TECHNE

Journal of Technology for Architecture and Environment

31 | 2026

RISCHI E AMBIENTE COSTRUITO: DALLA CONOSCENZA AL PROGETTO

risks and built environment: from knowledge to project

on line ISSN 2239-0243

FIRENZE UNIVERSITY PRESS

SITdA

TECHNE

Journal of Technology for Architecture and Environment

Issue 31
Year 16

Direttore/*Director*
Mario Losasso

Comitato Scientifico/*Scientific Committee*
Gabriella Caterina, Gianfranco Dioguardi, Paolo Felli, Luigi Ferrara, Cristina Forlani, Franz Graf, Helen Lochhead, Maria Teresa Lucarelli, Lorenzo Matteoli, Gabriella Peretti, Edo Ronchi, Fabrizio Schiaffonati, Paolo Tombesi, Maria Chiara Torricelli

Direttore Editoriale/*Editor in Chief*
Elena Mussinelli

Comitato Editorale/*Editorial Board Members*
Filippo Angelucci, Alessandra Battisti, Andrea Boeri, Valeria D'Ambrosio, Paola Gallo, Francesca Giglio, Antonella Violano

Assistenti Editoriali/*Assistant Editors*
Cristiana Cellucci, Antonello Monsù Scolaro, Katia Perini, Francesca Thiébat

Segreteria di Redazione/*Editorial Staff*
Francesca Anania, Nazly Atta, Giovanni Castaldo, Maria Fabrizia Clemente, Michele Conteduca, Serena Giorgi, Nicola Panzini, Federica Romagnoli, Sara Verde, Giulia Vignati

Progetto grafico/*Graphic Design*
Veronica Dal Buono

Progettazione grafica esecutiva/*Executive Graphic Design*
Giulia Pellegrini

Editorial Office
c/o SIT*d*A onlus,
Via Toledo 402, 80134 Napoli
Email: redazionetechne@sitda.net

Issues per year: 2

Publisher
FUP (Firenze University Press)
Phone: (0039) 055 2743051
Email: journals@fupress.com

Journal of SIT*d*A (Società Italiana della Tecnologia dell'Architettura)

© Author(s). This is an open access, peer-reviewed article published by Firenze University Press (https://www.fupress.com) and distributed, except where otherwise noted, under the terms of the CC BY 4.0 License for content and CC0 1.0 Universal for metadata.

REVISORI / *REFEREES*

Per le attività svolte nel 2024-2025 relative al Double-Blind Peer Review process, si ringraziano i seguenti Revisori:
As concern the Double-Blind Peer Review process done in 2024-2025, we would thanks the following Referees:

2024
Luigi Alini, Davide Allegri, Ermini Attaianese, Antonio Basti, Adolfo Baratta, Chiara Bedon, Mariangela Bellomo, Oscar Bellini, Anita Bianco, Roberto Bolici, Maddalena Buffoli, Marta Calzolari, Cristiana Cellucci, Andrea Ciaramella, Domenico Chizzoniti, Alessandra Cucurnia, Alberto De Capua, Federico De Matteis, Maria De Santis, Pasquale De Toro, Federica Dell'Acqua, Domenico D'Olimpio, Francesco Fabris, Antonella Falotico, Daniele Fanzini, Massimo Ferrari, Enrico Formato, Matteo Gambaro, Andrea Giachetta, Roberto Giordano, Francesca Giofrè, Elisabetta Ginelli, Valentina Gianfrate, Mattia Leone, Maria Teresa Lucarelli, Viktor Malakuczi, Adriano Magliocco, Rossella Maspoli, Antonello Monsù Scolaro, Consuelo Nava, Pietro Nunziante, Filippo Orsini, Spartaco Paris, Francesco Pastura, Gabriella Peretti, Riccardo Pollo, Gabriella Pultrone, Donatella Radogna, Ernesto Ramon Rispoli, Chiara Rizzi, Rosa Romano, Massimo Rossetti, Fabrizio Schiaffonati, Alessandro Sgobbo, Simone Secchi, Nicoletta Setola, Cesare Sposito, Silvia Tedesco, Enza Tersigni, Benedetta Terenzi, Maria Chiara Torricelli, Dario Trabucco, Gaia Turchetti, Teresa Villani, Ignazio Vinci, Rosa Maria Vitrano.

2025
Luigi Alini, Maria Beatrice Andreucci, Ernesto Antonini, Vitangelo Ardito, Paola Ascione, Adolfo Baratta, Antonio Basti, Chiara Bedon, Oscar Bellini, Mariangela Bellomo, Roberto Bolici, Laura Calcagnini, Andrea Campioli, Eliana Cangelli, Monica Cannaviello, Valeria Cecafosso, Giacomo Chiesa, Andrea Ciaramella, Angelo Ciribini, Alessandro Claudi De Saint Miheil, Roberta Cocci Grifoni, Luigi Cocchiarella, Anna Dalla Valle, Alberto De Capua, Federica Dell'acqua, Valentina Dessì, Daniele Fanzini, Maddalena Ferretti, Enrico Formato, Rossella Franchino, Matteo Gambaro, Andrea Giachetta, Ilaria Giannetti, Francesca Giofrè, Roberto Giordano, Anna Maria Giovenale, Monica Lavagna, Massimo Lauria, Mattia Federico Leone, Maria Teresa Lucarelli, Adriano Magliocco, Lucia Mastrolonardo, Martino Milardi, Consuelo Nava, Alessandra Oppio, Federica Ottone, Ingrid Paoletti, Donatella Radogna, Andrea Rebecchi, Marina Rigillo, Alessandro Rogora, Rosa Romano, Massimo Rossetti, Monica Rossi Schwarzenbeck, Sergio Russo-Ermolli, Antonello Sanna, Emanuele Sommariva, Valeria Tatano, Benedetta Terenzi, Enza Tersigni, Marina Tornatora, Antonella Trombadore, Corrado Trombetta, Renata Valente, Cristina Visconti, Salvatore Viscuso, Piergiorgio Vitillo.

SITdA
Società Italiana della Tecnologia dell'Architettura






RISCHI E AMBIENTE COSTRUITO: DALLA CONOSCENZA AL PROGETTO
RISKS AND BUILT ENVIRONMENT: FROM KNOWLEDGE TO PROJECT

INTRODUZIONE AL TEMA *INTRODUCTION TO THE ISSUE*

7 | Progetto, tecnologia e ambiente negli scenari multirischio
Design, technology and the environment in multi-risk scenarios
Mario Losasso

EDITORIALE *EDITORIAL*

10 | Per una cultura della precauzione
Towards a culture of precaution
Elena Mussinelli

DOSSIER a cura di/*edited by* Valeria D'Ambrosio and Katia Perini

15 | Analisi e gestione del rischio nell'ambiente costruito: conoscenza, strategie e progetto
Risk analysis and management in the built environment: knowledge, strategies, and design
Valeria D'Ambrosio, Katia Perini

22 | Modelli di pericolosità e rischio nelle attività di protezione civile: utilizzo e prospettive in Italia
Hazard and risk models in civil protection activities: use and perspectives in Italy
Daniela Di Bucci

29 | Il rischio legato al cambiamento climatico
Climate change risk
Filippo Giorgi

35 | Adattamento climatico e progettazione: dalla scienza all'azione attraverso ricerca avanzata e competenze diffuse
Climate adaptation and design: from science to action through advanced research and widely shared skills
Paola Mercogliano

40 | Rischi del surriscaldamento urbano: dalle evidenze all'intervento
Risks and urban overheating: from evidence to intervention
Konstantina Vasilakopoulou, Qinghua Lv, Matthaios Santamouris

RICERCA E FOTOGRAFIA a cura di/*edited by* Federica Visconti

50 | Riflessioni sugli effetti del cambiamento climatico nelle città e nei territori
Reflections on the effects of climate change on cities and territories
Federica Visconti

CONTRIBUTI *CONTRIBUTIONS*

SAGGI E PUNTI DI VISTA *ESSAYS AND VIEWPOINTS*

60 | Cambiamento climatico, incertezza e valutazione del rischio per le strategie di adattamento nel progetto di architettura
Climate change, uncertainty and risk assessment for adaptation strategies in architectural design
Giancarlo Paganin, Cinzia Talamo, Nazly Atta

74 | Spazio, rischio, rifugio. Progettare nella complessità del cambiamento climatico
Space, risk, shelter: Designing within the complexity of climate change
Ina Macaione, Enrica Gaia Consiglio

85 | Scenari di adattamento *design-based* ai rischi climatici nei paesaggi di bonifica del 20° secolo
Design-based adaptation scenarios to climate risks in 20th-century reclaimed landscapes
Alessandro Raffa

96 | "Green Nexus Hub": verso un paradigma progettuale per la gestione ecosistemica del rischio urbano
"Green Nexus Hub": towards a design paradigm for ecosystem-based urban risk management
Martina Corti, Diletta Struzziero, Stefano Follesa

104 | Rischi e opportunità nel patrimonio rurale: il caso dell'ambiente costruito di Yuanjia
Risks and opportunities in rural heritage: the case of Yuanjia village's built environment
Barbara Galli, Emilio Faroldi, Yupeng Wang

RICERCA E SPERIMENTAZIONE *RESEARCH AND EXPERIMENTATION*

115 | Strumenti digitali *knowledge-based* per un approccio proattivo alla gestione del rischio climatico nel progetto urbano
Digital knowledge-based tools for a proactive approach to climate-risk management in urban design
Martina Di Palma, Marina Rigillo

129 | *Local Climate Zones* per la conoscenza e il progetto *climate-risk oriented* degli insediamenti urbani
Local climate zones for knowledge and climate-risk-oriented design of urban settlements
Antonio Sferratore, Vittorio Miraglia

143 | Disastri e Vulnerabilità: un approccio dinamico multidimensionale
Disasters and Vulnerability: a multidimensional dynamic approach
Maddalena Coccagna, Elisabetta Schiavone, Stefano Zanut

151 | Un nuovo strumento per mappare il cambiamento climatico in architettura: metodo e prospettive
A new tool for mapping climate change in architecture: method and perspectives
Giacomo Chiesa

160 | Verso una metodologia per la Valutazione della vulnerabilità sistemica urbana
Towards a methodology for assessing urban systemic vulnerability
Cristina Visconti, Martina Bosone

172 | Azioni distribuite di adattamento alluvionale: un modello decisionale partecipativo multi-scala
Distributed flood adaptation actions across scales: a participatory decision-making framework
Francesca Vanelli, Paul Minifie, Monica Lavagna

182 | Un *framework* integrato multi-scalare per la valutazione dei rischi climatici per il patrimonio culturale
An integrated multi-scalar framework for assessing climate change risks to cultural heritage
Alessandra Battisti, Angelo Figliola, Adriano Ruggiero, Alberto Calenzo

195 | Strumenti innovativi per la resilienza urbana e la salute pubblica nelle aree interne
Innovative tools for urban resilience and public health in inner areas
Paola Gallo, Alessandra Donato, Elisa Caruso, Valeria Lingua

207 | Resilienza al rischio nei centri storici: un approccio *user-centred*
Risk resilience in historic urban environments: a user-centred approach
Enrico Quagliarini, Mariella De Fino, Elena Cantatore, Fabio Fatiguso, Gabriele Bernardini

220 | Spazi pubblici provvisori: prossimità, inclusività e adattabilità per una socialità post-sisma
Provisional public spaces: proximity, inclusiveness, and adaptability for post-earthquake sociality
Ludovica Gregori

231 | Mappatura del rischio da isole di calore urbane durante le ondate di calore mediante *clustering fuzzy* di dati satellitari
Assessing urban heat island risk during heatwaves with satellite data and fuzzy clustering techniques
Rosa Cafaro, Barbara Cardone, Ferdinando Di Martino

245 | Climate Shelters: una rete urbana per la resilienza climatica e i servizi di quartiere
Climate Shelters: an urban network for climate resilience and neighbourhood services
Giovanni Nocerino, Maria Teresa Girardi, Mattia Federico Leone

256 | Strumenti di supporto al progetto di sistemi agrivoltaici *risk* e *climate oriented*
Design support tools for climate and risk-oriented agrivoltaic systems
Federica Marandino

268 | Architettura, rischio e co-progettazione. Approcci *community-based* per la mitigazione del rischio in Lomellina
Architecture, risk, and co-design. Community-based approaches for risk mitigation in Lomellina
Francesco Airoldi, Francesca Vigotti, Emilia Corradi, Cassandra Cozza, Camillo Frattari, Stefano Sartorio

279 | Febbre di Lassa: una revisione di tre centri di trattamento in Nigeria
Lassa fever: A review of three treatment centres in Nigeria
Francesca De Filippi, Francesca Pagano, Michele Di Marco, Luca Fontana, Anna Silenzi

293 | Mappe integrate del rischio e architetture tecniche per contesti fragili. I borghi dauni
Integrated risk maps and technical architectures for fragile contexts. The Daunia villages
Nicoletta Faccitondo

303 | Ri-Costruire. Il principio di "esposizione intollerabile" nel Piano di Ricostruzione d'Ischia
Reconstruction: The principle of 'Intolerable Exposure' in the Ischia Reconstruction Plan
Alessandro Sgobbo

DIALOGO *DIALOGUE* a cura di/*edited* by Mario Losasso con Andrea Prota

311 | Dall'integrazione dei saperi alle ricadute sui territori: per una innovativa "cultura del rischio"
From the integration of knowledge to territorial impacts: towards an innovative "risk culture"
Mario Losasso, Andrea Prota

RECENSIONE CRITICA *CRITICAL REVIEW* a cura di/*edited* by Roberto Bologna

314 | Letture critiche su clima, crisi e società per la progettazione tecnologica e ambientale
Critical readings on climate, crisis, and society for technological and environmental design
Roberto Bologna, Maria Vittoria Arnetoli

PROGETTO, TECNOLOGIA E AMBIENTE NEGLI SCENARI MULTIRISCHIO

Mario Losasso, Presidente SITdA, https://orcid.org/0000-0003-3251-8747 losasso@unina.it
Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II, Italia

Abstract. I rischi naturali, antropici e ambientali si manifestano frequentemente con combinazioni interconnesse, abbinando le pericolosità dei fenomeni all'esposizione e alla vulnerabilità di componenti fisiche, sociali e immateriali. Oltre che per produrre nuove qualità finalizzate a superare fattori di criticità, la tecnologia oggi è in grado di esprimere la capacità di sviluppare gli opportuni cambiamenti per la sicurezza e la vivibilità urbana di fronte a scenari multirischio. Fra i rischi maggiormente percepiti come grave minaccia, il cambiamento climatico diviene oggetto di studio anche in campo sociopolitico e nella dimensione della sicurezza. Negli insediamenti urbani gli impatti del clima che cambia, al pari di altri rischi, derivano dalla interazione dei fenomeni climatici con i livelli di vulnerabilità ed esposizione e il loro contrasto va attuato abbassandone i livelli attraverso interventi di adattamento. A fronte di condizioni multirischio interagenti con i rischi dovuti al nuovo regime climatico, nel campo del progetto architettonico occorre sviluppare strategie combinate in cui i fattori di carattere rigenerativo possano informare nuovi assetti di città purtroppo sviluppate e gestite in epoche in cui i fattori di rischio non erano opportunamente considerati.

Parole chiave: Progettazione ambientale; Scenari multirischio; Adattamento climatico; Città rigenerative; Resilienza urbana.

Negli studi e nelle riflessioni di Ulrich Beck, la società planetaria rappresenta la società globale del rischio poiché «nella modernità la produzione sociale di ricchezza va di pari passo con la produzione sociale di rischi»[1]. In questo scenario le componenti di tipo economico, energetico, sanitario, alimentare e culturale – solo per citare i campi di esposizione più rilevanti – si accompagnano sempre più ai rischi globali. Il fattore moltiplicatore della condizione di proliferazione di rischi e minacce assume una dimensione sempre più ampia.

Le sfide riguardano infatti effetti combinati di categorie di rischio spesso impropriamente considerate fra loro distanti e che si scoprono, invece, interagenti. Rischi naturali, antropici e ambientali esprimono spesso combinazioni in *compound* o in *cascade*, abbinando le pericolosità dei fenomeni all'esposizione e alla vulnerabilità di componenti fisiche, sociali e immateriali. All'interno di tale scenario la tecnologia, nella sua dimensione più inclusiva e sostenibile, è da tempo individuata come potente strumento per prevenire e mitigare i rischi. La tecnologia sostenibile è chiamata in causa quale strumento per rafforzare la resilienza dei territori, delle città e delle comunità accanto alla salvaguardia della biodiversità attraverso il ripristino degli ecosistemi, anche urbani, che risultano danneggiati da molteplici impatti.

Fra i rischi maggiormente percepiti come grave minaccia, il cambiamento climatico è collocato in una posizione prioritaria e diviene oggetto di studio anche in campo sociopolitico e nella dimensione della sicurezza, caratterizzandosi come "threat multiplier", ovvero una variabile indipendente in grado di innescare o amplificare situazioni critiche e spesso latenti[2]. I fenomeni climatici pericolosi (tempeste di vento, piogge intense, allagamenti, alluvioni, ondate di calore, siccità) sono oggi più frequenti, intensi e di maggiore durata a causa dei mutamenti del clima generati dalle emissioni di gas climalteranti – prevalentemente CO_2 – dovute all'utilizzo dei combustibili fossili. Negli insediamenti urbani gli impatti del clima che cambia, al pari di altri rischi, derivano dalla interazione dei fenomeni climatici con vulnerabilità ed esposizione. Il contrasto degli impatti è condotto riducendo i livelli di vulnerabilità ed esposizione attraverso interventi di adattamento, che hanno l'obiettivo di prevenire gli effetti, mitigare i danni o sfruttare in chiave propositiva le possibili soluzioni innovative.

Gli interventi di adattamento nelle città – greening urbano, permeabilità dei suoli, sistemi di ombreggiamento, isolamento degli edifici, sistemi di climatizzazione efficienti, mobilità eco-

DESIGN, TECHNOLOGY AND THE ENVIRONMENT IN MULTI-RISK SCENARIOS

Abstract. Natural, human-induced, and environmental risks often manifest through interconnected combinations, linking the hazards of these phenomena to the exposure and vulnerability of physical, social, and intangible components. In addition to producing new qualities designed to overcome critical factors, technology today is capable of driving the necessary changes to ensure urban safety and liveability in the face of multi-risk scenarios. Among the risks most widely perceived as a serious threat, climate change has become a subject of study in the sociopolitical sphere and in the context of security. In urban settlements, the impacts of a changing climate, like other risks, result from the interaction of climatic phenomena with levels of vulnerability and exposure. Efforts to mitigate them must be implemented by reducing these levels through adaptation measures. In the face of multiple risks interacting with those caused by the new climate regime, architectural design must develop integrated strategies in which regenerative factors can inform new urban layouts – cities that were unfortunately developed and managed in ages when risk factors were not adequately considered.

Keywords: Environmental design; Multi-risk scenarios; Climate adaptation; Regenerative cities; Urban resilience.

In Ulrich Beck's studies and writings, planetary society is a global society of risk, since «in modernity, the social production of wealth goes hand in hand with the social production of risks»[1]. In this scenario, economic, energy, health, food, and cultural factors – to name only the most significant areas of vulnerability – are increasingly linked to global risks. The multiplier effect of the proliferation of risks and threats is taking on an ever-wider scope.

These challenges concern the combined effects of risk categories that are often mistakenly viewed as unrelated but are, in fact, found to interact with one another. Natural, anthropogenic, and environmental risks frequently manifest as compound or cascading combinations, linking the hazards of these phenomena to the exposure and vulnerability of physical, social, and intangible components. Within this scenario, technology – in its most inclusive and sustainable form – has long been recognised as a powerful tool for preventing and mitigating risks. Sustainable technology is called upon as a mean to strengthen the resilience of landscapes, cities, and communities, alongside the preservation of biodiversity through the restoration of ecosystems – including urban ones

ISSN online: 2239-0243 | © 2025 Author(s) | http://www.fupress.com/techne | DOI: 10.36253/techne-20465
Open access, peer-reviewed article published by Firenze University Press (https://www.fupress.com) and distributed, except where otherwise noted, under the terms of the CC BY 4.0 License for content and CC0 1.0 Universal for metadata

logica, ecc. – vanno realizzati alla scala locale in riferimento alle specificità dei contesti e del modo con cui si manifestano i fenomeni pericolosi. Al contrario, la necessità di ridurre le emissioni climalteranti assume una rilevanza globale attraverso la riduzione dell'uso di combustibili fossili e il raggiungimento del target europeo della climate neutrality entro il 2050.

I dati recentemente disponibili devono purtroppo mettere in guardia le comunità scientifiche. L'ultimo *Adaptation Gap Report* del 2025[3] riporta che, nel periodo 2000-2019, gli eventi estremi legati al clima hanno determinato un impatto planetario pari a 140 miliardi di dollari USA all'anno e che questa cifra aumenterà fino a un valore compreso tra 1,7 e 3,1 trilioni di dollari all'anno entro il 2050, in base ai diversi scenari climatici. In questo quadro, l'Italia è tra i paesi dell'area euromediterranea maggiormente interessati e particolarmente vulnerabile ai fenomeni del cambiamento climatico, tanto da rappresentare un'area "hotspot".

In base a dati dell'ISPRA, in Italia il 2024 è stato l'anno più caldo, caratterizzato da due nuovi record: +1,33 °C per la temperatura media e +1,40 °C per la temperatura minima, rispetto alla media di riferimento 1991-2020. Anche i dati sull'esposizione della popolazione al rischio alluvioni sono preoccupanti: si calcola che un italiano su cinque – oltre 12 milioni di persone – vive in aree potenzialmente allagabili. Osservando l'ultimo decennio, secondo il Rapporto dell'Osservatorio Città Clima 2025[4], tra il 2015 e il 2025 si sono verificati 811 eventi meteorologici estremi.

A fronte di condizioni multirischio interagenti con i rischi dovuti al nuovo regime climatico, nel campo del progetto architettonico occorre sviluppare strategie combinate in cui i fattori di carattere rigenerativo possano informare nuovi assetti di città purtroppo nate e gestite in epoche in cui i fattori di rischio non erano opportunamente considerati. La città rigenerativa è una città riorganizzata in modo da ridurre i flussi e i consumi di energia e materiali attraverso processi circolari orientati a una transizione ecologica e capaci di fornire risposte appropriate ai rischi prevalentemente di carattere ambientale e antropico (salute, cambiamento climatico, inquinamento, sicurezza, ecc.). Rispetto ai rischi naturali – difficilmente prevedibili ma potenzialmente controllabili in maniera efficace come i fenomeni sismici o di tipo idraulico o geologico – accanto a una appropriata organizzazione urbana ed edilizia la prevenzione e l'informazione possono rappresentare un decisivo valore aggiunto. Le tematiche del multirischio richiedono di essere comprese in chiave interconnessa e solo la diffusione di una cultura del rischio può contribuire a guardare la conoscenza e il progetto da un differente punto di vista. La città e il territorio possono essere interpretati a partire dal fattore rischio visto come uno dei punti di impostazione principali del piano e del progetto, da cui far derivare concept rispondenti a specifici obiettivi e requisiti e caratterizzati da elevati gradi di fattibilità. Per generare habitat evolutivi di coesistenza fra componenti naturali e antropiche, un valore aggiunto può essere determinato dal ripristino degli ecosistemi naturali e urbani. Il ripristino degli assetti naturali nei punti in cui tale componente è stata degradata, orienta la costituzione di habitat urbani basati sul rapporto tra naturale e artificiale e sul legame tra architettura e natura, permettendo di affrontare temi cruciali come il miglioramento della resilienza urbana per la mitigazione dei rischi e il miglioramento del benessere e della vivibilità urbana.

– that have been damaged by multiple impacts.

Among the risks most widely perceived as a serious threat, climate change ranks as a top priority. It is now being studied in the sociopolitical sphere and within the context of security, where it is characterised as a "threat multiplier" – an independent variable capable of either triggering or amplifying critical and often latent situations[2]. Hazardous weather events (windstorms, heavy rains, flash floods, floods, heat waves, drought) are now more frequent, intense, and longer lasting due to climate changes caused by emissions of greenhouse gases – mainly CO_2 – resulting from the use of fossil fuels. In urban settlements, the impacts of a changing climate, like other risks, stem from the interaction of climate phenomena with vulnerability and exposure. Mitigating these impacts involves reducing levels of vulnerability and exposure through adaptation measures, which aim to prevent adverse effects, mitigate damage, or proactively leverage potentially innovative solutions.

Adaptation measures in cities – such as urban greening, soil permeability, shading systems, building insulation, efficient air conditioning systems, and eco-friendly mobility – must be implemented at the local level, taking into account the specific characteristics of each context, and the ways in which hazardous phenomena manifest themselves. Conversely, the need to reduce climate-changing emissions takes on global significance through the reduction of fossil fuel use, and the achievement of the European climate neutrality target by 2050.

Unfortunately, recently available data should serve as a warning to the scientific community. The latest 2025 Adaptation Gap Report[3] states that, during the period 2000–2019, climate-related extreme events caused global impacts amounting to 140 billion U.S. dollars per year. This figure is expected to rise to between 1.7 and 3.1 trillion dollars per year by 2050, depending on various climate scenarios. In this context, Italy is among the countries in the Euro-Mediterranean region most affected by and particularly vulnerable to the effects of climate change, to the extent that it is a "hotspot" area.

According to data from ISPRA, 2024 was the hottest year on record in Italy, marked by two new records, precisely +1.33 °C for the average temperature and +1.40 °C for the minimum temperature, compared with the 1991-2020 reference average. Data on the population's exposure to flood risk also raise concerns. Indeed, it is estimated that one in five Italians – over 12 million people – live in areas at risk of flooding. Looking at the last decade, according to the 2025 City Climate Observatory Report[4], 811 extreme weather events occurred between 2015 and 2025.

Given the multi-risk conditions interacting with the risks posed by the new climate regime, the field of architectural design must develop combined strategies where regenerative factors can inform new urban layouts – cities that were unfortunately built and managed in eras when risk factors were not adequately considered. The regenerative city is a city reorganised to reduce the flows and consumption of energy and materials through circular processes geared towards an ecological transition, and capable of providing appropriate responses to risks that are predominantly environmental and anthropogenic in nature (health, cli-

NOTE

[1] Beck, U. (2024), *La società del rischio. Verso una seconda modernità*, Carocci, Roma.

[2] Casini, E. & Deiana, F. (2025), "I cambiamenti climatici come moltiplicatore di crisi e minacce alla sicurezza. Scenari presenti e futuri", in: Med-Or Italian Foundation (a cura di), *Cambiamenti climatici e sicurezza: una sfida globale*, Roma.

[3] United Nations Environment Programme (2025), *UNEP's 2025 Adaptation Gap Report: Running on Empty*. Available at: https://wedocs.unep.org/items/ededе398-7a94-47e7-acb8-82159ca6ce0c.

[4] Nanni, G., Minutolo, A., Ferraresi, D., (Eds) (2025), *Rapporto Città Clima. Speciale governance per l'adattamento al clima delle aree urbane*, Osservatorio Nazionale Città Clima. Available at: https://cittaclima.it/rapporto-citta-clima-2025-speciale-governance-e-aree-urbane/.

mate change, pollution, safety, etc.). Concerning natural risks – which are difficult to predict but potentially controllable in an effective manner, such as seismic, hydraulic or geological phenomena – prevention and information can represent a decisive added value, alongside appropriate urban planning and building practices.

Multi-risk issues need to be understood in an interconnected manner, and only the dissemination of a risk culture can help us view knowledge and design from a different perspective. The city and its surrounding area can be interpreted by starting with the risk factor, seen as one of the main parameters of the plan and the design, from which concepts characterised by high levels of feasibility can be derived to meet specific objectives and requirements. Added value can be derived from the restoration of natural and urban ecosystems to create evolving habitats where natural and human-made elements coexist. The restoration of natural features in areas where they have been degraded guides the creation of urban habitats based on the relationship between the natural and the artificial, and on the link between architecture and nature, enabling us to address crucial issues such as improving urban resilience for risk mitigation, and enhancing urban wellbeing and liveability.

NOTES

[1] Beck, U. (2024), *La società del rischio. Verso una seconda modernità*, Carocci, Roma.

[2] Casini, E. & Deiana, F. (2025), "I cambiamenti climatici come moltiplicatore di crisi e minacce alla sicurezza. Scenari presenti e futuri", in: Med-Or Italian Foundation (a cura di), *Cambiamenti climatici e sicurezza: una sfida globale*, Roma.

[3] United Nations Environment Programme (2025), *UNEP's 2025 Adaptation Gap Report: Running on Empty*. Available at: https://wedocs.unep.org/items/ededе398-7a94-47e7-acb8-82159ca6ce0c.

[4] Nanni, G., Minutolo, A., Ferraresi, D., (Eds) (2025), *Rapporto Città Clima. Speciale governance per l'adattamento al clima delle aree urbane*, Osservatorio Nazionale Città Clima. Available at: https://cittaclima.it/rapporto-citta-clima-2025-speciale-governance-e-aree-urbane/.

PER UNA CULTURA DELLA PRECAUZIONE

Elena Mussinelli, https://orcid.org/0000-0002-4521-522X elena.mussinelli@polimi.it
Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito, Politecnico di Milano, Italia

Mentre sto scrivendo questo articolo, giornali e social media commentano i fatti di Crans-Montana, i cui esiti tragici evidenziano, al di là di quanto emergerà gli accertamenti in corso, quanto la consapevolezza e la percezione del rischio siano ancora oggi drammaticamente inadeguate, soprattutto sotto il profilo della prevenzione e della precauzione.
Una condizione che ci riguarda tutti (quali proprietari, gestori, addetti, tecnici e responsabili di enti pubblici e privati, o semplici fruitori) e che connota non solo gli edifici e la loro sicurezza, ma anche le città e i territori, in particolare in Italia, per fragilità che si configurano ormai come una vera emergenza strutturale. Soprattutto perché i comportamenti che determinano il danno antropico (in primis, nel caso dell'ambiente, il consumo e l'impermeabilizzazione del suolo, e l'inquinamento) agiscono da moltiplicatore esponenziale del rischio naturale preesistente. Il principio di precauzione dovrebbe quindi rappresentare un argine imprescindibile per interrompere questo circolo vizioso, inibendo trasformazioni irreversibili anche in assenza di certezze scientifiche assolute. In mancanza di questa cautela ex-ante, come *forma mentis* ben oltre la sola prevenzione e la cogenza giuridica del termine, l'azione antropica trasforma inevitabilmente l'alea naturale nella certezza di un disastro, che è poi spesso al tempo stesso ambientale, economico e sociale.
Mentre la prevenzione è ormai normata e integrata in diverse procedure autorizzative (salute e sicurezza sul lavoro, antincendio e sismica, ecc., Valutazione Ambientale Strategica-VAS di piani e programmi, Valutazione di Impatto Ambientale-VIA applicata a progetti e opere, norme tecniche sull'efficienza energetica degli edifici, norme sui limiti alle emissioni inquinanti, ecc.), decisamente più rare se non sporadiche sono le scelte improntate alla precauzione[1], ovvero all'adozione di comportamenti prudenti, cauti, sensibili e attenti al fine di evitare pericoli e di limitare il rischio di danni imminenti o possibili per l'uomo e per l'ambiente[2].
Peraltro, anche nel campo della prevenzione non mancano le criticità, con procedure spesso percepite più come ostacoli burocratici da superare grazie attraverso una "conformità formale" (Fidanza, Maiello, 2021). piuttosto che come strumenti a supporto del processo decisionale di progetto: misure di prevenzione e protezione ineffettuali perché non supportate da adeguati interventi di formazione e informazione; procedure di VIA utili a giustificare ex-post decisioni già prese, che raramente confrontano soluzioni alternative (inclusa l'opzione "zero"); rapporti di VAS formalizzati sulla carta che non incidono realmente sulle scelte di piano... Con una crescita ipertrofica di norme, prescrizioni, indicatori per la valutazione e la verifica, ecc., che non trovano poi riscontro nelle necessarie attività di vigilanza e monitoraggio ex post (ad esempio, ca. il 30-40% delle prescrizioni in materia ambientale non risponde ai criteri S.M.A.R.T. – *Specific, Measurable, Achievable, Relevant, Timebound* –, rendendo impossibile effettuare controlli sanzionabili; fonte SNPA, 2022).
L'impatto economico dell'eccessiva pressione antropica e di incaute dinamiche urbanizzative in aree a rischio, ma non solo, è un dato ben noto: la perdita di servizi ecosistemici (capacità del suolo di filtrare acqua, produrre cibo, regolare il clima e stoccare carbonio) indotta dal consumo di suolo costa all'Italia circa 400-500 milioni di euro ogni anno solo per i nuovi consumi, ma se si considera il valore complessivo del capitale naturale perso negli ultimi anni, ISPRA stima una cifra compresa tra 19 e 25

TOWARDS A CULTURE OF PRECAUTION

While I am writing this paper, newspapers and social media are reporting on the events in Crans-Montana, whose tragic outcome highlights – regardless of what will emerge from the ongoing investigations – how dramatically inadequate awareness and perception of risk still are today, particularly with regard to prevention and precaution.
This is a condition that concerns us all (as owners, managers, operators, technicians, and officials of public and private bodies, or simply as users), and it characterises not only buildings and their safety, but also cities and territories, especially in Italy, where vulnerabilities now amount to a true structural emergency. This is all the more serious because behaviours that generate anthropogenic damage (first and foremost, in environmental terms, land consumption and soil sealing, and pollution) become an exponential multiplier of previously existing natural risk. The precautionary principle should, therefore, represent an indispensable barrier to interrupt this vicious circle, preventing irreversible transformations even in the absence of absolute scientific certainty. Without such ex-ante caution, as a mindset going well beyond prevention and the legal enforceability of the term, human action inevitably transforms natural hazard into the certainty of disaster, often simultaneously environmental, economic, and social.
While prevention is now regulated and integrated into various authorisation procedures (occupational health and safety, fire and seismic safety, Strategic Environmental Assessment–SEA of plans and programmes, Environmental Impact Assessment–EIA applied to projects and works, technical standards on building energy efficiency, regulations on pollutant emission limits, etc.), choices inspired by precaution[1] are decidedly rarer and sporadic. They include the adoption of prudent, cautious, sensitive, and attentive behavioural patterns aimed at avoiding danger, and at limiting the risk of either imminent or potential harm to people and the environment[2].
Moreover, even in the field of prevention, critical issues persist with procedures often perceived more as bureaucratic obstacles to be overcome through "formal compliance" (Fidanza, Maiello, 2021) than as tools supporting project decision-making processes. Prevention and protection measures are ineffective when they are not underpinned by adequate training and information actions. EIA procedures are used to justify ex post decisions that have already been taken, and which rarely compare alternative

ISSN online: 2239-0243 | © 2025 Author(s) | http://www.fupress.com/techne | DOI: 10.36253/techne-20466
Open access, peer-reviewed article published by Firenze University Press (https://www.fupress.com) and distributed, except where otherwise noted, under the terms of the CC BY 4.0 License for content and CC0 1.0 Universal for metadata

miliardi di euro (ISPRA 2025)[3]. Il CNR e ISPRA evidenziano inoltre che l'Italia spende circa 7-10 volte di più per riparare i danni (interventi di emergenza e ricostruzione) rispetto a quanto investe in prevenzione (Repertorio Nazionale degli Interventi per la Difesa del Suolo-ReNDiS, 2023).

E questo in un Paese dove quasi il 60 % del patrimonio edilizio è stato costruito prima del 1970, quindi ante normativa sismica ed energetica (ISTAT, Censimento permanente, 2021; ENEA, 2023), dove il 94% dei Comuni presenta aree a rischio frane e/o alluvioni (ISPRA, 2021) e dove quasi il 40% della popolazione risiede in Zone 1 e 2, ad alta e media sismicità (ISPRA, 2022). E dove il suolo consumato in aree a rischio alluvione subisce ancora un incremento annuo del 9,5% (SNPA, 2025).

L'inadeguata prevenzione, interventi incauti e persino l'assenza di intervento (per la sorveglianza, la cura, il ripristino, ecc.) finiscono così per agire come moltiplicatore dei rischi preesistenti: edificazioni in contesti vulnerabili (aree morfologicamente instabili, aree golenali, ecc.), tombamento di corsi d'acqua e cementificazione degli argini, scarsa manutenzione dei versanti, impermeabilizzazione del suolo, uso di materiali ad alta inerzia termica e basso albero (asfalto, cemento), emissioni inquinanti, ecc., concorrono direttamente e indirettamente al deterioramento dell'ambiente e alla perdita di biodiversità, determinando ogni anno un incremento delle patologie croniche, quando non la perdita di vite umane, oltre a danni materiali a edifici e infrastrutture.

Notevole è la sproporzione negli investimenti: a fronte di un fabbisogno preventivo di circa 26 miliardi di euro, la spesa storica si è concentrata sulla gestione dell'emergenza (ISPRA, 2021), con un rapporto costi-benefici tra prevenzione e riparazione stimato in 1:7, a indicare che ogni euro non speso in prevenzione ne genera sette di danni (CNR-IRPI). La gestione del rischio continua così a essere di tipo reattivo, a valle di eventi catastrofici quali sismi e alluvioni; nel solo 2024 il Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (SNPA), che svolge attività nel campo della gestione degli aspetti ambientali legati alle situazioni di emergenza, ha registrato «2037 attivazioni, di cui 1723 riconducibili a situazioni emergenziali che hanno richiesto un intervento operativo sul campo» (SNPA, 2025).

Anche il PNRR, nonostante stanziamenti senza precedenti, sembra aver agito più come un acceleratore finanziario di progetti già esistenti che nella direzione di una sostanziale riforma del modello reattivo italiano. Come dimostra ad esempio il definanziamento di interventi per 1,287 miliardi di euro originariamente destinati alla "Gestione del rischio di alluvione e per la riduzione del rischio idrogeologico" (Investimento 2.1b) documentato dal Servizio Studi Camera e Senato nel Dossier sulla conversione in legge del DL 19/2024 (marzo 2024) a valle della revisione del PNRR approvata dalla Commissione UE a fine 2023. Il PNRR avrebbe inoltre dovuto finanziare una "nuova" sicurezza, basata su dati satellitari e scenari climatici aggiornati (precauzione) ma, come segnala la Corte dei Conti nella sua Relazione semestrale sullo stato di attuazione del PNRR (Delibera n. 1/2024), gran parte dei fondi per il rischio idrogeologico (circa il 65% della M2C4) ha sostenuto progetti definiti dal "Piano Proteggi Italia" del 2019 o finanziati dai fondi CIPE del 2015 e mai attuati.

Nonostante se ne parli da decenni, in Italia non è ancora previsto un "fascicolo del fabbricato" obbligatorio a livello nazionale, sul modello ad esempio dell'*Individueller Sanierungsfahrplan*

solutions (including the "zero option"). SEA reports are formalised on paper without actually influencing planning-related decisions. These factors are combined with a hypertrophic growth of regulations, prescriptions, evaluation and verification indicators, etc., which are not matched by the necessary ex post surveillance and monitoring activities (for example, approximately 30-40% of environmental prescriptions do not meet S.M.A.R.T. criteria – *Specific, Measurable, Achievable, Relevant, Time-bound* – making enforceable controls impossible; source SNPA, 2022).

The economic impact of excessive anthropogenic pressure and incautious urbanisation dynamics in risk-prone areas, but not only there, is well known. Indeed, the loss of ecosystem services (the soil's capacity to filter water, produce food, regulate climate, and store carbon) induced by land take costs Italy about 400-500 million euros every year just for new consumption, but if one considers the overall value of natural capital lost in recent years, ISPRA estimates a figure between 19 and 25 billion euros (ISPRA, 2025)[3]. CNR and ISPRA also highlight that Italy spends about 7-10 times more on repairing damage (emergency interventions and reconstruction) than on prevention (ReNDiS, 2023).

This is the case in a Country where almost 60% of the building stock was constructed before 1970, therefore prior to seismic and energy regulations (ISTAT, 2021; ENEA, 2023), where 94% of municipalities have areas at risk of landslides and/or floods (ISPRA, 2021), and where almost 40% of the population lives in Zones 1 and 2, with high and medium seismicity (ISPRA, 2022). It is a country where land consumption in flood-risk areas is still increasing annually by 9.5% (SNPA, 2025).

Inadequate prevention, incautious interventions, and even the lack of interventions (in terms of surveillance, maintenance, restoration, etc.) thus end up acting as multipliers of previously existing risks. Construction in vulnerable contexts (morphologically unstable areas, floodplains, etc.), culverting of watercourses and concrete embankments, poor slope maintenance, soil sealing, use of materials with high thermal inertia and low albedo (asphalt, concrete), pollutant emissions, etc., directly and indirectly contribute to environmental degradation and biodiversity loss, causing a yearly increase in chronic diseases, when not the loss of human lives, as well as material damage to buildings and infrastructure.

Investment disproportions are striking. Indeed, against a preventive need estimated at around 26 billion euros, historical expenditure has focused on emergency management (ISPRA, 2021), with a cost–benefit ratio between prevention and repair estimated at 1:7, indicating that every euro not spent on prevention generates seven euros in damage (CNR-IRPI). Risk management thus continues to be reactive, downstream of catastrophic events such as earthquakes and floods. In 2024 alone, the National System for Environmental Protection (SNPA) recorded «2,037 activations, of which 1,723 were attributable to emergency situations requiring on-site operational intervention» (SNPA, 2025).

Despite unprecedented funding, even the PNRR seems to have acted more as a financial accelerator of already existing projects than towards a substantial

(ISFP) tedesco, una sorta di passaporto digitale che pianifica gli interventi di *deep renovation* necessari nell'arco dei successivi 15 anni disciplinato dal Ministero federale dell'economia e della protezione del clima (BMWK) attraverso una apposita direttiva per gli edifici residenziali. O del *Digital Building Logbooks* dei Paesi nordici (Buildings Performance Institute Europe, 2022). E nemmeno esiste un modello assicurativo del tipo di quello francese, con compagnie che impongono controlli tecnici preventivi sui cantieri che concorrono a ridurre significativamente i difetti occulti e l'uso di materiali non certificati (l'*Assurance Décennale* prevista dal *Code des Assurances*, art. L241-1 e dal Codice Civile francese, art. 1792).

Emerge così uno scenario nazionale notevolmente critico, non a caso evidenziato nella call per questo numero di TECHNE laddove si sottolinea come sia necessaria «un'inversione di tendenza rispetto alle prassi di pianificazione, progettazione e organizzazione di tipo convenzionale e/o settoriale, partendo da una visione critica degli assetti attuali e da un netto cambiamento di prospettiva».

I contributi qui raccolti guardano in questa direzione, fornendo riflessioni critiche e apporti di ricerca ad ampio spettro che, nel loro insieme, consentono di prospettare un significativo avanzamento delle modalità con le quali è oggi possibile costruire sistemi di conoscenza *site specific* di supporto alla decisione, per un processo progettuale integrato e *climate/environmental-risk oriented*, con approcci operativi multidimensionali per la gestione ecosistemica del rischio (*risk resilience*) e la prospettazione di adeguati scenari di adattamento, attraverso protocolli valutativi del rischio e strumenti informativi digitali, anche con approcci decisionali partecipati e di *co-design*.

Un elemento chiave che emerge da tali contributi è costituito dallo sforzo di integrare informazioni e dati climatico-ambientali, edilizi, urbanistici e socioeconomici entro un quadro diagnostico unitario, declinato poi in puntuali approfondimenti tematici riferiti a contesti tematici notevoli, quali il patrimonio culturale, i sistemi ambientalali e i paesaggi fragili (territori costieri di bonifica, luoghi identitari a rischio di *overturism*, centri e borghi storici, aree interne idrogeologicamente vulnerabili, situazioni post-emergenza, ecc.).

Esplorando quindi in chiave progettuale come sia possibile rispondere alle molteplici dimensioni della vulnerabilità (ambientale, climatica, sociale, economica, istituzionale, ecc.) combinando strategie di mitigazione e di adattamento a condizioni strutturali e spesso permanenti di multirischio[4], anche valutando quindi la probabilità che più eventi pericolosi insistano sulla stessa area geografica in un arco temporale ravvicinato o simultaneo.

Per superare una concezione emergenziale del rischio e diffondere in modo pervasivo la cultura della precauzione e della sicurezza nella progettazione, a partire dalle scuole di Architettura dove, viceversa, il tema del rischio è trattato molto marginalmente, in genere solo per gli aspetti edilizi della statica e della sismica. Formando così giovani progettisti spesso del tutto inconsapevoli delle conseguenze del loro agire e delle responsabilità che esso implica.

NOTE

[1] Document 12016E191 (2016), Versione consolidata del trattato sul funzionamento dell'Unione europea, Parte Terza - Politiche e Azioni Interne

reform of the Italian reactive model. This is demonstrated, for example, by the de-financing of interventions worth 1.287 billion euros originally allocated to "Flood risk management and hydrogeological risk reduction" (Investment 2.1b), documented by the Parliamentary Research Services in the Dossier on the conversion into law of Decree Law 19/2024 (March 2024), following the revision of the PNRR approved by the European Commission at the end of 2023. The PNRR was also supposed to finance a "new" security paradigm based on satellite data and updated climate scenarios (precaution) but, as reported by the Court of Auditors in its Semi-annual Report on the state of implementation of the PNRR (Resolution no. 1/2024), a large part of the funds for hydrogeological risk (about 65% of M2C4) supported projects defined by the "Piano Proteggi Italia" of 2019, or financed by CIPE funds of 2015, and never implemented.

Although discussed for decades, Italy still does not provide for a mandatory national "building logbook", on the model, for example, of the German *Individueller Sanierungsfahrplan* (ISFP), a sort of digital passport planning deep renovation measures over the following 15 years, regulated by the Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK) through a specific directive for residential buildings. Another such example can be found in the *Digital Building Logbooks* of Nordic countries (Buildings Performance Institute Europe, 2022). Moreover, there is no insurance model like the French one, where companies impose preventive technical inspections on construction sites, significantly reducing hidden defects and the use of uncertified materials (the *Assurance Décennale* forecasted by the *Code des Assurances*, art. L241-1 and by the French Civil Code, art. 1792).

A markedly critical national scenario thus emerges, not coincidentally highlighted in the call for this issue of TECHNE, which stresses the need for «a reversal of current conventional and/or sectoral planning, design and organisational practices, starting from a critical vision of existing arrangements and a clear change of perspective».

The papers collected here move in this direction, offering critical reflections and broad-ranging research inputs. Considered together, they create the premises to envisage significant progress in how site-specific knowledge systems can now be built to support decision-making, and to promote an integrated and climate/environmental-risk-oriented design process with multidimensional operational approaches to ecosystem-based risk management (risk resilience). They could also underpin the definition of appropriate adaptation scenarios through risk assessment protocols and digital information tools, also including participatory decision-making and co-design approaches.

A key element emerging from these papers is the effort to integrate climatic-environmental, building, urban, and socio-economic information and data into a unified diagnostic framework, then articulated into targeted thematic investigations referring to significant contexts, such as cultural heritage, environmental systems, and fragile landscapes (reclaimed coastal territories, identity places at risk of overtourism, historic centres and villages, hydrogeologically vulnerable inner areas, post-emergency situations, etc.).

dell'unione, Titolo XX - Ambiente, Articolo 191 (ex articolo 174 del TCE), che recita in proposito:
«1. La politica dell'Unione in materia ambientale contribuisce a perseguire i seguenti obiettivi:
- salvaguardia, tutela e miglioramento della qualità dell'ambiente,
- protezione della salute umana,
- utilizzazione accorta e razionale delle risorse naturali,
- promozione sul piano internazionale di misure destinate a risolvere i problemi dell'ambiente a livello regionale o mondiale e, in particolare, a combattere i cambiamenti climatici.
2. La gestione del rischio nell'ambiente costruito si fonda sulla distinzione epistemologica e giuridica tra due concetti derivati dall'Art. 191 del Trattato sul Funzionamento dell'Unione Europea (TFUE): il principio di prevenzione si applica a rischi certi e scientificamente provati, con azioni volte a impedire il verificarsi di un danno noto, mentre il principio di precauzione si applica in condizioni di incertezza scientifica, dove il rischio è potenziale ma non quantificabile, con azioni che mirano a evitare danni irreversibili in attesa di evidenze. La relazione tra intervento e rischio è descritta dalla formula canonica del rischio: R=H×V×E, dove H è la pericolosità (Hazard), V la vulnerabilità ed E l'esposizione. La prevenzione agisce per ridurre V ed E su basi deterministiche, mentre la Precauzione agisce per minimizzare E quando H non è completamente noto».

[2] La politica dell'Unione in materia ambientale mira a un elevato livello di tutela, tenendo conto della diversità delle situazioni nelle varie regioni dell'Unione. Essa è fondata sui principi della precauzione e dell'azione preventiva, sul principio della correzione, in via prioritaria alla fonte, dei danni causati all'ambiente, nonché sul principio "chi inquina paga" (http://data.europa.eu/eli/treaty/tfeu_2016/art_191/oj).

[3] Il rapporto quantifica la perdita di "stock di capitale naturale" con un calcolo economico che si basa sulla metodologia dei Service Replacement Costs (costi di sostituzione dei servizi), stimando che la perdita di funzioni ecosistemiche (es. stoccaggio di carbonio, protezione dall'erosione) costi tra i 66.000 e gli 81.000 euro per ogni ettaro di suolo urbanizzato all'anno.

[4] Il concetto di multirischio non corrisponde unicamente al rilevamento della presenza di molteplici tipologie di pericolo (dai rischi più indagati, quali il rischio incendio e impiantistico, i rischi per la salute indoor e outdoor correlati all'infortunistica e all'inquinamento atmosferico, acustico e del suolo, e i rischi connessi alla presenza di industrie e infrastrutture "a rischio rilevante", attraverso i rischi ambientali – geomorfologico, idraulico e idrogeologico, sismico, vulcanico, desertificazione e perdita di fertilità del suolo – e climatici – isole e ondate di calore, allagamenti e inondazioni, ecc. –, sino ai rischi i cui effetti abbiamo avuto modo di sperimentare più volte negli ultimi anni – quali il rischio epidemiologico,, quello connesso alla insicurezza urbana, i rischi cibernetici, e quelli geopolitici, legati ad atti terroristici e bellici), ma mira a indagare specificatamente gli effetti moltiplicatori del danno derivanti dalla interazione tra diversi eventi avversi, naturali e/o antropici, indipendenti o tra loro correlati.

REFERENCES

Commissione Europea (20024), *Direttiva 2004/35/CE sulla responsabilità ambientale in materia di prevenzione e riparazione del danno ambientale*.

Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) (2020). *Rapporto sulle criticità ambientali e il principio di precauzione nel D.Lgs 152/2006*, ISPRA Rapporti 329/2020, ISBN: 978-88-448-1028-3.

Fidanza, A., Maiello, A. (2021), *The effectiveness of Environmental Impact Assessment in Italy: A practitioner's perspective on procedural and substantive dimensions*, in: "Land Use Policy", vol. 101.

Istituto Nazionale di Statistica (ISTAT) (2022), *Censimento permanente della popolazione e delle abitazioni: primi risultati*, Roma.

Buildings Performance Institute Europe (2022), *Building Logbooks. A user-centric initiative*.

Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) (2022), *Il rischio sismico. Popolazione esposta*, in: Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio. Rapporto n. 356/2021, gennaio 2022 (con dati consolidati al 2021).

Hence they explore, from a design perspective, possible responses to the multiple dimensions of vulnerability (environmental, climatic, social, economic, institutional, etc.) by combining mitigation and adaptation strategies to structural and often permanent multi-risk conditions[4], also assessing the probability that multiple hazardous events may affect the same geographical area in a short time span or simultaneously.
To overcome an emergency-driven conception of risk, and to pervasively disseminate a culture of precaution and safety in design, starting from Schools of Architecture where, conversely, the topic of risk is addressed only marginally, generally limited to building statics and seismic aspects, training should be provided for young designers who are often entirely unaware of the consequences of their actions and the responsibilities they entail.

NOTES

[1] Document 12016E191 (2016), Consolidated version of the Treaty on the Functioning of the European Union, Part Three – Union Policies and Internal Actions, Title XX – Environment, Article 191 (ex Article 174 TEC), which states:
«1. Union policy on the environment shall contribute to pursuit of the following objectives:
– preserving, protecting and improving the quality of the environment,
– protecting human health,
– prudent and rational utilisation of natural resources,
– promoting measures at international level to deal with regional or worldwide environmental problems, and in particular combating climate change.
2. Risk management in the built environment is based on the epistemological and legal distinction between two concepts derived from Article 191 of the Treaty on the Functioning of the European Union (TFEU). The principle of prevention applies to certain and scientifically proven risks through actions aimed at preventing the occurrence of known damage. The precautionary principle, instead, applies under conditions of scientific uncertainty, where risk is potential but not quantifiable, through actions aimed at avoiding irreversible damage pending further evidence. The relationship between intervention and risk is described by the canonical risk formula: R = H × V × E, where H is hazard, V vulnerability, and E exposure. Prevention acts to reduce V and E on a deterministic basis, whereas precaution acts to minimise E when H is not fully known».

[2] EU policy on the environment shall aim at a high level of protection, taking into account the diversity of situations in the various regions of the Union. It shall be based on the precautionary principle, and on the principles that preventive action should be taken, that environmental damage should as a priority be rectified at source, and that the polluter should pay (http://data.europa.eu/eli/treaty/tfeu_2016/art_191/oj).
[3] The report quantifies the loss of "natural capital stock" through an economic calculation based on the Service Replacement Cost methodology, estimating that the loss of ecosystem functions (e.g., carbon storage, erosion protection) entails costs ranging between €66,000 and €81,000 per hectare of urbanised land per year.
[4] The concept of multi-risk does not merely correspond to identifying the

Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (SNPA) (2022), *Rapporto sull'attuazione del monitoraggio ambientale nelle procedure di VIA in Italia – Analisi dello stato dell'arte e criteri metodologici*, Rapporto n. 32/2022 (con aggiornamenti metodologici pubblicati a fine 2023), 24 giugno 2022.

Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica (IRPI) (2023). *Rapporto periodico sul rischio posto alle popolazioni da frane e inondazioni in Italia*. Available at: https://www.rendis.isprambiente.it/.

Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA) (2023), *Rapporto Annuale sull'Efficienza Energetica* 2023, Roma.

Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) (2024), *Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici*, edizione 2024, in: "Report Stato dell'Ambiente n. 110/24", ISBN 978-88-448-1224-9.

Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) (2025), *Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio*, edizione 2024, Rapporto 415/2025, ISBN: 978-88-448-1273-7.

Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (SNPA) (2025), *Rapporto attivazioni SNPA Emergenza (dati 2024)*, Report Ambientali SNPA n. 47/2025, ISBN: 978-88-448-1284-3.

presence of multiple types of hazards (ranging from the most extensively studied risks, such as fire and plant-related risks, indoor and outdoor health risks related to accidents and to air, noise, and soil pollution, and risks associated with the presence of "major-accident hazard" industries and infrastructures; to environmental risks – geomorphological, hydraulic and hydrogeological, seismic, volcanic, desertification and loss of soil fertility – and climatic risks—heat islands and heatwaves, waterlogging and floods, etc.; and finally, to risks whose effects we have repeatedly experienced in recent years, such as epidemiological risk, risks linked to urban insecurity, cyber risks, and geopolitical risks related to terrorist acts and warfare). Instead, it specifically aims to investigate the damage multiplier effects arising from the interaction among different adverse events, natural and/or anthropogenic, independent or interrelated.

ANALISI E GESTIONE DEL RISCHIO NELL'AMBIENTE COSTRUITO: CONOSCENZA, STRATEGIE E PROGETTO

Valeria D'Ambrosio[1], https://orcid.org/0000-0002-0201-0590 valeria.dambrosio@unina.it
Katia Perini[2], https://orcid.org/0000-0003-0415-8246 katia.perini@unige.it
[1] Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II, Italia
[2] Dipartimento architettura e design, Università di Genova, Italia

Abstract. I rischi ambientali e climatici rappresentano una sfida crescente per l'ambiente costruito, con effetti rilevanti su città, infrastrutture e territori. L'aumento della frequenza e dell'intensità degli eventi estremi, insieme alla pressione antropica sugli ecosistemi, amplifica vulnerabilità sociali, economiche e ambientali. Il contributo analizza il ruolo della conoscenza e della prevenzione nella gestione dei rischi, evidenziando la necessità di integrare dati osservativi, modelli di rischio e scenari strategici nei processi decisionali orientati alla pianificazione e alla progettazione. Attraverso una prospettiva multirischio, il lavoro sottolinea l'importanza di strategie integrate di adattamento e mitigazione per la rigenerazione e la resilienza urbana. L'adozione di approcci interdisciplinari, strumenti di supporto alle decisioni e processi partecipativi consente di trasformare la conoscenza scientifica in azioni preventive efficaci, contribuendo alla costruzione di sistemi urbani più resilienti e sostenibili.

Parole chiave: Multirischio; Ambiente costruito; Vulnerabilità urbana; Mitigazione; Adattamento.

Introduzione

I rischi che interessano l'ambiente costruito assumono oggi un ruolo centrale nelle discipline che si occupano di città, infrastrutture e territorio. In particolare, i rischi di natura ambientale dominano le prospettive di medio e lungo periodo: eventi meteorologici estremi, perdita di biodiversità, collasso degli ecosistemi, alterazioni critiche dei sistemi terrestri e scarsità di risorse naturali rappresentano alcune delle principali minacce per le società contemporanee, come evidenziato dal *Global Risk Report 2024* (Global Economic Forum, 2024*)*. L'intensificazione di tali fenomeni produce effetti trasversali in diversi settori – economico, sanitario e ambientale – accentuando al contempo disuguaglianze preesistenti e colpendo in modo più marcato territori e gruppi sociali vulnerabili.

L'aumento della pressione antropica sull'ambiente è strettamente connesso sia alla crescita della popolazione mondiale sia all'incremento della sua concentrazione nelle aree urbane (United Nations, DESA Population Division, 2018). A questo si aggiungono modelli produttivi fondati su uno sfruttamento intensivo delle risorse naturali e dinamiche di consumo non sostenibili, che contribuiscono ad amplificare la vulnerabilità degli ecosistemi e delle comunità (Aznarez *et al*., 2024; Metzger *et al*., 2006; Seto *et al*., 2012, 2010).

Tra le manifestazioni più evidenti degli esiti della pressione antropica sull'ambiente vi sono gli eventi atmosferici intensi legatoi al cambiamento climatico, che comprendono precipitazioni estreme, ondate di calore, siccità prolungate, venti forti e alluvioni improvvise (Kim and Brown, 2021; Mastrantonas *et al*., 2021; Mosca *et al*., 2023; Nie *et al*., 2024). Tali fenomeni incidono direttamente sul benessere delle persone e sulla stabilità dei sistemi urbani, generando condizioni di rischio per la sicurezza e la qualità della vita (Cacciatore *et al*., 2025). In questo scenario, diventa necessario affrontare tali problematiche a diverse scale – da quella territoriale e urbana fino a quella edilizia – attraverso approcci progettuali e di ricerca capaci di integrare previsione, prevenzione e gestione del rischio, promuovendo al contempo una maggiore consapevolezza delle dinamiche ambientali in atto.

In tale prospettiva, il tema della conoscenza del rischio e quello delle strategie integrate di adattamento e mitigazione assumono un ruolo centrale per orientare le trasformazioni dell'ambiente costruito e rafforzare la resilienza dei sistemi urbani.

RISK ANALYSIS AND MANAGEMENT IN THE BUILT ENVIRONMENT: KNOWLEDGE, STRATEGIES, AND DESIGN

Abstract. Environmental and climate-related risks present a growing challenge for the built environment, with significant impacts on cities, infrastructures and territories. The increasing frequency and intensity of extreme events, together with anthropogenic pressure on ecosystems, amplify social, economic and environmental vulnerabilities. The paper analyses the role of knowledge and prevention in risk management, highlighting the need to integrate observational data, risk models, and strategic scenarios into decision-making processes oriented toward planning and design. Through a multi-risk perspective, the study emphasises the importance of integrated adaptation and mitigation strategies for urban regeneration and resilience. The adoption of interdisciplinary approaches, decision support tools, and participatory processes enables the transformation of scientific knowledge into effective preventive actions, contributing to the development of more resilient and sustainable urban systems.

Keywords: Multi-risk; Built environment; Urban vulnerability; Climate adaptation.

Introduction

Risks affecting the built environment have become a central concern across disciplines dealing with cities, infrastructures, and territorial systems. In particular, environmental risks dominate both medium and long-term perspectives. Extreme weather events, biodiversity loss, ecosystem collapse, critical alterations of Earth systems, and the scarcity of natural resources are some of the main threats to contemporary societies, as highlighted in the Global Risks Report 2024 (World Economic Forum, 2024). The intensification of these phenomena produces cross-sectoral impacts – economic, health-related, and environmental – while also exacerbating existing inequalities and disproportionately affecting vulnerable territories and social groups.

The growing anthropogenic pressure on the environment is closely linked both to global population growth and to its increasing concentration in urban areas (United Nations, DESA Population Division, 2018). This trend is further reinforced by production models based on the intensive exploitation of natural resources, and by unsustainable consumption patterns, which contribute to increasing the vulnerability of ecosystems and communities (Aznarez *et al*., 2024; Metzger *et al*., 2006; Seto *et al*., 2010; 2012).

The most evident manifestations of anthropogenic pressure on the environment are intense atmospheric events associated with climate change,

ISSN online: 2239-0243 | © 2025 Author(s) | http://www.fupress.com/techne | DOI: 10.36253/techne-20467
Open access, peer-reviewed article published by Firenze University Press (https://www.fupress.com) and distributed, except where otherwise noted, under the terms of the CC BY 4.0 License for content and CC0 1.0 Universal for metadata

Dalla conoscenza del rischio alla prevenzione nell'ambiente costruito

Se il rischio costituisce uno dei principali motori delle trasformazioni sociali, politiche e culturali nel mondo contemporaneo (Beck, 2000), anche la sua percezione, a diverse scale e differenti livelli decisionali, assume un ruolo centrale. Anche perché il processo di metamorfosi in atto non rappresenterebbe, secondo Beck, «un cambiamento sociale, né una trasformazione, né una evoluzione, o rivoluzione, o crisi, ma una modalità di cambiamento della natura stessa dell'esistenza umana» (Battisti, 2025). La percezione del rischio influenza non solo le risposte immediate, ma anche gli orientamenti di lungo periodo, rendendo necessarie azioni strutturate di informazione, educazione e coinvolgimento attivo delle comunità su temi che incidono direttamente su sicurezza, salute e benessere collettivo. Non è un caso che misinformazione e disinformazione figurino tra i rischi a breve termine più rilevanti individuati dal *Global Risk Report* (World Economic Forum, 2024).

In questo quadro, la qualità della conoscenza tecnica diventa determinante per orientare scelte progettuali e dei *policy makers*. La comprensione del rischio deve essere continuamente aggiornata attraverso l'integrazione di dati osservativi, scenari climatici e analisi di esposizione e vulnerabilità. Tale processo non può limitarsi alla produzione di dati, ma richiede la selezione di dataset appropriati, la verifica della coerenza dei modelli rispetto alle osservazioni storiche e la loro traduzione in strumenti utili alla pianificazione e alla progettazione. Come indicato dal *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction* (UNDRR, 2015) e dalle *EU-Level Technical Guidance on Climate Proofing* (European Commission, 2021b), la gestione del rischio richiede l'integrazione sistematica di valutazioni strutturate di pericolosità, esposizione e vulnerabilità nei processi decisionali. La prevenzione si fonda sull'utilizzo proattivo di tale conoscenza, anticipando i pericoli e riducendo l'esposizione prima che si producano danni. Un approccio multirischio risulta essenziale, poiché eventi quali quelli sismici, idrogeologici o meteoclimatici tendono a manifestarsi in combinazione piuttosto che isolatamente (Owolabi and Sajjad, 2023). I modelli di rischio avanzati supportano questa fase consentendo di stimare non solo la probabilità e la localizzazione degli eventi, ma anche i loro potenziali impatti su insediamenti, infrastrutture e popolazione (Ming *et al*., 2022).

L'avvento del nuovo regime climatico introduce ulteriori complessità, poiché altera le proprietà statisticamente consolidate dei fenomeni pericolosi e mette in discussione l'ipotesi di stazionarietà su cui si basano molte metodologie tradizionali. In questo contesto, le proiezioni climatiche non costituiscono previsioni deterministiche, ma descrivono risposte condizionate del sistema climatico a specifici scenari di emissione e sviluppo socio-economico, fornendo una gamma di possibili evoluzioni future (IPCC, 2023) che rappresentano la base conoscitiva per orientare decisioni preventive e strategie di adattamento.

L'ambiente costruito assume una posizione strategica, poiché è al tempo stesso bene esposto e fattore determinante della vulnerabilità della popolazione (IPCC, 2023). L'obsolescenza del patrimonio edilizio e infrastrutturale, unita alla crescente fragilità dei territori, accresce l'esposizione di popolazioni e asset economici ai pericoli climatici (UNDRR, 2024). Le vulnerabilità sociali ed economiche, connesse alla qualità dell'ambiente, alle dinamiche demografiche e alle disuguaglianze, amplifica-

including extreme precipitation, heatwaves, prolonged drought, strong winds, and flash floods (Kim and Brown, 2021; Mastrantonas *et al*., 2021; Mosca *et al*., 2023; Nie *et al*., 2024). These phenomena directly affect human wellbeing and the stability of urban systems, creating significant risks for safety and quality of life (Cacciatore *et al*., 2025). In this context, addressing such challenges at multiple scales – from territorial and urban levels to the building scale – becomes essential through research and design approaches capable of integrating risk prediction, prevention, and management, while also fostering greater awareness of ongoing environmental dynamics.

From this perspective, both risk knowledge and integrated adaptation and mitigation strategies become essential elements for guiding transformations in the built environment, and for strengthening the resilience of urban systems.

From Risk Knowledge to Prevention in the Built Environment

If risk constitutes one of the main drivers of social, political, and cultural transformations in contemporary society (Beck, 2000), its perception at different scales and decision-making levels also becomes central. Indeed, according to Beck, the ongoing process of metamorphosis is not a social change, transformation, evolution, revolution, or crisis, but rather "a change in the very nature of human existence" (Battisti, 2025). Risk perception influences not only immediate responses but also long-term orientation, making structured actions centred-on information, education, and active community engagement necessary on issues that directly affect safety, health, and collective wellbeing. Hence, it is not surprising that misinformation and disinformation rank among the most relevant short-term risks identified in the *Global Risks Report* (World Economic Forum, 2024).

In this framework, the quality of technical knowledge becomes crucial for guiding both design choices and policy-making processes. Understanding risk requires continuous updates through the integration of observational data, climate scenarios, and analyses of exposure and vulnerability. This process cannot be limited to the mere data production. Instead, it requires the selection of appropriate datasets, the verification of model consistency with historical observations, and the translation of information into tools useful for planning and design. As indicated by the *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction* (UNDRR, 2015), and the *EU-Level Technical Guidance on Climate Proofing* (European Commission, 2021b), risk management requires the systematic integration of structured hazard, exposure, and vulnerability assessments into decision-making processes.

Prevention relies on the proactive use of such knowledge, anticipating hazards and reducing exposure before damage occurs. A multi-risk approach is, therefore, essential, since events such as seismic, hydrogeological, and meteorological hazards tend to occur in combination rather than as isolated events (Owolabi and Sajjad, 2023). Advanced risk models support this phase by enabling the estimation not only of the probability and spatial distribution of events but also of their potential impacts on settlements, in-

no ulteriormente gli effetti degli eventi estremi, rendendo urgente l'integrazione sistematica delle valutazioni di rischio nei processi di pianificazione e progettazione, come previsto dalla Strategia Europea di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (European Commission, 2021a).
Infine, affinché la conoscenza produca effetti concreti in termini di prevenzione, è necessario un dialogo strutturato tra comunità scientifica, amministrazioni, professionisti e cittadini (IPCC, 2023). Strumenti di comunicazione chiari, processi partecipativi e sistemi di monitoraggio condivisi consentono di trasformare dati e scenari in azioni preventive verificabili nel tempo, in linea con il Sendai Framework e con la Strategia Europea di Adattamento (European Commission, 2021; UNDRR, 2015).

Strategie integrate di adattamento e mitigazione del rischio per la rigenerazione e la resilienza urbana in scenari multi-hazard

Le città contemporanee si configurano sempre più come sistemi esposti in scenari multirischio, nei quali hazard differenti interagiscono generando effetti cumulativi, concatenati e non lineari. L'intensificazione degli eventi climatici estremi, unita alla crescente esposizione dei sistemi insediativi e della popolazione, impone pertanto una revisione sostanziale dei modelli di pianificazione e di progettazione degli interventi di adattamento e mitigazione. In tale contesto, la gestione del rischio non può più essere affrontata attraverso approcci settoriali o frammentati, ma richiede quadri interpretativi e operativi integrati, capaci di connettere in modo sistemico dimensioni ambientali, sociali, economiche e infrastrutturali.
Negli scenari multi-hazard, infatti, il rischio deve essere assunto come esito di relazioni dinamiche tra vulnerabilità, esposizione, caratteristiche dei contesti locali e interazioni tra fattori naturali, ambientali e antropici. Ne deriva la necessità di modelli conoscitivi in grado di integrare osservazione, valutazione degli impatti e definizione delle priorità di intervento entro una cornice unitaria, nella quale la resilienza urbana non sia intesa soltanto come capacità di risposta agli *shock*, ma come principio ordinatore dei processi di trasformazione. In questa prospettiva, l'interazione tra rischio, trasformazione urbana e resilienza diventa un nodo centrale del progetto contemporaneo, soprattutto nei contesti in cui le pressioni climatiche si sovrappongono a fragilità strutturali pregresse (Menoni, 2025).
La ricerca ha progressivamente elaborato strumenti per l'identificazione e la classificazione dei livelli di intervento, evidenziando come l'efficacia delle strategie urbane dipenda dalla capacità di agire non solo sugli effetti dei fenomeni ma, ove possibile, anche sulle loro determinanti strutturali. In questo senso, l'integrazione tra adattamento e mitigazione si consolida come presupposto indispensabile per la costruzione di politiche e progetti di resilienza realmente efficaci, in quanto consente di affrontare simultaneamente la riduzione delle vulnerabilità, il contenimento delle pressioni ambientali e il rafforzamento della capacità adattiva dei territori.
Tale esigenza appare ancora più evidente se si considera che gran parte degli insediamenti urbani esistenti è stata concepita in fasi storiche nelle quali le condizioni di multirischio, e soprattutto le loro reciproche interazioni, non costituivano un riferimento centrale per il progetto. Ne consegue la necessità di riformulare strumenti conoscitivi e approcci progettuali alla luce dell'evolu-

frastructures, and populations (Ming *et al*., 2022).
The emergence of a new climatic regime introduces additional complexity, as it alters the historically established statistical properties of hazardous phenomena, and challenges the stationarity assumptions on which many traditional methodologies are based. In this context, climate projections do not constitute deterministic forecasts; rather, they describe climate system responses conditioned by specific emission and socio-economic development scenarios, providing a range of possible future evolutions (IPCC, 2023). These options form the knowledge base for guiding preventive decisions and adaptation strategies.
Hence, the built environment assumes a strategic role, as it is both the primary asset exposed to hazards, and a determinant of population vulnerability (IPCC, 2023). The ageing of building stock and infrastructures, combined with the increasing fragility of territories, heightens the exposure of populations and economic assets to climate hazards (UNDRR, 2024). Social and economic vulnerabilities—linked to environmental quality, demographic dynamics, and inequalities—further amplify the effects of extreme events, making the systematic integration of risk assessments into planning and design processes increasingly urgent, as emphasised by the *EU Strategy on Adaptation to Climate Change* (European Commission, 2021a).
Finally, a structured dialogue among the scientific community, administrations, professionals, and citizens is required for knowledge to translate into effective preventive action (IPCC, 2023). Clear communication tools, participatory processes, and shared monitoring systems enable the transformation of data and scenarios into preventive actions that can be evaluated over time, in line with the *Sendai Framework* and the European Adaptation Strategy (European Commission, 2021; UNDRR, 2015).

Integrated Adaptation and Risk Mitigation Strategies for Urban Regeneration and Resilience in Multi-Hazard Scenarios

Contemporary cities increasingly function as systems exposed to multirisk scenarios in which different hazards interact, generating cumulative, cascading, and non-linear effects. The intensification of extreme climate events, combined with the growing exposure of settlements and populations, requires adaptation and mitigation interventions to be designed, as well as a substantial revision of planning models. In this context, risk management can no longer be addressed through sectoral or fragmented approaches but requires integrated interpretative and operational frameworks capable of connecting environmental, social, economic, and infrastructural dimensions.
In multi-hazard scenarios, risk must be understood as the outcome of dynamic relationships among vulnerability, exposure, local context characteristics, and interactions between natural, environmental, and anthropogenic factors. This calls for knowledge models capable of integrating observation, impact assessment, and the prioritisation of interventions within a unified framework, in which urban resilience is understood not only as the ability to respond to shocks but also as a guiding principle for urban transformation processes. From this perspective, the

zione della cultura del rischio, tanto sul piano nazionale quanto su quello internazionale. In questa direzione si collocano, ad esempio, gli indirizzi sviluppati nell'ambito del Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (2023) e, più in generale, gli approcci riconducibili a una prospettiva di "resilient urbanism", orientata a integrare sicurezza territoriale, qualità della vita urbana e trasformazione ecologica.

All'interno di questa cornice, il cambiamento climatico assume una rilevanza peculiare in quanto opera come "*threat multiplier*", ossia come fattore capace di amplificare fragilità pregresse e di intensificare tensioni già presenti nei sistemi urbani e territoriali. Il rischio climatico, pertanto, non può essere considerato una categoria autonoma e separata, ma va interpretato come una componente trasversale che interagisce con altre condizioni critiche e altri rischi, producendo effetti di tipo "*cascade*" e "*compound*". Come osservato da Goodman *et al.* (2007), esso può infatti innescare o aggravare situazioni già segnate da fragilità, conflitti o competizione per le risorse. Tale dinamica è riscontrabile in diversi ambiti: l'aumento delle ondate di calore aggrava i rischi per la salute e la sicurezza dei lavoratori esposti all'aperto; l'innalzamento del livello del mare amplifica i danni al patrimonio edilizio costiero e i costi assicurativi; la scarsità idrica compromette la produttività agricola, con ricadute sulle filiere di approvvigionamento e sulla sicurezza alimentare. Gli scenari di rischio indotti dal cambiamento climatico alla scala locale si connettono alla valutazione del grado di vulnerabilità delle aree urbane per considerare appropriate strategie di adattamento e di maggiore efficacia in base a una conoscenza dettagliata dei contesti (Tucci *et al*., 2021). Ne consegue che i processi di conoscenza, pianificazione e progetto debbano assumere un orientamento esplicitamente "climate-resilient", individuando contesti critici e aree urbane "hot spot", capace non solo di contrastare gli impatti climatici, ma anche di ridurre esposizione e vulnerabilità agli altri rischi interconnessi (Losasso *et al*., 2024). In tale prospettiva, la distinzione tra componenti "*green*" e "*grey*" dei sistemi urbani, proposta dalla letteratura e ripresa dalle tassonomie dell'ISPRA – Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale, nonché del Piano Nazionale di Adattamento al Cambiamento Climatico, assume una forte rilevanza operativa. Essa non va letta come una semplice classificazione descrittiva, ma come un dispositivo interpretativo utile a orientare le strategie di transizione ecologica e a rendere praticabili le possibili le integrazioni tra molteplici soluzioni di adattamento. Il punto, infatti, non consiste nel contrapporre due modelli di intervento, bensì nel comprenderne la complementarità entro processi di trasformazione eco-orientati, nei quali riduzione del rischio, adattamento climatico e miglioramento della qualità urbana concorrano alla definizione di un medesimo quadro strategico.

È proprio su questo terreno che le strategie di adattamento e mitigazione climatica assumono un ruolo di cerniera tra gestione del rischio, rigenerazione urbana e transizione ecologica. Esse possono infatti funzionare come dispositivi di integrazione delle risposte multi-hazard, attribuendo centralità a interventi in grado di produrre simultaneamente benefici climatici, ambientali e sociali. In particolare, le azioni "*green & grey*" possono essere interpretate come leve conoscitive e progettuali per promuovere processi di "*climate risk-oriented regeneration*", nei quali, per esempio, infrastrutture ibride, superfici permeabili, aree vegetate e interventi di greening edilizio e urbano concor-

interaction between risk, urban transformation, and resilience becomes a key issue in contemporary design, particularly in contexts where climate pressures overlap with former structural fragilities (Menoni, 2025).

Research has progressively developed tools for identifying and classifying intervention levels, highlighting how the effectiveness of urban strategies depends on the ability to act not only on the effects of hazards but, where possible, also on their structural determinants. In this sense, the integration of adaptation and mitigation emerges as a fundamental prerequisite for building effective resilience policies and projects, as it enables the simultaneous reduction of vulnerabilities and the containment of environmental pressures, while also strengthening the adaptive capacity of territories.

This need becomes more evident when considering that much of the existing urban fabric was conceived during historical periods in which multi-risk conditions – and especially their interactions – were not central considerations for design. Consequently, knowledge tools and design approaches must be reformulated in light of the evolving culture of risk at both national and international levels. Initiatives such as the (Italian) National Climate Change Adaptation Plan (2023) and, more broadly, approaches associated with resilient urbanism move in this direction, aiming to integrate territorial safety, urban quality of life, and ecological transformation.

Within this framework, climate change assumes particular relevance as a "threat multiplier", that is, a factor capable of both amplifying previously existing vulnerabilities and intensifying tensions already present within urban and territorial systems. Hence, climate risk cannot be considered an isolated or autonomous category; rather, it should be interpreted as a transversal component interacting with other critical conditions and risks, generating cascade and compound effects. As noted by Goodman *et al.* (2007), climate change can either trigger or exacerbate situations already characterised by fragility, conflict, or competition over resources.

Such dynamics are evident across multiple sectors. Indeed, increasing heatwaves heighten health and safety risks for workers exposed to outdoor conditions; sea-level rise amplifies damage to coastal built heritage and increases insurance costs; and water scarcity reduces agricultural productivity, with consequences for supply chains and food security. Climate change–induced risk scenarios at the local scale are closely linked to the assessment of urban vulnerability, which is essential for identifying appropriate and effective adaptation strategies based on a detailed understanding of local contexts (Tucci *et al*., 2021).

Consequently, knowledge production, planning, and design processes must adopt an explicitly climate-resilient orientation aimed at identifying critical contexts and urban "hotspots." Such an approach should not only address climate impacts but also reduce exposure and vulnerability to interconnected risks (Losasso *et al*., 2024).

In this perspective, the distinction between "green" and "grey" components of urban systems – proposed in the literature and adopted by ISPRA taxonomies – assumes strong operational relevance. Rather than representing

rono ad accrescere la resilienza urbana attraverso l'attivazione di servizi ecosistemici complementari, quali il controllo microclimatico, la gestione delle acque meteoriche e il rafforzamento della biodiversità urbana (Huang *et al*., 2025). La loro rilevanza risiede nella capacità di produrre co-benefici che travalicano la sola sfera climatica e incidono anche su altre forme di vulnerabilità urbana.

Parallelamente, negli scenari di contrasto del multirischio acquistano crescente importanza le dimensioni sociali e partecipative. In tale ambito, gli "*Urban Living Labs*" e i processi di "*co-design*" si configurano come strumenti rilevanti per la co-produzione di conoscenza e per la costruzione di soluzioni contestualizzate, poiché consentono di coinvolgere attivamente comunità locali e stakeholder nella definizione, sperimentazione e valutazione degli interventi. La resilienza urbana, da questo punto di vista, non si esaurisce nella robustezza delle infrastrutture o nell'efficienza dei dispositivi tecnici, ma si misura anche nella capacità istituzionale e sociale di attivare forme collaborative di governance delle trasformazioni urbane (Amorim *et al*., 2022).

I processi di rigenerazione urbana devono pertanto essere interpretati come sistemi dinamici, aperti e condizionati nel tempo da variabili politiche, economiche e socio-ambientali. Per questa ragione, una prospettiva orientata alla resilienza richiede una visione di lungo periodo, capace di integrare pianificazione, governance e investimenti infrastrutturali entro traiettorie trasformative coerenti. In questo quadro si colloca il ruolo dei Sistemi di Supporto alle Decisioni ("Decision Support Systems", DSS), intesi non solo come strumenti tecnico-operativi, ma come dispositivi di mediazione tra conoscenza, progetto e decisione pubblica. Linee guida, protocolli, "design proposal" e manuali operativi possono infatti contribuire a rendere trasferibili gli esiti delle ricerche o di attività operative, supportando i decisori nella definizione di strategie resilienti fondate su evidenze e scenari comparativi.

L'impiego di analisi "what-if" e di strumenti di simulazione multirischio appare, in questo senso, particolarmente significativo, poiché consente di mettere a confronto alternative progettuali differenti e di valutarne gli effetti rispetto a combinazioni complesse di hazard. La simulazione assume così non una funzione meramente descrittiva, ma un valore propriamente strategico, in quanto permette di integrare la valutazione degli impatti all'interno dei processi di scelta e di orientare gli interventi verso soluzioni più robuste, adattive e contestualmente appropriate (De Fino *et al*., 2023).

Infine, la valutazione delle tecnologie e delle alternative tecniche utilizzabili negli interventi non può limitarsi al solo piano prestazionale, ma deve includere anche le implicazioni etiche, economiche e sociali. È in questa prospettiva che il paradigma della "just transition" acquisisce una rilevanza decisiva, offrendo una cornice entro cui collocare adattamento e mitigazione come componenti di una più ampia trasformazione urbana, orientata alla costruzione di metabolismi sostenibili, alla riduzione degli scarti, all'uso non estrattivo delle risorse e all'adozione dei principi dell'economia circolare (Russo, 2026). La rigenerazione urbana non coincide dunque con una sommatoria di interventi fisici, ma con un processo di riconfigurazione dei rapporti tra ambiente costruito, sistemi ecologici e pratiche sociali, nel quale la gestione integrata del rischio diventa parte costitutiva del progetto. In tale quadro, interventi quali ad esempio "*green roofs*", superfici permeabili o infrastrutture ibride,

a purely descriptive classification, it becomes an interpretative framework for guiding ecological transition strategies, and for enabling integration among different solutions. The key issue is not to oppose two intervention models but to understand their complementarity within eco-oriented transformation processes in which risk reduction, climate adaptation, and improvements in urban quality converge within a shared strategic framework.

In this context, adaptation and mitigation strategies function as a hinge between risk management, urban regeneration, and ecological transition. They act as integrative mechanisms for multi-hazard responses, prioritising interventions capable of generating simultaneous climatic, environmental, and social benefits. In particular, "green and grey" actions can be interpreted as knowledge-based and design-oriented tools for promoting processes of climate risk-oriented regeneration, in which, for example, hybrid infrastructures, permeable surfaces, vegetated areas, and urban greening interventions contribute to enhancing urban resilience through ecosystem services such as microclimatic regulation, stormwater management, and the reinforcement of urban biodiversity (Huang *et al*., 2025). Their importance lies in their capacity to produce co-benefits that extend beyond the climatic dimension, and address broader forms of urban vulnerability.

At the same time, social and participatory dimensions are gaining increasing importance in multi-risk scenarios. Urban Living Labs and co-design processes are important tools for knowledge co-production, and for the development of context-specific solutions. They enable the active involvement of local communities and stakeholders in defining, testing, and evaluating interventions. From this perspective, urban resilience is measured not only by the robustness of infrastructures or the efficiency of technical devices but also by the institutional and social capacity to activate collaborative governance processes for urban transformation (Amorim *et al*., 2022).

Urban regeneration processes must, therefore, be interpreted as dynamic and open systems influenced over time by political, economic, and socio-environmental variables. A resilience-oriented perspective requires a long-term vision capable of integrating planning, governance, and infrastructural investments within coherent transformation trajectories. Within this framework, Decision Support Systems (DSS) play a crucial role not only as technical tools but also as mediating instruments between knowledge production, design processes, and public decision-making. Guidelines, protocols, design proposals, and operational manuals can help make research outcomes transferable, supporting decision-makers in defining resilient strategies based on evidence and comparative scenarios.

The use of what-if analyses and multi-hazard simulation tools is particularly relevant in this regard, as it allows different design alternatives to be compared, and their impacts to be evaluated under complex hazard combinations. Hence, simulation does not merely assume a descriptive role but a strategic one, enabling impact assessments to be integrated into decision-making processes, and guiding interventions toward more robust, adaptive, and context-appropriate solutions (De Fino *et al*., 2023).

mostrano non solo benefici microclimatici, ma anche rilevanti co-benefici sociali ed ecosistemici, confermando il potenziale delle strategie integrate nel sostenere forme più eque, adattive e durevoli di trasformazione urbana (Bleicher, 2025).

Verso strategie integrate di resilienza urbana

La gestione dei rischi nell'ambiente costruito richiede un approccio integrato capace di connettere conoscenza scientifica, strumenti di previsione e strategie di prevenzione. In uno scenario caratterizzato dall'intensificazione dei fenomeni climatici e dall'interazione tra rischi naturali, ambientali e antropici, diventa fondamentale superare approcci settoriali e adottare prospettive multirischio. La centralità dell'ambiente costruito emerge sia come principale bene esposto sia come fattore determinante della vulnerabilità delle comunità. In questo contesto, l'integrazione tra adattamento e mitigazione, insieme allo sviluppo di strumenti di supporto alle decisioni e di processi partecipativi, rappresenta una condizione essenziale per rafforzare la resilienza urbana. Le strategie progettuali e di pianificazione devono quindi orientarsi verso modelli di trasformazione capaci di ridurre esposizione e vulnerabilità, promuovendo al contempo co-benefici ambientali, sociali ed economici.

REFERENCES

Amorim, E.E.R., Menezes, M. and Fernandes, K.V.G. (2022), "Urban living labs and critical infrastructure resilience: A global match?", *Sustainability*, 14(16), p. 9826. Available at: https://doi.org/10.3390/su14169826.

Aznarez, C., Kumar, S., Marquez-Torres, A., Pascual, U. and Baró, F. (2024), "Ecosystem service mismatches evidence inequalities in urban heat vulnerability", *Science of the Total Environment*, 922, p. 171215. Available at: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171215.

Battisti, A. (2025), "Do technologists dream of digital sheep? Reflections upon changes and metamorphoses in research", in Losasso, M. and Romano, R. (eds.), *Progettazione Ambientale, sfide globali, scenari di ricerca. Contributi alla ricerca del Cluster Progettazione Ambientale della Società Italiana della Tecnologia dell'Architettura*. Santarcangelo di Romagna: Maggioli.

Bleicher, J. and Kumar, P. (2025), "A novel framework integrating resilient and sustainable urbanism for designing climate-resilient sustainable urban neighbourhoods", *Sustainable Cities and Society*, 130, p. 106577. Available at: https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106577.

Cacciatore, S., Mao, S., Nuñez, M.V., Massaro, C., Spadafora, L., Bernardi, M., Perone, F., Sabouret, P., Biondi-Zoccai, G., Banach, M., Calvani, R., Tosato, M., Marzetti, E. and Landi, F. (2025), "Urban health inequities and healthy longevity: Traditional and emerging risk factors across cities and policy implications", *Aging Clinical and Experimental Research*, 37, p. 143. Available at: https://doi.org/10.1007/s40520-025-03052-1.

De Fino, M., Tavolare, R., Bernardini, G., Quagliarini, E. and Fatiguso, F. (2023), "Boosting urban community resilience to multi-hazard scenarios in open spaces: A virtual reality serious game training prototype for heat wave protection and earthquake response", *Sustainable Cities and Society*, 99, p. 104847. Available at: https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104847.

European Commission (2021), *EU Adaptation Strategy*. Available at: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/adaptation-climate-change/eu-adaptation-strategy_en.

European Commission (2025), *Nature Restoration Regulation*.

Huang, X., Yao, R., Halios, C.H., Kumar, P. and Li, B. (2025), "Integrating green infrastructure, design scenarios, and social-ecological-technological systems for thermal resilience and adaptation: Mechanisms and approa-

Finally, the evaluation of technologies and technical alternatives cannot be limited to performance criteria alone but must also consider ethical, economic, and social implications. In this perspective, the paradigm of just transition becomes particularly relevant, providing a framework within which adaptation and mitigation can be integrated into broader processes of urban transformation oriented toward sustainable metabolisms, waste reduction, non-extractive resource use, and circular economy principles (Russo, 2026). Urban regeneration is not merely a set of physical interventions but a broader process of reconfiguring relationships between the built environment, ecological systems, and social practices. Within this framework, interventions such as green roofs, permeable surfaces, and hybrid infrastructures demonstrate not only microclimatic benefits but also significant social and ecosystem co-benefits, confirming the potential of integrated strategies to support more equitable, adaptive, and long-term urban transformation processes (Bleicher, 2025).

Towards Integrated Urban Resilience Strategies

Risk management in the built environment requires an integrated approach capable of connecting scientific knowledge, predictive tools, and preventive strategies. In a context characterised by intensifying climate phenomena and increasing interactions between natural, environmental and anthropogenic risks, it becomes essential to move beyond sectoral approaches and adopt multi-risk perspectives.

Within this framework, the built environment plays a central role, both as the primary asset exposed to hazards, and as a key determinant of community vulnerability. Consequently, the integration of adaptation and mitigation strategies, together with decision-support tools and participatory processes, becomes fundamental for strengthening urban resilience.

Planning and design strategies should, therefore, guide urban transformation toward models capable of reducing exposure and vulnerability, while simultaneously generating environmental, social, and economic co-benefits.

ches", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 212, p. 115422. Available at: https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115422.

IPCC (2022), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press. Available at: https://doi.org/10.1017/9781009325844.

Kim, S.W. and Brown, R.D. (2021), "Urban heat island (UHI) variations within a city boundary: A systematic literature review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 148, p. 111256. Available at: https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111256.

Losasso, M., Clemente, M.F., Sferratore, A. and Verde, S. (2024), "Systemic approach and multi-scalar urban knowledge: Urban hotspot and critical context identification", *RETURN Dissemination Workshop*, Torino (Italy), 1–2 February 2024. Available at: https://doi.org/10.5281/zenodo.10598007.

Mastrantonas, N., Herrera-Lormendez, P., Magnusson, L., Pappenberger, F. and Matschullat, J. (2021), "Extreme precipitation events in the Mediterranean: Spatiotemporal characteristics and connection to large-scale atmospheric flow patterns", *International Journal of Climatology*, 41, pp. 2710–2728. Available at: https://doi.org/10.1002/joc.6985.

Menoni, S. (2025), "Urban planning for disaster risk reduction and climate change adaptation: A review at the crossroads of research and practice", *Sustainability*, 17(20), p. 9092. Available at: https://doi.org/10.3390/su17209092.

Metzger, M.J., Rounsevell, M.D.A., Acosta-Michlik, L., Leemans, R. and Schröter, D. (2006), "The vulnerability of ecosystem services to land use change", *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 114, pp. 69–85. Available at: https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.11.025.

Mosca, F., Canepa, M. and Perini, K. (2023), "Strategies for adaptation to and mitigation of climate change: Key performance indicators to assess nature-based solutions performances", *Urban Climate*, 49, p. 101580. Available at: https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101580.

Nie, G., Yang, J., Zhang, Y., Xiao, X., Xia, J., Cai, X. and Li, C. (2024), "Duration of exposure to compound daytime–nighttime high temperatures and changes in population exposure in China under global warming", *Humanities and Social Sciences Communications*, 11, p. 1065. Available at: https://doi.org/10.1057/s41599-024-03586-1.

Seto, K.C., Güneralp, B. and Hutyra, L.R. (2012), "Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109, pp. 16083–16088. Available at: https://doi.org/10.1073/pnas.1211658109.

Seto, K.C., Sánchez-Rodríguez, R. and Fragkias, M. (2010), "The new geography of contemporary urbanization and the environment", *Annual Review of Environment and Resources*, 35, pp. 167–194. Available at: https://doi.org/10.1146/annurev-environ-100809-125336.

Tucci, F., Cecafosso, V. and Turchetti, G. (2021), "La multiscalarità degli interventi di adattamento climatico: programmi strategici, metaprogettazione e progetti dimostratori", in Bologna, R., Losasso, M., Mussinelli, E. and Tucci, F. (eds.), *Dai distretti urbani agli eco-distretti. Metodologie di conoscenza, programmi strategici, progetti pilota per l'adattamento climatico*. Santarcangelo di Romagna: Maggioli.

UNDRR (2015), *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030*.

UNDRR (2024), *Nature-based solutions for comprehensive disaster and climate risk management: Toolkit for integrated planning and implementation of disaster risk reduction and climate change adaptation*.

United Nations, DESA Population Division (2018), *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*.

World Economic Forum (2024), *The Global Risks Report 2024*, 19th ed.

MODELLI DI PERICOLOSITÀ E RISCHIO NELLE ATTIVITÀ DI PROTEZIONE CIVILE: UTILIZZO E PROSPETTIVE IN ITALIA

Daniela Di Bucci,
Dipartimento della Protezione Civile, Italia
daniela.dibucci@protezionecivile.it

Abstract. Il sistema italiano di protezione civile rappresenta un contesto multilivello integrato, volto a proteggere le persone, i beni e l'ambiente dai pericoli naturali e antropici. I modelli di pericolosità e rischio sono essenziali in tutte le fasi di gestione del rischio. Indirizzano le politiche di preparazione e prevenzione, come i piani di protezione civile, o i programmi di rafforzamento strutturale del costruito. Supportano inoltre la gestione delle emergenze attraverso sistemi di allerta precoce, monitoraggio in tempo reale, modelli probabilistici e valutazioni rapide del danno, che sono alla base del processo decisionale di protezione civile. Nelle fasi di recupero post-evento, contribuiscono a definire priorità nella ricostruzione e strategie di "*build back better*". Approcci multi-rischio stanno assurgendo a un ruolo sempre più importante. La percezione e la comunicazione del rischio, così come le sfide emergenti poste dal cambiamento climatico, meritano particolare attenzione. Le priorità future includono una valutazione multi-rischio avanzata, l'integrazione della vulnerabilità sociale e l'uso dell'intelligenza artificiale nella modellazione di pericolosità e rischio, per migliorare le decisioni basate sull'evidenza nella gestione del rischio di disastri.

Parole chiave: Modelli di pericolosità e rischio; Valutazione multi-rischio; Gestione del rischio di disastri; Protezione civile.

Introduzione

Il sistema italiano di protezione civile (Servizio Nazionale della Protezione Civile) rappresenta un contesto integrato ideato per salvaguardare la popolazione, i territori e l'ambiente costruito dai pericoli naturali e antropici (Decreto Legislativo 1, 2018).

In questo lavoro si intende esaminare come i modelli di pericolosità e rischio vengano impiegati durante tutto il ciclo di gestione del rischio di disastri (*disaster risk management*, DRM), enfatizzando l'integrazione della conoscenza scientifica in un processo decisionale di protezione civile basato sull'evidenza. Viene qui adottata una prospettiva nazionale, pur riconoscendo la natura intrinsecamente multi-scala della valutazione e gestione del rischio.

Il sistema italiano di protezione civile si occupa di tutte le fasi del DRM: previsione e prevenzione (attraverso misure non strutturali), preparazione, emergenza e recupero post-evento. Ogni fase richiede specifici input scientifici, che vanno dalle valutazioni probabilistiche della pericolosità ai sistemi di monitoraggio e previsione in tempo reale.

Il coinvolgimento della comunità scientifica è centrale: essa fornisce competenze in geoscienze, ingegneria, meteorologia, scienze sociali. Questo approccio collaborativo assicura che i modelli riflettano le conoscenze scientifiche più recenti e possano essere aggiornati man mano che nuovi dati e metodologie diventano disponibili (Dolce e Di Bucci, 2015). L'integrazione nella modellazione di una prospettiva multi-pericolo e multi-rischio è una priorità in evoluzione, a cui il cambiamento climatico aggiunge ulteriori complessità, alterando frequenze e intensità dei pericoli mentre modifica i modelli di esposizione e vulnerabilità, spingendo così verso modelli di rischio adattivi, capaci di incorporare tendenze emergenti e incertezze.

Rischi di protezione civile in Italia

L'Italia affronta molti pericoli naturali e antropogenici, che ne definiscono le priorità di protezione civile (Decreto Legislativo 1, 2018). Ad esempio, la pericolosità sismica è particolarmente impattante, come testimoniato dai terremoti storici, che hanno causato ingenti perdite di vite umane e danni (Guidoboni *et al.*, 2018). I modelli di pericolosità sismica quantificano le probabilità di occorrenza del moto del suolo per diversi periodi di ritorno e informano i modelli di rischio sismico, le norme tecniche per le costruzioni e la pianificazione.

HAZARD AND RISK MODELS IN CIVIL PROTECTION ACTIVITIES: USE AND PERSPECTIVES IN ITALY

Abstract. The Italian civil protection system is a comprehensive multi-level framework aimed at protecting people, property and the environment from natural and anthropogenic hazards. Hazard and risk models are essential for all phases of risk management. They guide preparedness and prevention policies, such as plans and structural retrofit programmes. They also underpin emergency management through early warning systems, real time monitoring, rapid damage assessments, and probabilistic models that support civil protection decision-making. In recovery phases, they inform reconstruction priorities and enable "build back better" strategies. An increasingly important role is played by multi-risk approaches. Risk perception and communication, as well as the emerging challenges posed by climate change, deserve special attention. Future priorities also include improved multi-risk assessment, integration of social vulnerability, and the use of artificial intelligence in hazard and risk modelling to enhance evidence-based decisions in disaster risk management.

Keywords: Hazard and Risk models; Multi-Risk Assessment; Disaster Risk Management; Civil Protection.

Introduction

The Italian civil protection system is a comprehensive framework designed to safeguard populations, territories and the built environment from natural and anthropogenic hazards (Legislative Decree 1, 2018).

This work aims at examining how hazard and risk models are employed throughout the disaster risk management (DRM) cycle, emphasising the integration of scientific knowledge into evidence-based decision making for civil protection. A national perspective is adopted, while recognising the inherently multi-scale nature of risk assessment and management.

The Italian civil protection system deals with all phases of DRM, including forecast and prevention, preparedness through non-structural measures, emergency, and post-event recovery. Each phase requires specific scientific inputs, ranging from probabilistic hazard assessments to real-time monitoring and forecasting systems.

Scientific community engagement is central, providing expertise in geosciences, engineering, meteorology, and social sciences. This collaborative approach ensures that models reflect current scientific understanding, and can be updated as new data and methodologies become available (Dolce and Di Bucci, 2015). The integration of a multi-hazard risk perspective is an evolving priority. Climate change adds further complexity, altering haz-

ISSN online: 2239-0243 | © 2025 Author(s) | http://www.fupress.com/techne | DOI: 10.36253/techne-20471
Open access, peer-reviewed article published by Firenze University Press (https://www.fupress.com) and distributed, except where otherwise noted, under the terms of the CC BY 4.0 License for content and CC0 1.0 Universal for metadata

La pericolosità vulcanica è un altro dei motivi principali di preoccupazione, con più sistemi vulcanici attivi che richiedono un monitoraggio continuo: l'area vulcanica napoletana (Vesuvio, Campi Flegrei, Ischia), il Monte Etna, le Isole Eolie. Ogni sistema presenta caratteristiche distintive e specifici impatti potenziali. I modelli di pericolosità integrano eruzioni esplosive, flussi piroclastici e di lava, cadute di tefra, lahar, rilascio gas vulcanici. Nelle isole vulcaniche, le eruzioni possono generare frane lungo i versanti del vulcano verso mare, che a loro volta possono indurre onde di tsunami (Dolce *et al*., 2020).

I pericoli idrogeologici includono inondazioni, frane e colate detritiche che interessano ampie porzioni del territorio italiano (Trigila *et al*., 2025). L'eterogeneità geologica, la morfologia spesso caratterizzata da pendenze elevate, gli eventi di precipitazione intensa e le modifiche antropiche ai sistemi di drenaggio contribuiscono all'instabilità idrogeologica. I modelli di pericolosità combinano parametri geologici, morfologici, di copertura del suolo e idrologici per identificare le aree soggette a instabilità di versante (Reichenbach *et al*., 2018). La valutazione della pericolosità da alluvione utilizza la modellazione idraulica per delineare le aree di inondazione per diversi periodi di ritorno, considerando la portata dei corsi d'acqua, la topografia e le infrastrutture idrauliche (Decreto Legislativo 49, 2010).

La vulnerabilità dell'ambiente costruito rispetto a questi pericoli dipende dalle caratteristiche costruttive, dalle condizioni di manutenzione e dall'esposizione di specifiche infrastrutture critiche. I modelli di vulnerabilità valutano il potenziale danno fisico agli edifici e alle infrastrutture e consentono la quantificazione del rischio combinando le componenti di pericolosità, esposizione e vulnerabilità.

L'approccio multi-rischio tiene conto del fatto che i pericoli quasi mai si verificano singolarmente (si veda Zschau, 2017, per una revisione). I territori possono dover fronteggiare più pericoli tra loro indipendenti, oppure effetti a cascata in cui un evento ne scatena di successivi. Anche la vulnerabilità e l'esposizione, negli scenari multi-pericolo, mostrano un'evoluzione dinamica. I modelli multi-rischio tentano di caratterizzare queste interazioni, sebbene sfide metodologiche rimangano aperte nella quantificazione delle probabilità composite e degli impatti cumulati.

La centralità dell'ambiente costruito nella valutazione del rischio riflette il suo duplice ruolo, sia come principale bene a rischio, sia come determinante dell'esposizione e della vulnerabilità della popolazione. Le aree urbane concentrano popolazione e attività economiche, creando condizioni in cui gli eventi pericolosi possono produrre conseguenze catastrofiche. Inoltre, i centri storici sono importanti, specialmente in Italia, anche per il loro valore come siti del patrimonio culturale.

Esempi di uso dei modelli di rischio nella prevenzione e preparazione

I modelli di rischio supportano le attività di prevenzione e preparazione attraverso la valutazione sistematica di pericolosità, esposizione e vulnerabilità. Il *National Risk Assessment* italiano (https://www.protezionecivile.gov.it/static/5cffeb32c9803b0bddce533947555cf1/Documento_sulla_Valutazione_nazionale_dei_rischi.pdf), ad esempio, fornisce una valutazione complessiva dei rischi di disastro incorporando molteplici pericolosità e considerando i loro potenziali impatti sulla popolazione, l'economia, l'ambiente, i

ard frequencies and intensities while modifying exposure and vulnerability patterns, thus pushing towards adaptive risk models capable of incorporating emerging trends and uncertainties.

Civil protection risks in Italy

Italy faces many natural and human-induced hazards that define its civil protection priorities (Legislative Decree 1, 2018). For instance, seismic hazard is particularly impacting, as witnessed by historical earthquakes, which have caused extensive damage and loss of life (Guidoboni *et al*., 2018). Seismic hazard models quantify ground motion probabilities of occurrence for different return periods, and inform seismic risk models, national building codes, and land-use planning. Volcanic hazard is another major concern with active volcanic systems requiring continuous monitoring, such as the Neapolitan volcanic area (Vesuvius, Campi Flegrei, Ischia), Mount Etna, and the Aeolian Islands. Each system presents distinct characteristics and potential impacts. Hazard models integrate explosive eruptions, pyroclastic and lava flows, tephra fall, lahars, and volcanic gases. In volcanic islands, eruptions can generate landslides along volcano slopes, which in turn can induce tsunami waves (Dolce *et al*., 2020).

Hydrogeological hazards encompass floods, landslides and debris flows, affecting extensive portions of Italian territory (Trigila *et al*., 2025). Geological heterogeneity, steep topography, intense precipitation events, and anthropogenic modifications to drainage systems contribute to hydrogeological instability. Hazard models combine geological, morphological, land cover, and hydrological parameters to identify areas prone to slope failures (Reichenbach *et al*., 2018). Flood hazard assessment utilises hydraulic modelling to delineate inundation areas for different return periods, considering river discharge, topography, and hydraulic infrastructure (Legislative Decree 49, 2010).

The built environment's vulnerability to these hazards depends on construction characteristics, maintenance conditions, and exposure of critical infrastructure. Vulnerability models assess potential physical damage to buildings and infrastructure, and enable risk quantification by combining hazard, exposure, and vulnerability components.

Multi-risk assessment recognises that hazards do not occur as isolated events (see Zschau, 2017, for a review). Territories may face multiple independent hazards or cascading effects where one event triggers additional phenomena. Vulnerability and exposure as well show a dynamic evolution in multi-hazard scenarios. Multi-risk models attempt to characterise these interactions, though methodological challenges remain in quantifying coupled probabilities and compound impacts.

The built environment's centrality in risk assessment reflects its dual role as both the primary asset at risk, and a determinant of population exposure and vulnerability. Urban areas concentrate population and economic activities, creating conditions where hazard events can produce catastrophic consequences. Furthermore, historic centres are important, especially in Italy, for their value as cultural heritage sites.

beni culturali. A seconda del rischio considerato, questo può informare la pianificazione nazionale di protezione civile, le decisioni sull'allocazione delle risorse, o la definizione delle priorità nelle strategie di prevenzione.
Le iniziative di prevenzione strutturale mirano a ridurre la vulnerabilità attraverso interventi su edifici, infrastrutture e sistemi territoriali. Il Piano Nazionale di Prevenzione Sismica (Dolce *et al*., 2021), ad esempio, coordina gli sforzi per migliorare la sicurezza sismica in più settori indirizzando e (co) finanziando i programmi di intervento. I modelli economici supportano le analisi costi-benefici, che sottendono all'allocazione dei finanziamenti e alla programmazione e realizzazione degli interventi.
Per quanto riguarda il rischio sismico e le norme tecniche per le costruzioni, in Italia la regolamentazione si è evoluta da approcci prescrittivi verso un quadro di progettazione di tipo prestazionale, che considera esplicitamente le intensità del moto del suolo attese e le caratteristiche di risposta strutturale (NTC, 2018).
La pianificazione di protezione civile a livello nazionale, regionale e locale si basa su scenari di rischio per definire procedure operative, risorse necessarie e meccanismi di coordinamento (https://servizio-nazionale.protezionecivile.gov.it/en/approfondimento/civil-protection-planning/). Lo sviluppo di scenari utilizza modelli di pericolosità per definire le potenziali caratteristiche degli eventi, combinati con database di esposizione e funzioni di vulnerabilità per stimare gli impatti. Gli scenari di pianificazione considerano diverse intensità e localizzazioni dei pericoli, consentendo la preparazione per varie condizioni di emergenza.
Sia i piani nazionali di protezione civile sia i programmi nazionali di soccorso regolamentano procedure, capacità, attrezzature e personale per rispondere alle emergenze più severe. Entrambi si basano su scenari e modelli di pericolosità e rischio. Per il rischio vulcanico, sono definiti nei piani anche i livelli di allerta, le procedure di evacuazione e le strutture di risposta alle emergenze. Questi piani incorporano modelli di pericolosità vulcanica che collegano i parametri di monitoraggio alle probabilità di eruzione e ai fenomeni attesi, fornendo basi scientifiche per i protocolli decisionali (Dolce *et al*., 2020).

Esempi di uso dei modelli di rischio nella gestione delle emergenze e nel recupero post-evento

Durante un'emergenza, i modelli di pericolosità e rischio supportano il processo decisionale nella fase operativa attraverso previsioni dei fenomeni e valutazioni degli impatti in tempo reale. La gestione del rischio idrogeologico è un esempio di questa integrazione, con reti di monitoraggio nazionali e regionali che forniscono dati continui su precipitazioni, livelli dei fiumi e umidità del suolo (https://mappe.protezionecivile.gov.it/en/risks-maps-and-dashboards/radar-map/). I modelli meteorologici prevedono la distribuzione delle precipitazioni, mentre i modelli idrologici traducono queste previsioni in probabilità di occorrenza di inondazioni e frane. Sulla base di queste previsioni, le autorità di protezione civile emettono poi le allerte, attivando conseguenti misure di preparazione e comportamenti di autoprotezione (https://rischi.protezionecivile.gov.it/en/meteo-hydro/alert/).
Nelle prime ore successive a terremoti severi, le stime preliminari dei danni guidano le operazioni di soccorso, la predispo-

Examples of use of risk models in prevention and preparedness
Risk models support prevention and preparedness activities through systematic assessment of hazards, exposure, and vulnerability. The Italian National Risk Assessment (https://www.protezionecivile.gov.it/static/5cffeb32c9803b0bddce533947555cf1/Documento_sulla_Valutazione_nazionale_dei_rischi.pdf), for instance, provides a comprehensive evaluation of risks, incorporating multiple hazards and considering their potential impacts on population, economy, environment, and cultural heritage. Depending on the considered risk, it may inform national civil protection planning, resource allocation decisions, and prevention strategy prioritisation.
Structural prevention initiatives aim to reduce vulnerability through interventions on buildings, infrastructure, and territorial systems. The National Seismic Prevention Plan (Dolce *et al*., 2021), for example, coordinates efforts to improve seismic safety across multiple sectors, and to guide intervention programmes. Economic models support cost-benefit analyses, which inform funding allocation and implementation scheduling.
As for seismic risk and building codes, in Italy the regulation has evolved from prescriptive approaches toward a performance-based design framework that explicitly considers expected ground motion intensities and structural response characteristics (NTC, 2018).
Civil protection planning at national, regional, and local levels relies on risk scenarios to define operational procedures, resource requirements, and coordination mechanisms (https://servizio-nazionale.protezionecivile.gov.it/en/approfondimento/civil-protection-planning/). Scenario development utilises hazard models to define potential event characteristics, combined with exposure databases and vulnerability functions to estimate impacts. Planning scenarios consider different hazard intensities and locations, enabling preparation for various contingencies.
National rescue programmes and plans rule procedures, capabilities, equipment, and personnel to respond to major emergencies. They both rely on hazard and risk models and scenarios. For volcanic risk, alert levels, evacuation procedures, and emergency response structures are also defined in the plans, which incorporate volcanic hazard models that link monitoring parameters to eruption probabilities and expected phenomena, providing scientific foundations for decision-making protocols (Dolce *et al*., 2020).

Examples of use of risk models in emergency management and recovery
During an emergency, hazard and risk models support operational decision-making through real-time forecasting and impact assessment. Hydrogeological risk management exemplifies this integration, with national and regional monitoring networks providing continuous data on precipitation, river levels, and soil moisture (https://mappe.protezionecivile.gov.it/en/risks-maps-and-dashboards/radar-map/). Meteorological models forecast precipitation patterns, while hydrological models translate these forecasts into flood and landslide probability of occurrence. Civil protection authorities issue alerts based on these fore-

sizione dei ricoveri temporanei e la mobilitazione delle risorse. Le mappe di scuotimento, generate in base ai dati acquisiti dalle reti di monitoraggio sismico, rappresentano la distribuzione del moto del suolo (https://shakemap.ingv.it/). Queste mappe, combinate con database di esposizione degli edifici e funzioni di fragilità, consentono modellazioni speditive delle perdite attese (https://rischi.protezionecivile.gov.it/en/seismic/activities/emergency-planning-and-damage-scenarios/), che vengono poi aggiornate man mano che i rilievi sul campo forniscono osservazioni dirette dei danni.

La gestione delle crisi vulcaniche integra il monitoraggio in continuo con modelli a supporto delle decisioni che mettono in relazione fenomeni osservabili e probabilità di eruzione. I sistemi di monitoraggio multi-parametrici registrano la sismicità, la deformazione del suolo, le emissioni di gas e le variazioni di falda e geochimiche (https://www.ov.ingv.it/index.php). Modelli ad albero degli eventi interpretano questi segnali all'interno di schemi concettuali relativi alla dinamica dei sistemi vulcanici, aggiornando le stime di probabilità di eruzione man mano che i dati provenienti dal monitoraggio evolvono. I sistemi di livelli di allerta traducono soglie di probabilità in stati operativi, ciascuno associato a specifiche azioni di protezione civile.

In tutti questi esempi, una sfida importante sta nel gestire le incertezze preservando la fiducia del pubblico e assicurando che venga dato séguito ai messaggi ufficiali, una volta emessi (Bebbington *et al*., 2025).

Infine, durante la fase di recupero post-evento, i modelli di rischio, vincolati da indagini dettagliate sui danni agli edifici, possono essere utilizzati per stabilire le priorità e pianificare gli interventi di ricostruzione, e per allocare le risorse (Oliveira *et al*., 2017). Questi modelli includono valutazioni sulla sicurezza strutturale e stime dei costi di riparazione, informando le politiche riguardanti gli alloggi temporanei, il supporto economico e gli standard per la ricostruzione definitiva. La pianificazione della fase di recupero incorpora sempre più i principi del "*build back better*" (ricostruire meglio) per ridurre la vulnerabilità futura. I modelli di rischio supportano questo approccio, identificando misure di riduzione della vulnerabilità e quantificando le conseguenti riduzioni di rischio attese; consentono così decisioni consapevoli sugli investimenti destinati alle fasi di recupero e di ricostruzione.

Esempi di uso dei modelli di rischio nella comunicazione del rischio

La percezione dei rischi di disastro influenza le iniziative di prevenzione e preparazione, l'efficacia della risposta in emergenza e l'accettazione delle politiche connesse. Le valutazioni scientifiche di un rischio spesso divergono dalle percezioni pubbliche del medesimo, riflettendo differenze nel modo in cui esperti e persone comuni valutano probabilità, conseguenze e livelli di rischio accettabili (ad es., Cugliari *et al*., 2022; Mafuko Nyandwi *et al*., 2023). Le strategie di comunicazione tentano di colmare questo divario traducendo le valutazioni tecniche del rischio in formati accessibili (ad es., Pielke, 2007).

Le mappe di pericolosità e rischio sono anche utilizzate come strumenti di visualizzazione, fornendo modelli spaziali dell'intensità dei pericoli e dei livelli di rischio. Esse possono migliorare la percezione del rischio fornendo stime oggettive delle probabilità e degli impatti; tuttavia, tradurre informazioni probabilistiche in formati che possano essere compresi "intuitiva-

casts, triggering preparedness measures and self-protection behaviours (https://rischi.protezionecivile.gov.it/en/meteo-hydro/alert/).

In the first hours following severe earthquakes, preliminary damage estimates guide rescue operations, temporary shelter provision, and resource mobilisation. Shake maps, generated from seismic monitoring networks, characterise ground motion distribution (https://shakemap.ingv.it/). These maps, combined with building exposure databases and fragility functions, enable rapid modelling of expected losses (https://rischi.protezionecivile.gov.it/en/seismic/activities/emergency-planning-and-damage-scenarios/), which are then updated as field surveys provide direct damage observations.

Volcanic crisis management integrates continuous monitoring with decision support models linking observable phenomena to eruption probabilities. Multi-parametric monitoring systems track seismicity, ground deformation, gas emissions, and geochemical variations (https://www.ov.ingv.it/index.php). Event tree models interpret these signals within conceptual frameworks of volcanic system dynamics, updating eruption probability estimates as monitoring data evolve. Alert level systems translate probability thresholds into operational states, each associated with specific civil protection actions.

In all these examples, a major challenge lies in managing uncertainties while maintaining public trust and ensuring that warnings are taken seriously when issued (Bebbington *et al*., 2025).

Finally, during the post-emergency recovery phase, risk models, constrained by detailed building damage surveys, can be used to prioritise and plan reconstruction interventions, and allocate resources (Oliveira *et al*., 2017). They include structural safety evaluations and repair cost estimation. These data inform policies regarding temporary housing, economic support, and permanent reconstruction standards. Recovery planning increasingly incorporates build-back-better principles to reduce future vulnerability. Risk models support this approach by identifying vulnerability reduction measures, and by quantifying expected future risk reductions, enabling informed decisions about recovery and reconstruction investments.

Examples of use of risk models in risk communication

Risk perception influences prevention and preparedness initiatives, emergency response effectiveness, and policy acceptance. Scientific risk assessments often diverge from public risk perceptions, reflecting differences in how experts and laypeople evaluate probabilities, consequences, and acceptable risk levels (e.g., Cugliari *et al*., 2022; Mafuko Nyandwi *et al*., 2023). Communication strategies attempt to bridge this gap by translating technical risk assessments into accessible formats (e.g., Pielke, 2007).

Hazard and risk maps serve as visualisation tools, conveying spatial patterns of hazard intensities and risk levels. They can inform perception by providing objective probability and consequence estimates. However, translating probabilistic information into formats that can be intuitively understood remains challenging. Comparative risk frameworks help contextualise risks from natural and human-induced hazards against more familiar risks,

mente" rimane una sfida aperta. Schemi di confronto fra rischi aiutano a contestualizzare i rischi causati da pericoli naturali e antropici rispetto a rischi più familiari per il pubblico, anche se occorre prestare attenzione per evitare confronti inappropriati (ad es., Savadori *et al*., 2022).
Le campagne di comunicazione del rischio impiegano vari approcci: coinvolgimento delle comunità, programmi educativi nelle scuole, materiali informativi pubblici ed esercizi di mappatura partecipata del rischio (ad es., campagna "Io non rischio"; https://www.iononrischio.gov.it/en/). La ricerca nelle scienze sociali contribuisce con approfondimenti sui fattori che influenzano la percezione del rischio e i comportamenti, sia della popolazione, sia dei decisori. La costruzione della fiducia tra autorità e popolazione rimane una priorità (Di Bucci e Savadori, 2018).

Discussione

Il cambiamento climatico sta introducendo sfide fondamentali alle modellazioni di pericolosità e rischio, alterando le proprietà statistiche dei fenomeni naturali e influenzando indirettamente la vulnerabilità e l'esposizione (Stalhandske *et al*., 2024). Gli approcci tradizionali assumono spesso la stazionarietà di fenomeni e processi, ma il cambiamento climatico viola questa assunzione, richiedendo che i modelli incorporino tendenze e processi non stazionari.
I pericoli idrogeologici appaiono particolarmente sensibili al cambiamento climatico, con aumenti previsti della siccità o nelle intensità e frequenze delle precipitazioni estreme; i modelli aggiornati devono tenere conto di queste tendenze. L'innalzamento del livello del mare esacerba i pericoli di inondazione ed erosione costiera, rendendo necessaria una revisione delle stime del rischio conseguente. Gli aumenti di temperatura influenzano il pericolo di incendi boschivi, ad esempio attraverso l'aumento di *stress* per la vegetazione e l'alterazione dei tassi di umidità del combustibile.
I modelli di vulnerabilità ed esposizione evolvono attraverso cambiamenti socioeconomici, processi di urbanizzazione e misure di adattamento; questa dinamica ha conseguenze anche per quei rischi che non sono direttamente correlati al cambiamento climatico. La concentrazione della popolazione nelle aree urbane aumenta l'esposizione, mentre l'invecchiamento del patrimonio edilizio e una sua manutenzione differita nel tempo possono aumentare la vulnerabilità fisica. Al contrario, i miglioramenti delle norme tecniche per le costruzioni e i programmi di adeguamento, miglioramento e rafforzamento riducono la vulnerabilità per le strutture più recenti o su cui si sia intervenuti.
Lo sviluppo economico aumenta il valore esposto dei beni a rischio anche quando la vulnerabilità fisica diminuisce. I cambiamenti demografici (invecchiamento della popolazione, modelli migratori) influenzano le dimensioni della vulnerabilità sociale. La valutazione dinamica del rischio tenta di catturare anche questi cambiamenti nel tempo, effettuando delle proiezioni su come il rischio evolva in diversi scenari di cambiamento della pericolosità, di crescita dell'esposizione e di modifica della vulnerabilità, supportando ove possibile la pianificazione di lungo termine e le valutazioni delle strategie di adattamento.
Gli approcci multi-rischio riconoscono le interazioni tra i pericoli (Zschau J., 2017) e gli impatti cumulativi sui sistemi esposti. Le metodologie per la valutazione multi-rischio, tuttavia,

though care must be taken to avoid inappropriate comparisons (e.g., Savadori *et al*., 2022).
Risk communication campaigns employ various approaches, including community engagement, educational programmes in schools, public information materials, and participatory risk mapping exercises (e.g., I don't take risks, https://www.iononrischio.gov.it/en/). Social science research contributes insights into factors influencing risk perception and behaviours, both of population and decision-makers. Trust-building between authorities and populations remains a priority (Di Bucci and Savadori, 2018).

Discussion

Climate change is introducing fundamental challenges to hazard and risk modelling by altering the statistical properties of natural phenomena, and by indirectly affecting vulnerability and exposure (Stalhandske *et al*., 2024). Traditional approaches assume stationarity, but climate change violates this assumption, requiring models to incorporate trends and non-stationary processes.
Hydrogeological hazards appear particularly sensitive to climate change, with projected increases in extreme precipitation intensities and frequencies. Updated models must account for these trends. Sea level rise exacerbates coastal flooding and erosion hazards, necessitating revised coastal risk assessments. Temperature increases influence wildfire hazards through vegetation stress and altered fuel moisture regimes.
Vulnerability and exposure patterns evolve through socioeconomic changes, urbanisation processes, and adaptation measures. These dynamics have consequences also for risks that are not directly related to climate change. Population concentration in urban areas increases exposure, while ageing building stock and deferred maintenance can increase vulnerability. Conversely, building code improvements and retrofit programmes reduce vulnerability for newer or upgraded structures.
Economic development increases asset values at risk, even when physical vulnerability decreases. Demographic changes (population ageing, migration patterns) affect social vulnerability dimensions. Dynamic risk assessment attempts to capture these temporal changes, projecting how risk evolves under different scenarios of hazard change, exposure growth, and vulnerability modification, possibly supporting long-term planning and adaptation strategy evaluations.
Multi-risk approaches recognise interactions between hazards (Zschau, 2017) and cumulative impacts on exposed systems. However, methodological frameworks for multi-risk assessment remain under development, facing challenges in characterising hazard dependencies, modelling cascading effects, and aggregating risks across different hazard types. Some approaches employ risk matrices to compare hazards qualitatively, while quantitative methods attempt to calculate compound probabilities and cumulative losses.
Spatial multi-risk assessment identifies areas exposed to multiple hazards, supporting prioritisation of prevention measures that address multiple disaster events simultaneously. Temporal aspects of multi-risk consider how antecedent events modify vulnerability to subsequent hazards, e.g.,

rimangono ancora in fase di sviluppo, affrontando sfide nella caratterizzazione delle dipendenze tra i pericoli, nella modellazione degli effetti a cascata e nell'aggregazione dei rischi a partire da diversi tipi di pericolo. Alcuni approcci impiegano matrici di rischio per confrontare qualitativamente i pericoli, mentre i metodi quantitativi tentano di calcolare probabilità composite e perdite cumulative.

La valutazione spaziale multi-rischio identifica aree esposte a molteplici pericoli, supportando la definizione delle priorità rispetto a misure di prevenzione che affrontino simultaneamente più eventi disastrosi. Gli aspetti temporali del multi-rischio considerano come gli eventi antecedenti modifichino la vulnerabilità rispetto a successivi fenomeni pericolosi: ad esempio, il danno dovuto a un terremoto severo che aumenta la vulnerabilità degli edifici rispetto agli *aftershock*, o il deterioramento legato alle condizioni meteorologiche rispetto all'impatto di fenomeni seguenti.

Le prospettive europee per la protezione civile enfatizzano l'utilizzo di approcci armonizzati (*all-hazard*) alla valutazione del rischio. A scala globale, il Quadro di Sendai per la Riduzione del Rischio di Disastri 2015-2030 (https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030) stabilisce obiettivi a livello da internazionale a locale per ridurre la mortalità da disastri, la numerosità della popolazione colpita, le perdite economiche e i danni alle infrastrutture critiche. In questo modo, il Quadro indirizza gli sforzi per aggiornare le metodologie di valutazione del rischio ed espandere la loro applicazione.

L'intelligenza artificiale (IA) e il *machine learning*, infine, offrono opportunità del tutto nuove per migliorare i modelli di rischio. Le applicazioni includono avanzamenti nella previsione dei pericoli attraverso il riconoscimento di *pattern* nei dati di monitoraggio, la valutazione automatica dei danni da immagini satellitari, l'ottimizzazione dell'allocazione delle risorse in emergenza. Tuttavia, gli approcci che si avvalgono dell'IA richiedono un'attenta validazione e una debita considerazione dei limiti del metodo, incluse le dipendenze dalla qualità dei dati e i potenziali *bias* nei *set* di dati di addestramento.

Considerazioni finali

I modelli di pericolosità e di rischio costituiscono strumenti essenziali per il DRM e le attività di protezione civile in Italia, supportando il processo decisionale attraverso tutte le sue fasi. L'integrazione efficace della conoscenza scientifica nel contesto operativo richiede una collaborazione continua tra comunità scientifica e autorità di protezione civile. Lo sviluppo dei modelli deve bilanciare il rigore e il consenso scientifico con l'applicabilità operativa, assicurando che gli *output* rispondano praticamente alle esigenze decisionali, pur mantenendo solidità metodologica. La quantificazione e la comunicazione dell'incertezza rappresentano aspetti critici, poiché gli *stakeholder* chiedono di comprendere i livelli di affidabilità associati alle previsioni e alle valutazioni. Gli sviluppi futuri dei modelli includono una modellazione multi-rischio sempre più avanzata, una migliore integrazione degli effetti del cambiamento climatico e delle dimensioni di vulnerabilità sociale, l'esplorazione delle applicazioni dell'IA. Gli investimenti continui nelle reti di monitoraggio, nell'infrastruttura dati e nelle capacità di modellazione supporteranno questi progressi.

In definitiva, l'utilizzo dei modelli di rischio di disastro dipende dal loro contributo alla riduzione degli impatti degli eventi

when seismic damage increases building susceptibility to aftershocks or weather-related deterioration.

European perspectives on civil protection emphasise harmonised, all-hazard approaches to risk assessment. At the global scale, the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030 (https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030) establishes international targets for reducing disaster mortality, affected populations, economic losses, and critical infrastructure damage. These commitments drive efforts to improve risk assessment methodologies and expand their application.

Finally, artificial Intelligence (AI) and machine learning offer emerging opportunities for enhancing risk models. Applications include improving hazard forecasting through pattern recognition in monitoring data, automated damage assessment from satellite imagery, and optimisation of emergency resource allocation. However, AI approaches require careful validation and consideration of limitations, including data quality dependencies and potential biases in training datasets.

Final remarks

Hazard and risk models constitute essential tools for DRM and civil protection activities in Italy, supporting decision-making across all DRM phases. Effective integration of scientific knowledge into operational frameworks requires ongoing collaboration between research communities and civil protection authorities. Model development must balance scientific rigor and consensus with operational applicability, ensuring that outputs address practical decision needs while maintaining methodological soundness. Uncertainty quantification and communication are critical aspects, as stakeholders require an understanding of the levels of reliability associated with forecasting and assessments. Future directions include enhanced multi-risk modelling, improved integration of climate change effects and social vulnerability dimensions, besides exploration of AI applications. Continued investment in monitoring networks, data infrastructure, and modelling capabilities will support these advances.

Ultimately, the use of risk models depends on their contribution to reducing disaster impacts and enhancing community resilience through informed decision-making and effective DRM strategies.

ACKNOWLEDGMENTS

The contents of this publication present the author's ideas, and do not necessarily correspond to the official opinion and policies of the Italian Civil Protection Department.

catastrofici e al miglioramento della resilienza della comunità, che avvengono attraverso un processo decisionale informato volto all'adozione di strategie efficaci di DRM.

RINGRAZIAMENTI

I contenuti di questa pubblicazione rappresentano le idee dell'autrice e non corrispondono necessariamente all'opinione ufficiale e alle politiche del Dipartimento della Protezione Civile italiana.

REFERENCES

Bebbington M., Barsotti S., Marzocchi W., Tadini A., Widiwijayanti C., Wright H. (2025), "Forecasting During Volcanic Crises", *EarthArXiv*. https://doi.org/10.31223/X5243J.

Cugliari L., Cerase A., Amato A. (2022), "Tsunami risk perception, a state-of-the-art review with a focus in the NEAM region", *FEART*, Vol. 10. https://www.frontiersin.org/journals/earth-science/articles/10.3389/feart.2022.995536 ISSN=2296-6463.

Di Bucci D., Savadori L. (2018), "Defining the acceptable level of risk for civil protection purposes: a behavioral perspective on the decision process", *Nat. Haz.*, Vol. 90 n. 1, pp. 293-324. Available at: https://doi.org/10.1007/s11069-017-3046-5.

Dolce M., Di Bucci D. (2015), "Civil Protection Achievements and Critical Issues in Seismology and Earthquake Engineering Research", in: A. Ansal (Ed), *Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology*, Vol. 2. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-319-16964-4_2.

Dolce M., Miozzo A., Di Bucci D., Alessandrini L., Bastia S., Bertuccioli P., Bilotta D., Ciolli S., De Siervo G., Fabi D., Madeo L., Panunzi E., Silvestri V. (2020), *Civil Protection in Italy. Basic Training in Civil Protection*. Civil Protection Department. 229 pp. ISBN: 9791281195011. Available at: https://www.protezionecivile.gov.it/it/pubblicazione/civil-protection-italy-basic-training-civil-protection.

Dolce M., Speranza E., De Martino G., Conte C., Giordano F. (2021), "The implementation of the Italian National Seismic Prevention Plan: A focus on the seismic upgrading of critical buildings", *IJDRR*, Vol. 62, p. 102391. Available at: https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102391.

Guidoboni E., Ferrari G., Mariotti D., Comastri A., Tarabusi G., Sgattoni G., Valensise G. (2018), *CFTI5Med, Catalogo dei Forti Terremoti in Italia (461 a.C.-1997) e nell'area Mediterranea (760 a.C.-1500),* INGV. Available at: https://doi.org/10.6092/ingv.it-cfti5

Legislative Decree 49 (2010), Implementation of Directive 2007/60/EC on the assessment and management of flood risks (Floods Directive). Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, 23.02.2010.

Legislative Decree 1 (2018), Civil Protection Code (Codice della Protezione Civile). Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, 2.01.2018.

Mafuko Nyandwi B., Kervyn M., Habiyaremye F.M., Kervyn F., Michellier C. (2023), "Differences in volcanic risk perception among Goma's population before the Nyiragongo eruption of May 2021, Virunga volcanic province (DR Congo)", *Nat. Haz. Earth Syst. Sci.*, Vol. 23, pp. 933-953. Available at: https://doi.org/10.5194/nhess-23-933-2023.

NTC (2018), Decreto ministeriale 17.01.2018. Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni». (18A00716) GU Serie Generale n.42 del 20-02-2018 - Suppl. Ordinario n. 8.

Oliveira C.S., De Almeida B., Di Bucci D., Dolce M., Havekes H., Kemp V., Simonet C., Thorvaldsdottir S., Twigg J., Williams R. (2017), "Recovery and avoiding risk creation". in: Poljanšek K., Marín Ferrer M., De Groeve T., Clark I. (Eds), *Science for disaster risk management 2017: knowing better and losing less*. Chapter 5.3. Available at: https://doi.org/10.2788/842809.

Pielke R.A. Jr (2012), *The honest broker. Making sense of science in policy and politics*. Cambridge University Press. Available at: https://doi.org/10.1017/CBO9780511818110.

Reichenbach P., Rossi M., Malamud B., Mihir M., Guzzetti F. (2018), "A review of statistically-based landslide susceptibility models", *Earth-Science Rev.*, Vol. 180, pp. 60-91. Available at: https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001.

Savadori L., Ronzani P., Sillari G., Di Bucci D., Dolce M. (2022), "Communicating seismic risk information: The effect of risk comparisons on risk perception sensitivity", *FComm*, Vol. 7, p. 743172. Available at: https://doi.org/10.3389/fcomm.2022.743172.

Stalhandske Z., Steinmann C.B., Meiler S., Sauer I.J., Vogt T., Bresch D.N., Kropf C.M. (2024), "Global multi-hazard risk assessment in a changing climate", *Sci. Rep*, Vol. 14, p. 5875. Available at: https://doi.org/10.1038/s41598-024-55775-2.

Trigila A., Lastoria B., Iadanza C., Bussettini M., Mariani S., D'Ascola F., Salmeri A., Cassese M.L., Pesarino V., Di Paola G., Romeo S., Rischia I., Dessì B., Spizzichino D., Licata V., Gallozzi P.L. (2025), Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio - 2024. ISPRA, Rapporti 415/2025. Available at: https://www.isprambiente.gov.it/files2025/pubblicazioni/rapporti/rapporto_ispra_dissesto_idrogeologico_ed2024_web.pdf.

Zschau, J. (2017), "Where are we with multihazards, multirisks assessment capacities?", in: Poljansek, K., Marin Ferrer, M., De Groeve, T., Clark, I. (Eds.), *Science for disaster risk management 2017: knowing better and losing less*, European Union, pp. 98-115. Available at: https://doi.org/10.2788/688605.

Filippo Giorgi, giorgi@ictp.it
International Centre for Theoretical Physics, Italia

Abstract. Il sistema climatico terrestre è un sistema complesso e non lineare, la cui evoluzione futura non può essere prevista in modo deterministico, ma solo stimata in termini probabilistici attraverso scenari di emissione e simulazioni modellistiche. In questo quadro, il rischio associato al cambiamento climatico può essere definito come l'interazione tra probabilità di eventi meteoclimatici, esposizione e vulnerabilità. Le evidenze osservative e le proiezioni modellistiche indicano un aumento senza precedenti delle concentrazioni di gas serra e della temperatura media globale (IPCC, 2021), con conseguente intensificazione del ciclo idrologico, incremento della frequenza e severità degli eventi estremi, fusione dei ghiacciai e innalzamento del livello del mare. Le aree urbane e costiere risultano particolarmente esposte, mentre regioni quali il Mediterraneo si configurano come hotspot climatici, caratterizzati da un riscaldamento superiore alla media globale. La riduzione del rischio richiede un approccio integrato che combini mitigazione delle emissioni e politiche di adattamento su scala locale, al fine di evitare il superamento di punti di non ritorno del sistema climatico e mantenere i rischi entro soglie compatibili con lo sviluppo sostenibile.

Parole chiave: Rischio climatico; Eventi estremi; Vulnerabilità; Esposizione; Adattamento; Mitigazione.

Il sistema climatico terrestre è formato da diverse componenti che interagiscono fra di loro in maniera non-lineare: atmosfera, oceani, biosfera, criosfera e litosfera (tramite il vulcanismo). A queste, dall'inizio dell'era industriale, o il cosiddetto Antropocene, dobbiamo aggiungere l'antroposfera, cioè la società umana. Ciascuna di queste componenti, poi, è essa stessa un sistema complesso, non-lineare e caotico, cosa che rende il sistema Terra uno dei più complessi studiati dalla scienza odierna. Questa complessità intrinseca rende di fatto impossibile prevedere in maniera deterministica l'evoluzione del clima futuro. A questo riguardo, per esempio, nessuno può prevedere come si evolveranno i forzanti esterni del clima, come le emissioni di gas serra dovute allo sviluppo socio-economico della società, le eruzioni vulcaniche o l'attività del sole. L'obiettivo della "previsione" climatica non è dunque quello di prevedere con accuratezza l'evoluzione del clima, ma di stimare il ventaglio di possibili condizioni climatiche future in risposta a ipotesi plausibili (chiamate scenari) di evoluzioni future dei forzanti esterni (per esempio gli scenari di emissione di gas serra). Questo processo deve anche incorporare il contributo della variabilità naturale interna del sistema climatico legata alla sua natura non-lineare e caotica. Ai possibili stati climatici futuri si può poi assegnare una certa probabilità usando tecniche per lo più basate sull'uso di insiemi di molte simulazioni di clima futuro con diversi modelli climatici, scenari di emissione e condizioni iniziali delle componenti più lente del sistema climatico (e.g. gli oceani). In altre parole, l'obiettivo della "previsione" climatica non è di simulare quale sarà l'evoluzione precisa del clima futuro ma di riprodurre il più accuratamente possibile la distribuzione di probabilità di tutte le plausibili evoluzioni.

Il concetto di rischio legato al cambiamento climatico va dunque considerato all'interno di questo contesto. In generale, il rischio viene definito come l'intersezione (o il prodotto) di tre variabili (Fig. 1): la probabilità di un certo impatto meteo-climatico; l'esposizione di un soggetto a questo impatto; e la vulnerabilità del soggetto esposto all'impatto considerato. La probabilità di impatto meteo-climatico può poi essere decomposta nella probabilità che accada un certo evento meteoclimatico moltiplicata per l'impatto di questo evento sul territorio. Infatti, eventi ad alta probabilità ma basso impatto possono dare lo stesso contributo al rischio di eventi ad alto impatto ma bassa probabilità. Se una sola delle quantità che compongono il rischio è bassa o nulla, allora il rischio è basso o nullo. Per esempio, potrebbe esserci una alta probabilità di eventi piovosi

Climate Change Risk

Abstract. The Earth's climate system is a complex and non-linear system, whose future evolution cannot be predicted deterministically but only estimated probabilistically through emission scenarios and climate model simulations. Within this framework, climate change risk can be defined as the interaction among the probability of weather and climate events, exposure, and vulnerability. Observational evidence and model projections indicate unprecedented increases in greenhouse gas concentrations and global mean temperature (IPCC, 2021), resulting in hydrological cycle intensification, more frequent and severe extreme events, glacier retreat, and sea-level rise. Urban and coastal areas are particularly exposed, while regions such as the Mediterranean are recognised as climate hotspots, characterised by warming rates above the global average. Risk reduction requires an integrated approach combining emission mitigation and locally tailored adaptation policies to avoid crossing climate system tipping points, and to keep risks within thresholds compatible with sustainable development.

Keywords: Climate risk; Extreme events; Vulnerability; Exposure; Adaptation; Mitigation.

The Earth's climate system is composed of several interacting components that influence one another in a non-linear manner, namely the atmosphere, the oceans, the biosphere, the cryosphere, and the lithosphere (through volcanism). Since the beginning of the industrial era, often referred to as the Anthropocene, the anthroposphere – that is, human society – must also be considered an integral component of the climate system. Each of these components is itself a complex, non-linear, and chaotic system. As a result, the Earth system ranks among the most complex objects studied by modern science. This intrinsic complexity makes it effectively impossible to predict the future evolution of climate in a fully deterministic way. For example, the evolution of external climate forcing cannot be accurately foreseen. These include greenhouse gas emissions linked to socio-economic development, volcanic eruptions, and variations in solar activity. The objective of climate "prediction" is, therefore, not to forecast the precise evolution of climate. Rather, it is to estimate the range of possible future climatic conditions in response to plausible assumptions about the evolution of external forcing, commonly referred to as scenarios (for example, greenhouse gas emission scenarios). This process must also account for the internal natural variability of the climate system, which arises

ISSN online: 2239-0243 | © 2025 Author(s) | http://www.fupress.com/techne | DOI: 10.36253/techne-20470
Open access, peer-reviewed article published by Firenze University Press (https://www.fupress.com) and distributed, except where otherwise noted, under the terms of the CC BY 4.0 License for content and CC0 1.0 Universal for metadata

01 | Descrizione schematica del concetto di rischio
Schematic representation of the concept of risk



con impatto di carattere alluvionale in una certa area, ma se nessuno vive in questa area (cioè si ha esposizione 0), o se i soggetti a questi eventi alluvionali hanno una tecnologia tale da non subire danni (cioè si ha 0 vulnerabilità), allora il rischio è nullo. Ne consegue che per ridurre il rischio associato al cambiamento climatico si può ridurre la probabilità di occorrenza di eventi meteoclimatici estremi tramite la mitigazione (vedi sotto), si può ridurre l'esposizione, per esempio non costruire edifici ai margini di fiumi che possano esondare, o diminuire la vulnerabilità, per esempio costruendo edifici più resistenti.
Anche se il clima futuro non può essere previsto in maniera deterministica, le osservazioni e le simulazioni climatiche (che vengono solitamente chiamate "proiezioni" di clima futuro) ci danno diverse indicazioni su come alcune caratteristiche del sistema climatico stanno cambiando e continueranno a cambiare in risposta al riscaldamento globale. A questo riguardo, va chiarito che esiste ormai un larghissimo, se non quasi unanime, consenso all'interno della comunità scientifica che studia il cambiamento climatico che il riscaldamento globale è in atto ed è dovuto per la maggior parte alle emissioni di gas serra da attività umane, in primis le emissioni di anidride carbonica dall'uso di combustibili fossili e le emissioni di metano dall'uso di allevamenti intensivi e dalle perdite durante il processo di estrazione. Dall'inizio del ventesimo secolo, la concentrazione di anidride carbonica in atmosfera è aumentata di circa 50% e quella di metano è più che raddoppiata. In risposta a questi aumenti la temperatura globale è salita di circa 1.25 oC. Per tutte queste quantità le velocità di crescita sono senza precedenti almeno negli ultimi 11500 anni (il periodo dell'Olocene) (IPCC, 2021).

Quali sono dunque le modifiche del sistema climatico indotte dal riscaldamento globale che impattano maggiormente la società umana? Ovviamente ce ne sono tante, ma qui ne vogliamo sottolineare alcune che costituiscono forse i rischi maggiori per diversi settori socioeconomici. Una è l'"intensificazione del ciclo idrologico". Una atmosfera più calda è più energetica e può contenere più vapor d'acqua (per la legge di Clausius-Clapeyron). Di conseguenza, in queste condizioni quando piove tende a farlo più intensamente, e questo aumenta la probabilità, e quindi il rischio, di eventi estremi di carattere alluvionale. Al tempo stesso, i modelli ci dicono che la frequenza degli eventi piovosi tende a diminuire con il riscaldamento globale, cioè in media si allungano i periodi secchi, cosa che, insieme alle temperature più elevate, tende ad aumentare la probabilità e il rischio di eventi siccitosi. In altre parole, il riscaldamento globale porta ad un regime di piogge più intense ma meno frequenti. Infatti, osservazioni per gli ultimi 40 anni mostrano come la frequenza di eventi piovosi estremi e di eventi di carattere siccitoso sono

from its non-linear and chaotic nature. Probabilities can then be assigned to potential future climate states using approaches that primarily rely on ensembles of climate simulations. These ensembles combine different climate models, emission scenarios, and initial conditions, particularly for the slower components of the climate system, such as the oceans. In other words, the aim of climate "prediction" is not to reproduce a single, exact future trajectory, but to represent, as accurately as possible, the probability distribution of plausible climate evolution paths.
The concept of climate-change risk must, therefore, be understood within this framework. In general, risk is defined as the intersection (or product) of three variables (Fig. 1), precisely the probability of a given meteorological or climatic impact, the exposure of a subject to that impact, and the vulnerability of the exposed subject. The probability of a meteorological or climatic impact can be further decomposed into two elements, namely the likelihood of a specific event occurring, and the magnitude of its impact on a given territory. As a result, high-probability, low-impact events may contribute to overall risk in a manner comparable to low-probability, high-impact events. If any one of the three risk components is low or zero, the overall risk is correspondingly low or negligible. For example, a region may experience a high probability of flood-related precipitation events. However, if no one lives in that area (i.e., exposure is zero), or if the exposed population has technologies and infrastructure that prevent damage (i.e., vulnerability is low or zero), the resulting risk remains negligible. Climate-change risk can, therefore, be reduced by acting on any of its components, precisely by lowering the probability of extreme meteorological events through mitigation (see below), by reducing exposure (for example, by avoiding construction in areas subject to flooding), or by decreasing vulnerability (for instance, through more resilient infrastructure).
Although future climate cannot be predicted in a deterministic manner, observations and climate simulations – commonly referred to as climate projections – provide robust indications of how key characteristics of the climate system are changing, and are expected to continue changing in response to global warming. In this context, it is important to emphasise that there is now very broad, if not near-unanimous, scientific consensus that global warming is occurring, and that it is largely driven by greenhouse gas emissions from human activities. These emissions are primarily associated with carbon dioxide released through fossil fuel combustion and methane emitted by intensive livestock farming, and by leakages during fossil-fuel extraction. Since the early twentieth century, atmospheric carbon dioxide concentrations have increased by approximately 50%, while methane concentrations have more than doubled. In response, global mean surface temperature has risen by about 1.25 °C. For all these variables, the observed rates of change are unprecedented over at least the past 11,500 years, corresponding to the Holocene period (IPCC, 2021).
Which climate-system changes induced by global warming have the greatest impact on human society? While many changes are occurring, a subset poses particularly significant risks across multiple socio-economic

in aumento su molte aree del globo (IPCC, 2021). Tra gli effetti più evidenti del riscaldamento globale vi è l'aumento della frequenza e intensità delle ondate di calore, fenomeno che si sta riscontrando su quasi tutte le aree continentali e marine del globo (IPCC, 2021). Basti ricordare le diverse ondate di calore record che hanno colpito l'Europa negli ultimi 25 anni causando decine di migliaia di vittime e ingenti danni all'agricoltura.

Un altro importante fenomeno legato al riscaldamento globale è quello della fusione dei ghiacciai continentali e del conseguente innalzamento del livello del mare. La maggior parte dei ghiacciai su tutti i continenti è già in fase di recessione, e in particolare la massa di quasi tutti i ghiacciai delle Alpi Europee è in forte diminuzione. Alcuni studi hanno stimato che anche nello scenario più ottimistico circa il 70% di tutti i ghiacciai Alpini è destinato a scomparire entro la fine del ventunesimo secolo. L'importanza dei ghiacciai risiede nel fatto che essi sono i maggiori serbatoi di acqua dolce sul pianeta, e quindi la loro fusione implica una perdita di questa risorsa che già oggi non è sufficiente per tutta la popolazione mondiale. L'acqua sarà probabilmente il più prezioso dei beni del ventunesimo secolo a causa del quale si potranno sviluppare forti tensioni geopolitiche.

I ghiacci marini stanno subendo la stessa sorte dei ghiacciai continentali. Dati da satellite mostrano che la copertura dei ghiacci a fine estate in Artico è diminuita di quasi la metà rispetto agli anni '80, e molti ritengono che avremo un Artico senza ghiaccio a fine estate entro qualche decade. In Antartide la perdita dei ghiacci continentali riguarda per lo più le zone costiere dell'Antartide Occidentale e della penisola Antartica. Queste si manifestano spesso come eventi molto spettacolari di frantumazione di enormi banchise di ghiaccio che dal continente si estendono sul mare, come quello occorso alla banchisa Larsen B nel marzo del 2002.

L'acqua che fonde dai ghiacciai continentali, insieme con quella proveniente dalle grandi calotte di ghiaccio della Groenlandia e dell'Antartide Occidentale, confluisce negli oceani e contribuisce, insieme con l'espansione termica dell'acqua, all'innalzamento del livello del mare. Questo innalzamento aumenta la frequenza di eventi alluvionali costieri, mareggiate sempre più distruttive e intrusione di acqua marina nel suolo, e quindi costituisce un importante elemento rischio per le aree costiere. L'innalzamento del livello del mare è un tema centrale nell'ambito del dibattito sugli impatti del riscaldamento globale perché una grande e crescente porzione della popolazione mondiale risiede soprattutto nelle grandi aree urbane tropicali di paesi poveri e quindi in condizioni spesso degradate. Questo implica una alta esposizione insieme ad una forte vulnerabilità, che risulta quindi in un alto rischio.

Dall'inizio del ventesimo secolo il livello del mare globale è salito di circa 20 cm, e questo andamento è in fase di accelerazione. Le simulazioni di scenario dell'ultima generazione di modelli climatici danno un possibile innalzamento fino a quasi un metro (IPCC, 2021). Tuttavia, studi recenti indicano che i ghiacci della Groenlandia stanno fondendo ad una velocità maggiore di quello che era stato stimato qualche anno fa, e che questo fenomeno è in fase di forte accelerazione. Se una parte significante della calotta della Groenlandia dovesse fondere, l'aumento del livello del mare potrebbe raggiungere diversi metri, che avrebbe ovviamente un impatto devastante sulle aree costiere del pianeta.

Infine, un importante aspetto del riscaldamento globale è che i suoi impatti non sono distribuiti in maniera omogenea sul-

sectors. One key process is the so-called *intensification of the hydrological cycle*. A warmer atmosphere is more energetic, and can hold greater amounts of water vapour, as described by the Clausius – Clapeyron relationship. As a consequence, when precipitation occurs, it tends to be more intense. This increases both the probability and the associated risk of extreme flood events. At the same time, climate models indicate that the overall frequency of precipitation events tends to decrease with global warming, resulting in longer dry periods on average. When combined with higher temperatures, this shift increases the probability and risk of drought. In other words, global warming leads to precipitation regimes characterised by less frequent but more intense rainfall. Observations over the past four decades confirm this pattern, showing increasing frequencies of both extreme precipitation events and drought across many regions of the world (IPCC, 2021). Closely related to these changes is the rise in the frequency and intensity of heatwaves, a phenomenon documented across nearly all continental and marine regions (IPCC, 2021). In Europe, several record-breaking heatwaves over the past 25 years have caused tens of thousands of deaths and substantial agricultural losses.

Another major consequence of global warming is the widespread melting of continental glaciers, and the associated rise in sea level. Glaciers on all continents are currently retreating, and the mass of nearly all European Alpine glaciers is declining rapidly. Several studies estimate that, even under the most optimistic scenarios, approximately 70% of Alpine glaciers are likely to disappear by the end of the twenty-first century. Glaciers are of critical importance because they are the largest reservoirs of freshwater on the planet. Hence, their loss implies a substantial reduction in a resource that is already insufficient to meet global demand. Water scarcity is expected to intensify over the course of the twenty-first century, potentially making freshwater one of the most valuable resources and a source of increasing geopolitical tension.

Sea ice is experiencing a similar decline. Satellite observations show that Arctic summer sea-ice extent has decreased by nearly half, compared to the 1980s, and many studies project the possibility of an ice-free Arctic during late summer within the next few decades.

In Antarctica, ice loss primarily affects the coastal regions of West Antarctica and the Antarctic Peninsula. This loss often manifests as large-scale disintegration events of ice shelves extending from the continent into the ocean, such as the collapse of the Larsen B Ice Shelf in March 2002.

Meltwater from continental glaciers, together with contributions from the Greenland and West Antarctic ice sheets, flows into the oceans and contributes to sea-level rise, along with the thermal expansion of seawater. Rising sea levels increase the frequency of coastal flooding, intensify storm surges, and promote saltwater intrusion into soils. Together, these processes represent a major risk factor for coastal regions.

Sea-level rise is a central issue in assessments of the impact of global-warming because a large and growing proportion of the world's population resides in coastal areas. This is particularly true for large tropical cities in low-income countries, where living

la superficie terrestre, ma esistono delle regioni, che vengono chiamate "Zone calde" (o "Hotspots") che sono particolarmente sensibili al riscaldamento globale per le loro caratteristiche e la loro collocazione geografica. La zona calda per eccellenza è l'Artico dove la temperatura sta salendo ad una velocità che è circa quattro volte maggiore della media globale. La causa principale di questa amplificazione del riscaldamento sull'Artico è il "feedback" o processo di retroazione, del ghiaccio. I processi di retroazione sono essenzialmente dei processi che tendono ad accelerare autoalimentandosi. Nel caso del ghiaccio, questo ha una alta riflettività della luce solare, e quando fonde, scopre la superficie sottostante che in genere ha una riflettività minore. Questo causa un aumento dell'assorbimento della radiazione solare da parte della superficie; quindi, un ulteriore riscaldamento che fonde più ghiaccio, scopre nuova superficie più scura e così via.

Una seconda importante zona calda del riscaldamento globale è proprio la regione del Mediterraneo, che si sta riscaldando ad una velocità di 1.5-2 volte la media globale. Nel caso del Mediterraneo, questo è dovuto al fatto che il riscaldamento globale provoca una deviazione verso i poli delle perturbazioni di medie latitudini. Quindi, perturbazioni che normalmente porterebbero pioggia sul Mediterraneo lo fanno invece sul centro e nord Europa. Questo fa sì che sul Mediterraneo si generino condizioni di clima più secche e con meno nuvolosità, con un conseguente aumento delle temperature. Sia le osservazioni per le ultime decadi che le simulazioni con modelli climatici confermano questo andamento verso condizioni molto calde e secche sull'area del Mediterraneo, simili a quanto accaduto nell'estate del 2003. L'importanza della presenza di zone calde nel pianeta è che spesso queste si trovano in aree povere e quindi anche molto vulnerabili, come alcune zone dell'Amazzonia, del Centro America o dell'Africa equatoriale, e questo potrebbe causare flussi migratori di portata sempre maggiore.

Dopo avere dato degli esempi dei rischi associati al cambiamento climatico, la domanda si pone di come affrontarli. Come già accennato, possiamo partire dalla definizione di rischio e agire riducendo le sue tre componenti: probabilità di eventi meteo-climatici ad alto impatto, esposizione agli impatti e vulnerabilità. Partendo da quest'ultimo aspetto, il tema della vulnerabilità è sostanzialmente legato a quello dell'adattamento, e cioè implementare delle politiche tese ad aumentare la resilienza di diversi settori socio-economici agli impatti meteo-climatici del riscaldamento globale. L'adattamento ha una natura locale, perché gli impatti cambiano da luogo a luogo. Per esempio, nelle zone costiere le politiche di impatto includeranno azioni come la costruzione di barriere costiere per contenere gli effetti di mareggiate e intrusione di acqua salina. In zone agricole interne l'adattamento può coinvolgere una migliore gestione dell'irrigazione o l'uso di culture più resistenti alle alte temperature, mentre in aree fluviali l'innalzamento dei margini dei fiumi aiuterebbero ad evitare esondazioni legate all'aumento di frequenza e intensità di eventi piovosi estremi. Questo tipo di interventi aumenta la resilienza, diminuisce la vulnerabilità e quindi diminuisce il rischio.

Di interesse speciale in questo contesto sono le aree urbane, che sono particolarmente vulnerabili all'aumento di temperatura e ondate di calore a causa dell'effetto "isola di calore". La ridotta presenza di vegetazione nelle città riduce l'evaporazione, che è uno dei principali meccanismi di raffrescamento del suolo. Questo fa sì che, specialmente durante le stagioni calde e insieme con il calore rilasciato da traffico, impianti di riscaldamento

conditions are often already degraded. The combination of high exposure and high vulnerability in these regions results in elevated climate-related risk.

Since the early twentieth century, global mean sea level has risen by approximately 20 cm, and this rise is accelerating. Simulations from the latest generation of climate models project a possible increase of nearly one metre by 2100 (IPCC, 2021). However, recent studies indicate that ice loss from Greenland is occurring more rapidly than previously estimated, and is continuing to accelerate. If a substantial portion of the Greenland ice sheet were to melt, sea-level rise could reach several metres, with potentially devastating consequences for coastal regions worldwide.

Finally, an important characteristic of global warming is that its impacts are not evenly distributed across the Earth's surface. Certain regions – commonly referred to as hotspots – are particularly sensitive to warming because of their physical properties and geographic location. The Arctic is the most prominent hotspot, with temperatures increasing at approximately four times the global average. This amplified warming is primarily driven by the ice–albedo feedback. Ice has a high reflectivity, but as it melts, it exposes darker underlying surfaces that absorb more solar radiation. This increased absorption leads to further warming and additional ice loss, creating a self-reinforcing cycle.

Another major hotspot is the Mediterranean region, which is warming at a rate approximately 1.5–2 times faster than the global average. This enhanced warming is largely driven by a poleward shift of mid-latitude storm tracks under global warming. As a result, weather systems that would normally bring precipitation to the Mediterranean increasingly affect central and northern Europe instead. Consequently, the Mediterranean region experiences drier conditions, reduced cloud cover, and higher temperatures. Both observational records from recent decades and climate-model simulations consistently indicate a shift toward hotter and drier conditions, similar to those observed during the summer of 2003.

The importance of climate hotspots lies in the fact that many are located in low-income and highly vulnerable regions, such as parts of the Amazon, Central America, and equatorial Africa. In these areas, climate impacts may contribute to increasingly large migration flows.

Having outlined several climate-change-related risks, the question arises of how these risks can be addressed. As discussed earlier, risk can be reduced by acting on its three components, namely the probability of high-impact meteorological events, exposure to those impacts, and vulnerability. Starting with vulnerability, this dimension is closely linked to adaptation, defined as the implementation of policies aimed at increasing the resilience of socio-economic sectors to climate-related impacts. Adaptation is inherently local, as climate impacts vary across regions. In coastal areas, adaptation measures may include the construction of coastal barriers to reduce the effects of storm surges and saltwater intrusion. In inland agricultural regions, adaptation strategies may involve improved irrigation management or the adoption of crop varieties that are more resistant to heat stress. In river basins, reinforcing riverbanks can help limit flooding associated with more frequent and

e condizionamento e così via, le temperature nelle aree urbane siano anche di diversi gradi maggiori di quelle delle zone rurali limitrofe. Già oggi esistono metropoli a latitudini tropicali in cui lo stress termico può eccedere per molti giorni la cosiddetta soglia di vivibilità, cioè temperature di 35 °C e umidità relativa del 95%. Al di sopra di queste soglie il corpo umano fa fatica a raffreddarsi e questo causa importanti problemi cardiovascolari che possono portare anche al decesso, come accadde per esempio durante le ondate di calore dell'estate del 2003 in Europa. Molti studi hanno mostrato che le aree di invivibilità così definite si estenderebbero marcatamente in diversi scenari di riscaldamento futuro. Aumentare la resilienza degli ambienti urbani con una architettura che incentivi la creazione di verde urbano o altre tecniche per rinfrescare gli ambienti urbani è quindi una priorità di molte città.

Chiaramente, il problema della vulnerabilità è anche legato a quello della povertà, perché i paesi più poveri sono anche più vulnerabili. Infatti, un indicatore della capacità di adattamento è proprio dato dal logaritmo del prodotto interno lordo pro capite. Quindi un aumento della resilienza delle popolazioni è certamente collegato anche ad uno sviluppo maggiore e delle popolazioni più povere e a una ripartizione più equa delle risorse del pianeta.

Passando al tema dell'esposizione, la riduzione di questa componente del rischio richiede per esempio che non si creino insediamenti umani o altre infrastrutture in aree che possono essere soggette all'impatto di eventi meteoclimatici estremi. Questo richiede una pianificazione territoriale che tenga conto del rischio legato al cambiamento climatico, un approccio ormai indispensabile vista la situazione attuale del riscaldamento globale. I flussi migratori in un certo senso possono considerarsi come tentativi di diminuire l'esposizione, ma ovviamente questo crea molti problemi aggiuntivi. Anche in questo caso si riconduce la questione alla dimensione socioeconomica: la riduzione della povertà rappresenta una leva fondamentale per contenere la vulnerabilità.

Come già menzionato il terzo elemento riguardante la riduzione del rischio è legato alla probabilità degli impatti di eventi meteoclimatici estremi e rientra nel campo della mitigazione ovvero la riduzione delle emissioni di gas serra per contenere il riscaldamento globale nei limiti gestibili con delle appropriate politiche di adattamento. Più le emissioni saranno ridotte, minore sarà il riscaldamento globale e il conseguente aumento di eventi meteoclimatici impattanti. La mitigazione è il tema centrale delle negoziazioni sul cambiamento climatico. Nell'accordo di Parigi del 2015 si è individuato l'obiettivo di contenere il riscaldamento globale al di sotto dei 2° C rispetto ai valori pre-industriali, ovvero circa 0.75 °C rispetto a quelli attuali. Si è anche individuata una traiettoria che consentirebbe di ottenere questo obiettivo, che richiedeva un picco di emissioni nel 2020 e poi una rapida riduzione fino ad arrivare a 0 emissioni nette nel 2050. L'obiettivo dell'accordo di Parigi è anche quello che consentirebbe al sistema Terra di non raggiungere i punti di non ritorno, come la fusione delle calotte di ghiaccio della Groenlandia e dell'Antartide occidentale, o il collasso della circolazione marina profonda che connette tutti gli oceani del globo (la cosiddetta "conveyor belt"). Questi punti di non ritorno costituirebbero delle modifiche profonde del sistema climatico con enormi impatti sul clima globale e conseguentemente sulla società umana.

La riduzione delle emissioni di gas serra si può ottenere tramite la "transizione ecologica" al cui centro c'è la decarbonizzazio-

intense precipitation events. Together, these interventions enhance resilience, reduce vulnerability, and ultimately lower climate-related risk.

Urban areas deserve particular attention because they are especially vulnerable to rising temperatures and heatwaves as a result of the urban heat-island effect. Reduced vegetation cover limits evapotranspiration, which is one of the primary natural cooling mechanisms. In addition, waste heat from traffic and from heating and cooling systems contributes to further warming. As a result, urban temperatures can exceed those of surrounding rural areas by several degrees, particularly during the warm season. Some tropical megacities already experience levels of thermal stress that exceed the so-called habitability threshold for many days each year. This threshold is commonly defined by air temperatures of approximately 35 °C combined with relative humidity near 95%. Under such conditions, the human body struggles to dissipate heat efficiently, leading to severe cardiovascular stress and increased mortality, as observed during the European heatwaves of 2003. Numerous studies indicate that areas experiencing these uninhabitable conditions are likely to expand substantially under future warming scenarios. Enhancing urban resilience through climate-responsive architecture, increased urban greenery, and other cooling strategies is, therefore, a priority for many cities.

Vulnerability is also closely linked to poverty, as lower-income countries and populations tend to be more exposed and less able to cope with climate impacts. Indeed, adaptive capacity is strongly correlated with the logarithm of per-capita gross domestic product. Enhancing population resilience is, therefore, closely tied to economic development, and to a more equitable distribution of global resources.

Reducing exposure – the second component of risk – requires, for example, avoiding the development of settlements and infrastructure in areas exposed to extreme climatic impacts. This, in turn, necessitates land-use planning that explicitly incorporates climate-change risk, an approach that is becoming increasingly essential under current warming trends. Migration flows can, in some respects, be interpreted as attempts to reduce exposure, although they introduce significant additional social and political challenges. Once again, reducing poverty emerges as a key strategy for lowering vulnerability and overall climate-related risk.

The third component of risk – impact probability – is addressed through mitigation, defined as the reduction of greenhouse gas emissions to limit global warming to levels that can be managed through adaptation policies. Lower emissions result in less warming and, consequently, in a reduced frequency and intensity of extreme climatic events. Mitigation lies at the core of international climate negotiations. The 2015 Paris Agreement established the objective of limiting global warming to well below 2 °C above pre-industrial levels (approximately 0.75 °C present-day levels). It also outlined a mitigation pathway involving peak emissions around 2020, followed by rapid reductions toward net-zero emissions by 2050.

Achieving this objective would reduce the likelihood of crossing critical climate tipping points, such as large-scale melting of the Greenland and West Antarctic ice sheets, or a collapse of the global

ne del sistema energetico, cioè il passaggio da energia prodotta con combustibili fossili a energia ottenuta da fonti rinnovabili pulite. Va detto comunque che non esiste una soluzione unica al problema della mitigazione, ma piuttosto un mosaico di politiche, che possiamo chiamare "mosaico della sostenibilità", che comprende opzioni multiple: efficienza energetica, decarbonizzazione del sistema energetico, riforestazione, economia circolare e a km 0, cattura e stoccaggio dell'anidride carbonica, uso del suolo, riduzione degli allevamenti intensivi e degli sprechi alimentari. Questo mosaico va perseguito in tutto il suo potenziale e può essere molto diverso da area ad area a seconda delle diverse esigenze e delle risorse dei diversi paesi.

Purtroppo, siamo ancora lontani dalla traiettoria indicata nell'accordo di Parigi e le emissioni di gas serra sono ancora in aumento. I modelli climatici ci dicono che se si seguirà una traiettoria "business as usual", cioè continuare ad andare avanti come stiamo facendo ora, potremmo raggiungere un riscaldamento globale di circa 4 °C entro il 2100, che significherebbe una perturbazione del sistema climatico senza precedenti che porterebbe ad uno sconvolgimento del clima della Terra con conseguenze non facilmente prevedibili. Quello che complica il processo di mitigazione è che mentre la conversione ecologica è avviata nei paesi industrializzati dell'Europa e in maniera minore negli Stati Uniti, questa è ancora lontana in molti paesi emergenti che stanno diventando grandi emittori di gas serra, come la Cina, l'India, il Sudamerica, il sud-est Asiatico e l'Africa. È quindi imperativo che lo sviluppo di questi paesi avvenga in un contesto di economia verde, e per questo è necessario un grande sforzo di cooperazione internazionale tecnologica ed economica. Questo tema è infatti al centro delle negoziazioni che avvengono nelle annuali Conferences of Parties (COP).

Nonostante ci sia ancora molto lavoro da fare per raggiungere l'obiettivo dell'accordo di Parigi, questo è ancora possibile, ma richiede uno sforzo deciso e soprattutto una implementazione urgente di quelli che abbiamo chiamato mosaici della sostenibilità. L'urgenza è dettata dal fatto che il tempo di vita medio dell'anidride carbonica in atmosfera è molto lungo, ordine di un centinaio di anni, e quindi più si aspetta a diminuire le emissioni, più l'anidride carbonica si accumulerà in atmosfera e più si dovranno implementare misure draconiane in futuro per rimanere entro l'obiettivo dell'accordo di Parigi.

In conclusione, come enfatizzato all'inizio di questo articolo, il sistema Terra è estremamente complesso e non-lineare, specialmente al tempo dell'Antropocene, e quindi è impossibile prevedere con accuratezza come il clima cambierà in futuro. Si possono però valutare i rischi associati alle decisioni che si prenderanno nei prossimi anni in termini di transizione ecologica e mitigazione del cambiamento climatico. Alcuni rischi sono gestibili con politiche di adattamento e cooperazione internazionale, ma bisogna evitare di raggiungere rischi così elevati da costituire una seria minaccia allo sviluppo sostenibile della società come oggi la conosciamo. Abbiamo una scelta di quale traiettoria seguire nel nostro sviluppo e questa scelta è un importante messaggio che lasceremo alle prossime generazioni.

REFERENCES

IPCC (2021). *The Science of Climate change. WGI contribution to the 6th Assessment Report of the Intergovenrmental Panel on Climate Change (IPCC)*, Masson-Delmotte *et al.* Eds., Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

ocean overturning circulation (the so-called "conveyor belt"). Crossing such thresholds would fundamentally alter the climate system and entail severe consequences for human societies.

Greenhouse gas mitigation can be pursued through the so-called ecological transition, which is centred on decarbonising the energy system by shifting from fossil fuels to clean, renewable energy sources. However, no single solution is sufficient. Effective mitigation, instead, requires a "*sustainability mosaic*" composed of multiple, complementary strategies. These include improvements in energy efficiency, expanded deployment of renewable energy, reforestation, the promotion of circular and local economies, carbon capture and storage, sustainable land-use practices, reductions in intensive livestock farming, and the minimisation of food waste. This mosaic of measures must be adapted to regional contexts, reflecting differences in local needs, capacities, and resource availability.

Unfortunately, current emission trends remain far from the pathway outlined in the Paris Agreement, with global greenhouse gas emissions still increasing. Climate models indicate that a business-as-usual trajectory could result in approximately 4 °C of global warming by 2100. Such a level of warming would represent an unprecedented perturbation of the Earth system, with potentially severe and difficult-to-predict consequences.

Mitigation efforts are further complicated by the uneven pace of the ecological transition across regions. While significant progress is underway in parts of Europe and, to a lesser extent, in the United States, mitigation remains limited in many emerging economies that are becoming major emitters, including China, India, South America, Southeast Asia, and Africa. Ensuring that development in these regions proceeds within a green-economy framework requires substantial international technological and financial cooperation, which constitutes a central focus of the annual Conferences of the Parties (COP).

Although substantial efforts are still required to achieve the goals of the Paris Agreement, these goals remain attainable if decisive action is taken. This is particularly true if sustainability-mosaic strategies are implemented without delay. The urgency of action is underscored by the long atmospheric lifetime of carbon dioxide – on the order of a century. Hence, delays in reducing emissions lead to continued accumulation in the atmosphere, and will require increasingly drastic mitigation measures in the future.

In conclusion, as emphasised at the outset, the Earth system is extremely complex and non-linear, particularly in the Anthropocene. This complexity makes precise prediction of future climate evolution impossible. However, it is possible to assess the risks associated with decisions taken in the coming years regarding the ecological transition and climate-change mitigation. Some risks can be managed through adaptation measures and international cooperation. It is also essential to avoid development pathways that would generate risks so severe as to threaten sustainable societal development as we know it. Therefore, humanity faces a critical choice regarding its future development trajectory. This choice will shape the environmental, social, and economic conditions inherited by future generations.

ADATTAMENTO CLIMATICO E PROGETTAZIONE: DALLA SCIENZA ALL'AZIONE ATTRAVERSO RICERCA AVANZATA E COMPETENZE DIFFUSE

Paola Mercogliano, https://orcid.org/0000-0001-7236-010X
Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici, Italia
paola.mercogliano@cmcc.it

Abstract. La crisi climatica è un fattore di rischio crescente per città, infrastrutture e paesaggi. L'aumento della temperatura media globale (oltre ~1,3°C rispetto al periodo preindustriale) e la maggiore frequenza e intensità degli estremi meteo-climatici stanno già incidendo su settori strategici come salute, economia e sicurezza. Accanto a politiche di mitigazione ambiziose, rendere operative le strategie di adattamento è ormai un'esigenza concreta della progettazione e della gestione del territorio. In questa filiera, il contributo delle scienze del clima non si limita a "fornire scenari". Include la costruzione di informazioni adatte all'uso per l'ambiente costruito: selezione dei dataset più appropriati, verifica della consistenza dei modelli rispetto alle osservazioni sul periodo passato e supporto alla lettura delle incertezze in modo compatibile con decisioni tecniche. L'esperienza maturata in percorsi di ricerca applicata e in collaborazioni con soggetti che operano su pianificazione, infrastrutture e gestione dei servizi mostra che il valore aggiunto, spesso, non è la sola messa a disposizione di dati climatici. È, piuttosto, la capacità di trasformarli in requisiti e soglie comprensibili per progettisti e amministrazioni e in sistemi di monitoraggio che consentano di correggere le scelte di adattamento nel tempo. Trasformare dati e scenari in scelte verificabili richiede una filiera multidisciplinare che conduca: (i) dalla disponibilità dei dati all'interpretazione tramite indicatori leggibili; (ii) a valutazioni di rischio che includano pericolo, esposizione, vulnerabilità e capacità adattiva; (iii) alla prioritizzazione e all'implementazione delle misure; (iv) fino al monitoraggio continuo dell'efficacia nel tempo. Tra i nodi più delicati vi è la co-progettazione con amministrazioni, professionisti e cittadini. Per essere efficace, richiede un linguaggio comune, confronto continuo e competenze innovative da parte della comunità scientifica, in particolare delle scienze del clima, così da massimizzare co-benefici ambientali e sociali e ridurre disuguaglianze che il cambiamento climatico tende ad amplificare.

Parole chiave: Adattamento climatico; Rischio climatico; Co-progettazione; Servizi climatici; Città resilienti.

L'adattamento al cambiamento climatico come requisito di progetto

L'adattamento al cambiamento climatico non deve più essere considerato un tema "di scenario": è una condizione attuale. La frequenza e l'intensità con cui si verificano fenomeni come ondate di calore, precipitazioni intense e siccità stanno mettendo sotto pressione la resilienza di ecosistemi e società. In questo contesto, l'adattamento comprende sia azioni trasformative (ad es. rinverdimento urbano, infrastrutture verdi e blu, riduzione dell'impermeabilizzazione) sia misure immateriali di formazione, educazione e preparazione dei territori. Tutti i settori sono coinvolti, tra questi: salute, economia, agricoltura, infrastrutture, turismo. Tuttavia, le misure di adattamento non sono uniche: cambiano in funzione delle caratteristiche locali e devono essere definite con il supporto di chi conosce e gestisce i contesti. Su questi temi cresce la consapevolezza e la collaborazione tra comunità scientifica e mondo tecnico-professionale. La sfida, oggi, è rendere questa collaborazione sistemica, cioè far sì che l'adattamento entri stabilmente nella progettazione e nella gestione.

Dal dato climatico alla decisione: una filiera operativa

Quali sono i fattori abilitanti per ottenere questa inclusione? Ci sono diversi aspetti da considerare. Un punto critico è la traduzione: un dataset climatico o una mappa di anomalia non diventano automaticamente informazione utile per stabilire priorità, confrontare varianti progettuali o definire criteri di gestione degli asset. Serve una filiera che porti dalla disponibilità e dall'elaborazione di dati di qualità, climatici e non solo (tutti quelli necessari a un'analisi di rischio), alla definizione di indicatori robusti, alla valutazione del rischio e, infine, alla decisione, includendo in modo trasparente gli attori che contribuiscono con conoscenze e responsabilità.

CLIMATE ADAPTATION AND DESIGN: FROM SCIENCE TO ACTION THROUGH ADVANCED RESEARCH AND WIDELY SHARED SKILLS

Abstract. The climate crisis is a growing risk for cities, infrastructure, and landscapes. The rise in global mean temperature (approximately more than ~1.3°C compared with the pre-industrial period), and the higher frequency and intensity of extreme weather and climate events are already affecting key sectors such as health, the economy, and safety. Alongside ambitious mitigation policies, making adaptation strategies workable is now a concrete need for design practice, as well as for land and asset management. In this chain of processes, climate science does not only "provide scenarios". It also builds information that can be used in the built environment, such as choosing the most suitable datasets, checking consistency between models and observations from the past, and helping decision-makers read uncertainties in a way that fits technical choices. Experience from applied research and from collaborations with actors working on planning, infrastructure, and service management shows that the added value is given by the ability to turn high quality and innovative data into requirements and thresholds that designers and administrations can understand, and into monitoring systems that allow adaptation choices to be improved over time. Generally speaking, the entire process "from data to actions" requires a multidisciplinary chain that leads: (i) from data availability to interpretation through clear indicators; (ii) to risk assessments that include hazard, exposure, vulnerability, and adaptive capacity; (iii) to prioritising and implementing measures; and (iv) to continuous monitoring of effectiveness over time. One of the most delicate steps is co-design with administrations, professionals, and citizens. To work well, it needs a shared language, ongoing dialogue, and innovative skills from the scientific community to both maximise environmental and social co-benefits, and reduce inequalities that climate change tends to worsen.

Keywords: Climate adaptation; Climate risk; Co-design; Climate services; Resilient cities.

Climate adaptation as a design requirement

Climate adaptation should no longer be seen as a "scenario topic". It is a present condition. The frequency and intensity of events such as heatwaves, heavy rainfall, and meteorological drought are putting the resilience of ecosystems and society under pressure. In this context, adaptation includes both transformative actions (e.g., urban greening, green and blue infrastructure, reducing soil sealing), and "soft" measures such as training, education, and preparedness of

ISSN online: 2239-0243 | © 2025 Author(s) | http://www.fupress.com/techne | DOI: 10.36253/techne-20469
Open access, peer-reviewed article published by Firenze University Press (https://www.fupress.com) and distributed, except where otherwise noted, under the terms of the CC BY 4.0 License for content and CC0 1.0 Universal for metadata

In questa filiera gli esperti di cambiamento climatico supportano diversi aspetti tra quali: lo sviluppo di modelli e strumenti che rappresentano le dinamiche complesse del sistema Terra; l'uso di osservazioni per calibrare e validare i modelli; (i) la caratterizzazione del pericolo, (ii) la stima degli impatti attesi, (iii) l'analisi del rischio e (iv) la selezione di misure con obiettivi misurabili. Riconoscere questo contributo significa anche riconoscere che gli scienziati del clima sono chiamati a competenze più ampie rispetto al passato e alla capacità di dialogo con altre discipline e ambiti applicativi.

In concreto, il valore aggiunto dei climatologi emerge in alcuni passaggi che, se trascurati, rendono fragile l'intera catena decisionale. Un primo passaggio è la qualificazione del dato: capire se un prodotto (osservazioni, rianalisi, proiezioni regionali) è adeguato alla scala e alla variabile d'interesse, e con quali limiti. Un secondo passaggio è la traduzione in indicatori: ad esempio passare da temperature o precipitazioni "medie" a grandezze utili alla progettazione (stress termico, frequenza di superamento di soglie, intensità e durata di eventi rilevanti). Un terzo passaggio è l'attribuzione funzionale: collegare l'indicatore a un meccanismo di impatto (salute, comfort, prestazioni dei materiali, capacità di drenaggio, domanda idrica), così che l'informazione climatica diventi una variabile di progetto e non un allegato descrittivo. Infine, i climatologi possono supportare la definizione di criteri di robustezza: non "predire un numero", ma fornire un quadro di plausibilità e di variabilità utile a stress test, scenari multipli e scelte che restino valide al variare delle condizioni.

Questo tipo di supporto richiede modalità di lavoro che favoriscano una collaborazione continuativa tra mondo tecnico-professionale e scienze del clima: tempi e formati compatibili con la progettazione, documentazione trasparente delle assunzioni (periodo di riferimento, scenari, metodi), e un percorso iterativo in cui dati e requisiti si raffinano insieme. In tale logica, i servizi climatici e le competenze presenti in enti di ricerca dedicati possono svolgere un ruolo di ponte tra produzione scientifica e applicazioni, aiutando amministrazioni e progettisti a integrare evidenze climatiche in modo coerente, replicabile e verificabile. Certamente un elemento essenziale per rendere davvero efficace questo processo rimane lo sviluppo della ricerca che rende disponibili scenari regionali e locali ad altissima risoluzione spazio-temporale, anche su domini complessi come città e montagne, aumentando l'affidabilità delle valutazioni e sviluppando tecniche per la gestione delle incertezze. In particolare, per rendere l'incertezza utilizzabile in ambito tecnico-professionale, è utile esplicitarla e governarla lungo la filiera. In pratica ciò significa: utilizzare più scenari e, ove possibile, più modelli; definire soglie e livelli di servizio; eseguire stress test delle soluzioni; e prevedere opzioni flessibili e aggiornabili (es. misure no-regret, soluzioni modulari). In questo modo l'incertezza non paralizza la decisione, ma diventa parte del criterio con cui si progettano robustezza, manutenzione e adattabilità nel tempo.

Framework condivisi di rischio per decidere le priorità di adattamento

Altro fattore importante per realizzare un processo di adattamento efficace è costruire un linguaggio comune tra chi contribuisce al processo, tra cui climatologi, architetti, ingegneri, urbanisti, esperti di salute pubblica e scienze sociali. Aiuta adottare *framework* condivisi, come quello dell'IPCC AR6: il

territories. All sectors are involved, including health, the economy, agriculture, infrastructure, and tourism. However, adaptation measures are not "one-size-fits-all". They depend on local features, and must be defined with the support of those who know and manage each context. Awareness is growing, and so is collaboration between the scientific community and the technical and professional world. Today's challenge is to make this collaboration systemic, so that adaptation becomes a stable part of design and management.

From climate data to decisions: an operational chain

What enables this systemic collaboration? Several aspects matter. A critical point is translation. Indeed, a climate dataset or an anomaly map does not automatically become useful information to set priorities, compare design options, or define criteria to manage assets. We need a chain that moves from the availability and processing of high-quality data, climatic and not only climatic (all data needed for a risk analysis), to robust indicators, to risk assessment, and finally to decisions, while transparently involving the actors who bring knowledge and responsibilities.

In this chain, climate-change experts support several steps, including developing models and tools that represent complex Earth-system dynamics; using observations to calibrate and validate models; (i) describing the hazard, (ii) estimating expected impacts, (iii) analysing risk, and (iv) selecting measures with measurable objectives. Recognising this contribution also means acknowledging that climate scientists are asked for broader skills than in the past, and for the ability to work with other disciplines and applied fields.

In practice, the added value of climatologists becomes clear in some steps that, if neglected, make the whole decision chain fragile. A first step is data qualification, understanding whether a product (observations, reanalyses, regional projections) fits the needed scale and variable, and with which limits. A second step is translation into indicators, for example by moving from "average" temperature or precipitation to quantities useful for design (heat stress, frequency of threshold exceedance, intensity and duration of relevant events). A third step is functional linkage, which means connecting the indicator to an impact mechanism (health, comfort, material performance, drainage capacity, water demand), so that climate information becomes a design variable and not just a descriptive annex. Finally, climatologists can support robust design criteria by not "predicting one number", but by providing a plausible range and variability that supports stress tests, multiple scenarios, and choices that remain valid as conditions change.

This kind of support calls for ways of working that encourage continuous collaboration between the technical and professional world and climate science, including timelines and formats that fit design processes, transparent documentation of assumptions (reference period, scenarios, methods), and an iterative path where data and requirements are refined together. In this approach, climate services and the skills present in dedicated research organisations can act as a bridge between scientific production and applications, helping administrations and designers

rischio nasce dall'interazione tra fattori quali pericolo, esposizione e vulnerabilità ed è modulato dalla capacità adattiva. Questa struttura, maturata nel tempo dalla comunità scientifica, è efficace perché ben chiarisce, per l'ambiente costruito, quattro domande chiave: cosa cambia nel clima; dove sono persone e beni; perché subiscono danni; quali risorse (*governance*, competenze, capitale sociale, infrastrutture e servizi) riducono gli impatti.
Proporre e usare questi *framework* è importante anche perché l'adattamento non può basarsi solo sul pericolo: la stessa variazione di pericolo può generare esiti opposti in contesti diversi. Una modesta variazione di temperatura in un quartiere denso, poco ventilato e privo di verde può produrre rischio elevato; lo stesso segnale in un tessuto permeabile e ombreggiato può avere conseguenze più contenute.

Competenze diffuse e co-progettazione: dal "top-down" a soluzioni condivise

Infine, rimane l'implementazione, spesso la fase più complessa. Le misure di adattamento modificano spazi, abitudini e accesso alle risorse e possono generare conflitti se percepite come interventi calati dall'alto. Per questo l'attuazione deve basarsi sulla co-progettazione e su competenze diffuse in amministrazioni, professionisti e comunità. Questa dimensione è anche una questione di giustizia: i costi dell'inazione non sono solo economici, ma anche sociali e distribuiti in modo diseguale, con impatti maggiori su gruppi vulnerabili (anziani, bambini, persone con fragilità, comunità a basso reddito o con scarso accesso ai servizi). Investire in formazione e capacità tecniche abilita una partecipazione reale e rende più probabile che le misure siano accettate, mantenute e aggiornate nel tempo. Per rendere l'adattamento parte ordinaria dell'azione pubblica e professionale, la filiera deve innestarsi nei dispositivi che guidano scelte e investimenti: strumenti urbanistici e di settore, regolamenti edilizi, piani di protezione civile, capitolati e criteri prestazionali per opere e servizi, programmi di manutenzione degli asset. In questo quadro, indicatori e soglie diventano requisiti: definiscono prestazioni attese, priorità territoriali, criteri per la scelta tra varianti progettuali e procedure di verifica nel tempo.
Dal punto di vista operativo, ciò implica che gli output della filiera (indicatori, soglie, mappe di priorità, criteri di robustezza) vengano tradotti in disposizioni attuative: ad esempio requisiti prestazionali nei regolamenti edilizi, criteri per la scelta delle soluzioni in capitolati e linee guida, condizioni di manutenzione e gestione come parte integrante della progettazione, e integrazione nei piani di protezione civile e nei piani di gestione del verde e delle acque. Questo innesto normativo e procedurale è essenziale per evitare che l'adattamento resti confinato a studi conoscitivi: è il passaggio che rende confrontabili le alternative, responsabilizza gli attori e permette di verificare nel tempo se le misure funzionano nelle condizioni reali.

Indicatori, soglie e valutazione dell'efficacia: misurare per migliorare

Una misura di adattamento è davvero "operativa" solo se è accompagnata da un sistema di monitoraggio che ne misuri nel tempo diversi aspetti tra i quali efficacia, robustezza e replicabilità, così da poterla correggere o aggiornare quando cambiano, ad esempio, condizioni climatiche, uso degli spazi e bisogni so-

integrate climate evidence in a coherent, repeatable, and verifiable way.
A key element for making this process truly effective is continued research that provides very high-resolution regional and local scenarios, also over complex domains such as cities and mountains. This increases the reliability of assessments, and improves methods to handle uncertainty. To make uncertainty usable in professional practice, it helps to make it explicit and manage it along the chain. In practice, this means using more than one scenario and, when possible, more than one model; defining thresholds and levels of service; running stress tests on solutions; and planning flexible and updatable options (e.g., no-regret measures, modular solutions). Hence, uncertainty does not block decisions but becomes part of the criteria used to design robustness, maintenance, and long-term adaptability.

Shared risk frameworks to set adaptation priorities

Another important factor for an effective adaptation process is building a shared language among those who contribute to it, including climatologists, architects, engineers, urban planners, public-health experts, and social scientists. It helps to adopt shared frameworks, such as IPCC AR6. Risk arises from the interaction of hazard, exposure, and vulnerability, and is shaped by adaptive capacity. Developed over time by the scientific community, this structure is effective because it clarifies four key questions for the built environment, precisely what is changing in the climate; where people and assets are; why they suffer damage; and which resources (governance, skills, social capital, infrastructure, services) reduce impacts.
Using these frameworks matters also because adaptation cannot be based on hazard alone. Indeed, the same change in hazard can lead to opposite outcomes in different contexts. A modest rise in temperature in a dense neighbourhood with low ventilation and little greenery can create high risk, while the same signal in a permeable and shaded urban fabric can have more limited consequences.

Widely shared skills and co-design: from "top-down" to shared solutions

Implementation remains the hardest phase. Adaptation measures change spaces, habits, and access to resources, and can create conflict if they are seen as imposed from above. Hence, delivery should be based on co-design, and on widely shared skills in administrations, professionals, and communities. This is also a matter of justice. The costs of inaction are not only economic, but also social and unevenly distributed, with stronger impacts on vulnerable groups (older people, children, people with health fragilities, low-income communities, or those with limited access to services). Investing in training and technical capacity enables actual participation, and makes it more likely that measures will be accepted, maintained, and updated over time. To make adaptation a routine part of public action and professional practice, the chain must be connected to the tools that guide choices and investments, precisely urban and sector plans, building regulations, civil protection plans, tender documents and performance criteria for works and services, and asset maintenance

ciali. Gli indicatori, quindi, non descrivono soltanto il contesto ma verificano se la misura raggiunge gli obiettivi, con quali effetti collaterali e a quali costi.
Per rendere questo monitoraggio più efficace, è utile pensare a un'integrazione tra fonti e competenze: osservazioni in situ e reti locali (anche a scala di quartiere), dati satellitari, archivi di segnalazioni e impatti, e prodotti climatici che consentano di leggere gli esiti in un contesto di variabilità meteorologica e di cambiamento in atto. In questa fase, le scienze del clima possono supportare la definizione di indicatori stabili e confrontabili (ad esempio attraverso normalizzazioni), riducendo il rischio di attribuire a una misura effetti dovuti invece alla sola variabilità interannuale. Inoltre, una collaborazione strutturata con chi produce e interpreta dati climatici facilita l'aggiornamento di soglie e baseline quando cambiano uso del suolo, esposizione e vulnerabilità, mantenendo nel tempo la coerenza tra obiettivi progettuali e condizioni climatiche osservate o attese.
È utile combinare indicatori di diversa natura, quali quelli di realizzazione, funzionamento, riduzione degli impatti, equità e fruizione, co-benefici ed effetti collaterali, costi e gestione e trasferibilità. Ad esempio per il verde urbano andrà valutata nel tempo, dandone visibilità a tutti gli attori, la copertura di chioma ottenuta dagli alberi nel tempo e sopravvivenza delle alberature alle diverse condizioni climatiche; lo stato idrico del suolo; riduzione di temperatura superficiale/aria e di indici di stress termico; aumento della fruizione e della permanenza nelle ore calde; fabbisogni irrigui e costi di manutenzione. Oppure nel caso del drenaggio urbano andranno valutati, ad esempio, i risultati della misura di adattamento implementata in termini di volumi infiltrati/trattenuti, riduzione dei picchi di portata e dei tempi di drenaggio; numero di allagamenti segnalati o misurati da sensori; percentuale di elementi ostruiti e interventi di pulizia; performance dopo eventi intensi (tempo di ripristino). Per rendere il monitoraggio utile alla decisione, conviene definire una baseline pre-intervento, una frequenza di osservazione e, ove possibile, confronti "prima-dopo" o con aree analoghe. Per attribuire correttamente gli esiti alla misura (e non alla sola variabilità meteo-climatica), è utile leggere le prestazioni in modo "normalizzato" rispetto alle condizioni dell'evento o della stagione (ad esempio confrontando periodi/anni con intensità comparabile, o usando indicatori per unità di evento). L'adozione di soglie, laddove possibile, consente di attivare revisioni puntuali (manutenzione, modifiche progettuali o misure complementari) e di documentare le condizioni per una replica efficace in altri contesti.

Conclusioni

Per l'ambiente costruito, l'adattamento può diventare un driver di qualità e innovazione se affrontato come un processo continuo che integra dati ad alta risoluzione, servizi climatici, cornici di rischio condivise, co-progettazione e monitoraggio degli esiti. L'obiettivo è rafforzare la capacità dei territori di anticipare, assorbire e trasformarsi, riducendo vulnerabilità e disuguaglianze e massimizzando co-benefici ambientali e sociali. In questa prospettiva, il contributo delle scienze del clima è soprattutto nel suggerire un metodo: ancorare la progettazione a soglie e livelli di servizio misurabili, per rendere confrontabili alternative e obiettivi; monitorare nel tempo gli esiti per apprendere e correggere, evitando interventi "una tantum" non verificati; e co-progettare per costruire soluzioni legittime e

programmes. In this framework, indicators and thresholds become requirements. They define expected performance, territorial priorities, criteria to choose between design options, and procedures to verify results over time.
From an operational point of view, this means that the outputs of the chain (indicators, thresholds, priority maps, robustness criteria) are turned into implementing provisions as, for example, performance requirements in building regulations; criteria to choose solutions in tenders and guidelines; maintenance and management conditions as an integral part of design; and integration into civil protection plans and into green and water management plans. This procedural and "regulatory" link is essential to avoid keeping adaptation within knowledge-only studies. It is the step that makes alternatives comparable, assigns responsibilities, and allows verification that measures work under real conditions.

Indicators, thresholds, and effectiveness: a measure to be improved

An adaptation measure is truly "operational" only if it is supported by a monitoring system that measures different aspects over time, including effectiveness, robustness, and replicability. This makes it possible to either correct or update the measure when, for example, climate conditions, land use, and social needs change. Therefore, indicators do not only describe the context, they verify whether the measure reaches its goals, with which side effects, and at what costs.
To make monitoring more effective, it is useful to combine sources and skills, including in-situ observations and local networks (also at neighbourhood scale), satellite data, archives of reports and impacts, and climate products that help read results within ongoing weather variability and climate change. In this phase, climate science can support the definition of stable, comparable indicators (for example through normalisation) by reducing the risk of attributing to a measure any effects that are, instead, the result of year-to-year variability. In addition, structured collaboration with those who produce and interpret climate data helps update thresholds and baselines when land use, exposure, and vulnerability change, keeping coherence over time between design objectives and observed or expected climate conditions.
It is useful to combine different types of indicators, such as those for delivery, functioning, impact reduction, equity and use, co-benefits and side effects, costs and management, and transferability. For example, for urban green areas, it is useful to assess over time—and make visible to all actors—the tree canopy cover achieved; the survival of trees under different climate conditions; soil water status; the reduction of surface and air temperature and heat-stress indices; increased use and time spent outdoors during hot hours; irrigation needs and maintenance costs. In the case of urban drainage, it is useful to assess, for example, infiltrated or retained volumes; reductions in peak flow and drainage time; the number of flood events reported or measured by sensors; the share of clogged elements and cleaning actions; and performance after intense events (recovery time). To make monitoring useful for decisions, it helps to define a pre-intervention baseline, an observation frequency, and, where possible, before-after com-

manutenibili, capaci di durare e adattarsi quando cambiano condizioni climatiche, uso degli spazi e bisogni sociali.
In quest'ottica, una collaborazione più strutturata tra chi pianifica e progetta e chi si occupa di cambiamento climatico può rafforzare la qualità e la trasparenza delle scelte.
Il passaggio dalla conoscenza all'azione beneficia in particolare di interazioni continuative, non episodiche: definizione congiunta degli obiettivi e delle soglie, scelta trasparente degli scenari e delle assunzioni, costruzione di indicatori interpretabili e confrontabili, e supporto allo sviluppo di stress test e soluzioni flessibili. Queste pratiche rendono più semplice replicare esperienze tra territori, documentare ciò che funziona e motivare scelte e investimenti anche in condizioni di incertezza, rafforzando la fiducia tra amministrazioni, professionisti e comunità.

REFERENCES

European Commission (2021), *Forging a climate-resilient Europe – the new EU Strategy on Adaptation to Climate Change, COM(2021) 82 final.* Available at: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52021DC0082.

European Commission (2025), *EU Mission on Adaptation to Climate Change.* Available at: https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/f5bb6378-5ba7-11f0-a9d0-01aa75ed71a1.

IPCC (2022), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. Available at: https://doi.org/10.1017/9781009325844.

MASE – Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (2023), *Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (PNACC).* Available at: https://www.mase.gov.it/portale/piano-nazionale-di-adattamento-ai-cambiamenti-climatici-pnacc.

UNFCCC (2023). Decision 2/CMA.5: "Global goal on adaptation (UAE Framework for Global Climate Resilience)", CMA 5 (COP28), Dubai, 2023, in: FCCC/PA/CMA/2023/16/Add.1. UN Climate Change (UNFCCC). Available at: https://unfccc.int/documents/637073.

parisons or comparisons with similar areas. To correctly attribute results to the measure (and not only to weather and climate variability), it is helpful to read performance in a "normalised" way with respect to event or seasonal conditions (for example by comparing periods/years with similar intensity, or using indicators per unit of event). Where possible, using thresholds allows targeted reviews (maintenance, design changes, or additional measures), and helps document the conditions for effective replication in other contexts.

Conclusions

For the built environment, adaptation can become a driver of quality and innovation if it is treated as a continuous process that combines high-resolution data, climate services, shared risk frameworks, co-design, and monitoring of outcomes. The goal is to strengthen the ability of territories to anticipate, absorb, and transform, reducing vulnerabilities and inequalities while maximising environmental and social co-benefits. In this view, the contribution of climate science is mainly methodological. Indeed, climate science anchors design to measurable thresholds and levels of service. It makes alternatives and goals comparable, and monitors outcomes over time to learn and correct, avoiding one-off actions that are not checked. It uses a co-design approach to build solutions that are legitimate and maintainable, able to last and adapt when climate conditions, land use, and social needs change.
In this perspective, a more structured collaboration between those who plan and design, and those who work on climate change can strengthen the quality and transparency of choices.
The move from knowledge to action particularly benefits from continuous, not occasional, interactions, such as jointly defining objectives and thresholds; transparently selecting scenarios and assumptions; building indicators that are interpretable and comparable; and supporting the development of stress tests and flexible solutions. These practices make it easier to replicate experiences across territories, document what works, and justify choices and investments even under uncertainty, strengthening trust among administrations, professionals, and communities.

RISCHI DEL SURRISCALDAMENTO URBANO: DALLE EVIDENZE ALL'INTERVENTO

Konstantina Vasilakopoulou[1], https://orcid.org/0000-0002-9235-0782 konstantina.vasilakopoulou@rmit.edu.au
Qinghua Lv[2], linsa080@hbut.edu.cn
Matthaios Santamouris[3], https://orcid.org/0000-0001-6076-3526 m.santamouris@unsw.edu.au
[1] School of Property, Construction and Project Management, Post-Carbon Research Centre, Royal Melbourne Institute of Technology (RMIT), Melbourne, Australia
[2] School of Science, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China
[3] School of Built Environment, University of New South Wales (UNSW), Sydney, Australia

Abstract. Il surriscaldamento urbano ha un impatto rilevante sui settori energetico, sanitario, ambientale e finanziario. Sebbene i rischi diretti siano chiaramente percepiti, gli impatti multidimensionali più ampi sono raramente compresi o adeguatamente valutati da decisori politici, mercati e altri stakeholder. Ciò è imputabile principalmente alla rilevante carenza di dati statistici e sociali di natura primaria, nonché all'assenza di studi specialistici dedicati. Questo contributo mira a identificare i principali ostacoli a una corretta valutazione dei rischi più ampi associati al surriscaldamento urbano. Elabora un processo organico articolato in nove fasi distinte, volto a valutare, pianificare e affrontare in modo efficace le sfide poste dai cambiamenti climatici a livello regionale. Esamina, inoltre, le strategie e le politiche da adottare per promuovere uno sviluppo sostenibile e una crescita economica attraverso l'attuazione di interventi su larga scala finalizzati alla mitigazione e all'adattamento agli effetti delle ondate di calore.

Keywords: Surriscaldamento urbano; Mitigazione; Adattamento; Energia; Salute; Crescita Economica.

Introduzione

Il surriscaldamento urbano è un fenomeno climatico ampiamente documentato, caratterizzato dallo sviluppo di temperature ambientali più elevate nelle aree urbane densamente edificate rispetto alle regioni rurali circostanti. Tale disparità è riconducibile ai processi di urbanizzazione, ai modelli di uso del suolo, alle emissioni di calore di origine antropica e alla riduzione di aree vegetate e corpi idrici, in grado di contribuire al raffrescamento (Santamouris, 2015). Le elevate temperature urbane determinano un aumento significativo della domanda energetica per il raffrescamento degli edifici, innalzano i picchi di carico elettrico e spesso rendono necessaria la realizzazione di ulteriori impianti di produzione energetica, con conseguente incremento dei costi di fornitura dell'elettricità. Inoltre, il surriscaldamento urbano riduce l'efficienza delle centrali termiche e nucleari, esercita una pressione rilevante sulle reti elettriche e contribuisce all'aumento delle concentrazioni di inquinanti nocivi, quali l'ozono troposferico (Santamouris, 2020).

Oltre agli impatti sulle infrastrutture e sui sistemi energetici, il surriscaldamento urbano comporta rilevanti implicazioni sociali e sanitarie. Esso colpisce in modo sproporzionato le popolazioni a basso reddito e vulnerabili, aumenta l'incidenza della violenza e determina un incremento della mortalità, della morbilità e dei disturbi di salute mentale associati all'esposizione al caldo. Sono state inoltre documentate perdite significative di produttività e riduzioni delle prestazioni cognitive, in particolare tra gli studenti (Santamouris, 2020). Un'analisi su larga scala dei dati climatici relativi al periodo 1983–2016, condotta su 13.115 città, ha mostrato che l'esposizione a condizioni termoigrometriche estreme, corrispondenti a temperature di bulbo umido (*wet-bulb* temperature) superiori a 30 °C, è aumentata di quasi il 200% nel 46% delle città analizzate, interessando circa 1,7 miliardi di persone (Tuholske *et al*., 2021).

Gli impatti del surriscaldamento urbano rappresentano pertanto una grave minaccia per le popolazioni urbane e costituiscono uno dei rischi più significativi per i gruppi sociali maggiormente esposti e vulnerabili, sia nei Paesi sviluppati sia in quelli in

RISKS AND URBAN OVERHEATING: FROM EVIDENCE TO INTERVENTION

Abstract. Urban overheating has a serious impact on the energy, health, environmental, and financial sectors. While the direct risks are clearly perceived, the broader multidimensional impacts are rarely understood or adequately assessed by decision-makers, markets, and other stakeholders. This is mainly due to the significant lack of primary statistical and social data, as well as the absence of specialised studies. This paper aims to identify the main obstacles to properly assessing the broader risks of urban overheating. It develops a comprehensive process comprising nine distinct phases to effectively evaluate, plan, and address the challenges of regional climate change. It also discusses strategies and policies to be adopted to promote sustainable development and economic growth through the implementation of large-scale heat mitigation and adaptation projects.

Keywords: Urban overheating; mitigation, adaptation, energy; health; economic growth.

Introduction

Urban overheating is a well-documented climatic phenomenon characterised by the development of higher ambient temperatures in densely built urban areas, compared to surrounding rural regions. This disparity arises from urbanisation, land-use patterns, anthropogenic heat emissions, and the reduction of natural sinks such as vegetation and water bodies (Santamouris, 2015). Elevated urban temperatures significantly increase cooling energy demand in buildings, raise peak electricity loads, and often necessitate the construction of additional power plants, thereby escalating the cost of electricity supply. Furthermore, overheating reduces the efficiency of thermal and nuclear power plants, places serious strain on electricity grids, and contributes to elevated concentrations of harmful pollutants such as ground-level ozone (Santamouris, 2020).

Beyond infrastructure and energy systems, urban overheating has profound social and health implications. It disproportionately affects low-income and vulnerable populations, exacerbates incidences of human violence, and increases heat-related mortality, morbidity, and mental health challenges. Productivity losses and declines in cognitive performance, particularly among students, have also been documented (Vasilakopoulou, 2025). A large-scale analysis of climatic data between 1983 and 2016 from 13,115 cities revealed that exposure to wet-bulb temperatures above 30 °C has increased by nearly 200% in 46% of these

ISSN online: 2239-0243 | © 2025 Author(s) | http://www.fupress.com/techne | DOI: 10.36253/techne-20468
Open access, peer-reviewed article published by Firenze University Press (https://www.fupress.com) and distributed, except where otherwise noted, under the terms of the CC BY 4.0 License for content and CC0 1.0 Universal for metadata

via di sviluppo (Santamouris e Kolokotsa, 2015). Gli effetti del fenomeno su energia, salute, ambiente ed economia sono stati ampiamente analizzati e quantificati in numerose città a livello globale (Haddad *et al*., 2022; Santamouris *et al*., 2020). Le proiezioni future delle condizioni climatiche urbane indicano un aumento sostanziale delle temperature ambientali, accompagnato da una crescita della frequenza e dell'intensità delle ondate di calore, esponendo diversi miliardi di persone a livelli di rischio estremo (Cool Coalition UNEP, 2025).

Nonostante l'entità del problema, la percezione del rischio e gli approcci alla previsione, alla prevenzione e alla gestione del surriscaldamento urbano variano considerevolmente tra decisori politici, attori sociali e popolazione generale nelle diverse regioni del mondo. Questo articolo si propone di analizzare e chiarire le condizioni prevalenti nelle città globali in relazione a: previsione, percezione, prevenzione e gestione dei rischi associati al surriscaldamento urbano. In particolare, esamina gli approcci adottati, individua le principali criticità riscontrate e valuta l'efficacia complessiva delle metodologie applicate.

Percezione del rischio di surriscaldamento urbano

Gli strumenti che influenzano la percezione del rischio associato al surriscaldamento urbano differiscono sostanzialmente tra decisori politici, attori sociali e popolazione generale. Ciascun gruppo interpreta e risponde alle minacce climatiche attraverso prospettive distinte, influenzate dai rispettivi ruoli, dalle risorse disponibili e dalle esperienze vissute.

Per i decisori politici, la percezione del rischio dovrebbe essere basata su conoscenze scientifiche ed evidenze tecnologiche derivate da studi dettagliati e specializzati. Una governance efficace richiede l'accesso sia a dati qualitativi sia a dati quantitativi che catturino:

- Entità del surriscaldamento: misurazioni precise delle anomalie di temperatura nelle aree urbane.
- Distribuzione spaziale e temporale: identificazione delle aree maggiormente surriscaldate e delle variazioni stagionali.
- Impatti relativi nei diversi settori: domanda energetica degrado ambientale, salute pubblica, produttività economica e resilienza globale.
- Impatti sociali attuali e futuri: effetti differenziati sui diversi gruppi sociali, con particolare enfasi sulle popolazioni vulnerabili e a basso reddito.
- Efficienza normativa: valutazione dei quadri regolatori esistenti, delle politiche e degli interventi, al fine di determinarne l'adeguatezza nella mitigazione dei rischi.

Informazioni complete consentono ai responsabili politici nei paesi sviluppati di apprendere dagli eventi passati e di progettare strategie basate su evidenze che bilancino le esigenze immediate con la resilienza a lungo termine. L'esperienza maturata in occasione di precedenti disastri di origine climatica rafforza la conoscenza istituzionale e contribuisce a migliorare la percezione del rischio, sia a livello pubblico sia governativo. Ad esempio, l'ondata di calore che ha colpito Parigi nel 2003 ha causato quasi 14.000 decessi, incidendo in modo sproporzionato sulle popolazioni a basso reddito. Questo evento ha contribuito a colmare parzialmente il divario tra previsione scientifica e consapevolezza pubblica, favorendo l'adozione di politiche e interventi più efficaci in materia di salute e caldo (Poumadère *et al*., 2005). In

cities, impacting approximately 1.7 billion people (Tuholske *et al*., 2021).

The impacts of urban overheating pose a serious threat to urban populations, and are one of the most significant risks for disadvantaged groups in both developed and developing countries (Santamouris and Kolokotsa, 2015). Its effects on energy, health, the environment, and the economy have been extensively assessed and quantified across numerous cities worldwide (Haddad *et al*., 2022; Santamouris *et al*., 2020). Future projections of urban climatic conditions indicate a substantial rise in ambient temperatures, alongside increases in the frequency and intensity of heat waves, placing several billion people under extreme risk (Cool Coalition UNEP, 2025).

Although the scale of the problem is immense, perceptions of risk and approaches to predict, prevent and manage differ considerably among decision-makers, social stakeholders, and the general population across different regions of the world. This paper analyses and describes the conditions prevailing in global cities with respect to risk prediction, perception, prevention, and the management of risks associated with urban overheating. It examines the approaches adopted, identifies the principal challenges encountered, and evaluates the overall effectiveness of the methodologies applied.

Urban Overheating Risk Perception

The tools that shape the perception of risk associated with urban overheating differ substantially among decision-makers, social stakeholders, and the general population. Each group interprets and responds to climatic threats through distinct lenses, influenced by their roles, resources, and lived experiences.

For decision-makers, risk perception should be grounded in scientific knowledge and technological evidence derived from detailed, specialised studies. Effective governance requires access to both qualitative and quantitative data that capture:

- Magnitude of overheating: precise measurements of temperature anomalies in urban areas.
- Spatial and temporal distribution: identification of hotspots and seasonal variations.
- Relative impacts across domains: energy demand, environmental degradation, public health, economic productivity, and global resilience.
- Current and projected societal impacts: differentiated effects on various social groups, with particular emphasis on vulnerable and low-income populations.
- Regulatory efficiency: assessment of existing frameworks, policies, and interventions to determine their adequacy in mitigating risks.

Comprehensive information enables policymakers in developed countries to learn from past events, and to design evidence-based strategies that balance immediate needs with long-term resilience. Experience accumulated through previous climate-related disasters strengthens institutional knowledge, and improves both public and governmental risk perception. For example, the 2003 Paris heatwave resulted in nearly 14,000 deaths, disproportionately affecting low-income populations. This severe event helped partially bridge the gap between scientific prediction and public awareness, ultimately prompting more effective

molti Paesi in via di sviluppo, la mancanza di dati comparabili e di adeguate capacità analitiche limita la possibilità di formulare e attuare strategie di adattamento efficaci.

L'accesso a dati storici e informazioni dipende in larga misura dalla qualità dei sistemi di documentazione a livello nazionale o regionale. Ciò include la disponibilità di statistiche affidabili e dettagliate, il ricorso a competenze specialistiche e la realizzazione di studi settoriali volti a valutare l'entità e gli impatti del surriscaldamento. Sebbene tale documentazione sia spesso pienamente o parzialmente disponibile nei Paesi sviluppati, essa risulta quasi del tutto assente nei Paesi in via di sviluppo. Le principali cause comprendono infrastrutture sanitarie carenti, capacità di monitoraggio limitate e risorse insufficienti. Nei Paesi a più alto reddito, la popolazione tende a mostrare una maggiore resilienza agli impatti del cambiamento climatico grazie a condizioni economiche più favorevoli, a una più solida organizzazione del settore pubblico, a mercati assicurativi maggiormente sviluppati e all'accesso a tecnologie avanzate. Nei Paesi in via di sviluppo, i decessi legati al caldo sono sistematicamente sottostimati a causa dell'assenza di sistemi di registrazione medica adeguati e della formazione insufficiente del personale sanitario nell'identificare e registrare le effettive cause di morte (Chakraborty, 2024). L'attesa intensificazione del cambiamento climatico potrebbe ampliare ulteriormente il divario tra decessi riportati e reali, a meno che i sistemi di documentazione e statistica non vengano rafforzati. L'attesa intensificazione del cambiamento climatico potrebbe ampliare ulteriormente il divario tra i decessi riportati e quelli effettivi, qualora i sistemi di documentazione e di raccolta statistica non vengano adeguatamente rafforzati (Ritchie, 2024).

Inoltre, nei Paesi in via di sviluppo le informazioni e i dati disponibili sulle popolazioni vulnerabili e a basso reddito sono spesso incompleti, incoerenti e poco affidabili, a causa della scarsità di risorse statistiche, di infrastrutture carenti e di vincoli istituzionali (World Bank, n.d.). L'assenza di dati affidabili rende incerta la comprensione delle caratteristiche e degli effetti degli eventi climatici estremi e limita l'azione efficace sia del settore pubblico sia di quello privato. I Paesi a basso reddito subiscono danni sproporzionatamente più elevati rispetto alle nazioni sviluppate: i disastri nelle regioni più povere causano un numero significativamente maggiore di decessi e producono perdite sociali ed economiche più durature. Infrastrutture limitate, sistemi sanitari fragili e ridotta capacità di adattamento accentuano ulteriormente la vulnerabilità, rendendo questi Paesi meno in grado di riprendersi dagli shock climatici. Dal 1960, pur a fronte di un numero simile di eventi estremi, i Paesi in via di sviluppo hanno registrato un numero di decessi per evento superiore di oltre sei volte rispetto ai Paesi a più alto reddito (Shilpi *et al*., 2025).

Mentre il cambiamento climatico sta aggravando povertà e vulnerabilità nei Paesi in via di sviluppo e a basso reddito, la persistente carenza di dati affidabili ostacola in modo significativo la progettazione e l'attuazione di politiche e interventi efficaci di mitigazione e adattamento (Stanford University, 2025). Nei Paesi in via di sviluppo, inoltre, risultano spesso scarse anche le informazioni di base necessarie alla popolazione per valutare i rischi climatici: ad esempio, nell'Africa subsahariana sono disponibili solo 1,6 stazioni meteorologiche per ogni milione di abitanti, contro le 217 presenti negli Stati Uniti (Shilpi *et al*., 2025).

heat-health policies and interventions (Poumadère *et al*., 2005). In contrast, many developing countries lack access to comparable data and analytical capacity, constraining their ability to formulate and implement robust adaptation strategies.

Access to historical data and information largely depends on the quality of national or regional documentation systems. This encompasses the availability of reliable and detailed statistics, expert consultation, and sectoral studies that assess the scale and impact of overheating. While such documentation is often fully or partially available in developed countries, it is almost entirely lacking in developing nations. The primary reasons include weak health infrastructure, limited monitoring capacity, and scarce resources. People in wealthier countries tend to be more resilient to the impacts of climate change because of higher income and savings, stronger public sector organisation, more developed insurance markets, and access to advanced technologies. Heat-related deaths in developing countries are systematically underreported due to the absence of robust medical reporting systems, and to the inadequate training of medical professionals to both identify and record heat-related deaths (Chakraborty, 2024). The expected intensification of climate change may further widen the gap between reported and actual deaths, unless documentation and statistical systems are strengthened (Ritchie, 2024).

Additionally, the information and data available on vulnerable and low-income populations in developing countries are often incomplete, inconsistent, and unreliable due to limited statistical resources, weak infrastructure, and institutional constraints (World Bank, n.d.). Lack of reliable information generates ambiguity about the characteristics and the impact of extreme climate events, and paralyses the public and private sectors. Low-income countries experience disproportionately higher levels of damage from climate change, compared to developed nations. Disasters in poorer regions result in significantly more deaths, and cause longer-lasting social and economic losses. Limited infrastructure, weaker health systems, and reduced adaptive capacity exacerbate vulnerability, leaving these countries less able to recover from climate-related shocks. Since 1960, developed and developing countries have faced a similar number of disasters; however, developing countries experienced more than six times the number of deaths per event, compared to wealthier countries (Shilpi *et al*., 2025).

While climate change is exacerbating poverty and vulnerability in developing and low-income nations, the persistent lack of reliable data significantly hinders the design and implementation of effective mitigation and adaptation policies and interventions (Stanford University, 2025). Moreover, the information people need to assess climate risks is also scarce in developing countries. For example, the population in Sub-Saharan Africa has just 1.6 weather stations for every 1 million people, while the United States have 217 for every 1 million people (Shilpi *et al*., 2025).

In addition to decision-makers and public managers, social stakeholders such as community leaders, advocacy groups, and NGOs contribute significantly to shaping the overall percep-

Oltre ai decisori politici e ai gestori pubblici, anche gli attori sociali - quali leader comunitari, gruppi di advocacy e organizzazioni non governative - contribuiscono in modo significativo a definire la percezione complessiva del rischio all'interno di una regione o di un paese. Il loro ruolo si concentra principalmente, sebbene non esclusivamente, sulla comprensione dei rischi affrontati dalle popolazioni a basso reddito e vulnerabili in relazione al surriscaldamento urbano. Tali attori operano spesso come portavoce dei gruppi socialmente svantaggiati, sollevando criticità, proponendo strategie di protezione, influenzando l'opinione pubblica e promuovendo il rafforzamento dell'equità sociale (Friesenecker *et al*., 2025).

La percezione del rischio associata al surriscaldamento urbano e alla qualità ambientale varia in modo significativo tra le diverse classi economiche e i segmenti sociali. È ampiamente documentato che le popolazioni con basso status socioeconomico, così come altri gruppi vulnerabili, tendono a risiedere nelle aree urbane maggiormente esposte al surriscaldamento e all'inquinamento (Friesenecker *et al*., 2025). Inoltre, la qualità delle abitazioni in cui vivono spesso non garantisce una protezione adeguata dal calore eccessivo, mentre le misure di adattamento disponibili, in particolare l'uso dell'aria condizionata, risultano limitate (De Cian *et al*., 2025). Le proiezioni climatiche future indicano che la diffusione dell'aria condizionata tra le popolazioni a basso reddito e vulnerabili continuerà a rimanere contenuta, aumentando ulteriormente la loro esposizione al caldo estremo (Pavanello *et al*., 2021). È infine importante sottolineare che la percezione di un rischio elevato da parte dei gruppi a più basso reddito fatica a emergere nello spazio pubblico, poiché il loro accesso alle strutture di governance e ai canali mediatici è fortemente limitato.

Previsione e prevenzione del rischio di surriscaldamento urbano

Mentre la percezione del rischio associata al surriscaldamento urbano è spesso influenzata da informazioni generali e incomplete, da misurazioni limitate, da segnalazioni della popolazione e solo raramente da studi specializzati, la previsione e la prevenzione dei rischi di surriscaldamento devono basarsi su conoscenze scientifiche integrate, complete e di elevata qualità. Tali conoscenze dovrebbero derivare dall'impiego di strumenti scientifici di previsione in grado di valutare l'efficacia relativa delle politiche proposte nel ridurre sia l'esposizione sia la vulnerabilità.

La procedura e la metodologia complessiva di previsione e prevenzione del rischio possono articolarsi in nove passaggi, descritti di seguito.

Fase uno. Identificazione delle cause del surriscaldamento urbano

Il primo passo per le autorità competenti consiste nell'identificare le cause del surriscaldamento urbano. Le temperature elevate possono derivare da diverse fonti, tra cui l'advezione di calore da aree esterne alla città, le emissioni locali di calore di origine antropica, l'assenza di *cooling sinks* (ad esempio verde urbano o superfici evaporative) e l'eccessivo accumulo di calore in edifici e strutture urbane. Queste fonti presentano caratteristiche termiche, intensità e variabilità spaziale e temporale differenti e richiedono, di conseguenza, approcci di mitigazione

tion of risk within a region or country. Their role focuses primarily, though not exclusively, on understanding the risks faced by low-income and vulnerable populations in relation to urban overheating. These stakeholders often act as advocates for disadvantaged social groups by raising concerns, proposing protection strategies, influencing public opinion, and promoting the establishment of social equity (Friesenecker *et al*., 2025).

The perception of risk related to urban overheating and environmental quality varies substantially across different economic classes and social segments. It is well documented that populations with low socioeconomic status, as well as other vulnerable groups, tend to reside in the most overheated and polluted parts of cities (Friesenecker *et al*., 2025). Moreover, the quality of their housing often fails to provide adequate protection against excessive heat, while adaptation measures, particularly the use of air conditioning, remain limited (De Cian *et al*., 2025). Future climate projections indicate that the penetration of air conditioning among low-income and vulnerable populations will continue to be restricted, thereby intensifying their exposure to extreme heat (Pavanello *et al*., 2021). Importantly, the perception of high risk among lower-income groups cannot be easily communicated, as their access to governance structures and media channels is severely constrained.

Urban Overheating Risk Prediction and Prevention

While the perception of risk related to urban overheating is often shaped by general and incomplete information, limited measurements, public complaints, and rarely by specialised studies, the prediction and prevention of overheating risks must rely on integrated, complete and high-quality scientific knowledge. This knowledge should be derived from the use of scientific forecasting tools that evaluate the relative effectiveness of proposed policies in reducing both exposure and vulnerability.

The overall risk prevention and prediction procedure and methodology may include nine steps as described below.

Step One: Identification of the Causes of Urban Overheating

The first step to be undertaken by the responsible authorities is identification of the causes of urban overheating. Elevated temperatures may arise from various sources, including the advection of heat from areas outside the city, local anthropogenic heat emissions, the absence of cooling sinks such as urban greenery or evaporative bodies, and the excessive storage of heat within buildings and urban structures. These sources present distinct thermal characteristics, intensities and temporal and spatial variability, and the methodologies required to mitigate their effects are also different. Overheating sources can be identified by using specialised measurements and/or microscale and mesoscale climatic simulations, followed by a thorough analysis of the results.

Step Two: Identification of the Cooling Mechanisms

The second step in the prediction and prevention methodology is to identify the strength and characteristics of the cooling mechanisms operating within the city. Potential cooling mechanisms

specifici. L'identificazione delle fonti di surriscaldamento può essere condotta mediante misurazioni specialistiche e/o simulazioni climatiche a micro e mesoscala, seguite da un'analisi approfondita dei risultati.

Fase due. Identificazione dei meccanismi di raffrescamento
Il secondo passo della metodologia di previsione e prevenzione consiste nell'identificazione dell'intensità e delle caratteristiche dei meccanismi di raffrescamento che operano all'interno della città. Tra i principali meccanismi potenziali rientrano la brezza marina nelle aree costiere, l'advezione di aria più fresca proveniente da aree naturali limitrofe, quali foreste o laghi, nonché specifiche condizioni climatiche locali che si sviluppano all'interno e in prossimità dell'ambiente urbano. È fondamentale valutare e comprendere sia la variabilità spaziale sia quella temporale di tali meccanismi, al fine di determinarne l'efficacia nel mitigare il surriscaldamento urbano.

Fase tre. Valutazione degli impatti del surriscaldamento sulla società locale
Gli impatti del surriscaldamento locale su energia, salute, ambiente ed economia devono essere valutati in modo sistematico. Attualmente non esistono protocolli o quadri di riferimento universalmente accettati per la valutazione delle conseguenze complessive del surriscaldamento urbano. Tale lacuna riflette la notevole eterogeneità degli impatti, la diversità dei gruppi di popolazione interessati e la complessità degli input statistici richiesti per una valutazione esaustiva (Shilpi *et al.*, 2025). Tuttavia, sono state proposte diverse metodologie applicabili, purché siano disponibili dati di input adeguati. Qualsiasi valutazione complessiva dovrebbe porre particolare enfasi sugli effetti sproporzionati del surriscaldamento sulle popolazioni a basso reddito e vulnerabili, così da garantire equità nelle strategie di adattamento climatico, orientare una pianificazione proattiva e mobilitare risorse a tutela dei gruppi maggiormente esposti.

Fase quattro. Determinazione del bilancio termico
Successivamente all'identificazione delle fonti di surriscaldamento e dei *cooling sinks* (elementi di raffrescamento), nonché alla valutazione della loro intensità e della variabilità spazio-temporale, il quarto passo consiste nella stima del bilancio termico delle principali zone climatiche urbane. Tale analisi consente di comprendere il peso relativo dei diversi fenomeni responsabili del surriscaldamento. Il bilancio termico dovrebbe essere determinato mediante strumenti avanzati di simulazione climatica, applicati alle condizioni climatiche prevalenti e considerando l'intero arco stagionale. Questo approccio permette di acquisire una comprensione dettagliata della variabilità spaziale e temporale sia dell'intensità sia delle caratteristiche del surriscaldamento locale all'interno delle diverse aree urbane.

Fase cinque. Identificazione delle potenziali strategie di mitigazione del calore
Una chiara comprensione delle cause del surriscaldamento, unitamente a una conoscenza accurata delle caratteristiche termiche qualitative e quantitative, costituisce la base per la preselezione di strategie di mitigazione implementabili a livello locale. Le strategie individuate devono essere coerenti con le

include the sea breeze in coastal areas, the advection of cool air from neighbouring sinks such as forests or lakes, and specific climatic conditions occurring in and around the urban environment. It is essential to evaluate and understand both the spatial and temporal variability of these cooling sinks to assess their effectiveness in mitigating urban overheating.

Step Three: Assessment of the Impact of Overheating on the Local Society
The impacts of local overheating on energy, health, environmental quality, and the economy must be systematically assessed. At present, there are no universally accepted protocols or frameworks for evaluating the global consequences of overheating. This gap reflects the considerable diversity of impacts, the heterogeneity of affected population segments, and the complexity of the detailed statistical inputs required for comprehensive evaluation (Shilpi *et al.*, 2025). Nevertheless, several methodologies have been proposed and can be implemented, provided that adequate input data are available. Importantly, any overall assessment must place particular emphasis on the disproportionate effects of overheating on low-income and vulnerable populations. Highlighting these impacts is essential for ensuring equity in climate adaptation strategies, guiding proactive planning, and mobilising resources to protect those most at risk.

Step Four: Establishing the Heat Balance
Following the identification of overheating sources and cooling sinks, together with an assessment of their strength and spatial–temporal variability, the fourth step in the prediction and prevention procedure is to establish the heat balance for the principal climatic zones of the city in order to understand the relative importance of the various phenomena causing overheating. This balance should be determined using advanced climatic simulation tools, applied under prevailing climatic conditions, and across all seasons. Such an approach enables a comprehensive understanding of both spatial and temporal variability concerning the magnitude and the characteristics of local overheating within each urban zone.

Step Five: Identification of Potential Heat Mitigation Strategies
A clear understanding of the causes of overheating, together with precise knowledge of the qualitative and quantitative thermal characteristics, provides the foundation for pre-selecting mitigation strategies that can be locally implemented. The chosen strategies must align with the specific causes of overheating, and effectively reduce their intensity. For instance, when overheating results from excessive heat storage in urban buildings and open spaces, the application of reflective materials can reduce absorbed solar radiation and stored heat. In addition, solar control measures for open spaces may serve as efficient mitigation strategies. Conversely, when overheating is primarily driven by excessive anthropogenic heat generation, reflective materials may offer only limited benefits. In such cases, reducing anthropogenic heat emissions and enhancing urban ventilation are more appropriate and effective solutions.

specifiche cause del surriscaldamento e in grado di ridurne efficacemente l'intensità. Ad esempio, quando il surriscaldamento è riconducibile a un eccessivo accumulo di calore negli edifici e negli spazi aperti, l'impiego di materiali riflettenti può ridurre l'assorbimento della radiazione solare e il calore immagazzinato. Analogamente, misure di controllo solare negli spazi aperti possono risultare efficaci. Al contrario, quando il surriscaldamento è principalmente determinato da elevate emissioni di calore di origine antropica, i materiali riflettenti offrono benefici limitati; in tali casi, la riduzione delle emissioni e il miglioramento della ventilazione urbana rappresentano soluzioni più appropriate ed efficaci.

Fase sei. Quantificazione del potenziale di raffrescamento delle strategie selezionate
La capacità di raffrescamento ottenibile mediante le strategie di mitigazione selezionate dovrebbe essere valutata in modo rigoroso attraverso tecniche avanzate di simulazione climatica. Tali simulazioni devono considerare sia la variabilità spaziale sia quella temporale dell'efficacia degli interventi, in relazione alle diverse condizioni climatiche prevalenti. Inoltre, è opportuno analizzare in modo sistematico le possibili combinazioni delle strategie, poiché approcci integrati possono generare benefici di raffrescamento superiori rispetto a interventi isolati.

Fase sette. Selezione finale delle strategie di mitigazione da implementare
La selezione finale delle strategie di mitigazione e adattamento dovrebbe basarsi sui risultati quantitativi ottenuti nella fase precedente, integrati dalla valutazione di ulteriori fattori quali i costi, la fattibilità operativa, i requisiti di manutenzione e la sostenibilità nel lungo periodo. Le strategie prescelte devono dimostrare non solo un potenziale di raffrescamento misurabile, ma anche risultare coerenti con le condizioni socio-economiche locali, garantendo praticabilità, accessibilità economica e capacità di essere mantenute nel tempo. In ultima analisi, la decisione dovrebbe contemperare l'efficacia tecnica con la sostenibilità economica e l'equità sociale, al fine di consentire l'attuazione di soluzioni solide e sensibili al contesto per il contrasto al surriscaldamento urbano.

Fase otto. Coinvolgimento di attori economici e sociali
Il coinvolgimento attivo dei principali attori economici e della società civile è essenziale nella progettazione e nell'attuazione di strategie di resilienza urbana e di interventi di riqualificazione. Il raggiungimento di un ampio consenso tra autorità pubbliche, attori economici e comunità locali rappresenta un prerequisito fondamentale per il successo delle iniziative volte a rafforzare la resilienza urbana. Gli attori economici dovrebbero essere adeguatamente preparati a contribuire ai piani di resilienza, incrementando il valore aggiunto locale degli interventi. Parallelamente, i cittadini possono essere incentivati ad adottare misure complementari di autoprotezione, rafforzando la resilienza collettiva. Un approccio integrato di questo tipo, che combina la mobilitazione degli attori istituzionali ed economici con l'empowerment degli individui, garantisce che le strategie di resilienza risultino non solo tecnicamente efficaci, ma anche socialmente radicate, economicamente sostenibili e ampiamente condivise.

Step Six: Quantification of the Cooling Potential of Selected Mitigation Strategies
The cooling potential of the preselected mitigation strategies should be rigorously quantified using detailed climatic simulation techniques. These simulations must account for both spatial and temporal variations in mitigation effectiveness under all prevailing climatic conditions. Furthermore, combinations of the selected strategies should be systematically considered and evaluated, as integrated approaches may yield greater cooling benefits than individual measures alone.

Step Seven: Final Selection of the Mitigation Strategies to be implemented
The final selection of mitigation and adaptation strategies should be based on the quantitative results obtained in Step Five, complemented by an evaluation of additional influencing parameters. These include cost considerations, operational feasibility, maintenance requirements, and long-term sustainability. The strategies selected must not only demonstrate measurable cooling potential but also align with the socio-economic requirements of the city, ensuring that they are practical, affordable, and capable of being maintained over time. Ultimately, the decision should balance technical effectiveness with economic viability and social equity, thereby enabling the implementation of robust and context-sensitive solutions to urban overheating.

Step Eight: Enable the Market and Society Stakeholders
The active involvement of major market and societal stakeholders is essential for designing and implementing urban resilience and retrofitting strategies. Achieving wide consensus and agreement among government authorities, market stakeholders, and the community is a prerequisite for the effective realisation of resilience initiatives. Market stakeholders should be adequately prepared to contribute to the resilience plan, thereby enhancing the local added value of the interventions. At the same time, individuals can be encouraged to design and adopt complementary self-protection measures, reinforcing collective resilience. This dual approach of mobilising institutional and market actors, while empowering individuals, ensures that resilience strategies are not only technically sound but also socially embedded, economically viable, and widely supported.

Step Nine: Evaluation of the Mitigation Strategy's Societal Impact Post-Implementation
The ability to design effective mitigation and adaptation strategies to address urban overheating is often hampered by the lack of reliable methods to measure and monitor their impacts. The effect of urban overheating on energy, health, environmental quality, and the economy after the implementation of mitigation strategies can be evaluated using a range of established methodologies (Kalkstein *et al*., 2013; Santamouris and Fiorito, 2021; Santamouris and Osmond, 2020; Stone *et al*., 2014). The repercussions on energy consumption, peak electricity demand, heat-related mortality and morbidity, pollutant concentrations, and the broader economy can be accurately assessed once detailed information on climatic conditions prior to

*Fase nove***.** *Valutazione degli impatti sociali delle strategie di mitigazione dopo l'implementazione*

La progettazione di strategie efficaci di mitigazione e adattamento al surriscaldamento urbano è spesso ostacolata dalla mancanza di metodi affidabili per la misurazione e il monitoraggio dei loro impatti. La valutazione degli effetti del surriscaldamento urbano sui settori energetico, sanitario, ambientale ed economico, successivamente all'implementazione delle strategie di mitigazione, può essere condotta mediante diverse metodologie consolidate (Kalkstein *et al*., 2013; Santamouris e Fiorito, 2021; Santamouris and Osmond, 2020; Stone *et al*., 2014). Una volta disponibili dati dettagliati sulle condizioni climatiche precedenti e successive agli interventi, è possibile stimare con precisione gli effetti sui consumi energetici, sulla domanda elettrica di picco, sulla mortalità e morbilità legate al caldo, sulle concentrazioni di inquinanti e sull'economia nel suo complesso. Una conoscenza accurata del carico sociale imposto dal surriscaldamento urbano, insieme ai benefici potenziali degli interventi climatici, favorisce decisioni informate, rafforza la pianificazione proattiva, migliora la comprensione pubblica e mobilita gli attori finanziari a sostegno dei cambiamenti necessari.

Esempi applicativi della metodologia di previsione e prevenzione proposta sono riportati in Haddad *et al.* (2020), Haddad *et al.* (2024) e Haddad *et al.* (2020).

Gestione del rischio da surriscaldamento urbano

L'implementazione di un piano locale di riqualificazione adeguatamente progettato dovrebbe basarsi su un approccio olistico e integrato, in grado di rafforzare la resilienza urbana. Sebbene gli interventi di adattamento climatico possano migliorare in modo significativo le condizioni locali e offrire sollievo ai cittadini, essi devono essere accompagnati da misure di natura politica, economica e sociale. Nel loro insieme, tali azioni possono contribuire alla definizione di un quadro solido e duraturo, capace di garantire una protezione efficace a tutti i gruppi sociali, con particolare attenzione alle popolazioni a basso reddito e vulnerabili. Un approccio di questo tipo non solo tutela le comunità, ma genera anche valore aggiunto a livello locale, rafforza le conoscenze e le capacità del settore pubblico e favorisce una crescita sostenibile. Allineando gli interventi tecnici con politiche e misure sociali più ampie, i piani di riqualificazione possono conseguire efficacia nel lungo periodo, promuovendo al contempo equità e resilienza.

Il reddito locale svolge un ruolo determinante nel definire la capacità delle comunità di far fronte agli impatti del cambiamento climatico. È ampiamente riconosciuto che le società economicamente più solide riescono a rispondere in modo più efficace agli eventi estremi rispetto alle comunità più povere (Shilpi *et al*., 2025). Un livello più elevato di risorse a disposizione dei governi locali consente l'erogazione di servizi collettivi più efficienti, l'attuazione di sussidi mirati, l'adozione di strumenti e metodi avanzati e il rafforzamento dei mercati attraverso riforme regolatorie. Inoltre, una maggiore capacità economica favorisce investimenti in politiche proattive volte a migliorare la preparazione, i sistemi di allerta precoce, le infrastrutture di protezione e i meccanismi di recupero. In questo modo, la solidità economica sostiene direttamente sia la resilienza istituzionale sia l'adattamento a livello comunitario, evidenziando

and following the application of mitigation measures is available. Precise knowledge of the societal burden imposed by urban overheating, together with the potential benefits derived from climatic interventions, facilitates informed decision-making, strengthens proactive planning, enhances public understanding, and mobilises financial stakeholders to support the necessary changes.

Examples highlighting the proposed prediction and prevention methodology can be found in Haddad *et al.* (2020a), Haddad *et al.* (2024), e Haddad *et al.* (2020b).

Urban Overheating Risk Management

Implementing a well-designed local retrofitting plan should follow a holistic and integrated approach that strengthens urban resilience. While climatic interventions can significantly improve local conditions and provide relief to citizens, they must be complemented by political, economic, and social measures. Together, these actions can establish a concrete and stable framework capable of delivering permanent protection to all social groups, with particular emphasis on low-income and vulnerable populations. Such an approach not only safeguards communities but also generates local added value, enhances public knowledge and capacity, and contributes to sustainable growth. By aligning technical interventions with broader societal measures, retrofitting plans can achieve long-term effectiveness, equity, and resilience.

Local income plays a decisive role in shaping the capacity of communities to cope with the impacts of climate change. It is well established that wealthier societies can respond more effectively to extreme events than poorer communities (Shilpi *et al*., 2025). Higher local government income enables the delivery of more effective collective services, provides targeted subsidies, implements advanced methods and tools, and strengthens markets through regulatory reforms. Moreover, increased income facilitates investment in proactive policies that enhance preparedness, early warning systems, protective infrastructure, and recovery mechanisms. Economic strength thus directly supports both institutional resilience and community-level adaptation, underscoring the importance of equitable development strategies that reduce vulnerability across all social segments.

At the household level, higher income allows the improvement of house quality, enhances personal climatic protection, and allows access to economic instruments such as insurance, which can significantly improve recovery conditions. Thus, income disparities play a critical role in shaping both collective and individual resilience, highlighting the need for equitable strategies that support vulnerable populations.

Projects designed to counterbalance the impacts of urban overheating should foster sustainable and inclusive development. They must contribute to improving local financial conditions by alleviating the economic constraints faced by vulnerable populations, and by generating added value for the community. This can be achieved by carefully selecting systems, materials, and services that not only enhance environmental performance but also deliver high added value. Such choices

l'importanza di strategie di sviluppo eque in grado di ridurre la vulnerabilità in tutti i segmenti sociali.
A livello di nucleo familiare, un reddito più elevato consente il miglioramento della qualità abitativa, rafforza la protezione individuale dagli impatti climatici e permette l'accesso a strumenti finanziari, quali le assicurazioni, che possono migliorare in modo significativo le capacità di recupero. Di conseguenza, le disparità di reddito svolgono un ruolo cruciale nel determinare sia la resilienza collettiva sia quella individuale, evidenziando la necessità di strategie eque volte a sostenere le popolazioni più vulnerabili.
I progetti finalizzati a contrastare gli impatti del surriscaldamento urbano dovrebbero promuovere uno sviluppo sostenibile e inclusivo. Essi dovrebbero contribuire a migliorare le condizioni economiche locali, alleviare i vincoli finanziari affrontati dalle popolazioni vulnerabili e generare valore aggiunto per la comunità. Tali obiettivi possono essere perseguiti attraverso una selezione accurata di sistemi, materiali e servizi in grado non solo di migliorare le prestazioni ambientali, ma anche di offrire un elevato valore aggiunto. Le scelte progettuali dovrebbero privilegiare soluzioni capaci di stimolare le economie locali e di creare significative opportunità occupazionali, sia durante la fase di realizzazione sia nel lungo periodo, coinvolgendo e valorizzando efficacemente gli attori locali. Integrando benefici sociali ed economici con obiettivi ambientali, i progetti di mitigazione del surriscaldamento urbano possono così fungere da catalizzatori di resilienza, equità e crescita sostenibile.
Alcuni studi indicano che, entro la fine del secolo, quasi quattro quinti della resilienza all'aumento delle temperature ambientali deriveranno dalla crescita del PIL pro capite, mentre il restante quinto sarà attribuibile alla conoscenza accumulata attraverso l'esposizione di lungo periodo (Carleton *et al*., 2022). Per massimizzare tale resilienza, è necessario sviluppare meccanismi e strumenti in grado di assorbire, elaborare e tradurre l'esperienza maturata in seguito all'esposizione a condizioni climatiche estreme in strategie operative. Il surriscaldamento urbano dovrebbe pertanto essere affrontato come un rischio in progressiva intensificazione, continuo e ricorrente, anziché come una problematica secondaria. Riconoscerne la natura persistente è fondamentale per la definizione di politiche di adattamento efficaci e per garantire che le misure di resilienza rimangano robuste nel tempo.
La valutazione e la post-valutazione quantitativa dei progetti di mitigazione e resilienza sono fondamentali per comprendere l'efficacia relativa delle misure implementate e per ricavare evidenze utili a orientare miglioramenti futuri. La post-valutazione dovrebbe basarsi su metriche chiare e consolidate, in grado di consentire un monitoraggio sistematico e un confronto nel tempo.

Sebbene metriche universalmente accettate per la valutazione delle prestazioni dei progetti di mitigazione non siano ancora pienamente sviluppate né ampiamente adottate, è possibile definire e monitorare insiemi di indicatori specificamente calibrati. Tali indicatori dovrebbero considerare:
– Efficacia ambientale: riduzione della temperatura ambientale durante le condizioni climatiche di picco, diminuzione dei gradi-giorno di raffrescamento, miglioramento dei livelli di comfort, riduzione della mortalità e della morbilità legate al caldo, diminuzione dei consumi energetici e riduzione delle concentrazioni di inquinanti, ecc.

should prioritise solutions that stimulate local economies, and create strong employment opportunities both during the implementation phase, and in the long term by effectively engaging and enabling local stakeholders. By integrating social and economic benefits with environmental objectives, urban overheating mitigation projects can serve as catalysts for resilience, equity, and sustainable growth.
Studies indicate that, by the end of the century, nearly four-fifths of resilience to increased ambient temperatures will result from growth in per capita GDP, while the remaining one-fifth will derive from knowledge accumulated through long-term exposure (Carleton *et al*., 2022). To maximise this resilience, mechanisms and tools must be developed to absorb, process, and translate the experience gained from exposure to extreme climatic conditions into actionable strategies. Urban overheating should, therefore, be addressed as an intensifying, continuous, and recurrent risk, rather than treated as a secondary concern. Recognising its persistent nature is essential for designing effective adaptation policies, and to ensure that resilience measures remain robust over time.
Assessment and quantitative post-evaluation of mitigation and resilience projects are essential for understanding the relative success of implemented measures, and for extracting insights that inform future improvements. Post-assessment should be guided by concrete, well-established metrics that enable systematic monitoring and comparison over time.
Although universally accepted metrics for evaluating the performance of mitigation projects have not yet been fully developed or widely adopted, tailored sets of indicators can be defined and monitored. These indicators should capture:
– Environmental effectiveness: reduction of ambient temperature during peak climatic conditions, decrease in cooling degree days, improvement of comfort levels, reduction in heat-related mortality and morbidity, lowering of energy consumption, decrease of pollutant concentration, etc.
– Socio-economic impact: emphasis on benefits for low-income and vulnerable populations, including improved access to protective infrastructure and services, increase of income, generation of employment, etc.
– Long-term resilience outcomes: strengthened adaptive capacity, enhanced preparedness, and sustained equity in climate protection.

By integrating environmental, social, and economic dimensions, post-evaluation ensures that mitigation projects are not only technically sound but also socially equitable and economically viable, serving as a foundation for continuous improvement and sustainable growth.

Conclusions
Urban overheating is a major threat to urban populations. It affects numerous aspects of city life by increasing energy consumption, exacerbating health problems, degrading environmental quality, and placing additional stress on low-income and vulnerable communities.
The perception of risk associated with higher urban temperatures is evident to all those living under overheating conditions. However, given the wide range of impacts caused by urban over-

– Impatto socio-economico: benefici per le popolazioni a basso reddito e vulnerabili, inclusi il miglioramento dell'accesso a infrastrutture e servizi di protezione, l'aumento del reddito e la creazione di opportunità occupazionali, ecc.
– Esiti di resilienza nel lungo periodo: rafforzamento della capacità adattiva, miglioramento della preparazione e mantenimento dell'equità nella protezione climatica.

Integrando le dimensioni ambientale, sociale ed economica, la post-valutazione assicura che i progetti di mitigazione risultino non solo tecnicamente efficaci, ma anche socialmente equi ed economicamente sostenibili, costituendo una base solida per il miglioramento continuo e la crescita sostenibile.

Conclusioni

Il surriscaldamento urbano rappresenta una minaccia rilevante per le popolazioni urbane, incidendo su numerosi aspetti della vita cittadina: aumenta i consumi energetici, aggrava i problemi di salute, compromette la qualità ambientale ed esercita una pressione crescente sulle comunità a basso reddito e vulnerabili.

La percezione del rischio associata all'aumento delle temperature urbane è generalmente evidente per coloro che sono esposti a livelli elevati di stress termico. Tuttavia, considerando l'ampio spettro di impatti generati dal fenomeno, autorità e comunità sono raramente del tutto consapevoli dell'estensione complessiva delle minacce, sia in termini quantitativi sia qualitativi. Una corretta percezione del rischio richiede un'analisi approfondita degli effetti specifici del surriscaldamento urbano su energia, salute, ambienti ed economia. Nonostante nei Paesi industrializzati si registri un progressivo sviluppo di studi mirati, le conoscenze disponibili rimangono limitate nelle nazioni povere e in via di sviluppo. Questa carenza informativa ostacola o ritarda l'elaborazione di politiche, iniziative e strategie di pianificazione di lungo periodo, contribuendo ad amplificare la gravità del problema ed esponendo le popolazioni locali a rischi significativi.

Affrontare in modo efficace il rischio del surriscaldamento urbano richiede l'adozione di strategie a livello locale solide e ben strutturate, capaci di coinvolgere le amministrazioni, i decisori politici e gli attori rilevanti a livello territoriale. In questo contesto, il presente lavoro ha proposto un quadro metodologico articolato in nove fasi distinte. Tale approccio è già stato applicato con successo in numerosi progetti di mitigazione del calore a livello internazionale, dimostrando una costante efficacia nel conseguimento di risultati positivi.

La progettazione di interventi su larga scala volti a contrastare il surriscaldamento urbano dovrebbe pertanto adottare un approccio olistico, orientato al rafforzamento della resilienza al calore urbano. Oltre ai benefici climatici attesi, tali interventi dovrebbero contribuire ad accrescere il reddito regionale attraverso l'impiego di tecnologie, servizi e beni caratterizzati da un elevato valore aggiunto locale, promuovendo uno sviluppo sostenibile e favorendo la creazione di opportunità economiche e occupazionali durature.

REFERENCES

Carleton, T., Jina, A., Delgado, M., Greenstone, M., Houser, T., Hsiang, S., Hultgren, A., *et al.* (2022), "Valuing the Global Mortality Consequences of Climate Change Accounting for Adaptation Costs and Benefits", *The Quarterly Journal of Economics*, Vol. 137 No. 4, pp. 2037–2105, Available at: https://doi.org/10.1093/qje/qjac020.

heating, authorities and communities are often unaware of the full extent of the quantitative and qualitative threats it poses. An adequate perception of risk requires a thorough analysis of the specific impacts of overheating on the energy, health, environmental, and financial sectors. While relevant studies are gradually being conducted in developed countries, very little is known about these impacts in poorer and developing nations. The lack of knowledge and information is either hindering or delaying the development of policies, initiatives, and long-term planning, thereby exacerbating the magnitude of the problem, and placing local populations under serious threat.

Addressing the risk of urban overheating requires a well-prepared local strategy that engages local administrations, decision-makers, and all relevant stakeholders. A comprehensive plan consisting of nine distinct phases is proposed. This framework has already been successfully implemented in numerous heat mitigation projects worldwide, and has consistently delivered positive outcomes.

The design of large-scale projects aimed at addressing urban overheating should adopt a holistic approach that strengthens resilience to urban heat. Beyond the expected climatic benefits, such projects should also seek to enhance regional income by utilising technologies, services, and goods with high local added value. In doing so, they can promote sustainable development, while generating wealth and employment opportunities.

Chakraborty, R. (2024), "Why India is failing to track heatstroke fatalities properly", *BMJ*, p. q1437. Available at: https://doi.org/10.1136/bmj.q1437.

De Cian, E., Falchetta, G., Pavanello, F., Romitti, Y. and Sue Wing, I. (2025), "The impact of air conditioning on residential electricity consumption across world countries", *Journal of Environmental Economics and Management*, Academic Press Inc., Vol. 131. Available at: https://doi.org/ 10.1016/j.jeem.2025.103122.

Cool Coalition UNEP. (2025), *Global Cooling Watch 2025: The Free Degrees*, United Nations Environment Programme. Available at: https://doi.org/10.59117/20.500.11822/48926.

Friesenecker, M., Schneider, A., Bügelmayer-Blaschek, M., Getzner, M., Hahn, C., Schneider, M., Seebauer, S., *et al.* (2025), "Socially equitable climate risk management of urban heat", *Npj Urban Sustainability*, Springer Nature, Vol. 5, n. 1. Available at: https://doi.org/ 10.1038/s42949-025-00202-2.

Haddad, S., Barker, A., Yang, J., Kumar, D.I.M., Garshasbi, S., Paolini, R. and Santamouris, M. (2020a), "On the potential of building adaptation measures to counterbalance the impact of climatic change in the tropics", *Energy and Buildings*, Elsevier Ltd, Vol. 229. Available at: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110494.

Haddad, S., Paolini, R., Synnefa, A., De Torres, L., Prasad, D. and Santamouris, M. (2022), "Integrated assessment of the extreme climatic conditions, thermal performance, vulnerability, and well-being in low-income housing in the subtropical climate of Australia", *Energy and Buildings*, Elsevier Ltd, Vol. 272. Available at: https://doi.org/ 10.1016/j.enbuild.2022.112349.

Haddad, S., Paolini, R., Ulpiani, G., Synnefa, A., Hatvani-Kovacs, G., Garshasbi, S., Fox, J., *et al.* (2020b), "Holistic approach to assess co-benefits of local climate mitigation in a hot humid region of Australia", *Scientific Reports*, Nature Research, Vol. 10, n. 1. Available at: https://doi.org/10.1038/s41598-020-71148-x.

Haddad, S., Zhang, W., Paolini, R., Gao, K., Altheeb, M., Al Mogirah, A., Bin Moammar, A., *et al.* (2024), "Quantifying the energy impact of heat mitigation technologies at the urban scale", *Nature Cities*, Vol. 1 No. 1, pp. 62-72. Available at: https://doi.org/10.1038/s44284-023-00005-5.

Kalkstein, L.S., Sailor, D., Shickman, K., Sheridan, S. and Vanos, J. (2013), *Assessing the Health Impacts of Urban Heat Island Reduction Strategies in the District of Columbia*.

Pavanello, F., De Cian, E., Davide, M., Mistry, M., Cruz, T., Bezerra, P., Jagu, D., *et al.* (2021), "Air-conditioning and the adaptation cooling deficit in emerging economies", *Nature Communications*, Nature Research, Vol. 12, n. 1. Available at: https://doi.org/10.1038/s41467-021-26592-2.

Poumadère, M., Mays, C., Le Mer, S. and Blong, R. (2005), "The 2003 heat wave in France: Dangerous climate change here and now", *Risk Analysis*, December. Available at: https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2005.00694.x.

Ritchie, H. (2024), *How Many People Die from Extreme Temperatures, and How This Could Change in the Future: Part Two*.

Santamouris, M. (2015), "Analyzing the heat island magnitude and characteristics in one hundred Asian and Australian cities and regions", *Science of the Total Environment*, Elsevier, Vol. 512-513, pp. 582-598. Available at: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.060.

Santamouris, M. (2020), "Recent progress on urban overheating and heat island research. Integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact. Synergies with the global climate change", *Energy and Buildings*, Elsevier Ltd, 15 January. Available at: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109482.

Santamouris, M. and Fiorito, F. (2021), "On the impact of modified urban albedo on ambient temperature and heat related mortality", *Solar Energy*, Elsevier Ltd, Vol. 216, pp. 493-507. Available at: https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.01.031.

Santamouris, M. and Kolokotsa, D. (2015), "On the impact of urban overheating and extreme climatic conditions on housing, energy, comfort and environmental quality of vulnerable population in Europe", *Energy and Buildings*, Elsevier Ltd, Vol. 98, pp. 125-133. Available at: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.08.050.

Santamouris, M. and Osmond, P. (2020), "Increasing green infrastructure in cities: Impact on ambient temperature, air quality and heat-related mortality and morbidity", *Buildings*, MDPI AG, Vol. 10, n. 12, pp. 1-34. Available at: https://doi.org/10.3390/buildings10120233.

Santamouris, M., Paolini, R., Haddad, S., Synnefa, A., Garshasbi, S., Hatvani-Kovacs, G., Gobakis, K., *et al.* (2020), "Heat mitigation technologies can improve sustainability in cities. An holistic experimental and numerical impact assessment of urban overheating and related heat mitigation strategies on energy consumption, indoor comfort, vulnerability and heat-related mortality and morbidity in cities", *Energy & Buildings*, Vol. 217, p. 110002. Available at: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110.

Shilpi, F., Kahn, M.E. and Berg, C. (n.d.). *Adapting to a Changing Climate*.

Stanford University, K.C. on G.D.N. (2025), "As climate change deepens poverty in low-income countries: A call for better data". Available at: https://kingcenter.stanford.edu/news/climate-change-deepens-poverty-low-income-countries-call-better-data (accessed 4 January 2026).

Stone, B., Vargo, J., Liu, P., Habeeb, D., DeLucia, A., Trail, M., Hu, Y., *et al.* (2014), "Avoided heat-related mortality through climate adaptation strategies in three US cities", *PLoS ONE*, Public Library of Science, Vol. 9, n. 6. Available at: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0100852.

Tuholske, C., Caylor, K., Funk, C. and Evans, T. (2021), "Global urban population exposure to extreme heat", *PNAS*, Vol. 118, n. 41.

Vasilakopoulou, K., Santamouris, M. (2025), Cumulative exposure to urban heat can affect the learning capacity of students and penalize the vulnerable and low-income young population: A systematic review. *PLOS Clim* 4(7): e0000618.

World Bank. (n.d.). "Poverty and Inequality". Available at: https://datatopics.worldbank.org/world-development-indicators/themes/poverty-and-inequality.html (accessed 2 January 2026).

RIFLESSIONI SUGLI EFFETTI DEL CAMBIAMENTO CLIMATICO NELLE CITTÀ E NEI TERRITORI

Federica Visconti, https://orcid.org/0000-0002-9718-3522 federica.visconti@unina.it
Dipartimento di Architettura, Università degli studi di Napoli "Federico II", Italia

Premessa

Un piccolo libro di Maurizio Bettini ha recentemente proposto una rilettura del mito di Fetonte e di quello di Erisittone come metafora della cecità del nostro tempo nei confronti del cambiamento climatico e della devastazione dell'ambiente. Fetonte, figlio di Elio, guida il carro del Sole ma, incapace di farlo, si avvicina pericolosamente alla superficie terreste determinando incendi che distruggono boschi e campi mentre mari e fiumi vengono prosciugati finché Zeus non ne provoca la caduta. Erisittone è invece il superbo re che decide di abbattere un albero consacrato a Demetra per utilizzarlo come legna per la costruzione di una sala per banchetti, provocando l'ira della dèa che lo condanna a una fame insaziabile che lo condurrà alla morte. In entrambi i casi si tratta di peccati di *hybris*: della volontà di arrogarsi uno *ius*, un diritto, che non compete agli umani che commettono così la *iniura* di voler superare i limiti imposti dall'ordine del mondo (Bettini, 2025).

Il mito acquisisce nuovi orizzonti di senso nel tempo presente: la caduta di Fetonte ci sta oggi avvertendo che gli eventi avversi che si succedono sul nostro Pianeta in ragione del riscaldamento globale sono causati dall'arroganza di una parte dell'umanità – non a caso quella delle economie forti – che ha stoltamente commesso atti di superbia nel consumare risorse non rinnovabili mentre la punizione che Demetra infligge a Erisittone stabilisce una apparentemente inattesa relazione tra disboscamento e fame che, purtroppo, anche in questo caso – e qui differentemente dal mito – colpisce i più deboli piuttosto che i diretti responsabili delle sconsiderate azioni.

La Terra, vista da lontano, vista da vicino

Il 12 aprile 1961, un giovane astronauta sovietico, Jurij Alekseevič Gagarin, a bordo del Vostok-1, percorse un'intera orbita ellittica intorno alla Terra. A lui sono attribuite queste parole: *Da quassù la Terra è bellissima, senza frontiere né confini*. Gagarin si accorge che confini e frontiere sono una sovrastruttura umana e che la bellezza del nostro Pianeta è fatta piuttosto dei suoi connotati morfologici: riferibili alle forme delle montagne, dei mari, dei fiumi, dei laghi, dei boschi e magari anche degli insediamenti umani. Da allora in poi, un campo rilevante della ricerca astronomica ha riguardato proprio l'osservazione della Terra dallo spazio, con occhi umani prima, più spesso oggi – e costantemente – attraverso una strumentazione tecnologica in grado non solo di scrutare ma anche di raccogliere innumerevoli dati: sulla concentrazione dei gas serra in atmosfera, sulle variazioni dei livelli del mare e sulle sue temperature, sulle concentrazioni di ozono, sulla variazione della superficie di ghiacciai, foreste e insediamenti umani. Trenta anni dopo il Vostok-1, nel 1990, la sonda Voyager 1 della NASA scatta una serie di sessanta immagini del nostro sistema solare dai suoi confini. Da lì, il nostro pianeta appare come un *pale blu dot*. È questa la definizione che ne darà Carl Sagan, figura di scienziato controversa, noto anche come autore di fantascienza e per aver dedicato gran parte della sua vita alla ricerca di prove sulla vita extraterrestre. Tuttavia, e senza voler entrare nel merito del suo multiforme pensiero, la riflessione di Sagan è qui utile. Scriverà: «Da questo distante punto di osservazione, la Terra può non sembrare di particolare interesse. Ma per noi, è diverso. Guardate ancora quel puntino. È qui. È casa. È noi. Su di esso, tutti coloro che amate [...] l'insieme delle no-

REFLECTIONS ON THE EFFECTS OF CLIMATE CHANGE ON CITIES AND TERRITORIES

Premise

A booklet by Maurizio Bettini recently proposed a reinterpretation of the myths of Fetonte and Erisittone as a metaphor for our time's blindness to climate change and environmental devastation. Fetonte, son of Helios, drives the chariot of the Sun but, unable to do it, comes dangerously close to the Earth's surface, causing fires that destroy forests and fields while seas and rivers dry up until Zeus causes his fall. Erisittone, on the other hand, is the proud king who decides to cut down a tree, sacred to Demeter, to use it as firewood for the construction of a banquet hall, provoking the fury of the goddess, who condemns him to an insatiable hunger that will lead him to death. In both cases, these are sins of *hybris*: the will to claim a *ius*, a right, that does not belong to humans, who thus commit the crime – the *iniuria* – of wanting to exceed the limits imposed by the world order (Bettini, 2025).

The myth acquires new horizons of meaning in the present time: the fall of Fetonte is warning us today that the adverse events occurring on our planet due to global warming are caused by the arrogance of a part of humanity – not coincidentally, that of strong economies – which has foolishly committed acts of pride in consuming non-renewable resources, while the punishment that Demeter inflicts to Erisittone establishes a seemingly unexpected connection between deforestation and hunger which, unfortunately, also in this case – and here differently from the myth – affects the weakest rather than those directly responsible for the irresponsible actions.

The Earth. Seen from Afar, Seen from Near

In 1961, on April the 12th, 1961, a young Soviet astronaut, Jurij Alekseevič Gagarin, on board the Vostok-1, completed an entire elliptical orbit around the Earth. He stated: «From up here, the Earth is beautiful, without frontiers or boundaries». Gagarin realized that borders and frontiers are a human superstructure and that the beauty of our planet is rather in its morphological features: the shapes of mountains, seas, rivers, lakes, forests, and perhaps even human settlements. Since then, a significant field of astronomical research has focused on observing the Earth from Space, first with human eyes, but more often today – and consistently – through technological instruments capable of not only observing but also collecting innumerable data: on the concentration of greenhouse gases in

ISSN online: 2239-0243 | © 2025 Author(s) | http://www.fupress.com/techne | DOI: 10.36253/techne-20472
Open access, peer-reviewed article published by Firenze University Press (https://www.fupress.com) and distributed, except where otherwise noted, under the terms of the CC BY 4.0 License for content and CC0 1.0 Universal for metadata

stre gioie e dolori, migliaia di religioni, ideologie e dottrine economiche, [...] ogni eroe e codardo, ogni creatore e distruttore di civiltà, ogni re e plebeo, ogni giovane coppia innamorata, ogni madre e padre, figlio speranzoso, inventore ed esploratore, ogni predicatore di moralità, ogni politico corrotto, ogni 'superstar', ogni 'comandante supremo', ogni santo e peccatore nella storia della nostra specie è vissuto lì, su un minuscolo granello di polvere sospeso in un raggio di sole» e ancora «Pensate ai fiumi di sangue versati da tutti quei generali e imperatori affinché, nella gloria e nel trionfo, potessero diventare per un momento padroni di una frazione di un puntino [...]. È stato detto che l'astronomia è un'esperienza di umiltà e che forma il carattere. Forse non c'è dimostrazione migliore della follia delle vanità umane di questa immagine lontana del nostro piccolo mondo [...]. Per me, sottolinea la nostra responsabilità di trattare gli altri con più gentilezza e di preservare e custodire il pallido puntino blu, l'unica casa che abbiamo mai conosciuto» (Sagan, 1997).

Dunque, l'osservazione da molto lontano ci interessa perché nell'etimologia del verbo osservare è implicita – per la presenza del verbo latino *servare*, custodire, salvare – l'idea di un guardare finalizzato al "prendersi cura". Osserviamo la superficie terrestre e ne registriamo i cambiamenti alla grande scala sia per quanto attiene i segni antropici sia per quanto riguarda gli elementi naturali rilevando che molti dei fenomeni che interessano questi ultimi – mari, corsi d'acqua, laghi, montagne, ghiacciai – sono in diretta relazione con il cambiamento climatico. Quando poi agli occhi umani si sono sostituiti quelli "tecnologici", sono diventati misurabili, con i satelliti, non solo le più evidenti modifiche della superficie terrestre ma anche la temperatura del mare, l'altezza delle onde, la velocità e la direzione del vento, lo stato di salute della vegetazione e la concentrazione in atmosfera dei cosiddetti composti climalteranti: dati che ci segnalano cosa è avvenuto ma, interpretati, ci avvertono di cosa potrebbe accadere.

In occasione di un recente convegno tenutosi nel Dipartimento di Architettura della Università di Napoli "Federico II", è stato presentato l'importante lavoro di ricerca del Servizio Meteorologico facente capo all'Ufficio Generale Aviazione Militare e Meteorologia dello Stato Maggiore dell'Aeronautica Italiana che, con il Consiglio Nazionale delle Ricerche, partecipa al programma del "Global Atmosphere Watch" della World Meteorological Organization, GAW-WMO. Attiva dal 1979, nel 2011 la stazione dell'Aeronautica Militare, con quella "Vittori" del Consiglio Nazionale delle Ricerche, sulla vetta appenninica del Monte Cimone, hanno ottenuto dal WMO la qualifica di "Stazione globale", una delle nove al mondo, l'unica in Italia e nell'intero bacino del Mediterraneo. È stato nell'occasione illustrato come dati satellitari, dati misurati a terra e modelli climatici siano oggi in grado di fornire un quadro dettagliato delle conseguenze a breve e lungo termine della crisi climatica sul pianeta grazie, in particolare, al programma europeo "Copernicus", che attraverso sei satelliti, monitora le emissioni di CO_2 e CH_4 derivanti da attività antropiche, le temperature sulla superficie terrestre e dei mari, le biodiversità e la qualità delle acque, le coste, i ghiacciai e molto altro ancora per il perseguimento dei suoi quattro obiettivi: *Combatting Climate Change*, *Food Security and Water Management*, *Monitoring Land and Natural Resources*, *Safeguarding the Arctic*. I dati illustrati sono preoccupanti e, ancor più, lo sono quelli di recente pubblicati nell'ultimo rapporto di "Copernicus" nel quale si legge che non

the atmosphere, on variations in the sea levels and temperatures, on ozone concentrations, on the variations in the surface of glaciers, forests, and human settlements. Thirty years after the Vostok-1, in 1990, NASA's Voyager 1 probe took a series of sixty images of the solar system from its edge. From there, our planet appears as a *pale blue dot*. This is the definition given by Carl Sagan, a divisive scientist, also known as a science fiction author and for having dedicated much of his life to the search for evidence of alien life. However, and without deeply entering his multifaceted thought, Sagan's reflection is useful here. He wrote: «From this distant vantage point, the Earth might not seem of any particular interest. But for us, it's different. Consider again that dot. That's here. That's home. That's us. On it everyone you love, everyone you know, everyone you have ever heard of, every human being who ever was, lived out their lives. The aggregate of our joy and suffering, thousands of confident religions, ideologies, and economic doctrines, every hunter and forager, every hero and coward, every creator and destroyer of civilization, every king and peasant, every young couple in love, every mother and father, hopeful child, inventor and explorer, every teacher of morals, every corrupt politician, every 'superstar,' every 'supreme leader,' every saint and sinner in the history of our species lived there – on a mote of dust suspended in a sunbeam» and also «Think of the rivers of blood spilled by all those generals and emperors so that in glory and triumph they could become the momentary masters of a fraction of a dot. [...] It has been said that astronomy is a humbling and character-building experience. There is perhaps no better demonstration of the folly of human conceits than this distant image of our tiny world. To me, it underscores our responsibility to deal more kindly with one another and to preserve and cherish the pale blue dot, the only home we've ever known» (Sagan, 1997).

Therefore, an observation from afar interests us because the etymology of the verb "to observe" implicitly implies – due to the presence of the Latin verb *servare*, to look after to save – the idea of a gaze aimed at "taking care of." We observe the Earth's surface and record its large-scale changes, both in terms of anthropic signs and natural elements, noting that many of the phenomena affecting the latter – seas, rivers, lakes, mountains, glaciers – are directly related to climate change. Then, when human eyes were replaced by "technological" ones – the satellites – not only the most obvious changes to the Earth's surface became measurable but also sea temperature, wave height, wind speed and direction, the health of vegetation, and the concentration of the so-called climate-altering compounds in the atmosphere: data that tell us what has happened but, when interpreted, warn us of what could happen.

In the occasion of a recent conference held at the Department of Architecture of the University of Naples "Federico II", the important research work of the Meteorological Service, part of the General Office of Military Aviation and Meteorology of the Italian Air Force, was presented. The Service, with the National Research Council (CNR), participates in the World Meteorological Organization's (GAW-WMO) Global Atmosphere Watch program. Active since 1979, in

solo il 2025 è stato il terzo anno più caldo di sempre ma anche che, per la prima volta, un periodo di tre anni consecutivi registra temperature globali in media superiori di oltre 1,5°C rispetto al livello preindustriale e che «sulla base dell'attuale tasso di riscaldamento, il limite di 1,5°C fissato dall'Accordo di Parigi per il riscaldamento globale a lungo termine potrebbe essere raggiunto entro la fine di questo decennio, oltre un decennio in anticipo rispetto a quanto previsto in base al tasso di riscaldamento al momento della firma dell'accordo» (Copernicus Climate Change Service, 2025).

Osservare e prevedere però non basta e purtroppo, se si guarda alle azioni di molti decisori politici – il ritiro degli Stati Uniti d'America dalla World Health Organization e proprio dagli Accordi di Parigi, ad esempio –, non c'è forse da essere ottimisti. Tuttavia alla comunità scientifica resta l'obbligo civile, oltre che disciplinare, di sollecitare una consapevolezza che sia basata su dati di qualità, osservati sistematicamente e adeguatamente elaborati. C'è poi un ulteriore modo di osservazione del cambiamento climatico, che ci riguarda tutti come abitanti del pianeta. Anche in questo caso si sono intensificate, nell'ultimo decennio, le ricerche, soprattutto in ambito statistico, sul livello d'informazione delle persone su questi temi come pure sulla percezione del rischio, in termini generali o specificamente legata agli eventi climatici eccezionali quali alluvioni o ondate di calore. Alcuni risultati ci convincono che, probabilmente, sarebbe oggi necessaria un'educazione civica legata a taluni comportamenti: sia quelli che possono influenzare, seppure in misura minima se presi individualmente, il riscaldamento globale sia quelli che possono ridurre il rischio per le persone in caso di eventi, catastrofici e non, legati al clima. Se insomma l'impegno maggiore è richiesto certamente ai governi e alle organizzazioni internazionali, ogni abitante della Terra può dare un contributo. Riconoscendo poi che gli obiettivi dell'Agenda 2030 sono tutti interconnessi tra loro e che la lotta contro il cambiamento climatico (obiettivo 13) si concretizza anche attraverso molte azioni che partono dalla volontà di raggiungere altri obiettivi, da un lato, e, dall'altro, produce su questi effetti positivi, l'impegno quotidiano dei cittadini ma anche quello civile delle cittadinanze nella loro forma collettiva potrebbe costituire una significativa azione *bottom up* utile magari a sensibilizzare istituzioni e governi riluttanti.

Economie solide, economie fragili

Tornando per un attimo ai miti evocati in premessa, bisogna osservare che i danni legati al riscaldamento globale non ricadono quasi mai sugli stessi soggetti che, in qualche misura, ne sono responsabili. Fetonte è una «figura drammaticamente moderna» perché «Anche l'uomo d'oggi, infatti, l'uomo dei Paesi sviluppati [...] gelosamente (e golosamente) si crede autorizzato a godersi il proprio privilegio sul pianeta [...] anche l'uomo moderno pretende che gli sia stato concesso un "diritto" sulla natura che in realtà, proprio per la sua umana condizione, non ha né legittimazione etica né legittimazione giuridica [e] si accinge a violare – anzi lo ha già fatto – la norma non negoziabile che la natura gli ha imposto. Quella di non andare oltre, di rispettare i limiti di sostenibilità del pianeta, introducendo il seme del disordine nel cosmo ordinato delle leggi naturali» (Bettini, 2025). In più le conseguenze di queste sconsiderate azioni stanno ricadendo sulle economie fragili e sulle aree del mondo che, in un solo apparente, piutto-

2011 the Italian Air Force station and the National Research Council's "Vittori" station, on the Apennine peak of Monte Cimone, were awarded the WMO designation of "Global Station", one of nine in the world and the only one in Italy and the entire Mediterranean basin. During the conference, it was illustrated how satellite data, ground-based data, and climate models are now able to provide a detailed picture of the short- and long-term consequences of the climate crisis on the planet, thanks in particular to the European "Copernicus" program, which, through six satellites, monitors CO_2 and CH_4 emissions from anthropic activities, land and sea surface temperatures, biodiversity and water quality, coasts, glaciers, etc. in pursuit of its four objectives: *Combatting Climate Change*, *Food Security and Water Management*, *Monitoring Land and Natural Resources*, *Safeguarding the Arctic*. The illustrated data are worrying and more are those recently published in the latest "Copernicus" report, which states that not only 2025 was the third warmest year on record but also that, for the first time, a period of three consecutive years recorded average global temperatures more than 1.5°C above the pre-industrial level and that "based on the current rate of warming, the 1.5°C limit set by the Paris Agreement for long-term global warming could be reached by the end of this decade, more than a decade earlier than expected based on the rate of warming when the agreement was signed" (Copernicus Climate Change Service, 2025).

However, observing and predicting is not enough, and unfortunately, considering the actions of many political decision-makers – the United States' abandonment of the World Health Organization and the Paris Agreement, for example – there is perhaps no reason to be optimistic. However, the scientific community remains under a civic, as well as disciplinary, obligation to promote an awareness based on quality data, systematically observed and adequately processed. Another way of observing climate change then exists, which affects all the inhabitants of the planet. Here too, research has intensified over the last decade, especially in the statistical field, into people's level of information on these issues as well as their perception of risk, both generally and specifically related to exceptional climatic events such as floods or heat waves. Over the past decade, research, especially in the statistical field, has intensified into people's level of information on these issues, as well as their perception of risk, both generally and specifically related to exceptional climate events such as floods or heat waves. Some findings convince us that civic education is probably needed today, addressing certain behaviours: both those that can influence global warming, albeit minimally when considered individually, and those that can reduce people's risk in the case of climate-related events. While the most relevant commitment is certainly required of governments and international organizations, every inhabitant of the Earth can contribute. Recognizing that the goals of the Agenda 2030 are all interconnected and that the fight against climate change (Goal 13) is also achieved through many actions that concern other goals, on the one hand, and produce positive effects on these, on the other, the daily commitment of citizens, but also their civic engagement in their collective form,

sto drammatico, paradosso, subiscono le conseguenze di comportamenti che sono prevalentemente delle economie solide. Ma anche questa è una visione non particolarmente accorta, se è vero che il cambiamento climatico genera conseguenze che vanno oltre il clima stesso. Un bel testo di Grammenos Mastrojeni e Antonello Pasini mette in collegamento cambiamento climatico, conflitti e migrazioni, di fatto convincendoci, caso mai ce ne fosse bisogno, che anche la distinzione che i Paesi "sviluppati" fanno tra chi ha diritto a richiedere asilo politico perché in fuga da una guerra e i cosiddetti "migranti economici" – oggi in un'ansia definitoria divenuti anche "migranti climatici" – sia del tutto pretestuosa: si tratta in ogni caso di "migrazioni di sopravvivenza". Semplificando forzatamente la tesi, più che argomentata, dati scientifici alla mano, nel testo (Mastrojeni, Pasini, 2017), le attività umane stanno inducendo cambiamenti climatici che, per velocità e misura, non hanno precedenti nel passato e se, nelle economie ricche, si fa fronte comprando altrove ciò che non si può più produrre e mettendo in campo strategie di adattamento, nelle economie 'fragili', di contro, la competizione per la sopravvivenza innesca conflitti e, quindi, migrazioni. Con occhi diversi si dovrebbe quindi guardare a questi fenomeni ricordando che «Le specie umane migrano da almeno due milioni di anni: lo hanno fatto prima in Africa, poi ovunque e il risultato è che il quadro delle popolazioni umane si è arricchito: fughe, ondate, convivenze, selezione naturale, sovrapposizione tra flussi successivi, forse conflitti tra diverse specie umane, fino a *Homo Sapiens*. Il cervello è cresciuto e con esso la flessibilità adattativa e la capacità migratoria. Gli esseri umani sono evoluti anche grazie alle migrazioni: questa è una delle ragioni per cui garantire la libertà di migrare, soprattutto nel momento in cui i cambiamenti climatici, oltre che le emergenze politiche, sociali ed economiche, provocano flussi forzati» (Calzolaio and Pievani, 2016).

Mediterranean Climate. Portraits of change

È stato già affermato in precedenza che dovranno essere governi e organizzazioni internazionali gli artefici del cambiamento ma analogamente è stata richiamata l'importanza di un'educazione civica sui temi che si stanno qui affrontando e, quindi, di un ruolo necessario anche della scuola e dell'università. All'interno di un progetto accademico ampio e con molte articolazioni, su quello che è probabilmente "il" tema della nostra contemporaneità, Salvatore Esposito, fotografo documentarista, ha realizzato "Mediterranean climate. Portraits of change" (Esposito, 2025).
All'interno del progetto SULIEIA (Supporting Universities in digital transition, educational innovation, & environment protection fostering the Launch of Italian Educational Institutions Abroad), di cui la "Federico II" è capofila, il fotografo napoletano ha guidato un BIC (Blended Intensive Course) con l'obiettivo di sperimentare, nella pratica e insieme agli studenti, come la fotografia possa farsi strumento potente per la comunicazione della ricerca a un pubblico più ampio di quello dei soli "addetti ai lavori", mettendola a servizio di un obiettivo civile. Gli scatti realizzati in Tunisia, cui si sono aggiunti quelli di un'ulteriore campagna in Spagna, sono confluiti in una Mostra che, allestita nei diversi dipartimenti dell'Ateneo napoletano, ha messo a disposizione lo sforzo documentarista – e artistico – di Salvatore Esposito come occasione per sollecitare un necessario dibattito su un tema oggi improcrastinabile quale quello degli effetti del

could constitute a significant bottom-up effort, perhaps useful in raising awareness among reluctant institutions and governments.

Solid Economies, Fragile Economies

Talking again of myths, as in premise, it should be noted that the damage linked to global warming almost never falls on the same individuals who are responsible for it. Fetonte is a "dramatically modern figure" because «[…] modern man, the man of developed countries […] jealously (and voraciously) believes himself entitled to enjoy his privilege on the planet […] modern man also claims to have been granted a 'right' over nature which in reality, precisely because of his human condition, has neither ethical nor legal legitimacy [and] is preparing to violate – indeed, has already done so – the non-negotiable norm that nature has imposed on him: that of not going beyond, of respecting the limits of planet sustainability, introducing the seed of disorder into the ordered cosmos of natural laws» (Bettini, 2025). Furthermore, the consequences of these irresponsible actions are falling on fragile economies and on areas of the world that, in a dramatic paradox, are suffering the consequences of behaviours that are predominantly those of solid economies even if it has to be considered that climate change generates consequences that go beyond the climate itself. An interesting text by Grammenos Mastrojeni and Antonello Pasini links climate change, conflict, and migration, affirming that the distinction, made by "developed" countries, between those entitled to ask for political asylum and the so-called "economic migrants" – now, with a kind of anxiety of giving definitions, also "climate migrants" – is totally unfounded: these are, in any case, "survival migrations". Here simplifying the thesis, deeply argued in the text (Mastrojeni and Pasini, 2017), human activities are inducing climate changes that, in speed and extent, have no precedent in the past. While this problem is addressed by buying elsewhere what can no longer be produced and by implementing adaptation strategies in rich economies, opposite in fragile economies competition for survival triggers conflicts and, therefore, migrations. Therefore these phenomena should be observed with different eyes, remembering that "Human species have been migrating for at least two million years: they did it first in Africa, then everywhere else, and the result is that the framework of human populations has been enriched: escapes, waves, cohabitations, natural selection, overlap between successive flows, perhaps conflicts between different human species, up to *Homo Sapiens*. The brain has grown, and with it, adaptive flexibility and migratory capability. Humans have also evolved thanks to migration: this is one of the reasons why it is important to guarantee the freedom to migrate, especially at a time when climate change, as well as political, social, and economic emergencies, are causing forced flows" (Calzolaio and Pievani, 2016).

Mediterranean Climate. Portraits of change

Governments and international organizations should be the architects of change, but the importance of civic education on the issues – as previously stated – is also relevant and therefore, the role of schools and universities. As

cambiamento climatico sulle città e sui territori. Le due campagne fotografiche ci raccontano di questioni in parte differenti ma complementari. In Spagna sono documentati gli effetti dell'alluvione che, nel 2024, ha colpito la regione di Valencia provocando oltre duecento vittime e danni molto consistenti. Il fenomeno scatenante è stato quello della Dana (Depresión Aislada en Niveles Altos) che consiste nella formazione di una zona di bassa pressione atmosferica ad alta quota formata da aria fredda che, scontrandosi con l'aria calda e umida presente sulla superficie del Mediterraneo, provoca fenomeni temporaleschi. Si tratta di un evento frequente nel Mediterraneo ma senza precedenti ne è stata, nel 2024, l'intensità, causata dall'innalzamento di 2°C della temperatura della superficie del mare. Le inquadrature di Salvatore Esposito fissano la scomparsa dello spazio pubblico – quello nel quale una comunità rappresenta i valori del suo vivere insieme – invaso dal fango e dai detriti e sul quale gli edifici restano come "personaggi" in apparenza privi di vita. È la rappresentazione di un evento calamitoso che, con la potenza della natura, in pochissimo tempo ha cancellato vite – quelle ricordate dalla installazione artistica di Roberto Marquez –, ma anche distrutto la quotidianità della vita. Sono immagini che provocano, scuotono. Le inquadrature realizzate in Tunisia hanno, invece, un carattere differente: in alcuni casi si potrebbe quasi correre il rischio che la bellezza dello scatto diventi estetizzante di una condizione di realtà che si intende invece criticamente documentare. Le inquadrature sono meno impattanti di quelle spagnole, a tratti struggenti nel rivelare effetti di un cambiamento che appare qui lento e forse, in qualche misura, finanche rassegnato. In Tunisia l'innalzamento delle temperature sta provocando infatti l'aumento dell'aridità dei suoli e la riduzione delle precipitazioni, compromettendo le attività agricole in cui, soprattutto nell'interno, quote consistenti della popolazione trovano sostegno. L'innalzamento del livello del mare e l'erosione delle coste stanno facendo scomparire le spiagge e danneggiando le infrastrutture turistiche che, lungo le coste, erano diventate, per molti, occasione di lavoro e principale fonte di reddito. Due sponde del Mediterraneo, due fenomeni diversi ma entrambi impattanti sui luoghi e sulle condizioni di vita delle popolazioni.

Come ha di recente affermato Ivano Dionigi, rettore emerito dell'Alma Mater Studiorum di Bologna, alle tre "I" della ultima riforma universitaria – informatica, impresa, inglese – sarebbe bene sostituirne altrettante, profondamente diverse: Interrogare, Intelligere, Invenire. Il progetto di Salvatore Esposito e le sue foto "interrogano" la società, rendono "intelligibile" un fenomeno che alcuni vorrebbero addirittura negare e – uno dei significati del verbo latino *in-venio* – producono conoscenza (Dionigi, 2025).

Naturalmente, e in conclusione, esiste poi un ruolo specifico dell'Architettura, per sua natura disciplina "ottimista" che, nell'etimologia latina della parola progetto/*projèctus*, contiene uno sguardo indirizzato al futuro. L'osservazione descrive e denuncia, la denuncia può sensibilizzare, ma, inevitabilmente lontani da una riduzione delle emissioni climalteranti che possa significativamente incidere su intensità e frequenza dei fenomeni climatici estremi, dobbiamo immediatamente porci il problema di azioni che possano produrre effetti significativi in termini di adattamento (Losasso *et al*., 2020). Lo scenario è preoccupante, tuttavia l'autorevole voce di Antonello Pasini ci rammenta che i cambiamenti climatici sono stati prodotti dall'essere umano

part of a broad academic project on what is probably "the" theme of our contemporary age, the documentary photographer Salvatore Esposito realized the project "Mediterranean Climate. Portraits of Change" (Esposito, 2025).

As part of SULIEIA project (Supporting Universities in digital transition, educational innovation, & environment protection fostering the Launch of Italian Educational Institutions Abroad) project, led by Federico II University, the Neapolitan photographer realized a BIC (Blended Intensive Course) with the aim of experimenting, in practice and together with students, how photography can be a powerful tool for communicating research to an audience wider than "insiders", putting it at the service of a civil goal. The photographs taken in Tunisia, along with those from a further campaign in Spain, were brought together in an exhibition staged in many departments of the University of Naples. This exhibition offered Salvatore Esposito's documentary – and artistic – efforts as an opportunity to incentive a needed debate on an urgent topic: the effects of climate change on cities and territories. The two photographic campaigns address different but related issues. In Spain, the effects of the 2024 flood that hit the Valencia region, causing over two hundred victims and significant damage, were documented. The triggering phenomenon was the Dana (Depresión Aislada en Niveles Altos), which consists of the formation of a high-altitude low-pressure area formed by cold air that, colliding with warm, moist air at the surface of the Mediterranean, causes thunderstorms. This is a frequent event in the Mediterranean, but its intensity in 2024, caused by a 2°C rise in temperature of sea surface, was unprecedented. Salvatore Esposito's shots capture the disappearance of the public space – the space in which a community embodies the values of its shared life – invaded by mud and debris, with buildings standing like seemingly lifeless "characters." It's the representation of a calamitous event that, with the power of the nature, quickly caused deaths – those commemorated in Roberto Marquez's art installation – but also destroyed the daily life. These images provoke and shock. The shots taken in Tunisia, however, have a different character: in some cases with the risk that the beauty of the shot produces an aestheticization of a reality that it is intended to critically document. The shots are less impactful than the Spanish, at times poignant in revealing the effects of a change that here appears slow and perhaps, to some extent, even resigned. In Tunisia, rising temperatures are causing soil aridity and reduced rainfall, compromising agricultural activities, which, especially in the interior, support a significant part of the population. Rising sea levels and coastal erosion are causing beaches to disappear and damaging the tourist infrastructure that, along the coast, had become, for many, an opportunity for employment and the main source of income. Two shores of the Mediterranean, two different phenomena, but both impacting the landscape and the living conditions of their populations.

As Ivano Dionigi, rector *emeritus* of the Alma Mater Studiorum of Bologna, recently stated, the three "I" of the latest university reform – *informatica*, *impresa*, *inglese* – should be replaced with three profoundly different ones: *Interrogare*, *Intelligere*, *Invenire*. Sal-

e non dalla Natura stessa e questa è la condizione che ci rende possibile pensare, se non di fermare questo processo, almeno di migliorare la nostra condizione globale (Pasini, 2020; 2025). E se per alcune 'misure' – isolamento degli edifici, sistemi di climatizzazione efficienti, mobilità ecologica – la conoscenza del nostro tempo può venirci in aiuto, bisognerebbe forse anche ricordare che altre – permeabilità dei suoli, bilanciato rapporto tra costruito e spazi di natura – sono parte di un'antica sensibilità che il nostro mestiere ha smarrito e deve ora, urgentemente, recuperare (Sansò and Visconti, 2019).

REFERENCES

Bettini, M. (2025), *Arrogante umanità. Miti classici e riscaldamento globale*. Einaudi, Torino.

Calzolaio, V. and Pievani, T. (2016), *Libertà di migrare. Perché ci spostiamo da sempre ed è bene così*. Einaudi, Torino.

Copernicus Climate Change Service (2025), "Global Climate Highlights - Full Report". Available at: https://climate.copernicus.eu/sites/default/files/custom-uploads/GCH-2025/GCH2025-full-report.pdf (accessed 12 February 2026).

Dionigi, I. (2025), *Magister. La scuola la fanno i maestri non i ministri*. Laterza, Bari-Roma.

Esposito, S. (2025), *Mediterranean Climate. Portraits of Change*. Clean Edizioni, Napoli.

Losasso, M., Lucarelli, M.T., Rigillo, M., Valente, R. (eds.) (2020), *Adattarsi al clima che cambia. Innovare la conoscenza per il progetto ambientale | Adapting to the Changing Climate. Knowledge Innovation for Environmental Design*. Maggioli, Milano.

Mastrojeni, G., Pasini, A. (2017), *Effetto serra, effetto guerra. Il clima impazzito, le ondate migratorie, i conflitti. Il riscaldamento globale, i ricchi, i poveri*. Chiarelettere, Milano.

Pasini, A. (2025), *La sfida climatica. Dalla scienza alla politica: ragioni per il cambiamento*. Codice edizioni, Torino.

Pasini, A. (2020), *L'equazione dei disastri. Cambiamenti climatici su territori fragili*. Codice edizioni, Torino.

Sagan, C. (1997), *Pale Blue Dot: A Vision of the Human Future in Space*. Random House USA Inc., New York.

Sansò, C. and Visconti, F. (2019), "Impianto urbano e valori tipo-morfologici nel progetto di adattamento agli impatti del cambiamento climatico | Urban fabric and typo-morphological values within the climate-adaptive project", in D'Ambrosio, V., Leone, F.M. (Eds.), *Progettazione ambientale per l'adattamento al Climate Change 2. Strumenti e indirizzi per la riduzione dei rischi climatici | Environmental Design for Climate Change adaptation 2. Tools and Guidelines for Climate Risk Reduction*. Clean Edizioni, Napoli.

vatore Esposito's project and his photographs "question" (*Interrogare*) society, making "intelligible" (*Intelligere*) a phenomenon that some would even deny, and – according to the meanings of the Latin verb *in-venio*vproducing knowledge (Dionigi, 2025).
Obviously, and finally, there is a specific role for Architecture, by its very nature an "optimistic" discipline, which, in the Latin etymology of the word project/projèctus, contains a gaze, directed towards the future. Observation describes and denounces, denunciation can raise awareness, but – today still inevitably far from a reduction in climate-altering emissions able to significantly impact the intensity and frequency of extreme weather events – facing the problem of actions that can produce significant effects in terms of adaptation is urgent (Losasso *et al*., 2020). The scenario is worrying. However, the authoritative voice of Antonello Pasini reminds us that climate change has been produced by human beings and not by Nature itself and this is the condition that makes possible to think, if not of stopping this process, at least of improving our global condition (Pasini, 2020; 2025). If for some actions – building insulation, efficient air conditioning systems, eco-friendly mobility – the knowledge of our times can help, we should perhaps also remember that others 'measures' – soil permeability, a balanced relationship between buildings and natural spaces – are part of an ancient responsiveness that our age and discipline has lost and has to be now urgently recovered (Sansò and Visconti, 2019).
E se per alcune 'misure' – isolamento degli edifici, sistemi di climatizzazione efficienti, mobilità ecologica – la conoscenza del nostro tempo può venirci in aiuto, bisognerebbe forse anche ricordare che altre – permeabilità dei suoli, bilanciato rapporto tra costruito e spazi di natura – sono parte di un'antica sensibilità che il nostro mestiere ha smarrito e deve ora, urgentemente, recuperare (Sansò and Visconti, 2019).



| 01

01 | Spagna, Chiva, 15 novembre 2024. © Salvatore Esposito
Spain, Chiva, November 15, 2024. © Salvatore Esposito



| 02

02 | Spagna, Picanya, 14 novembre 2024. © Salvatore Esposito
Spain, Picanya, November 14, 2024. © Salvatore Esposito

03 |



03 | Spagna, Paiporta, 14 novembre 2024. © Salvatore Esposito
Spain, Paiporta, November 14, 2024. © Salvatore Esposito

04 |



04 | Spagna, Valencia, 14 novembre 2024. Installazione di Roberto Marquez per le 229 vittime dell'alluvione. ©Salvatore Esposito
Spain, Valencia, November 14, 2024. Installation by Roberto Marquez for the 229 victims of the flood. © Salvatore Esposito



| 05

05 | Tunisia, Tozeur, 26 marzo 2025. © Salvatore Esposito
Tunisia, Tozeur, March 26, 2025. © Salvatore Esposito



| 06

06 | Tunisia, isola di Kerkennah, 27 marzo 2025. Una carretta carretta morta. ©Salvatore Esposito
Tunisia, Kerkennah island, March 27, 2025. A dead carretta carretta. © Salvatore Esposito

07 |



07 | Tunisia, isola di Djerba, 26 marzo 2025. © Salvatore Esposito
Tunisia, Djerba island, March 26, 2025. © Salvatore Esposito

08 |



08 | Tunisia, 27 marzo 2025. © Salvatore Esposito
Tunisia, March 27, 2025. © Salvatore Esposito

Cambiamento climatico, incertezza e valutazione del rischio per le strategie di adattamento nel progetto di architettura

Just Accepted: November 28, 2025 Published: July 29, 2026

Giancarlo Paganin[1], https://orcid.org/0000-0002-1508-7570 giancarlo.paganin@polimi.it
Cinzia Talamo[2], https://orcid.org/0000-0001-5916-7620 cinzia.talamo@polimi.it
Nazly Atta[2], https://orcid.org/0000-0003-4221-2020 nazly.atta@polimi.it
[1] Dipartimento di Architettura e Studi Urbani, Politecnico di Milano, Italia
[2] Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito, Politecnico di Milano, Italia

Abstract. Il saggio analizza il rapporto tra ambiente costruito e impatti derivanti dai cambiamenti climatici con l'obiettivo di evidenziare la necessità di sviluppare metodi e strumenti per gestire efficacemente in fase di progetto i numerosi fattori di incertezza presenti nel quadro delle azioni climatiche sugli edifici. In questo ambito il paper propone una analisi delle numerose tecniche di valutazione del rischio disponibili in letteratura per individuare strumenti in grado di supportare la progettazione edilizia nella gestione della incertezza delle azioni climatiche, individuando opportune strategie di adattamento. In una prospettiva di trasferimento tecnologico da altri settori produttivi si propone una sperimentazione nel progetto edilizio di una specifica tecnica di valutazione dei rischi – la *Hazard and Operability study* HAZOP – adattandone le caratteristiche al progetto edilizio e sperimentandone la applicazione in un caso di studio nell'ambito del progetto europeo RE-SKIN.

Parole chiave: Gestione del rischio; Tecnica HAZOP; Rischio climatico; Progetto; Strategie di adattamento.

Introduzione

I molteplici fenomeni connessi con il cambiamento climatico stanno ponendo una urgente sfida ai progettisti e agli altri operatori della filiera delle costruzioni quando chiamati a definire strategie di adattamento: si tratta di una sfida culturale per la quale sono necessari il confronto con molteplici discipline e aree di competenza e l'acquisizione di specifici e finalizzati metodi e strumenti di indagine e valutazione al fine di riconoscere bisogni emergenti e vulnerabilità di sistema, definire priorità, prefigurare soluzioni di adattamento e prevedere la loro efficacia.
Le strutture di progettazione sono chiamate ad acquisire nuove conoscenze e chiavi interpretative per comprendere gli effetti multiscalari sull'ambiente costruito di fenomeni climatici complessi per le loro interazioni, difficilmente riconducibili a precisi perimetri spaziali e temporali e incerti nei loro accadimenti. All'interno di questo scenario di complessità e incertezza, oltre che una consapevolezza della dimensione e delle dinamiche del cambiamento climatico, emerge la necessità di competenze analitiche. Tali competenze sono indispensabili, ad esempio, per: l'interpretazione dei dati climatici (dalla micro alla macroscala); l'indagine delle dinamiche prestazionali dei manufatti edilizi sottoposti ai pericoli cronici e acuti del cambiamento climatico, difficilmente modellizzabili nelle evoluzioni dei loro effetti; il riconoscimento delle trasformazioni dei comportamenti dei fruitori dell'ambiente costruito.
In questa prospettiva di allargamento di conoscenze, competenze e relazioni si collocano gli apparati metodologici della valutazione del rischio climatico, che rappresentano oggi una importante potenzialità come supporto ai processi di conoscenza e decisione finalizzati alla definizione di misure di adattamento. Attualmente la maggior parte delle applicazioni di questi apparati, sviluppati da importanti organismi internazionali (IPCC, ecc.), si colloca alla scala regionale e urbana: è urgente sperimentare alla scala dell'edificio l'appropriatezza dei metodi e strumenti per la valutazione del rischio climatico oggi disponibili, eventualmente individuando logiche di trasferimento e finalizzazione rispetto al progetto di architettura.

Climate change, uncertainty and risk assessment for adaptation strategies in architectural design

Abstract. The paper analyses the relationship between the built environment and impacts deriving from climate change with the aim of highlighting the need to develop methods and tools to effectively manage the numerous uncertainty factors present in the framework of climate actions on buildings in the design phase. In this context, the paper proposes an analysis of the many risk assessment techniques available in the literature to identify tools capable of supporting building design in managing the uncertainty of climate actions by defining appropriate adaptation strategies. In a perspective of technology transfer from other production sectors, the paper proposes an application to the building scale of a specific risk assessment technique – the Hazard and Operability study (HAZOP) – adapting its characteristics to the building project and testing its application to a case study within the European *RE-SKIN* project.

Keywords: Risk management; HAZOP technique; Climate risk; Project; Adaptation strategies.

Introduction

The multiple phenomena related to climate change are posing an urgent challenge to designers and other operators in the construction supply chain when called upon to define adaptation strategies. It is a cultural challenge, which requires the convergence of multiple disciplines and areas of expertise. It also needs the acquisition of specific and targeted methods and tools of investigation and evaluation to recognise emerging needs and system vulnerabilities, define priorities, envisage adaptation solutions, and predict their effectiveness.
Design structures are called upon to acquire new knowledge and interpretative keys to understand the multiscalar effects on the built environment of complex climatic phenomena resulting from their interactions. These are difficult to trace back to precise spatial and temporal perimeters and are uncertain concerning occurrence. The need for analytical skills, as well as awareness of the extent and dynamics of climate change, emerges within this complex and uncertain scenario. These skills are essential, for example, to interpret climate data (from micro to macro scale); to investigate the performance dynamics of buildings subjected to the chronic and acute dangers of climate change, which are difficult to model in the evolution of their effects; and to recognise transformations in the behaviour of users of the built environment.
The methodological apparatuses of climate risk assessment are situated in this perspective of extended knowl-

ISSN online: 2239-0243 | © 2025 Author(s) | http://www.fupress.com/techne | DOI: 10.36253/techne-18696
Open access, peer-reviewed article published by Firenze University Press (https://www.fupress.com) and distributed, except where otherwise noted, under the terms of the CC BY 4.0 License for content and CC0 1.0 Universal for metadata

Tab. 01 | Classificazione dei pericoli (*hazard*) legati al clima. Fonte: Commission Delegated Regulation (EU) 2021/2139 4 June 2021
Classification of climate-related hazards. Source: Commission Delegated Regulation (EU) 2021/2139 4 June 2021

La dimensione del problema climatico e le strategie di adattamento

A quasi trent'anni dal protocollo di Kyoto, che ha aperto a una presa di coscienza collettiva sulla responsabilità per il cambiamento climatico delle emissioni antropogeniche di gas serra, a oggi le misurazioni evidenziano che le concentrazioni di CO_2 hanno raggiunto il massimo degli ultimi 2 milioni di anni, e che per gli altri gas serra CH4 e N2O sono arrivate al massimo degli ultimi 800.000 anni (WMO, 2025). Gli effetti del cambiamento climatico si presentano come pericoli sia cronici – cambiamenti permanenti – che acuti (Tab. 1), anche identificati come eventi estremi, ormai noti nei loro effetti, ma altamente incerti nei loro tempi di accadimento e nella magnitudo (IPCC, 2023).

L'analisi del nesso di causalità tra cambiamento climatico ed evento estremo specifico è stata oggetto di numerosi studi (Zhai *et al*., 2018; Otto, 2023; Perkins-Kirkpatrick *et al*., 2022). Per quanto riguarda la regione Europea, tali studi evidenziano come i più rilevanti eventi siano relativi a ondate di calore e, a seguire, piogge estreme, inondazioni e siccità.
L'impatto degli eventi climatici – sia cronici che acuti – è rilevante sull'ambiente naturale e antropico con gravi ricadute per la salute e l'incolumità delle popolazioni come pure per i danni economici: in Europa si stima che nel periodo 1980-2023 oltre 240.000 persone abbiano perso la vita per eventi climatici e i danni economici abbiano superato abbondantemente i 700 miliardi di euro (Fig. 1).

| Tab .01

	TEMPERATURE-RELATED	BOUND TO THE WIND	WATER-RELATED	CORRELATED SOLID MASS
CHRONIC	Temperature change (air, fresh water, sea water)	Changing the wind regime	Change in precipitation regime and type (rain, hail, snow/ice)	Coastal erosion
	Heat stress		Precipitation or hydrological variability	Soil degradation
	Temperature variability		Ocean acidification	Soil erosion
	Melting permafrost		Saline intrusion	Solifluction
			Sea level rise	
			Water stress	
ACUTE	Heat wave	Cyclone, hurricane, typhoon	Drought	Avalanche
	Cold/frost wave	Storm (including blizzards, dust, and sandstorms)	Heavy precipitation (rain, hail, snow/ice)	Landslide
	Fires	Air Horn	Floods (coastal, fluvial, rainwater, underground)	Subsidence
			Collapse of glacial lakes	

edge, skills and relationships. Today they have remarkable potential as support for knowledge and decision-making processes aimed at defining adaptation measures. Most of the applications of these devices, developed by leading international bodies (IPCC, etc.), are currently located at the regional and urban scale. It is urgent to experiment at the building scale with the appropriate methods and tools for climate risk assessment available today, possibly identifying a rationale of transfer and finalisation with respect to the architectural project.

Extent of the climatic issue and adaptation strategies

Almost thirty years after the Kyoto Protocol, which opened up a collective awareness of the responsibility for climate change of anthropogenic greenhouse gas emissions, to date measurements show that CO2 concentrations have reached the maximum levels of the last 2 million years. The levels of other greenhouse gases, such as CH4 and N2O, have reached the maximum of the last 800,000 years (WMO, 2025). The effects of climate change are both chronic – permanent changes – and acute hazards (Tab. 1), also identified as extreme events, now known in their effects, but highly uncertain in their timing of occurrence and magnitude (IPCC, 2023).
The analysis of the causal link between climate change and specific extreme events has been the subject of numerous studies (Zhai P., *et al*., 2018; Otto, 2023; Perkins-Kirkpatrick *et al*., 2022). As far as the European region is concerned, these studies show that the most relevant events are related to heat waves and are, subsequently, extreme rainfall, floods and drought.

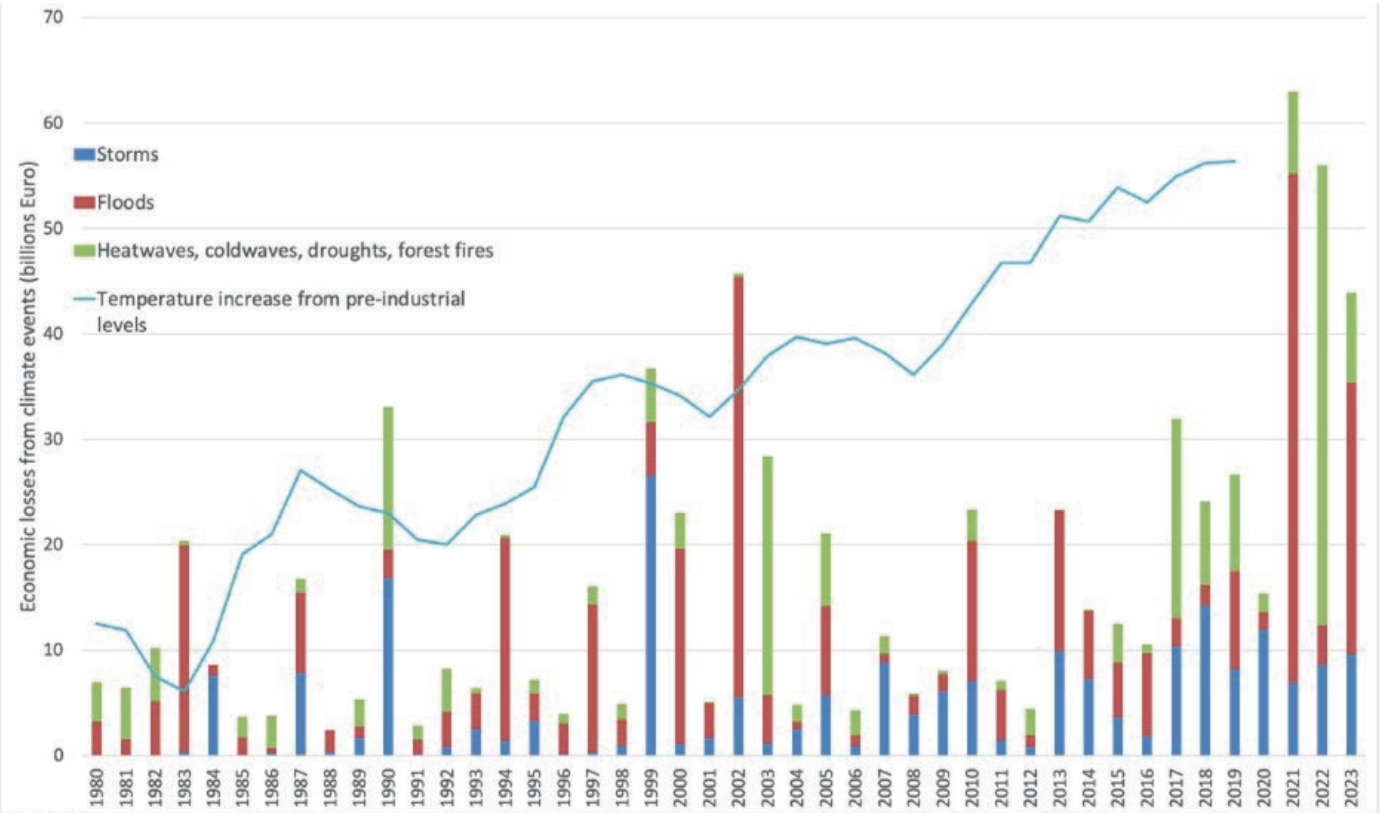
The impact of climate events – both chronic and acute – is significant on the natural and anthropogenic environment, with serious repercussions for the health and safety of populations, as well as for economic damage. It is estimated that more than 240,000 people lost their lives due to climatic events in Europe in the period 1980-2023 with economic damage exceeding 700 billion euros (Fig. 1).
The direct relationship between the average increase in global temperature and the increase in damage caused by extreme events is evident. Indeed, more than half of the total damage recorded over a period of 44 years (1980-2023) has occurred in the last 15 years, highlighting the correlation between the growth of impacts and the acceleration of temperature increase in the European region (Fig. 1).

On the basis of estimates from forecasting models and climate projections, the major international bodies (UNEP, 2024; IPCC, 2014; UNFCCC, 2015) agree that even if greenhouse gas emissions were reduced to zero today, thanks to widespread and effective mitigation actions, the time needed to slow down climate change is in the order of decades. In this scenario, climate adaptation can no longer be seen as a secondary or alternative measure, assuming instead the role of a priority and urgent strategy that must be developed in a multi-scalar dimension, and according to multidisciplinary approaches (Losasso *et al*., 2020; Losasso, 2025), as is the case for mitigation actions.
In the production, management and transformation of the built environment, the definition of adaptation measures at various scales requires

01 | Danni economici e decessi da eventi climatici estremi in Europa. Grafico: andamento dei danni economici causati da eventi climatici estremi in Europa nel periodo 1980-2023 confrontati con l'incremento medio delle temperature annuali rispetto ai livelli pre-industriali. Fonte: European Environment Agency website https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/economic-losses-from-climate-related/annual-economic-losses-caused. Tabella: distribuzione dei danni economici e dei decessi da eventi climatici estremi in Europa dal 1980 al 2023: primi cinque paesi per entità del danno economico. Fonte: https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/economic-losses-from-climate-related

Economic damage and deaths from extreme weather events in Europe. Graph: Trend in economic damage caused by extreme weather events in Europe in the period 1980-2023, considering the average increase in annual temperatures, compared to pre-industrial levels; source: European Environment Agency website https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/economic-losses-from-climate-related/annual-economic-losses-caused. Table: Distribution of economic damage and deaths from extreme weather events in Europe from 1980 to 2023: top five countries in terms of extent of economic damage; source: https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/economic-losses-from-climate-related

01 |



Country	Total losses	Losses per sqkm	Losses per citizen	Insured losses	Insured losses	Fatalities
	Millions EURO	EURO	EURO	Millions EURO	%	N
Germany	180.372	504.438	2.225	54.759	30	104544
Italy	133.934	443.373	2.311	5.916	4	21822
France	129.897	203.449	2.092	46.052	35	50461
Spain	95.966	189.662	2.258	5.243	5	32053
Poland	20.630	66.138	545	1.379	7	2553
Total EU-27	738.280			139.872		245719

the ability to develop, integrate and implement "hard" and "soft" strategies (Sovacool, 2011) by balancing choices based on assessments of risks associated with the effects of climate change, and their impacts in a condition of highly uncertain forecasts of occurrence (Mentges, *et al.* 2023, WEC, 2018).

The Climate-ADAPT adaptation platform (Source: https://climate-adapt.eea.europa.eu) categorises three main categories of adaptation measures, namely grey (infrastructure, technological and engineering solutions), green (nature-based solutions), and soft (political, legal, social, managerial, governance and financial measures). IPCC2 (2014) reinforces the dual "material" and "immaterial" nature of adaptation measures by classifying them as structural and physical, social and institutional. This duality brings out new needs, and the need to develop design approaches oriented towards the flexibility and adaptability of physical systems, besides services capable of strengthening the resilience of systems by leveraging the organisation and management of information (Bernardini, 2024).

Building design, uncertainty and climate risk

The operators in the construction supply chain now have to deal with climate change in their design and production strategies which, as the data show, appears to be characterised by multiple aspects of uncertainty such as speed of evolution and magnitude of the phenomena, ways in which they will affect natural and anthropogenic systems, deriving effects and their interferences, possible impact of current and future policies, funding, regulations and measures.

In this scenario, in which traditional statistical methods and forecasting models no longer appear sufficient to support cognitive and decision-making processes (Taleb, 2009), designing and managing the built environment from the perspective of adaptation, in its hard and soft forms, as a strategy for managing uncertainty implies approaching the culture of risk. Specifically concerning climate risk, this approach found initial criteria, methods and tools in the context of Disaster Risk Reduction (DRR) (Wen *et al.*, 2023; Imamguluyev *et al.*, 2025). The method has steadily evolved, particularly in the last decade (IPCC 2007, IPCC 2014, IPCC 2023, ISO 14901), with the consolidation of some interrelated concepts (Tab. 3). These are essential for assessing climate risk in anthropogenic systems, for developing adaptive design strategies, and for defining intervention priorities. Hazard, vulnerability, sensitivity, exposure, adaptive capacity, and impact are the key concepts common to a series of approaches to climate risk estimation, developed by different international

Il rapporto diretto tra l'aumento medio della temperatura globale e l'incremento dei danni provocati dagli eventi estremi appare evidente: del totale dei danni che sono stati registrati in un periodo di 44 anni (1980-2023) più della metà è stato registrato negli ultimi 15 anni evidenziando la correlazione tra la crescita degli impatti e la accelerazione dell'aumento di temperatura della regione europea (Fig. 1).

Sulla base delle stime derivanti dai modelli previsionali e dalle proiezioni climatiche, i maggiori organismi internazionali (UNEP, 2024; IPCC, 2014; UNFCCC, 2015) concordano sul fatto che anche se le emissioni di gas serra venissero ridotte a zero oggi, grazie ad azioni di mitigazione capillari ed efficaci, il tempo necessario per rallentare i cambiamenti climatici è nell'ordine di grandezza dei decenni. In questo scenario, l'adattamento climatico non può più essere visto di conseguenza come una misura secondaria o alternativa, assumendo viceversa il ruolo di strategia prioritaria e urgente che si deve sviluppare in una dimensione multiscalare e secondo approcci multidisciplinari (Losasso *et al.*, 2020; Losasso, 2025), così come avviene per le azioni di mitigazione.

Nella produzione, gestione e trasformazione dell'ambiente costruito la definizione delle misure di adattamento alle varie scale richiede la capacità di sviluppare, integrare e attuare strategie "*hard*" e "*soft*" (Sovacool, 2011) bilanciando le scelte sulla base di valutazioni dei rischi connessi con gli effetti dei cambiamenti climatici e dei loro impatti in una condizione di elevata incertezza delle previsioni di accadimento (Mentges, *et al.* 2023, WEC, 2018).

La piattaforma di adattamento Climate-ADAPT (https://climate-adapt.eea.europa.eu) individua tre principali categorie di misure di adattamento: grigie (soluzioni infrastrutturali, tecnologiche e ingegneristiche), verdi (*nature-based solutions*) e soft (misure politiche, legali, sociali, gestionali, di governance e finanziarie). IPCC[2] (2014) rafforza la duplice natura "materiale" e immateriale" delle misure di adattamento classificandole come strutturali e fisiche, sociali e istituzionali. Questa dualità fa emergere nuove esigenze e la necessità sviluppare da una parte approcci progettuali orientati alla flessibilità e alla adattabilità dei sistemi fisici, dall'altra servizi capaci di rafforzare la resilienza dei sistemi facendo leva sull'organizzazione e sulla gestione delle informazioni (Bernardini, 2024).

Progettazione degli edifici, incertezza e rischio climatico

Appare ormai ineludibile per gli operatori della filiera delle costruzioni il dover confrontarsi nelle loro strategie progettuali e produttive con il cambiamento climatico che, come i dati dimostrano, appare essere caratterizzato da molteplici aspetti di incertezza quali: velocità di evoluzione e magnitudo dei fenomeni, modalità con cui questi interesseranno i sistemi naturali e antropici, effetti derivanti e loro interferenze, possibile incidenza delle politiche, dei finanziamenti, delle normative e delle misure presenti e future.

In questo scenario, nel quale i tradizionali apparati statistici e i modelli previsionali appaiono non più sufficienti a supportare i processi conoscitivi e decisionali (Taleb, 2009), progettare e gestire l'ambiente costruito nella prospettiva dell'adattamento, nelle sue forme hard e soft, come strategia di gestione dell'incertezza implica un avvicinamento alla cultura del rischio, che, nel declinarsi nello specifico del rischio climatico, ha trovato nell'ambito

bodies to systematise and make available various methods and tools of evaluation and decision-making support (Tab. 2) for different types of decision-makers (regions, cities, organisations, etc.) in different fields of action (finance, public administration, etc.).

Developing, right from the meta-design phase (D'Ambrosio, 2017), an architectural organism characterised by adaptive capacity in terms of settlement, typology and technology implies the ability to assess the climate risk with progressive levels of in-depth analysis, by exploring the key concepts described (Tab. 3) regarding the natural and anthropic context, the modes of use, systemic interactions, the possible behaviour of users, as well as technical systems and materials.

If the analysis of climate risks is integrated into the decision-making process and the evaluation of alternative design solutions, articulated skills are required, for example, to select and interpret climate data at different spatial (from macro to micro-local level) and temporal scales; to simulate performance dynamics of buildings (not always known as, for example, the ageing time in relation to the variability and uncertainty of the magnitude of extreme events), in the presence of various chronic and acute climate hazards (Dong *et al.* 2022); and to analyse the needs of users of the built space. With respect to the latter, in order to investigate behavioural reactions and sensitivity to climate change at the level of both communities and individuals (e.g., in relation to age, gender, class), it is necessary to acquire contextual knowledge also with the support of typical methods of the social sciences (e.g., focus groups and interviews).

The several approaches to climate risk assessment (Tab. 2) include those proposed by IPCC in its Assessment Reports (AR4, AR5 and AR6), and by ISO 14091:2021 "Adaptation to climate change – Guidelines on vulnerability, impacts and risk assessment" (Monteiro *et al.*, 2022; Farinós-Dasí *et al.*, 2024; Ye *et al.*, 2025).

The IPCC and ISO approaches share some common concepts (Tab. 3) that are used differently. The model proposed by AR 4 (IPCC, 2007) aims to assess the vulnerability of systems, while the subsequent AR5 (IPCC, 2014) aims to assess the risk in relation to the characteristics of the system under consideration. The approach proposed by ISO 14091:2021 appears to be a development of the AR5 approach by highlighting the potential contribution of adaptation actions to the reduction of potential risk.

The ISO approach (Fig. 2) first assesses the potential climate risk, and then introduces the contribution of the system's adaptive capacity to change the level of risk by highlighting its value.

The approaches to risk assessment (Tab. 2) have in common a rationale of identifying the causal links between climate hazards and the extent of the consequences on human systems. In order to systematically assess the links between hazards and consequences – taking into account the multiple stakeholders involved – and to consequently identify priorities for intervention and their possible impact with respect to different value systems, the ISO 14091:2021 standard refers to the Impact Chain approach as an "*analytical approach that enables understanding of how given hazards generate direct and indirect impacts, which propagate through a system at risk*". Impact

della *Disaster Risk Reduction* (DRR) (Wen *et al*., 2023; Imamguluyev *et al*., 2025) un iniziale apparato di criteri, metodi e strumenti. Questo apparato ha visto, in particolare nell'ultimo decennio, una costante evoluzione (IPCC 2007, IPCC 2014, IPCC 2023, ISO 14901) e il consolidarsi di alcuni concetti interrelati (Tab. 3), basilari per la valutazione del rischio climatico nei sistemi antropici, per lo sviluppo di strategie progettuali adattive e per la definizione delle priorità di intervento. Pericolo, vulnerabilità, sensibilità, esposizione, capacità adattiva, impatto sono i concetti chiave, comuni ad una serie di approcci alla stima del rischio climatico, sviluppati da diversi organismi internazionali al fine di sistematizzare e mettere a disposizioni vari metodi e strumenti di supporto valutativo e decisionale (Tab. 2) per diversi tipi di decisori (regioni, città, organizzazioni, ecc.) in diversi campi di azione (finanza, amministrazione pubblica, ecc.).

Sviluppare, fin dalla fase metaprogettuale (D'Ambrosio, 2017), un organismo architettonico caratterizzato da capacità adattiva in termini insediativi, tipologici e tecnologici implica la capacità di valutare, con livelli di approfondimento progressivo, il rischio climatico analizzando i concetti chiave descritti (Tab. 3) in relazione al contesto naturale e antropico, ai modi d'uso, alle interazioni sistemiche, ai possibili comportamenti degli utilizzatori e dei sistemi tecnici e dei materiali.

Se l'analisi dei rischi climatici entra nel processo conoscitivo decisionale e nella valutazione delle soluzioni progettuali alternative sono necessarie articolate competenze, per esempio, per: la selezione e interpretazione dei dati climatici a diverse scale spaziali (dal livello macro a quello micro-locale) e temporali; la simulazione in presenza dei vari pericoli climatici cronici e acuti (Dong *et al*. 2022) delle dinamiche prestazionali degli edifici (non sempre note come, per esempio, il tempo di invecchiamento in relazione alla variabilità e alla incertezza della magnitudo degli eventi estremi); l'analisi dei bisogni dei fruitori dello spazio costruito. Rispetto a questi ultimi, per indagare reazioni comportamentali e sensibilità al cambiamento climatico a livello sia di collettività che di individui (per esempio in relazione all'età, al genere, al ceto) è necessario acquisire conoscenze contestuali anche con il supporto di metodi tipici delle scienze sociali (per esempio *focus group* e interviste).

Tra i numerosi approcci alla valutazione del rischio climatico (Tab. 2) appaiono essere maggiormente applicati quelli proposti da IPCC nei suoi *Assessment Report* (AR4, AR5 e AR6) e dalla norma ISO 14091:2021 "*Adaptation to climate change – Guidelines on vulnerability, impacts and risk assessment*" (Monteiro *et al*., 2022; Farinós-Dasí *et al*., 2024; Ye *et al*., 2025).

Gli approcci IPCC e ISO sono accomunati da alcuni concetti comuni (Tab. 3) che vengono utilizzati in modo diverso; il modello proposto dall'AR 4 (IPCC, 2007) ha l'obiettivo di valutare la vulnerabilità dei sistemi mentre il successivo AR5 (IPCC, 2014) ha l'obiettivo di valutare il rischio in relazione alle caratteristiche del sistema in esame. L'approccio proposto dalla norma ISO 14091:2021 appare uno sviluppo dell'approccio AR5 mettendo in evidenza il potenziale contributo delle azioni di adattamento alla riduzione del rischio potenziale.

L'approccio ISO (Fig. 2) valuta, in primo luogo, il potenziale rischio climatico e successivamente introduce il contributo della capacità di adattamento del sistema per modificare il livello di rischio evidenziandone il valore.

Gli approcci alla valutazione del rischio (Tab. 2) sono accomunati da una logica di individuazione dei nessi di causalità tra i

Chains are usually developed with the support of workshops, focus groups, round tables and other participatory activities, involving stakeholders and experts. The involvement of different skills in risk assessment, at the basis of the Impact Chain approach, can be developed by integrating different techniques such as, for example, Delphi technique, Brainstorming, Nominal Group Technique, and HAZOP (IEC 31010:2019). These techniques have some characteristics in common, as they:

- involve all project operators in their application in a rationale of participatory planning of adaptation measures;
- allow for a gradual application of the systems under consideration at different levels of complexity;
- are not an additional tool applied by specialists external to the project team but are meant to be a shared tool;
- allow risks to be assessed by interpreting them against the framework of objectives expected for the project.

The impact chain approach is now widely used at the regional or urban scale (Estoque *et al*., 2022; Menk *et al*., 2022) but its rationale can also be used for buildings by activating participatory design processes to acquire knowledge about the system's sensitivity and vulnerability (Dodman *et al*., 2022). There are many recent studies developed with the active involvement of supply chain stakeholders and scholars (André *et al*., 2023; Englund *et al*., 2022; Daniels *et al*., 2020) highlighting the benefits of assessing climate risks, on different scales, by adopting knowledge co-production and sharing case studies.

The potential of the HAZOP technique in climate risk management

Among the techniques mentioned, it seems interesting, with respect to the issues of climate risk management, to evaluate the possibility of applying the HAZOP "Hazard and Operability study" methodology in architectural projects, using it in a broader Impact Chain process or in a timely manner for a preliminary assessment of climate risks and possible adaptive actions. HAZOP derives from risk analysis techniques developed in the 1970s by the chemical industry that led, in 2001, to the publication of the international standard IEC 61882, which formally described HAZOP (Dunjò *et al*., 2010). Although HAZOP was developed for processes involving a significant use of hazardous substances, its application has subsequently spread to other areas such as medical devices, road traffic safety, and operation of photovoltaic systems (Marhavilas *et al*., 2019).

The main features of HAZOP are:

- to be a "collegial" process developed by a team of experts from the different design disciplines under the guidance of a coordinator;
- to be a process directed by the use of "guiding words", which are useful for the shared identification of potential changes in the design parameters;
- to set the goal of identifying potential deviations from the project objectives in order to adopt appropriate risk control measures.

As far as the methodological steps are concerned, the main phases of the HAZOP proposed by the EN 61882:2016 standard are:

- division of the system into sections or subsystems;

Tab. 02 | Esempi di approcci per la valutazione e gestione del rischio da cambiamenti climatici per i sistemi antropici
Examples of approaches for the assessment and management of climate change risk for anthropogenic systems

INSTITUTION AND **APPROACH/ METHOD**	**DESCRIPTION**	**KEYWORDS** AND **KEY CONCEPTS**	**REFERENCE/S**
Assessment reports - Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)	*«The Sixth Assessment Report (AR6) by IPCC proposes an approach to assess the risk related to climate change based on the evaluation of the complex interactions between climate-related hazards, like floods and droughts, and the vulnerability of human and ecological systems to these hazards. The report introduces key concepts that contribute to an understanding of risk, including: the risk components, namely **hazards**, **exposure**, and **vulnerability**; the recognition that risks may be complex and cascading; and the reasons for concern framework used to summarise the most policy-relevant risks.* ***Risk** in the Sixth Assessment Report is defined as the potential for adverse consequences for human or ecological systems, recognising the diversity of values and objectives associated with such systems. In the context of climate change impacts, risks result from dynamic interactions between climate-related hazards with the exposure and vulnerability of the affected human or ecological system. In the context of climate change responses, risks result from the potential for such responses not achieving the intended objective(s), or from potential trade-offs or negative side effects».*	– Climate-related hazards – Exposure and vulnerability – Complex interactions	https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/chapter/chapter-1/
ISO 14091:2021 - International Organization for Standardization (ISO)	*«The ISO 14091:2021 standard "Adaptation to climate change – Guidelines on vulnerability, impacts and risk assessment" support the assessment of the risks related to the potential impacts of climate change. It describes how to understand vulnerability and how to develop and implement a sound risk assessment in the context of climate change. It can be used for assessing both present and future climate change risks.* *The ISO 14091 standard poposes the following steps:* – ***Preparing a climate change risk assessment** – including: identifying objectives and expected outcomes; establishing a project team; setting the time horizon; preparing an implementation plan; etc.* – ***Implementing a climate change risk assessment** – including: screening impacts and developing impact chains; identifying indicators; Assessing adaptive capacity; etc.* – ***Reporting and communicating climate change risk assessment results** – including: communicating climate change risk assessment results; reporting findings as a basis for appropriate adaptation planning; etc.»*	– Adaptation planning – Vulnerability – Participatory approach	https://www.iso.org/standard/68508.html
CLIMADA (CLIMate ADAptation) – ETH Zurich	***«CLIMADA (CLIMate ADAptation)** is a free and open-source software framework for climate risk assessment and adaptation option appraisal. Designed by a large scientific community, it helps reasearchers, policymakers, and businesses analyse the **impacts of natural hazards** and explore **adaptation strategies**.* *CLIMADA integrates **hazard, exposure, and vulnerability data** to provide detailed insights into potential socioeconomic, human, and ecological impacts of climate-related events. The framework supports a wide range of input data and includes tailored solutions for **integrating data from various sources** such as OpenStreetMap, the International Best Track Archive for Climate Stewardship, the Copernicus Climate Data Store, and many more».*	– Framework for climate risk assessment – Natural hazards – Adaptation strategies – Multiple-sources data	https://climada.ethz.ch/
TCFD disclosure recommendations - Task Force on Climate-Related Financial Disclosures (TCFD)	*«The TCFD disclosure recommendations are structured around four thematic areas that represent core elements of how companies operate: governance, strategy, risk management, and metrics and targets. In particular:* – ***Governance** – Disclose the organization's governance around climate-related risks and opportunities.* – ***Strategy** – Disclose the actual and potential impacts of climate-related risks and opportunities on the organization's businesses, strategy, and financial planning where such information is material.* – ***Risk Management** – Disclose how the organization identifies, assesses, and manages climate-related risks.* – ***Metrics and Targets** – Disclose the metrics and targets used to assess and manage relevant climate-related risks and opportunities where such information is material».*	– Financial Markets and Transparency – Financial Implications of Climate Change – Pricing of risks and allocation of capital in the global economy	https://www.fsb-tcfd.org/ https://www.fsb-tcfd.org/recommendations/ https://assets.bbhub.io/company/sites/60/2021/10/FINAL-2017-TCFD-Report.pdf
Climate and Disaster Risk Screening - World Bank	*«Climate and Disaster Risk Screening is a process for identifying short and long term climate and disaster risks to build resilience in development projects, policies, and programs.* *The Screening aims to identify risks and proactively incorporate resilience measures at an early stage of project design objectives.* *The Four Main Phases:* – ***Exposure** – evaluate the extent to which the project location will be exposed to risks from climate change and geophysical disasters.* – ***Impact** – assess how these hazards may impact the project's physical investments and beneficiaries. Start to consider risk mitigation measures.* – ***Adaptive Capacity** – examine how a project's non-physical components and the broader sector and development context may influence the level of risk posed to the project. Also consider impacts on vulnerable groups.* – ***Overall Risk Rating** – rate the overall risk from climate and geophysical hazards to the project outcome based on the previous considerations».*	– Adaptive Capacity – Impacts on vulnerable groups – Resilience measures intregrated at an early project design stage	https://climatescreeningtools.worldbank.org/ https://climatescreeningtools.worldbank.org/what-does-the-screening-process-look https://climatescreeningtools.worldbank.org/in-depth-assessment-tool

(Continued)

Tab. 02 | Esempi di approcci per la valutazione e gestione del rischio da cambiamenti climatici per i sistemi antropici
Examples of approaches for the assessment and management of climate change risk for anthropogenic systems

INSTITUTION AND **APPROACH/ METHOD**	**DESCRIPTION**	**KEYWORDS** AND **KEY CONCEPTS**	**REFERENCE/S**
Regional Adaptation Support Tool (RAST) - Climate-ADAPT	*«The Regional Adaptation Support Tool (RAST) is designed to help local and regional authorities with climate change adaptation strategies and plans – from development and implementation to monitoring, evaluating and updating them. RAST provides practical guidance in 6 steps aligned with the key features of climate adaptation policy processes.* *The tool consists of the following subsequential steps:* – ***Preparing the ground for adaptation*** *– including: setting up governance structures to support adaptation; communicating adaptation and raising awareness.* – ***Assessing climate risks and vulnerabilities*** *– including: defining the core elements of your climate risk assessment; identifying and assessing climate risks; defining key adaptation objectives, etc.* – ***Identifying adaptation options*** – ***Assessing and selecting adaptation options*** – ***Implementing adaptation policies and actions*** *– including: developing adaptation strategies and plans; integrating adaptation into existing plans; Funding and supporting governance for implementation, etc.* – ***Monitoring, evaluation and learning****»*	– Local or regional authority's policy-making – Development of climate change adaptation plans – Planning and implementing adaptation actions at the regional level	https://climate-adapt.eea.europa.eu/en https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/mission/knowledge-and-data/regional-adaptation-support-tool https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/mission/knowledge-and-data
Physical Climate Risk Assessment and Management - Adaptation and Resilience Investors Collaborative (ARIC) and UNEP	*«The Adaptation and Resilience Investors Collaborative (ARIC) have developed the Physical Climate Risk Investor Playbook. The latter provides investors with a simplified step-by-step approach to integrate the identification, assessment and management of physical climate risks in the investment process. It focuses on how to assess* ***physical climate risks*** *and identify* ***adaptation and resilience (A&R) opportunities*** *in the context of corporate finance and is product agnostic, applying to the provision of capital across both equity and debt instruments».*	– Corporate Finance – Physical Climare Risks – Adaptation and resilience opportunities	https://www.unepfi.org/wordpress/wp-content/uploads/2024/10/ARIC-PCR-Playbook-2.pdf

pericoli climatici e l'entità delle conseguenze sui sistemi umani. Al fine di valutare in modo sistematico i nessi tra pericoli e conseguenze – tenendo in considerazione i molteplici portatori di interessi coinvolti – e di individuare di conseguenza priorità di intervento e la loro possibile incidenza rispetto a sistemi di valore diversi, la norma ISO 14091:2021 fa riferimento all'approccio *Impact Chain* che definisce come «*analytical approach that enables understanding of how given hazards generate direct and indirect impacts which propagate through a system at risk*». Le *Impact Chain* sono solitamente sviluppate con il supporto di *workshop*, *focus group*, tavole rotonde ed altre attività partecipative, coinvolgendo *stakeholder* ed esperti. Il coinvolgimento di diverse competenze nella valutazione del rischio, alla base dell'approccio *Impact Chain*, può essere sviluppato integrando diverse tecniche come, ad esempio: *Delphi technique, Brainstorming, Nominal Group Technique*, HAZOP (IEC 31010:2019). Si tratta di tecniche accomunate da alcune caratteristiche:

– coinvolgere nella loro applicazione tutti gli operatori del progetto in una logica di progettazione partecipata delle misure di adattamento;
– consentire un'applicazione graduale a diversi livelli di complessità dei sistemi in esame;
– non essere uno strumento aggiuntivo applicato da specialisti esterni al *team* di progetto ma essere uno strumento condiviso;

– identification of an element of the system under study (e.g., cold production, etc.);
– description of the design objectives attributed to the element (e.g., maintenance of previously established environmental conditions);
– choice of an operating parameter that influences the design objectives (e.g., outdoor temperature, etc.);
– application of guide words describing possible deviations in operating parameters;
– definition of the causes that can lead to deviations and evaluation of the effects;
– selection of appropriate risk management measures.

In the HAZOP technique the use of "guiding words" (Tab. 4) helps to define uncertainty scenarios on the design parameters. The guiding words describe a possible deviation from an expected condition and are, therefore, critical in determining the potential levels of uncertainty and the resulting risks, allowing designers to take counteracting or containment measures.

Applying the HAZOP technique to a case study

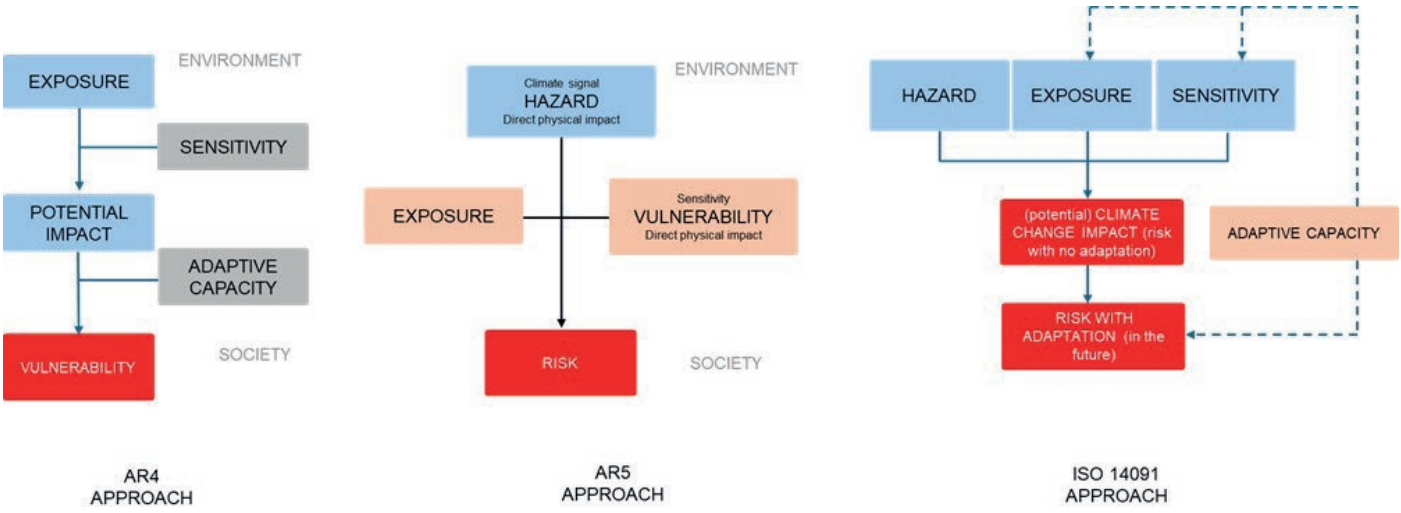
For validation purposes, the HAZOP method was applied as part of the European Horizon project "RE-SKIN – Renewable and Environmental-Sustainable Kit for building Integration". The RE-SKIN project aims to develop a scalable and multifunctional system (kit) based on advanced façade and roof solutions and "smart" technological systems. It should be integrated into existing buildings to offer a joint response to the demand for energy efficiency and environmental quality expressed by the recent European regulatory framework (Green Deal, Circular Economy Action Plan, Fit for 55 Package, Energy Performance of Buildings Directive, etc.).

In particular, the HAZOP method has been applied in experimental form to two subsystems of the RE-SKIN project, namely:

– roofing solution with integrated photovoltaic-thermal system (BIPVT) (Fig. 3). The solution consists of profiles for curtain walls in recycled aluminium, where box sheet panels containing bio-polyurethane foam and photovoltaic modules are housed;
– air-to-water heat pump (Fig. 4).

Application of the HAZOP technique within the project allowed to assess—by involving various project stakeholders to share knowledge and experiences—the potential risks from climate events for some components of the RE-SKIN system, and to also determine possible technical adaptation measures to be adopted during the design and management phases with a view to reduce the impacts of such events. Experimentation with the transfer of the technique from the traditional industrial context to that of the construction project did not reveal any particular need for modification or adaptation. Indeed, the qualitative approach activated by the guiding words is well suited to the objective of identifying possible climate risk scenarios to be subjected to specific in-depth analyses to identify climate adaptation design or management measures. The application of the HAZOP technique to the architectural project can be implemented without significantly modifying current design practices. It essentially takes place through collegial design review meetings, which, however, require two basic conditions: firstly,

Tab. 03 | Concetti chiave legati alla gestione del rischio climatico. Fonte: adattato da ISO 14091:2021
Key concepts related to climate risk management. Source: adapted from ISO14091:2021



| 02

– permettere di valutare i rischi interpretandoli rispetto al quadro di obiettivi attesi per il progetto.

L'approccio della *impact chain* è oggi largamente impiegato alla scala regionale o urbana (Estoque *et al*., 2022; Menk *et al*., 2022) ma in virtù della sua logica si presta ad impieghi anche alla scala dell'edificio, con l'attivazione di processi di progettazione partecipata per acquisire conoscenza rispetto alla sensitività e alla vulnerabilità (Dodman *et al*., 2022) del sistema. Sono molteplici gli studi recenti (André *et al*., 2023; Englund *et al*., 2022; Daniels *et al*., 2020) che evidenziano i benefici alle diverse scale sulla capacità di valutare i rischi climatici ottenibili da processi di co-produzione della conoscenza e condivisione di casi di studio, sviluppati con il coinvolgimento attivo di *stakeholder* di filiera e studiosi.

Il potenziale della tecnica HAZOP nella gestione dei rischi climatici

Tra le tecniche citate, appare interessante, rispetto ai temi della gestione del rischio climatico, valutare la possibilità di applicare nei progetti di architettura la metodologia HAZOP "*Hazard and Operability study*", utilizzandola in un processo più ampio di *Impact Chain* o in modo puntuale per una preliminare valutazione dei rischi climatici e delle possibili azioni adattive. La HAZOP deriva da tecniche di analisi del rischio sviluppate

| Tab. 03

	Definition – Source: ISO 14091:2021
HAZARD	*«**Potential source of harm.*** *Note 1 to entry: The potential for harm can be in terms of loss of life, injury or other health impacts, as well as damage and loss to property, infrastructure, livelihoods, service provision, ecosystems and environmental resources.* *Note 2 to entry: In this document, the term usually refers to climate-related physical events or trends or their physical impacts.* *Note 3 to entry: Hazard comprises slow-onset developments (e.g. rising temperatures over the long term) as well as rapidly developing climatic extremes (e.g. a heatwave) or increased variability».*
EXPOSURE	*«**Presence of people, livelihoods, species or ecosystems, environmental functions, services, resources, infrastructure, or economic, social or cultural assets in places and settings that could be affected.*** *Note 1 to entry: Exposure can change over time, for example as a result of land use change».*
SENSITIVITY	*«**Degree to which a system or species is affected, either adversely or beneficially, by climate variability or change.*** *Note 1 to entry: The effect may be direct (e.g. a change in crop yield in response to a change in the mean, range or variability of temperature) or indirect (e.g. damages caused by an increase in the frequency of coastal flooding due to sea level rise) ».*
ADAPTIVE CAPACITY	*«**Ability of systems, institutions, humans, and other organisms to adjust to potential damage, to take advantage of opportunities, or to respond to consequences**»*
VULNERABILITY	*«**Propensity or predisposition to be adversely affected*** *Note 1 to entry: Vulnerability encompasses a variety of concepts and elements including sensitivity or susceptibility to harm and lack of capacity to cope and adapt».*
IMPACT	*«**Effect on natural and human systems*** *Note 1 to entry: In the context of climate change, the term "impact" is used primarily to refer to the effects on natural and human systems of extreme weather and climate events and of climate change. Impacts generally refer to effects on lives, livelihoods, health, ecosystems, economies, societies, cultures, services and infrastructure due to the interaction of climate change or hazardous climate events occurring within a specific time period and the vulnerability of an exposed society or system. Impacts are also referred to as consequences and outcomes. The impacts of climate change on geophysical systems, including floods, droughts and sea level rise, are a subset of impacts called "physical impacts"».*

Tab. 04 | Esempi di parole guida nella applicazione della metodologia HAZOP. Fonte: EN 61882:2016
Examples of guiding words in the application of the HAZOP methodology. Source: EN 61882:2016

GUIDING WORD	MEANING IN THE CONTEXT OF ANALYSIS
NO	Complete denial of design intent
MORE	Quantitative increase
LESS	Quantitative decrease
BEYOND	Qualitative change/increase
PART OF	Qualitative change/decrease
REVERSAL	Logical opposite of design intent
OTHER	Complete replacement
BEFORE	With respect to an order or sequence
AFTER	With respect to an order or sequence
BEFOREHAND	Compared to time
LATE	Compared to time

negli anni '70 dall'industria chimica, le quali hanno portato nel 2001, alla pubblicazione della norma internazionale IEC 61882 che ha descritto formalmente la HAZOP (Dunjò *et al*., 2010). Anche se la HAZOP è stata sviluppata per processi che prevedono un impiego significativo di sostanze pericolose la sua applicazione si è successivamente diffusa anche ad altri ambiti come dispositivi medicali, sicurezza del traffico stradale, esercizio di impianti fotovoltaici (Marhavilas *et al*., 2019).
Le caratteristiche principali della HAZOP sono:
– essere un processo "collegiale" sviluppato da un gruppo di esperti delle diverse discipline di progetto con la guida di un coordinatore;
– essere un processo indirizzato dall'uso di "parole guida" utili per la individuazione condivisa dei potenziali cambiamenti dei parametri di progetto;
– porsi l'obiettivo di individuare potenziali deviazioni rispetto agli obiettivi di progetto per adottare appropriate misure di controllo del rischio.

Per quanto riguarda i passaggi metodologici, le principali fasi della HAZOP proposte dalla norma EN 61882:2016 sono:
– divisione del sistema in sezioni o sottosistemi;
– individuazione di un elemento del sistema oggetto di studio (ad esempio: produzione del freddo, ecc.);
– descrizione degli obiettivi progettuali attribuiti all'elemento (ad es. mantenimento di condizioni ambientali prefissate);
– scelta di un parametro di funzionamento che influenza gli obiettivi progettuali (ad esempio: temperatura esterna, ecc.);
– applicazione di parole guida che descrivano le possibili deviazioni dei parametri di funzionamento;
– definizione delle cause che possono portare alle deviazioni e valutazione degli effetti;
– selezione di appropriate misure di gestione del rischio.

Nella HAZOP l'uso di "parole guida" (Tab. 4) aiuta a definire scenari di incertezza sui parametri di progetto. Le parole guida descrivono una possibile deviazione rispetto a una condizione attesa e sono quindi fondamentali per determinare i potenziali livelli di incertezza e i rischi che ne conseguono consentendo ai progettisti di assumere misure di contrasto o contenimento.

Applicazione della tecnica HAZOP a un caso di studio

Per sperimentare la validità dell'ipotesi di trasferimento, la metodologia HAZOP è stata applicata nell'ambito del progetto europeo Horizon "RE-SKIN – Renewable and Environmental-Sustainable Kit for building Integration". Il progetto RE-SKIN mira a sviluppare un sistema (*kit*) scalabile e multifunzionale basato su soluzioni avanzate di facciata, copertura e su sistemi tecnologici "smart" da integrare negli edifici esistenti per offrire una risposta congiunta alla domanda di efficienza energetica e

the identification of a qualified person capable of coordinating the working group; secondly, for effective application of the technique, widespread knowledge of climate risks and their effects on the built environment must be created within the design team.

Conclusions
The chronic and acute hazards of climate change open up scenarios of epistemic uncertainty on how the built environment and its inhabitants react to the many phenomena, which are hard to predict and linked by synergistic and multi-scalar effects. In this scenario, as they are being developed globally, climate risk assessment methods are configured as an important support in the cognitive and decision-making activities of the project. They offer a systematic apparatus for the definition of adaptation strategies, which are declined within different contexts, including design of new interventions characterised by "design for adaptability" approaches; management of the built environment considering which improvement actions can be implemented on buildings (hard), and development of targeted services (soft); transformation of architectural organisms with one objective being an increase in resilience.
The conceptual and methodological apparatus for climate risk assessment is evolving. Today it provides an important support in defining new project requirements, in reading systemic links between territory and buildings at different scales, in evaluating the vulnerabilities of buildings and their inhabitants in the light of hazards deriving from climate change and the potential of adaptation measures for their management. It seems increasingly urgent to adopt methodologies and tools of this framework at the project scale. They are currently applied mostly at the territorial scale.
With respect to these considerations, the paper proposes running a test by transferring the HAZOP technique to the building scale with a view to identify and assess climate risks. This method, applied at the building and subsystem scales, enables effective interaction between the various skills involved in the project, adopting a participatory and shared identification and assessment approach for risks associated with extreme climate events for building systems, and for the effective identification of related adaptation measures.
Based on the findings from the application phase, the tool replicability and scalability appear to be guaranteed, although depending on the availability of information regarding the characteristics of the building systems identified in the project, especially during the preliminary design phase, and of the level of knowledge of the reference climate context and the extreme climate events likely to occur in the project area.
Concluding, transferring and applying the HAZOP technique for climate risk assessment at the building level is an innovation that should be part of a broader effort to develop a suite of tools to support climate adaptation design decisions. This effort must include building new climate adaptation design skills; expanding participatory design and knowledge co-creation practices to include climate change issues; and experimenting with assessment methods at various levels of project development. Among contextual conditions that could both accelerate

qualità ambientale espressa dal recente quadro normativo europeo (*Green Deal*, *Circular Economy Action Plan*, *Fit for 55 Package*, *Energy Performance of Buildings Directive*, ecc.).
In particolare, la metodologia HAZOP è stata applicata in forma sperimentale a due sottosistemi del progetto RE-SKIN, ovvero:

– soluzione di copertura con sistema fotovoltaico-termico integrato (BIPVT) (Fig. 3). La soluzione è costituita da profili per facciate continue in alluminio riciclato, dove sono alloggiati pannelli in lamiera scatolare contenenti schiuma bio-poliuretanica e moduli fotovoltaici;
– pompa di calore aria-acqua (Fig. 4).

L'applicazione della tecnica HAZOP nell'ambito del progetto ha consentito di valutare – coinvolgendo diversi *stakeholder* di progetto per condividere conoscenze ed esperienze – i potenziali rischi da eventi climatici per alcune componenti del sistema RE-SKIN e, nello stesso tempo, di determinare in maniera condivisa possibili misure tecniche di adattamento da adottare in fase di progettazione e in fase di gestione per ridurre gli impatti di tali eventi. La sperimentazione del trasferimento della tecnica dall'ambito tradizionalmente industriale a quello del progetto edilizio non ha evidenziato una particolare necessità di modifiche o adattamento: l'approccio qualitativo attivato dalle parole guida ben si presta all'obiettivo di individuare possibili scenari di rischio climatico da sottoporre poi a specifiche analisi di approfondimento per l'individuazione delle misure progettuali o gestionali di adattamento climatico. L'applicazione della tecnica HAZOP al progetto di architettura può essere attuata senza necessità di modificare significativamente le attuali prassi progettuali sviluppandosi essenzialmente in riunioni collegiali di riesame della progettazione che richiedono però due condizioni di base: da un lato si deve predisporre la qualifica di un soggetto che possa attuare un ruolo di coordinamento del gruppo di lavoro; dall'altro per una efficace applicazione della tecnica si deve creare una conoscenza diffusa all'interno del gruppo di progettazione dei rischi climatici e dei loro effetti sull'ambiente costruito.

Conclusioni

I pericoli, sia cronici che acuti, legati al cambiamento climatico aprono a scenari di incertezza epistemica sulle modalità di reazione dell'ambiente costruito e dei suoi abitanti rispetto alla molteplicità dei fenomeni, difficili da prevedere e legati da effetti sinergici e multiscalari. In questo scenario, le metodiche di valutazione dei rischi climatici si configurano come un importante supporto nelle attività conoscitive e decisionali del progetto, offrendo un apparato sistematico per la definizione di strategie di adattamento, che si declinano all'interno di diversi contesti: progettazione di nuovi interventi connotati da approcci "*design for adaptability*"; gestione dell'ambiente costruito rispetto al quale integrare azioni migliorative sui manufatti (*hard*) e sviluppo di servizi mirati (*soft*); trasformazioni degli organismi architettonici, dove uno degli obiettivi diviene l'innalzamento della loro resilienza.
L'apparato concettuale e metodologico per la valutazione del rischio climatico è in evoluzione e rappresenta oggi un supporto importante per la definizione di nuovi quadri esigenziali per il progetto, per la lettura alle diverse scale dei nessi sistemici tra territorio e manufatti edilizi, per la pesatura delle vulnerabilità degli organismi edilizi e delle potenzialità delle misure di adattamento per la loro gestione. Appropriarsi alla scala del progetto delle me-

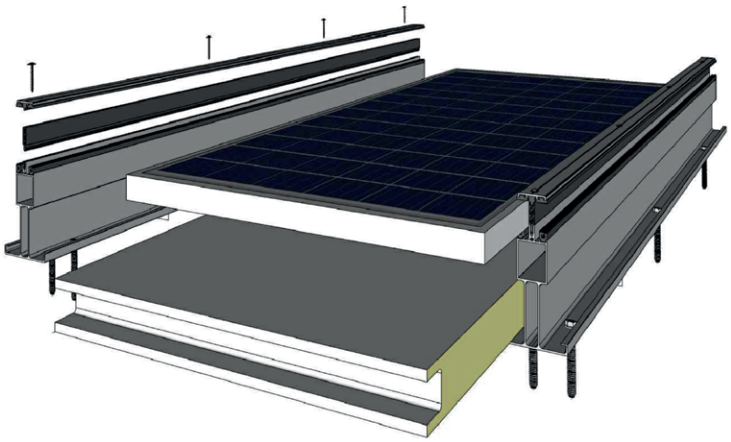
and facilitate widespread application of this experiment, the interaction among the key stakeholders who have to address the impacts of climate change is crucial. Indeed, local governments must manage emergencies caused by climate events, insurance companies can effectively share climate risks, and clients are increasingly requesting buildings that can mitigate the negative impacts of climate events.

ACKNOWLEDGEMENTS
The work presented was carried out as part of the European Horizon project "RE-SKIN – Renewable and Environmental-Sustainable Kit for building Integration". *Grant Agreement* ID: 101079957.

NOTES
[1] The IPCC Sixth Assessment Report (IPCC, 2022) defines human systems as «any system in which human organisations and institutions play an important role. Often, but not always, the term is synonymous with society or social system. Systems such as agricultural systems, urban systems, political systems, technological systems, and economic systems are all human systems in the sense applied in this report» (IPCC, 2022).
[2] Created in 1988 by both the World Meteorological Organisation (WMO) and the United Nations Environment Programme (UNEP), the IPCC aims to provide governments at all levels with scientific information that is useful for developing climate policies. The IPCC reports are also a key contribution to international negotiations on climate change. The IPCC is an organisation made up of member governments of the United Nations or WMO. It currently counts 195 members.

03 | Esempio di applicazione dell'analisi HAZOP alla soluzione di copertura "RE-SKIN". Fonte dell'immagine: progetto RE-SKIN
Example of application of the HAZOP analysis to the "RE-SKIN" roof solution. Source of the drawing: RE-SKIN project

03 | **RE-SKIN project's Roof solution: Hybrid building-integrated photovoltaic-thermal (BIPVT) system**

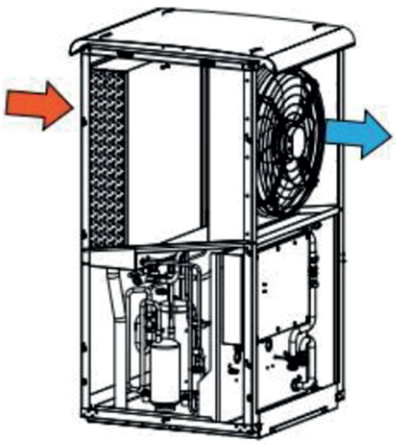


GUIDING WORD	ELEMENT	DEVIATION	CAUSE	CONSEQUENCE ON THE WORK PART	ADAPTATION ACTIONS
MORE	Outdoor temperature	Higher than average outside temperatures	Heat waves	Decrease in efficiency of photovoltaic panels in relation to their temperature coefficient	Sufficient natural ventilation spaces, mechanical ventilation for heat dissipation, dampening systems for temperature reduction
MORE	Outdoor temperature	Higher than average outside temperatures	Heat waves	Overheating of the ventilation chamber between PV panels and insulation panels with potential excessive thermal expansion or deformation	mechanical ventilation for excess heat dissipation
LESS	Outdoor temperature	Very low and below average temperatures	Harsh or late winters	Risk of frost, increase in loads due to permanence of ice or snow, decrease in production efficiency due to ice or snow	Supplemental resistance, cleaning and maintenance
OTHER	Outdoor air quality	Presence of dust/fumes not foreseen during installation	Fires following heat waves	Soiling of the capturing surface of the panels and reduction of energy production efficiency	Periodic cleaning, automatic washing systems
OTHER	Outdoor air quality	Presence of dust/fumes not foreseen during installation	Fires following heat waves	Reduction of radiant energy that reaches the surface of the panels with less energy production	Storage Battery System
MORE	Hail	Hail size well above average	Gales	Damage to glass surface panels, damage to sealing gaskets	Movable panel protection, use of glass with increased impact resistance, risk transfer or sharing (insurance coverage)
MORE	Rainfall	Rain with intensity well above average	Gales	Insufficient drainage of the roof with possible infiltration	Additional watertight layer placed under the insulation panels, sizing of the gutter sections.
MORE	Wind	Wind speed well above average	Gales	Panel lifting actions, possible impacts from wind-blown debris	Panel Fixture Sizing, Impact Risk Transfer and Sharing (Insurance Coverage)

04 | Esempio di applicazione della analisi HAZOP all'elemento pompa di calore aria-acqua DC. Fonte dell'immagine: progetto RE-SKIN
Example of application of the HAZOP analysis to the "RE-SKIN" DC air-to-water heat pump. Source of the drawing: RE-SKIN project

todiche e degli strumenti di questo apparato, oggi maggiormente applicato alla scala territoriale, appare sempre più urgente.
Rispetto a queste considerazioni, l'articolo propone e sperimenta il trasferimento alla scala dell'edificio della tecnica HAZOP per l'identificazione e la valutazione dei rischi climatici. Tale metodo, applicato alla scala dell'edificio e dei sub-sistemi, consente di attivare un'efficace interazione tra le diverse competenze coinvolte nel progetto adottando un approccio di identificazione e valutazione partecipata e condivisa dei rischi legati ad eventi climatici estremi per i sistemi edilizi e per una efficace individuazione delle relative misure di adattamento.
Sulla base di quanto riscontrato nella fase di applicazione, la replicabilità e la scalabilità dello strumento sembrano essere garantite, pur dipendendo dalla disponibilità informativa rispetto alle caratteristiche dei sistemi edilizi individuati nel progetto soprattutto in fase di progettazione preliminare, alla conoscenza del contesto climatico di riferimento e degli eventi climatici estremi ipotizzabili nell'area di progetto.

DC air-to-water heat pump of RE-SKIN project | 04



GUIDING WORD	ELEMENT	DEVIATION	CAUSE	CONSEQUENCE ON THE WORK PART	ADAPTATION ACTIONS
MORE	Outdoor temperature	Higher than average outside temperatures	Heat waves	Decrease in efficiency of the heat pump due to difficulties in the exchange on the condensing side, excessive thermal loads that increase the demand for cooling power	Auxiliary or booster systems, night ventilation, possible cooling of the exchange surface, for example, with water to increase efficiency
LESS	Outdoor temperature	Very low and below average temperatures	Harsh or late winters	Frequent defrosting, risk of frost, blockages	Supplementary heating element, hybrid heat pump
OTHER	Outdoor air quality	Presence of dust/fumes not foreseen during installation	Fires following heat waves	Dirtying of the exchange surface on the condenser side and reduction of the efficiency of the heat pump	Filters, periodic condenser cleaning, automatic washing systems
OTHER	hail	Hail size well above average	Gales	Damage to capacitor-side exchange surfaces	Mechanical Impact Resistant Protections

Concludendo, il trasferimento e l'applicazione a livello di edificio della tecnica HAZOP per la valutazione dei rischi climatici rappresenta una innovazione da collocare all'interno di una più vasta azione volta a costruire un apparato di strumenti a supporto delle scelte di progetto per l'adattamento climatico che non può prescindere: dalla costruzione di nuove competenze progettuali in materia di adattamento climatico; dall'ampliamento con i temi del cambiamento climatico delle pratiche di progettazione partecipata e di co-creazione di conoscenza; dalla sperimentazione di metodi valutativi ai diversi livelli di sviluppo del progetto. Tra le condizioni di contesto che potrebbero accelerare e agevolare la diffusione di questa sperimentazione si ritiene possa essere decisiva l'interazione tra i principali *stakeholder* che sono chiamati a intervenire sugli impatti del cambiamento climatico: le amministrazioni di governo del territorio che devono gestire le situazioni emergenziali causate dagli eventi climatici, le compagnie di assicurazione che possono condividere efficacemente i rischi climatici e i committenti che, sempre di più, stanno esprimendo richieste di edifici in grado di limitare gli impatti negativi degli eventi climatici.

RINGRAZIAMENTI

Il lavoro presentato è stato svolto nell'ambito del progetto europeo Horizon "RE-SKIN – Renewable and Environmental-Sustainable Kit for building Integration". ID del *Grant Agreement*: 101079957.

NOTE

[1] Il sesto *Assessment Report* dell'IPCC (IPCC, 2022) definisce i sistemi umani come «Qualsiasi sistema in cui le organizzazioni e le istituzioni umane svolgono un ruolo importante. Spesso, ma non sempre, il termine è sinonimo di società o sistema sociale. Sistemi come i sistemi agricoli, i sistemi urbani, i sistemi politici, i sistemi tecnologici e i sistemi economici sono tutti sistemi umani nel senso applicato in questo rapporto».

[2] Creato nel 1988 dall'Organizzazione Meteorologica Mondiale (OMM) e dal Programma delle Nazioni Unite per l'Ambiente (UNEP), l'IPCC ha come obiettivo quello di fornire ai governi di tutti i livelli informazioni scientifiche utili per elaborare politiche climatiche. I rapporti dell'IPCC costituiscono inoltre un contributo fondamentale ai negoziati internazionali sui cambiamenti climatici. L'IPCC è un'organizzazione composta da governi membri delle Nazioni Unite o OMM. Attualmente conta 195 membri.

REFERENCES

Alizadeh, O. (2022), "Advances and challenges in climate modeling", *Climatic Change*, Vol. 170, n. 1, p. 18. Available at: https://doi.org/10.1007/s10584-021-03298-4.

Bernardini, C. (2022), "Approccio soft all'adattamento ai cambiamenti climatici. Il ruolo attivo dei servizi urbani", *TECHNE: Journal of Technology for Architecture & Environment*, Vol. *23*, pp. 78-84. Available at: https://doi.org/10.36253/techne-12153.

D'Ambrosio V., (2017), "Processi di adattamento in ambito urbano. La Piattaforma Metropolis come strumento di supporto alle decisioni" in D'Ambrosio V., Leone M.F. (a cura di), *Progettazione ambientale per l'adattamento al Climate Change*, CLEAN, Napoli.

Dodman, D., Hayward, B., Pelling, M., Broto, V.C., Chow, W., Chu, E., … Munoz, T.A. (2022), *Cities, Settlements and Key Infrastructure. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Available at: https://doi.org/10.1017/9781009325844.008.

Döll, P. and Romero-Lankao, P. (2017), "How to embrace uncertainty in participatory climate change risk management. A roadmap", *Earth's Future*, Vol. 5, n. 1, pp. 18-36. Available at: https://doi.org/10.1002/2016EF000411.

Dong, B., Liu, Y., Mu, W. *et al.* A (2022), "A Global Building Occupant Behavior Database", *Sci Data*, Vol. 9, pp. 369. Available at: https://doi.org/10.1038/s41597-022-01475-3.

EN 61882:2016 Hazard and operability studies (HAZOP studies). Application guide. Available at: https://knowledge.bsigroup.com/products/hazard-and-operability-studies-hazop-studies-application-guide

Estoque, R.C., Ooba, M., Togawa, T. *et al.* (2022), "Climate impact chains for envisaging climate risks, vulnerabilities, and adaptation issues", *Reg Environ Change*, Vol. 22, pp. 133. Available at: https://doi.org/10.1007/s10113-022-01982-4.

Farinós-Dasí, J., Pinazo-Dallenbach, P., Peiró Sánchez-Manjavacas, E. and Rodríguez-Bernal, D. C. (2024), "Disaster risk management, climate change adaptation and the role of spatial and urban planning: evidence from European case studies", *Natural Hazards*, pp. 1-34. Available at: https://doi.org/10.1007/s11069-024-06448-w.

Flood, S., Paterson, S., O'Connor, E., O'Dwyer, B., Whyte, H., Le Tissier, M. and Gault, J. (2020), *National risk assessment of impacts of climate change: bridging the gap to adaptation action.* Environmental Protection Agency. Available at: https://www.epa.ie/publications/research/climate-change/Research_Report_346.pdf.

Gerber, D.J. and Lin, S.H.E. (2014), "Designing in complexity: Simulation, integration, and multidisciplinary design optimization for architecture", *Simulation*, Vol. 90, p. 8, pp. 936-959. Available at: https://doi.org/10.1177/0037549713482027.

Hallegatte, S. (2009), "Strategies to adapt to an uncertain climate change", *Global environmental change*, Vol. 19, n. 2, pp. 240-247. Available at: https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.12.003.

IEC 31010:2019 Risk management. Risk assessment techniques. Available at: https://www.iso.org/standard/72140.html.

Imamguluyev, R., Hajizada, S., Badalova, S., Mammadova, A., Abdullayeva, S., Karimova, S. (2025), "Fuzzy Logic for Modeling Climate Changes: Overcoming Uncertainty in Environmental Forecasts" in International Conference on Intelligent and Fuzzy Systems, pp. 278-285. Cham: Springer Nature Switzerland. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-031-98304-7_32.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007), *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Geneva, Switzerland: IPCC. Available at: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_full_report.pdf.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014), *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Geneva*, Switzerland: IPCC. Available at: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5_SYR_FINAL_Front_matters.pdf.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2022), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Available at: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_FullReport.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *2022: Annex II: Glossary In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 2897-2930. Available at: https://doi.org/10.1017/9781009325844.029.

ISO 14091:2021 Adaptation to climate change. Guidelines on vulnerability, impacts and risk assessment. Available at: https://www.iso.org/standard/68508.html.

Jones, R. N. (2000), "Managing uncertainty in climate change projections–issues for impact assessment", *Climatic change*, Vol. 45, n. 3, pp. 403-419. Available at: https://doi.org/10.1023/A:1005551626280.

Losasso, M. (2025), "Ambiti Urbani Climate Neutral", TECHNE: Journal of Technology for Architecture & Environment, Vol. 29, n. 1, pp. 7-8. Available at: https://doi.org/10.36253/techne-17666.

Losasso, M., Lucarelli M.T., Rigillo, M., Valente, R. (2020), Adattarsi al clima che cambia. Innovare la conoscenza per il progetto ambientale. Maggioli Editore. Available at: https://www.maggioli editore.it/adattarsi-al-clima-che-cambia.html.

Menk, L., Terzi, S., Zebisch, M., Rome, E., Lückerath, D., Milde, K., Kienberger, S. (2022), "Climate change impact chains: a review of applications, challenges, and opportunities for climate risk and vulnerability assessments", *Weather, Climate, and Society*, Vol. 14, n. 2, pp. 619-636. Available at: https://doi.org/10.1175/WCAS-D-21-0014.1.

Monteiro, A., Ankrah, J., Madureira, H., Pacheco, M.O. (2022), "Climate risk mitigation and adaptation concerns in urban areas: a systematic review of the impact of IPCC assessment reports", *Climate*, Vol. 10, n. 8, p. 115. Available at: https://doi.org/10.3390/cli10080115.

Muthumanickam, N.K., Brown, N., Duarte, J.P., Simpson, T.W. (2023), "Multidisciplinary design optimization in Architecture, Engineering, and Construction: a detailed review and call for collaboration", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 66, n. 11, p. 239. Available at: https://doi.org/10.1007/s00158-023-03673-y.

Otto, F. E. (2023), "Attribution of extreme events to climate change", *Annual Review of Environment and Resources*, Vol. 48, n. 1, pp. 813-828. Available at: https://doi.org/10.1146/annurev-environ-112621-083538

Perkins-Kirkpatrick, S.E., Stone, D.A., Mitchell, D.M., Rosier, S., King, A.D., Lo, Y.T.E., … Wehner, M. (2022), "On the attribution of the impacts of extreme weather events to anthropogenic climate change", *Environmental Research Letters*, Vol. 17, n. 2, p. 024009. Available at: https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac44c8.

Rathnayaka, B., Siriwardana, C., Amaratunga, D., Haigh, R., Robert, D. (2022), "Climate change impacts on built environment: a systematic review" in 12th International conference on structural engineering and construction management: Proceedings of the ICSECM 2021 (pp. 443-459). Singapore: Springer Nature Singapore. Available at: https://doi.org/10.1007/978-981-19-2886-4_31.

Risser, M.D., Tebaldi, C. (2025), "Uncertainty and Extremes". In: Mearns, L.O., Forest, C.E., Fowler, H.J., Lempert, R., Wilby, R.L. (Eds) *Uncertainty in Climate Change Research*. Springer, Cham. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-031-85542-9_21

Seneviratne, S., Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C., Kanae, S., Kossin, J., … Zwiers, F.W. (2012), *Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment*. Available at: https://academiccommons.columbia.edu/doi/10.7916/d8-6nbt-s431

Smith, P., Francombe, J., Lempert, R.J., Gehrt, D. (2022), "Consistency of UK climate risk approaches with new ISO guidelines", *Climate Risk Management*, Vol. 37, p. 100422. Available at https://doi.org/10.1016/j.crm.2022.100422.

Snyder, C. W., Mastrandrea, M. D., Schneider, S. H. (2011), "The complex dyanmics of the climate system: Constraints on our knowledge, policy implications and the necessity of systems thinking" in *Philosophy of complex systems*, pp. 467-505, North-Holland. Available at: https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52076-0.50017-1.

Taleb, N. N. (2009), *Il cigno nero. Come l'improbabile governa la nostra vita* (Vol. 77). Il saggiatore.

Voordijk, H. (2009), "Construction management and economics: the epistemology of a multidisciplinary design science. Construction management and economics", Vol. 27, n. 8, pp. 713-720. Available at: https://doi.org/10.1080/01446190903117777.

Wilby, R. L. (2007), "A review of climate change impacts on the built environment", *Built environment*, Vol. 33, n. 1, pp. 31-45. Available at: https://doi.org/10.2148/benv.33.1.31.

World Meteorological Organization (WMO) (2025), State of the Global Climate 2024, WMO, Geneva. Available at: https://library.wmo.int/records/item/69455-state-of-the-global-climate-2024.

Ye, X., Yigitcanlar, T., Xu, Y., Head, M., Hang, Y., Sanchez, T., … Niyogi, D. (2025), "Urban planning and IPCC-like city assessments integration for climate-resilient cities". *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, Vol. 52, n. 7. Available at: https://doi.org/10.1177/23998083251330940.

Ylhäisi, J. S., Garre, L., Daron, J., Räisänen, J. (2015), "Quantifying sources of climate uncertainty to inform risk analysis for climate change decision-making", *Local Environment*, Vol. 20, n. 7, pp. 811-835. Available at: https://doi.org/10.1080/13549839.2013.874987.

Zhai P., Zhou B., Chen Y. A., (2018), "A Review of Climate Change Attribution Studies", *Journal of meteorological research,* Vol. 32, n. 5, pp. 671–692. Available at: https://doi.org/10.1007/s13351-018-8041-6.

Zhang, Y., Wu, S., Dai, E., Liu, D., Yin, Y. (2008), "Identification and categorization of climate change risks", *Chinese Geographical Science*, Vol. 18, n. 3, pp. 268-275. Available at: https://doi.org/10.1007/s11769-008-0268-1.

Zięba, Z., Dąbrowska, J., Marschalko, M., Pinto, J., Mrówczyńska, M., Leśniak, A., … Kazak, J. K. (2020), "Built environment challenges due to climate change" in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 609, n. 1, p. 012061. IOP Publishing. Available at: 10.1088/1755-1315/609/1/012061.

Spazio, rischio, rifugio. Progettare nella complessità del cambiamento climatico

Ina Macaione[1], https://orcid.org/0000-0003-0840-9663 ina.macaione@unibas.it
Enrica Gaia Consiglio[2], https://orcid.org/0009-0000-7238-1269 enricagaia.consiglio@unipa.it
[1] Dipartimento per l'Innovazione Umanistica, Scientifica e Sociale, Università degli Studi della Basilicata, Italia
[2] Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Palermo, Italia

Abstract. La tesi sostenuta è che il rifugio, nel contesto della crisi climatica, debba essere ripensato come luogo in grado di esprimere e negoziare la complessità delle trasformazioni ambientali e sociali in atto. Collocato all'interno di una condizione permanente di esposizione al rischio, il rifugio non è inteso come risposta emergenziale né come soluzione tecnica, ma come dispositivo in grado di rendere leggibili le tensioni che attraversano lo spazio costruito. Il rifugio agisce come soglia: non luogo chiuso, ma dispositivo relazionale, attraversabile, che accoglie temporalità variabili e abita l'incertezza. Alcune pratiche progettuali contemporanee, pur non facendo riferimento esplicito a questa categoria, introducono soluzioni spaziali adattive, reversibili, multiscalari.

Parole chiave: Cambiamento climatico; Adattamento; Rifugio; Complessità; *Nature-based Solutions*.

Rischio climatico ed evoluzione del concetto: implicazioni per il progetto di architettura

Il concetto di rischio associato al cambiamento climatico, secondo l'ultimo rapporto dell'IPCC (2023), si basa sulle interazioni tra pericolo, vulnerabilità ed esposizione che possono essere soggetti ad incertezza e possono variare nel tempo e nello spazio a causa di cambiamenti socio-economici e delle decisioni umane. Operando entro uno sfondo di incertezza, che riguarda tanto l'intensità e la frequenza dei fenomeni quanto l'efficacia delle strategie di adattamento (risposta), il progetto di architettura è chiamato oggi a confrontarsi con un contesto in cui il rischio assume i tratti di una condizione strutturale, permanente e complessa della realtà. Con l'intento di comprendere il modo in cui il rischio è stato percepito nel corso della storia, appare utile fare una distinzione tra gli approcci che lo interpretano come fenomeno recente e quelli che ne ricostruiscono una genealogia più lunga. Nel primo caso, Anthony Giddens (1994) e Ulrich Beck (2000) contrappongono due modelli di società: da un lato, la società del progresso, promotrice di una rivoluzione scientifica e tecnologica che per decenni ha trasformato l'ambiente senza una piena consapevolezza delle conseguenze; dall'altro, la società del rischio, in cui la crisi ecologica contemporanea viene letta come il risultato di una presa di coscienza tardiva dei pericoli indotti dal progresso. Questa interpretazione presuppone una cesura tra un 'prima inconsapevole' e un 'dopo riflessivo'. Jean-Baptiste Fressoz (2012) mette in discussione tale narrazione attraverso il concetto di 'disinibizione', mostrando come i rischi fossero già noti al momento dell'ascesa industriale e siano stati deliberatamente normalizzati per rendere possibile l'avanzamento tecnologico ed economico, pur perpetuando condizioni di vulnerabilità ambientale e sociale.

La consapevolezza di un rischio strutturale radicato nel tempo si intreccia con una più ampia riflessione sul limite e del suo impatto nell'ambito dell'architettura. Come osserva Yona Friedman (2003), la fiducia illimitata nel progresso tecnologico vacilla di fronte al riconoscimento dei limiti globali e quando a questa fiducia si tenta di sostituire quella in un ordine politico-economico, anche tale prospettiva si rivela illusoria. Per Friedman la questione decisiva diventa allora come garantire a chi abita lo spazio il diritto di decidere: possibilità percorribile solo attraverso una comunicazione condivisa. Questa centralità del dialogo, maturata nella consapevolezza del limite, conduce

Space, risk, shelter: Designing within the complexity of climate change

Abstract. The thesis advanced is that, in the context of the climate crisis, the shelter must be re-conceived as a place capable of expressing and negotiating the complexity of ongoing environmental and social transformations. Situated within a permanent condition of risk exposure, the shelter is not conceived as either an emergency response or a purely technical solution, but as a device that renders the tensions running through the built environment legible. The shelter functions as a threshold. It is not an enclosed space, but a relational, permeable device that accommodates variable temporalities and inhabits uncertainty. While not explicitly referring to this category, several contemporary design practices introduce adaptive, reversible, and multi-scalar spatial solutions.

Keywords: Climate change; Adaptation; Shelter; Complexity; Nature-based Solutions.

Climate risk and the evolution of the concept: Implications for architectural design

According to the latest IPCC report (2023), the concept of risk associated with climate change is based on the interactions among hazard, vulnerability, and exposure – factors subject to uncertainty, and capable of varying across time and space due to socio-economic changes and human decisions. Operating within a backdrop of uncertainty, concerning both the intensity and frequency of phenomena and the effectiveness of adaptation strategies (responses), architectural design is now called upon to confront a context in which risk takes on the character of a structural, permanent, and complex condition of reality.

To understand how risk has been perceived throughout history, it is useful to distinguish between approaches that interpret it as a recent phenomenon, and those that trace a longer genealogy. In the first case, Anthony Giddens (1994) and Ulrich Beck (2000) contrast two models of society, precisely the society of progress, driven by a scientific and technological revolution that for decades transformed the environment without full awareness of the consequences; and the risk society, in which the contemporary ecological crisis is read as the result of a belated recognition of the dangers induced by progress. This interpretation presupposes a break between a 'before unaware' and an 'after reflective'.

Jean-Baptiste Fressoz (2012) challenges this narrative through the concept of 'disinhibition', showing how risks were already known at the dawn of industrialisation, and were deliberately normalised to enable technological and economic advancement, while per-

ISSN online: 2239-0243 | © 2025 Author(s) | http://www.fupress.com/techne | DOI: 10.36253/techne-18636
Open access, peer-reviewed article published by Firenze University Press (https://www.fupress.com) and distributed, except where otherwise noted, under the terms of the CC BY 4.0 License for content and CC0 1.0 Universal for metadata

alla necessità di un linguaggio comune con cui descrivere e governare il rischio ed orientare ricerca, politiche e progetto.
La costruzione di glossari è dunque indispensabile per garantire chiarezza concettuale, con conseguenti ricadute pratiche nell'ottica della cooperazione tra nazioni e stakeholder (United Nations, 2016). Consapevole di questa necessità, l'IPCC, dal 2001, allega ad ogni rapporto di valutazione un proprio glossario, pensato come strumento di riferimento comune per le diverse comunità scientifiche.
È interessante notare che il termine *risk* non compare come voce autonoma né nel Third Assessment Report (IPCC, 2001) né nel Fourth Assessment Report (IPCC, 2007), una scelta che riflette l'evoluzione del quadro epistemologico e politico della scienza climatica: nei primi rapporti, infatti, la priorità era quella di dimostrare l'esistenza e la portata del cambiamento climatico. Pur essendo già presenti i concetti di *vulnerability* ed *exposure*, mancava un quadro che li integrasse insieme ad *hazard* in una definizione formale di rischio, introdotta soltanto con il Fifth Assessment Report (IPCC, 2014).
Nel successivo rapporto (IPCC, 2023) la definizione evolve in direzione di un approccio sistemico al rischio. Esso è descritto come risultato di interazioni dinamiche tra *vulnerability*, *exposure* ed *hazard* – variabili soggette ad incertezza e mutamento nel tempo e nello spazio – e può derivare non solo dagli impatti climatici ma anche dalle risposte umane.
Per il progetto di architettura questo spostamento semantico è cruciale: il rischio diventa una dimensione della complessità con cui è necessario confrontarsi, intrecciando fattori climatici, sociali ed economici e possibilità di *trade-off* con altri Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (United Nations, 2015). Tale evoluzione sollecita l'architettura ad operare in chiave adattiva e anticipatoria, ponendo al centro la definizione di strategie multiscenario che assumano il rischio come elemento fondativo del processo progettuale.

Progettare nella complessità. Il cambiamento climatico come risorsa immaginativa

La necessità di considerare il cambiamento climatico non come qualcosa da "risolvere" ma come risorsa immaginativa (Hulme, 2009; Losasso, 2016) permette di esplorare progettualità che uniscano dimensioni ecologiche, spaziali e istituzionali, sperimentando modelli di città-rifugio per difendersi dai rischi ormai evidenti, in risposta al duplice intreccio tra cambiamento climatico e vulnerabilità sociale. Tale passaggio apre alla riflessione sul ruolo del 'critico' come spazio di negoziazione tra le trasformazioni in atto e le forme dell'abitare: una soglia concettuale che va costantemente interpretata, ridefinita, riabitata.
È utile osservare come, in diversi momenti storici, il termine 'critico' sia stato volutamente associato a forme spaziali specifiche, al fine di costruire un quadro entro cui articolare la riflessione. La lettura trasversale di tre opere – *Critical path* (Buckminster Fuller, 1981), *L'espace critique* (Virilio, 1984) e *Critical zones* (Latour, 2015; Latour and Weibel, 2020) – offre interessanti traiettorie, accomunate da un presupposto condiviso: la crisi non è un evento, ma una condizione, e lo spazio diventa campo espressivo della complessità.
Se Fuller parla di un 'percorso critico' da seguire per la sopravvivenza della vita sulla Terra, fondato su una progettualità sistemica, anticipatoria e planetaria, è significativo che nella stessa

petuating conditions of environmental and social vulnerability.
Awareness of a structurally rooted risk intertwines with a broader reflection on limits and their impact on architecture. As Yona Friedman (2003) observes, unlimited trust in technological progress falters when confronted with the recognition of global limits, and when that trust is replaced with faith in a political-economic order, this perspective likewise proves illusory. For Friedman, the decisive issue becomes how to guarantee inhabitants of space the right to decide – a possibility achievable only through shared communication. This centrality of dialogue, shaped by an awareness of limits, leads to the need for a common language to describe and govern risk, and to guide research, policy, and design.
The construction of glossaries is, therefore, essential to ensure conceptual clarity with practical implications for cooperation among nations and stakeholders (United Nations, 2016). Aware of this necessity, the IPCC has attached a glossary to every assessment report since 2001, intended as a common reference tool for diverse scientific communities.
It is noteworthy that the term *risk* does not appear as an independent entry in either the Third Assessment Report (IPCC, 2001) or the Fourth Assessment Report (IPCC, 2007). The choice reflects the evolving epistemological and political framework of climate science. In the early reports, the priority was to demonstrate the existence and magnitude of climate change. Although the concepts of *vulnerability* and *exposure* were already present, there was no framework integrating them with *hazard* in a formal definition of risk, which was introduced only in the Fifth Assessment Report (IPCC, 2014).
In the subsequent report (IPCC, 2023), the definition evolves toward a systemic approach to risk. It is described as the result of dynamic interactions among vulnerability, exposure, and hazard – variables subject to uncertainty and change over time and space – and can arise not only from climate impacts but also from human responses.
This semantic shift is crucial for architectural design. Risk becomes a dimension of complexity that must be addressed, interweaving climatic, social, and economic factors, as well as potential trade-offs with other Sustainable Development Goals (United Nations, 2015). This evolution calls upon architecture to operate in an adaptive and anticipatory manner, placing at the centre the definition of multi-scenario strategies that treat risk as a foundational element of the design process.

Designing within complexity: Climate change as an imaginative resource

The need to consider climate change not as something to be 'solved' but as an imaginative resource (Hulme, 2009; Losasso, 2016) makes it possible to explore design approaches that unite ecological, spatial, and institutional dimensions, experimenting with models of the climate-shelter-city to confront the evident risks arising from the intertwined challenges of climate change and social vulnerability. This shift opens up a reflection on the role of the 'critical' as a space of negotiation between ongoing transformations and

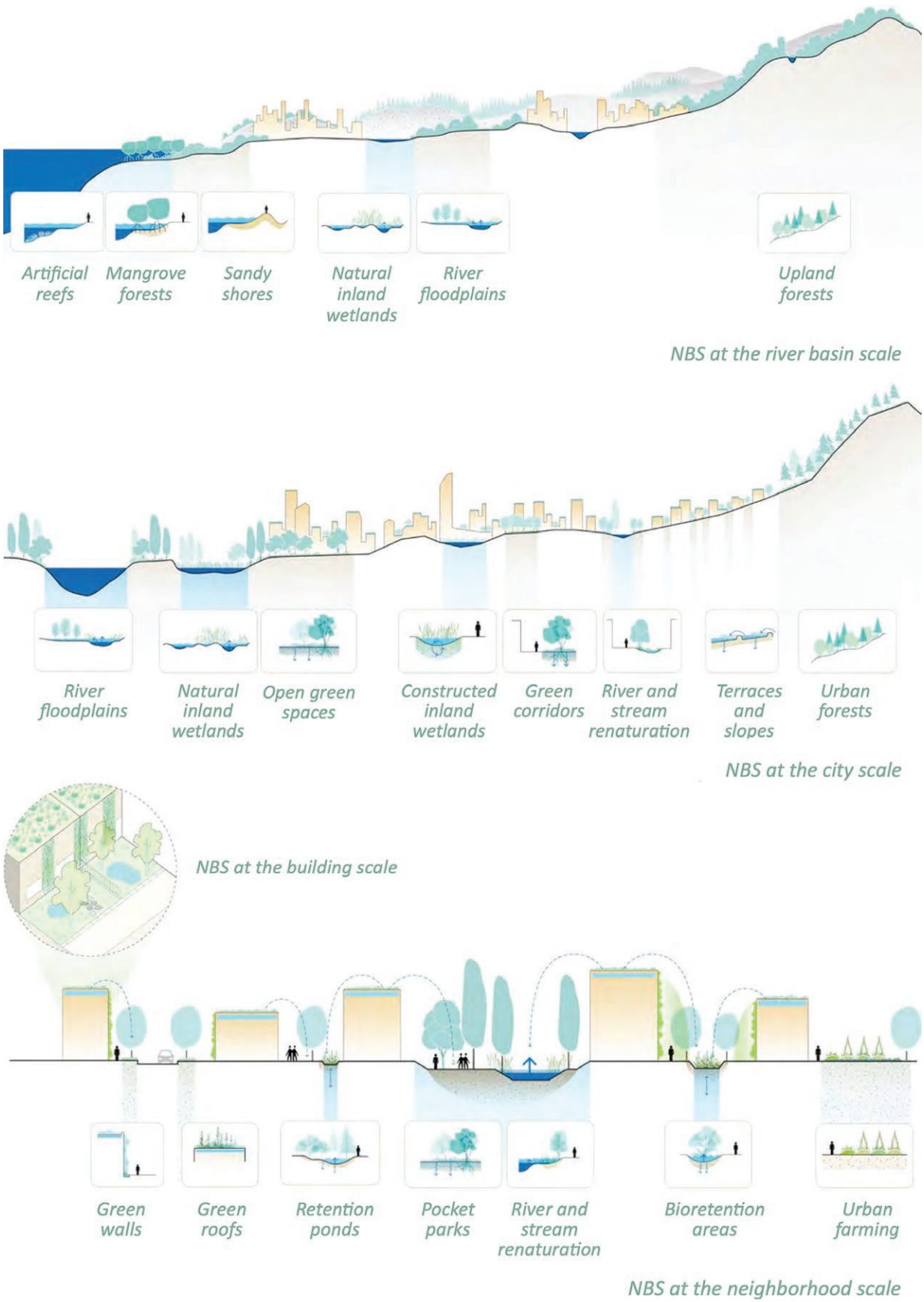
visione compaia anche il concetto di *shelter*, inteso come unità minima per garantire condizioni di abitabilità in equilibrio con le risorse del pianeta.
Su un piano diverso, Virilio definisce uno 'spazio critico' dove la velocità del progresso tecnologico ne altera la percezione e l'esperienza, rendendo instabile il rapporto tra tempo e spazio. Latour, infine, colloca la riflessione nella 'zona critica', uno spazio di interazione tra sistemi – sottile e fragile – sensibile alle azioni dell'essere umano per la sua stessa condizione di finitezza. Tutto, al suo interno, è finito, è locale, è a rischio ed è spesso l'oggetto del conflitto.
Pur provenendo da orizzonti teorici differenti, queste visioni condividono una consapevolezza comune: progettare in un contesto critico significa agire dentro la crisi, non a margine di essa. È da questo posizionamento che si apre la possibilità di reinterpretare il concetto di rifugio come dispositivo non di ritiro, ma di mediazione, capace di rispondere – o resistere – a trasformazioni profonde, sistemiche e non lineari.
Il concetto di città come rifugio climatico si colloca dunque all'intersezione tra complessità urbana, rischi sistemici e strategie di adattamento. In letteratura, i rifugi climatici vengono definiti come spazi urbani in grado di mitigare gli effetti delle ondate di calore e degli eventi meteorologici estremi, garantendo condizioni di sicurezza e inclusività per popolazioni vulnerabili (Amorim-Maia *et al*., 2023). «Ispirati al concetto ecologico di 'refugium', questi spazi urbani integrano natura, microclimi favorevoli, biodiversità e infrastrutture accessibili, con processi di co-progettazione che coinvolgono la comunità. Funzionano come strumenti di giustizia climatica e sociale, ridistribuendo risorse ecologiche e rafforzando l'equità territoriale» (Calderice, 2025).
L'idea di città-rifugio non deve essere vista come un insieme di spazi chiusi, bensì un sistema aperto di soglie, attraversabile e capace di accogliere temporalità variabili, muovendosi «in un oceano d'incertezze attraverso arcipelaghi di certezza» (Morin, 2001) mediante infrastrutture verdi e blu, spazi pubblici adattivi e reti sociali solidali.
Questa prospettiva emerge con chiarezza nelle visioni strategiche sviluppate in diverse città europee. Tra queste, Groningen mostra come tali orientamenti stiano dando forma a nuove modalità di adattamento, integrando la complessità climatica nella definizione di scenari e indirizzi progettuali.

Nuovi paradigmi per lo spazio urbano: il caso di Groningen

Il caso di Groningen offre un esempio di come una visione urbana integrata possa guidare le misure di adattamento climatico. La sua analisi si basa sulla lettura critica dei principali documenti ad indirizzo strategico sostenuti dalla municipalità, che definiscono le basi teoriche e applicative per l'individuazione di interventi realizzabili, con particolare attenzione al tema dello spazio pubblico.
Il *Geleide Groei* (Quadro Strategico per la Crescita Guidata) stabilisce principi flessibili per guidare la trasformazione del centro storico, incentrati su identità urbana, qualità della vita e resilienza climatica. Questo documento, approvato dall'amministrazione nel 2024 e sviluppato da MVRDV sotto la leadership di Nathalie de Vries nel suo mandato come architetto capo (2021-2023), si affianca alla *New Space for Living* adottata nel 2021 ed elaborata dal *team* Felixx con Goudappel, Stipo e Marco te Brömmelstroet, che propone un nuovo paradigma per

the forms of inhabiting, a conceptual threshold that must be continually interpreted, redefined, and re-inhabited.
It is useful to consider how, at different historical moments, the term *critical* has been deliberately associated with specific spatial forms in order to construct a framework within which to articulate reflection. A cross-reading of three works – *Critical Path* (Buckminster Fuller, 1981), *L'espace critique* (Virilio, 1984), and *Critical Zones* (Latour, 2015; Latour and Weibel, 2020) – offers compelling trajectories, united by a shared premise that crisis is not an event but a condition, and that space becomes an expressive field of complexity.
Fuller speaks of a 'critical path' to be followed for the survival of life on Earth, founded on a systemic, anticipatory, planetary design approach. It is significant that the same vision also presents the concept of shelter, understood as the minimal unit ensuring habitability in balance with the planet's resources.
On a different plane, Virilio defines a 'critical space' where the speed of technological progress alters perception and experience, destabilising the relationship between time and space. Latour, finally, situates his reflection in the 'critical zone', a space of interaction between systems – thin and fragile – sensitive to human action because of its finite condition. Everything within it is finite, local, at risk, and often the object of conflict.
Despite originating from different theoretical horizons, these perspectives share a common awareness. Indeed, to 'design' in a critical context means to act within the crisis, not at its margins. This position reveals the possibility of reinterpreting the concept of shelter as a device not of withdrawal but of mediation, capable of responding – or resisting – to profound, systemic, and non-linear transformations.
The concept of the climate-shelter city thus lies at the intersection of urban complexity, systemic risks, and adaptation strategies. In the literature, climate shelters are defined as urban spaces capable of mitigating the effects of heat waves and extreme weather events, ensuring conditions of safety and inclusivity for vulnerable populations (Amorim-Maia *et al*., 2023).
"Inspired by the ecological concept of *refugium*, these urban spaces integrate nature, favourable microclimates, biodiversity, and accessible infrastructures, with co-design processes that engage the community. They function as instruments of climate and social justice, redistributing ecological resources and strengthening territorial equity" (Calderice, 2025).
The idea of the climate-shelter-city should not be seen as a set of closed spaces, but as an open system of thresholds – permeable and capable to accommodate variable temporalities – moving in "an ocean of uncertainties through archipelagos of certainty" (Morin, 2001), through green and blue infrastructures, adaptive public spaces, and resilient social networks.
This perspective clearly emerges in the strategic visions developed across several European cities. Among them, Groningen illustrates how these orientations are shaping new modes of adaptation by integrating climatic complexity into the definition of scenarios and design guidelines

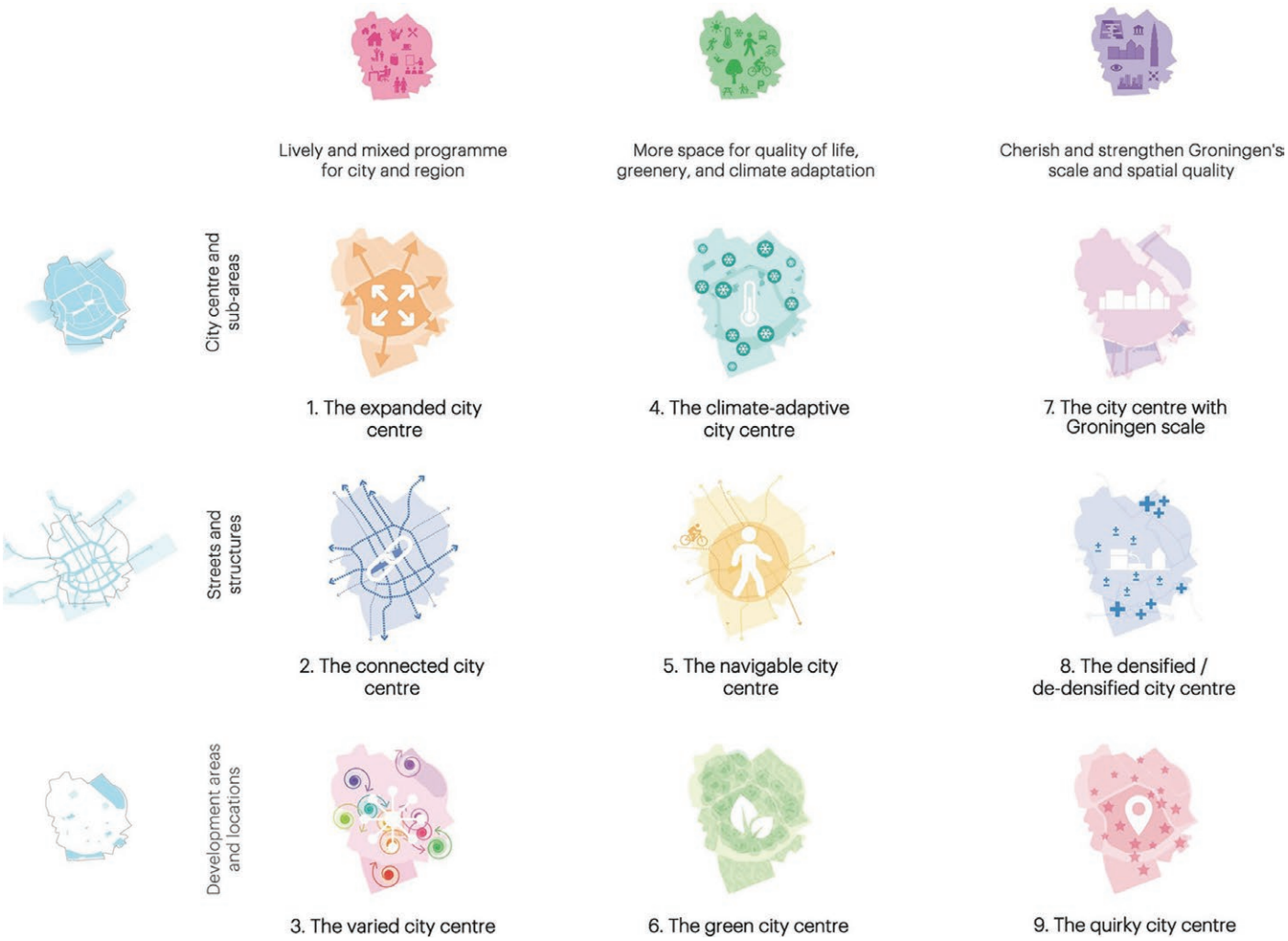
01 | Sezioni schematiche delle NBS alle diverse scale. World Bank, GFDRR and Felixx, 2021
Schematic sections of NBS at different scales. World Bank, GFDRR and Felixx, 2021



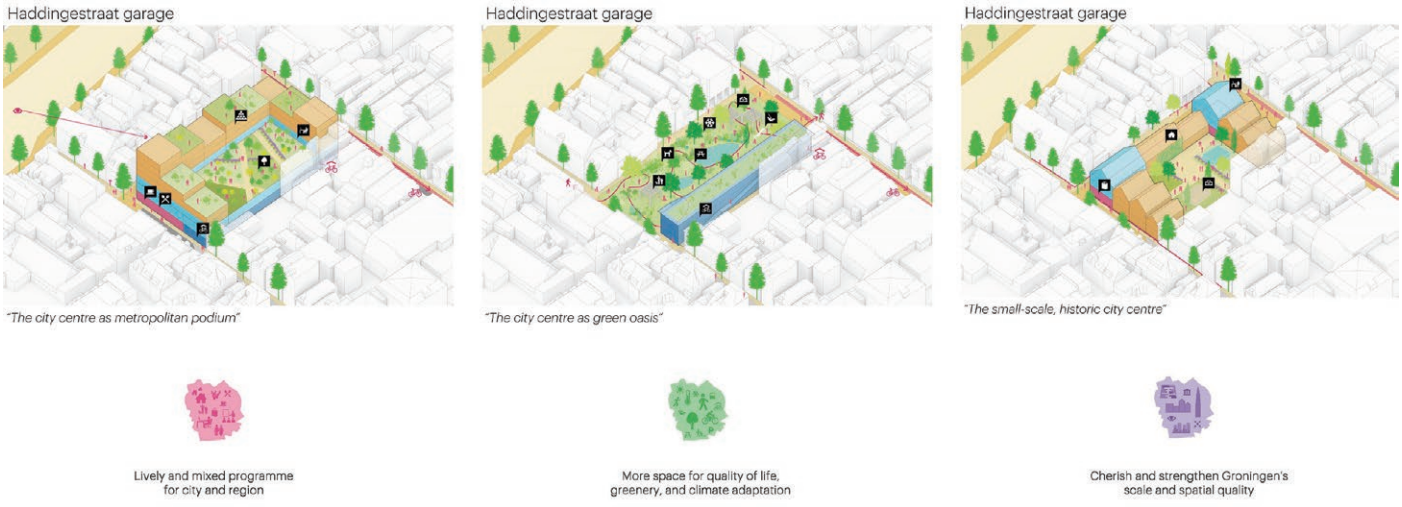
02 | Geleide Groei. Matrice. Gemeente Groningen, 2024
Geleide Groei. Matrix. Gemeente Groningen, 2024

lo spazio pubblico fondandosi sul principio che la strada è uno spazio per le persone, non mera via di passaggio.
Geleide Groei e *New Space* non devono essere interpretati come guide che forniscono indicazioni parallele (la prima di carattere più generale e la seconda più specifica sul centro storico della città), ma come assi complementari di una strategia integrata per la definizione di un ecosistema di resilienza che suggerisce una visione multilivello della città come rifugio climatico.
I due documenti spingono ad immaginare Groningen come una futura città-rifugio climatico grazie alla diffusione capillare di dispositivi spaziali, scalabili nel tempo, che mediano gli effetti negativi della crisi climatica: interventi quali implementazione delle aree verdi e ombreggiate, controllo delle acque, incremento del suolo permeabile, difesa della biodiversità, accessibilità sociale e reti lente diventano infrastrutture di cura (*care-infrastructure*) integrate nella trama urbana suggerendo micro-rifugi di prossimità che si relazionano con il tema degli *streetscapes* (strade-stanze, *pocket parks*, cortili comuni)[1].
Si può sostenere che i due documenti adottati dalla municipalità di Groningen siano un'elaborazione applicativa del *Catalogue of Nature-Based Solutions* (World Bank and GFDRR, 2021) che classifica soluzioni in famiglie e tipologie corredate da schede tecniche e casi studio. Il *Catalogue* è strutturato in modo tale da definire un repertorio globale di soluzioni verdi e blu, adattabili a differenti condizioni geo-morfologiche, climatiche, economiche e sociali.
Geleide Groei e *New Space* mostrano come integrare i suggerimenti del *Catalogue* nella forma urbana e nei processi (programmazione, partecipazione, governance). Questa traduzione

02 |



03 | Geleide Groei. Scenario 1. Gemeente Groningen, 2024
Geleide Groei. Scenario 1. Gemeente Groningen, 2024



dal 'cosa' al 'come' è il vero valore aggiunto di Groningen nel dibattito europeo sull'adattamento climatico della città.
In termini teorici, si può leggere come un passaggio dalla complessità descrittiva alla complessità operativa degli *streetscapes*, sul carattere sistemico e multidimensionale della città (Mansouri and Matsumoto, 2009).
La guida *New Space* non è solo un documento tecnico, ma anche uno strumento partecipativo e visuale. La sua versione preliminare è stata presentata attraverso incontri pubblici per confrontarsi con cittadini e stakeholders circa le opportunità di miglioramento della qualità della vita (Gemeente Groningen and Felixx, 2021). Affinché questo paradigma diventi prassi consolidata, occorre oggi sviluppare strumenti di monitoraggio, normative di applicazione e processi amministrativi organici, per trasformare il verde urbano e lo spazio pubblico in concreti rifugi climatici.
Gli elementi chiave della guida includono:

- la rinaturalizzazione dello spazio urbano;
- l'introduzione di infrastrutture verdi e blu per la gestione climatica;
- il potenziamento dell'accessibilità e dell'inclusività nei percorsi, arredi e spazi aperti;
- la riduzione del parcheggio su strada a favore di usi sociali e ambientali dello spazio.

La guida promuove inoltre un modello di città in cui la bicicletta e il camminare siano le modalità dominanti di spostamento, non per ideologia, ma per funzionalità ed efficienza (Gemeente Groningen and Felixx, 2021). Il principio di partenza di *New Space* è chiaro: la strada è lo spazio urbano più direttamente umanamente percepibile, non solo un collegamento funzionale tra punti A e B. Deve diventare uno *shared space*: uno spazio pubblico per la convivenza, non solo per la mobilità. La guida identifica dieci dimensioni fondamentali per la progettazione delle strade: accessibilità, sicurezza, percezione, salute,

New paradigms for urban space: The Case of Groningen
The case of Groningen offers an example of how an integrated urban vision can guide climate-adaptation measures. Its analysis draws on a critical reading of the main strategic documents supported by the municipality, which outline both the theoretical and operational bases for identifying feasible interventions, with particular attention to the public-space dimension.
The *Geleide Groei* (Strategic Framework for Guided Growth) sets out flexible principles for steering the transformation of the historic city centre, focusing on urban identity, quality of life, and climate resilience. Approved by the municipality in 2024 and developed by MVRDV under the leadership of Nathalie de Vries during her tenure as chief city architect (2021–2023), it works in tandem with *New Space for Living* – adopted in 2021 and prepared by Felixx together with Goudappel, Stipo, and Marco te Brömmelstroet – which proposes a new paradigm for public space based on the principle that the street is a place for people rather than a mere transit corridor.
Geleide Groei and *New Space* should not be read as parallel guides (the first more general, the second more specific to the historic centre) but as complementary axes of an integrated strategy to define an ecosystem of resilience that offers a multilevel vision of the city as a climate shelter.
The two documents invite us to imagine Groningen as a future climate-shelter-city, enabled by the widespread presence of scalable spatial devices that are scalable over time and capable of mediating the negative effects of climate change. Interventions such as expanded and shaded green areas, water-management measures, increased permeable surfaces, biodiversity protection, social accessibility, and slow-mobility networks become forms of care-infrastructure embedded in the urban fabric, suggesting micro-shelters of proximity that engage with the concept of streetscapes (street-rooms, pocket parks, communal courtyards)[1].
It can be argued that these two documents adopted by the Municipality of Groningen constitute an applied elaboration of the *Catalogue of Nature-Based Solutions* (World Bank and GFDRR, 2021), which classifies solutions into families and types, with technical sheets and case studies. The Catalogue is structured to provide a global repertoire of green and blue solutions, adaptable to different geomorphological, climatic, economic, and social conditions.
Geleide Groei and *New Space* illustrate how to integrate the Catalogue's recommendations into urban form and processes (planning, participation, governance). This translation from the 'what' to the 'how' is Groningen's true added value in the European debate on urban climate adaptation.
Theoretically, this marks a shift from descriptive to operational complexity in streetscapes, highlighting the systemic, multidimensional character of the city (Mansouri and Matsumoto, 2009).
The *New Space* guide is not only a technical document but also a participatory and visual tool. Its preliminary version was presented through public meetings to engage citizens and stakeholders in discussions on opportunities to improve quality of life (Gemeente Groningen and Felixx, 2021). To transform this paradigm into

04 | Geleide Groei. Scenario 2. Gemeente Groningen, 2024
Geleide Groei. Scenario 2. Gemeente Groningen, 2024

05 | Geleide Groei. Scenario 3. Gemeente Groningen, 2024
Geleide Groei. Scenario 3. Gemeente Groningen, 2024



established practice, it is now necessary to develop monitoring tools, application regulations, and integrated administrative processes to convert urban greenery and public space into tangible climate shelters.
Key elements of the guide include:
– renaturalisation of urban space;
– introduction of green and blue infrastructures for climate management;
– enhancement of accessibility and inclusivity in pathways, furnishings, and open spaces;
– reduction of on-street parking in favour of social and environmental uses of space.

The guide also promotes a city model in which cycling and walking are the dominant modes of transport – not for ideological reasons but for functional efficiency (Gemeente Groningen and Felixx, 2021). Its starting principle is clear. Indeed, the street is the most directly humanly perceptible urban space, not merely a functional link between points A and B. It must become a shared space, a public realm for coexistence, not just mobility. The guide identifies ten fundamental dimensions for street design, namely accessibility, safety, perception, health, social interaction, mobility, ecology, climate adaptation, economy, and identity. Through this approach it defines sustainable, multifunctional designs supported by visual examples across present, future, and potential contexts (*Now, Soon, Later*) and typological variations for each street.

The Geleide Groei (Gemeente Groningen, 2024) addresses the strategic, long-term dimension (a vision to 2050) by orienting urban expansion and land-use reconfiguration according to climatic, socio-demographic, and infrastructural scenarios.
It provides a flexible but guiding framework for all transformations within the historic city centre, at a time when urban growth is both a challenge and an opportunity. The city has seen a 10 % increase in the resident population of the centre over a decade, requiring careful reflection on space use in a dense, historically layered context like that enclosed by the *Diepenring*.
The document rests on three key themes:
– use of external space: balancing the needs of diverse social groups by combining residential, commercial, tourism, and soft-mobility functions;
– programmatic management: defining compatible and priority functions for each urban area;
– architectural and urban design: promoting coherent construction attentive to heritage yet open to innovation.

It highlights three focus areas – functional programming (*mixité*), climate and public space, and spatial quality (attention to historic identity) – which are systematised across three spatial scales – city centre and sub-areas, streets and infrastructures, expansion

Tab. 01 | Tabella riassuntiva dei glossari IPCC 2001-2023. Elaborazione degli autori.
Summary Table of IPCC Glossaries 2001-2023. Created by the Authors

interazione sociale, mobilità, ecologia, adattamento climatico, economia, identità. Attraverso questo approccio si definiscono progettazioni sostenibili e polifunzionali, supportate da esempi visuali nei contesti presenti, futuri e potenziali (*Now, Soon, Later*) e declinazioni tipologiche per ciascuna strada

La *Geleide Groei* (Gemeente Groningen, 2024) affronta la dimensione strategica e di lungo periodo (visione al 2050), orientando l'espansione urbana e la riconfigurazione degli usi del suolo in base a scenari climatici, socio-demografici e infrastrutturali.

Si propone come una cornice flessibile ma orientativa per tutte le trasformazioni nel centro storico, in un momento in cui la crescita urbana è simultaneamente una sfida e un'opportunità.

La città, infatti, ha visto un incremento del 10% della popolazione residente nel centro nell'arco di un decennio. Questo dato impone una riflessione sull'uso dello spazio, in particolare in un contesto denso e storicamente stratificato come quello racchiuso dal *Diepenring*.

Il documento si fonda su tre tematiche di sfondo:

– uso dello spazio esterno: la guida cerca di equilibrare le esigenze di diversi gruppi sociali, combinando residenzialità, commercio, turismo e mobilità dolce;
– gestione programmatica: vengono definite funzioni compatibili e prioritarie per ogni area urbana;
– progettazione architettonica e urbana: si promuove una costruzione coerente, attenta al patrimonio, ma aperta all'innovazione.

Vengono evidenziati tre temi – programmazione funzionale (*mixité*), clima e spazio pubblico, qualità spaziale (attenzione all'identità storica) – che vengono messe a sistema su tre scale dimensionali – centro città e sotto-aree, strade e infrastrutture, aree di espansione e luoghi iconici – generando una matrice di nove principi guida.

Il framework non prescrive soluzioni rigide, ma offre linee guida flessibili per orientare le scelte urbane in modo consapevole e duraturo.

Il piano emerge da un processo che incrocia GIS, governance e partecipazione cittadina, ponendo l'adattamento climatico come nodo chiave per ridefinire la città contemporanea.

Per dimostrare come i nove principi possano guidare il processo decisionale della città, il documento include tre casi di studio, uno per ogni tema, per fornire spiegazioni concrete di come dare priorità a temi diversi possa portare a risultati spazialmente diversi che includono strategie di verde integrato, riqualificazioni veicolari e valorizzazione di cortili e coperture come spazi di rifugio.

In questa prospettiva, Groningen non è soltanto un caso studio, ma un esempio paradigmatico di come la città possa configurarsi come rifugio climatico multilivello: dispositivo relazionale (*New Space*), cornice strategica (*Geleide Groei*) e laboratorio istituzionale.

Nonostante la ricchezza concettuale e il coinvolgimento partecipativo, supportati da flessibilità normativa, il rischio è che senza strumenti operativi vincolanti e metriche resti una visio-

| Tab. 01

Year	*Report*	*Definition of risk*	*Action*
2001	TAR	Missing	Missing
2007	AR4	Missing	Missing
2014	AR5	The potential for consequences where something of value is at stake and where the outcome is uncertain, recognizing the diversity of values. Risk is often represented as probability or likelihood of occurrence of hazardous events or trends multiplied by the impacts if these events or trends occur. In this report, the term risk is often used to refer to the potential, when the outcome is uncertain, for adverse consequences on lives, livelihoods, health, ecosystems and species, economic, social and cultural assets, services (including environmental services) and infrastructure.	- Explicit introduction of the term risk in the glossary; - Explicit definition of risk as the probability of "hazardous events × impacts"; - Emphasis on "adverse consequences" for lives, ecosystems, assets and infrastructure.
2023	AR6	The potential for adverse consequences for human or ecological systems, recognising the diversity of values and objectives associated with such systems. In the context of climate change, risks can arise from potential impacts of climate change as well as human responses to climate change. Relevant adverse consequences include those on lives, livelihoods, health and well-being, economic, social and cultural assets and investments, infrastructure, services (including ecosystem services), ecosystems and species.In the context of climate change impacts, risks result from dynamic interactions between climate-related hazards with the exposure and vulnerability of the affected human or ecological system to the hazards. Hazards, exposure and vulnerability may each be subject to uncertainty in terms of magnitude and likelihood of occurrence, and each may change over time and space due to socio-economic changes and human decision-making. In the context of climate change responses, risks result from the potential for such responses not achieving the intended objective(s), or from potential trade-offs with, or negative side-effects on, other societal objectives, such as the Sustainable Development Goals (SDGs). Risks can arise for example from uncertainty in the implementation, effectiveness or outcomes of climate policy, climate-related investments, technology development or adoption, and system transitions.	- Systemic extension: risk linked not only to climate impacts but also to human responses; - Explicit articulation of the dynamic interactions among hazards, exposure, and vulnerability in the context of climate change-related impacts; - Recognition of temporal and spatial dynamics and multiple uncertainties; - Direct connection with the SDGs and socio-economic trade-offs.

ne astratta. Nonostante ciò l'insieme dei tre documenti costituisce una strategia integrata: *New Space* fornisce il 'come' operativo; *Catalogue* estende la gamma di soluzioni; *Geleide Groei* dà la visione strutturata nel lungo termine.

Conclusioni

Sebbene le azioni introdotte dalla municipalità di Groningen esprimano le urgenze di una specifica città, la struttura dei principi e dei processi adottati risulta adattabile e trasferibile ad altri contesti urbani con condizioni e vulnerabilità differenti. I due documenti analizzati mostrano un processo multi-scalare e multidisciplinare, capace di supportare l'elaborazione di una visione della città-rifugio.

Il framework operativo delineato dalla municipalità con il supporto della ricerca condotta dalle università e da studi come MVRDV e Felixx rappresenta un esempio avanzato di città europea capace di integrare crescita urbana e qualità della vita alla gestione dei rischi. La sinergia tra la visione strategica della *Geleide Groei* e le linee operative di *New Space* testimonia una volontà chiara di implementare un modello di gestione della città animato, sostenibile e relazionale.

Affinché questo modello si consolidi, sarà imprescindibile:

- definire procedimenti di valutazione e monitoraggio;
- connettere la visione e i progetti a indicatori climatici e sociali;
- garantire continuità amministrativa e culturale alla strategia, evitando il rischio che resti condizionata a una particolare stagione politica.

Lo schema operativo descritto e in corso di implementazione si incentra sulla sovrapposizione della trama urbana delle infrastrutture grigie esistenti a nuovo ordito di infrastrutture verdi e blu che qualifica e aumenta la qualità, la dimensione e la frequenza degli spazi pubblici. Esso insiste sulla visione della strada come unità elementare di rifugio climatico che, a una scala più ampia concorre alla configurazione della città-rifugio (strategia che il NatureCityLAB sta proponendo anche ad alcune amministrazioni del sud Italia)[2].

L'estrema complessità necessaria all'attivazione delle strategie per la definizione del framework di una città-rifugio non consente di ridurre gli interventi a un elenco lineare e tecnico: tale framework va costruito mettendo in relazione infrastrutture, governance e immaginari progettuali. In questa prospettiva, la città-rifugio assume una doppia natura: è spazio fisico e orizzonte politico e culturale.

È chiaro che le difficoltà e le criticità sono molteplici ed è essenziale che la visione di città-rifugio non diventi un progetto-vetrina, un'azione di *greenwashing* per le amministrazioni, ma deve essere integrata nei processi di pianificazione e trasformazione urbana.

Si conclude sottolineando ancora che la città-rifugio può assumere un valore simbolico e narrativo, diventando spazio di pedagogia ambientale in cui pratiche di socialità e coabitazione con la natura si coniugano con forme di gestione del rischio.

ATTRIBUZIONE, RICONOSCIMENTI, DIRITTI D'AUTORE

Il contributo è frutto di una collaborazione da cui sono derivate riflessioni comuni. Nell'unitarietà della trattazione, ai soli fini di valutazioni concorsuali, il paragrafo "Rischio climatico ed evoluzione del concetto: implicazioni per il progetto di architettura" è stato redatto da Enrica Gaia Consiglio; il paragrafo "Progettare nella complessità. Il cambiamento climatico

areas and iconic sites – generating a matrix of nine guiding principles.

The framework does not prescribe rigid solutions but offers flexible guidelines to steer urban choices in an informed and lasting manner.

The plan emerges from a process that integrates GIS analysis, governance, and citizen participation, positioning climate adaptation as a key factor in redefining the contemporary city. To demonstrate how the nine principles can guide municipal decision-making, the document includes three case studies – one for each theme – providing concrete explanations of how prioritising different issues can lead to spatially distinct outcomes, including strategies of integrated greenery, vehicular requalification, and the enhancement of courtyards and rooftops as shelter spaces.

From this perspective, Groningen is not merely a case study but a paradigmatic example of how a city can configure itself as a multi-layered climate shelter, a relational device (*New Space*), a strategic framework (*Geleide Groei*), and an institutional laboratory. Despite its conceptual richness and participatory engagement, supported by regulatory flexibility, the risk is that without binding operational tools and metrics it could remain an abstract vision. Nevertheless, the ensemble of the three documents constitutes an integrated strategy. As a matter of fact, *New Space* provides the operational 'how', the *Catalogue* extends the range of solutions, and *Geleide Groei* supplies the long-term structured vision.

Conclusions

Although the actions introduced by the Municipality of Groningen address the urgencies of a specific city, the underlying principles and processes are adaptable and transferable to other urban contexts with different conditions and vulnerabilities. The two documents analysed reveal a multi-scalar and multidisciplinary process capable of supporting the development of a climate-shelter-city vision.

The operational framework outlined by the municipality, supported by research conducted by universities and firms such as MVRDV and Felixx, provides an advanced example of a European city able to integrate urban growth and quality of life with risk management. The synergy between the strategic vision of *Geleide Groei* and the operational guidelines of *New Space* clearly demonstrates a commitment to implementing a dynamic, sustainable, and relational model of urban management.

For this model to consolidate, it will be essential to:

- define procedures for evaluation and monitoring;
- connect the vision and projects to climatic and social indicators;
- ensure administrative and cultural continuity for the strategy, avoiding the risk that it remains tied to a specific political cycle.

The operational framework under implementation is grounded in overlaying the existing grey-infrastructure fabric with a new layer of green and blue systems, improving the quality, extent, and frequency of public spaces. It rests on the notion of the street as the basic unit of climate refuge which, when scaled up, contributes to configuring the climate-shelter-city (a strategy that NatureCityLAB is also proposing to several administrations in southern Italy)[2].

come risorsa immaginativa" è stato redatto da Ina Macaione; "Nuovi paradigmi per lo spazio urbano: il caso di Groningen" e "Conclusioni" sono stati redatti da entrambe le autrici.

NOTE

[1] Questa lettura è coerente con l'evidenza scientifica più recente che, proprio a Groningen, sta sperimentando modelli GIS per mappare opportunità di adattamento in spazi pubblici e privati, dimostrando l'efficacia dell'approccio interstiziale e multi-attore (Roest *et al*., 2023).

[2] Si veda l'esperienza condotta dal NatureCityLAB dell'Università della Basilicata nell'ambito della ricerca "Tech4you" Next Generation UE-PNRR_PP4.3.1, PP1, Action 1 "Climate change mitigation and adaptation in urban areas: infrastructure green and blue infrastructure for the resilient city" (Scientific referent: I. Macaione, with B. Andaloro, A. Raffa). Cfr: Corradi *et al*., (2024).

REFERENCES

Amorim-Maia, Anguelovski, I., Connolly, J. and Chu, E. (2023), "Seeking refuge? The potential of urban climate shelters to address intersecting vulnerabilities", *Landscape and Urban Planning*, Vol. 238, 104836. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104836 (Accessed on 11/09/2025).

Beck, U. (2000), *La società del rischio. Verso una seconda modernità*, Carocci, Rome.

Buckminster Fuller, R. (1981), *Critical Path*, St. Martins Press, New York.

Calderice, O. (2025), "Rifugio climatico", *Urbanistica Informazioni,* Vol. 321, p. 116. Available at: http://dx.doi.org/10.62661/ui321-2025-116 (Accessed on 11/09/2025).

Corradi, M., Stevens, T., Macaione, I., Raffa, A. and Andaloro, B. (2024) "Green climate-adaptive streetscapes regeneration – The De Urbanisten Experience in Antwerp", *AGATHÓN | International Journal of Architecture, Art and Design*, 16, pp. 60-73. Available at: http://dx.doi.org/10.19229/2464-9309/1652024 (Accessed on 11/09/2025).

Fressoz, J.-B. (2012), *L'Apocalypse joyeuse. Une histoire du risque technologique*, Le Seuil, Paris.

Friedman, Y. (2003), *L'Architecture de survie. Une philosophie de la pauvreté*, Éditions de l'éclat, Paris

Gemeente Groningen and Felixx (2021). *New space for living*. Available at: https://gemeente.groningen.nl/sites/groningen/files/2022-03/New-Space-For-Living---Quality-Of-Public-Space.pdf (Accessed on 11/09/2025).

Gemeente Groningen (2024), *Geleide Groei*. Available at: https://gemeenteraad.groningen.nl/Documenten/Collegebrieven/Strategisch-kader-Geleide-Groei (Accessed on 11/09/2025).

Giddens, A. (1994), *Le conseguenze della modernità. Fiducia e rischio, sicurezza e pericolo*, Il Mulino, Bologna.

IPCC (2001), *Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,* Cambridge University Press, Cambridge. Available at: https://www.ipcc.ch/report/ar3/wg1/ (Accessed on 11/09/2025).

IPCC (2007), *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC, Geneva. Available at: https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/ (Accessed on 11/09/2025).

IPCC (2014): *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC, Geneva. Available at: https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/ (Accessed on 11/09/2025).

IPCC (2023): *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC, Geneva. Available at: http://dx.doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647 (Accessed on 11/09/2025).

The high degree of complexity required to activate the strategies that define a climate-shelter-city framework makes it impossible to reduce interventions to a linear, technical list. Such a framework must be constructed by interrelating infrastructures, governance, and design imaginaries. In this perspective, the climate-shelter-city assumes a dual nature of being both a physical space and a political-cultural horizon.
The challenges and criticalities are many, and it is essential that the climate-shelter-city vision does not become a showcase project or a form of greenwashing for local administrations but is, instead, integrated into ordinary processes of urban planning and transformation. In conclusion, it must be said that the climate-shelter-city can also acquire a symbolic and narrative value, becoming a space of environmental pedagogy in which practices of sociality and cohabitation with nature are combined with forms of risk management.

ATTRIBUTION, ACKNOWLEDGMENTS, COPYRIGHT
The contribution is the result of a collaboration from which common reflections have derived. In the unitary nature of the discussion, and for the sole purpose of competition assessments, the paragraph "Climate risk and evolution of the concept: implications for the architectural project" was drafted by Enrica Gaia Consiglio; the paragraph "Designing in complexity. Climate change as an imaginative resource" was written by Ina Macaione; "New paradigms for urban space: the case of Groningen" and "Conclusions" were written by both authors.

NOTES

[1] This interpretation is consistent with the most recent scientific evidence, which – specifically in Groningen – is experimenting with GIS models to map adaptation opportunities in both public and private spaces, demonstrating the effectiveness of an interstitial and multi-actor approach. (Roest *et al*., 2023).

[2] See the experience conducted by the NatureCityLAB (University of Basilicata) within the research project "*Tech4you*" *Next Generation EU–PNRR_PP4.3.1, PP1, Action 1* "*Climate Change Mitigation and Adaptation in Urban Areas: Green and Blue Infrastructure for the Resilient City*" (Scientific coordinator: I. Macaione, with B. Andaloro and A. Raffa). Cf. Corradi *et al.* (2024).

Latour, B. (2015), *Face à Gaïa. Huit conférences sur le nouveau régime climatique*, Éditions La Découverte, Paris.

Latour, B. and Weibel, P. (2020), *Critical Zones. The Science and Politics of Landing on Earth*, MIT Press, Cambridge.

Losasso, M. (2016), "Climate risk, environmental planning urban design", *UPLanD | Journal of Urban Planning, Landscape & environmental Design*, Vol. 1, n. 1, pp. 219-232. Available at: http://dx.doi.org/10.6093/2531-9906/5039 (Accessed on 11/09/2025).

Mansouri, A. and Matsumoto, N. (2009), "Comparative study of Complexity in Streetscape Composition", *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, Vol. 3, n. 6, pp. 253-261. Available at: http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.1327724 (Accessed on 11/09/2025).

Morin, E. (2001). *I sette saperi necessari all'educazione del futuro*. Raffaele Cortina Editore, Milan.

Roest, A.H., Weitkamp, G., van den Brink, M. and Boogaard, F. (2023), "Mapping spatial opportunities for urban climate adaptation measures in public and private spaces using a GIS-based Decision Support Model", *Sustainable Cities and Society*, Vol. 96, 104651. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2023.104651 (Accessed on 11/09/2025).

United Nations (2015), *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. Available at: https://sdgs.un.org/2030agenda (Accessed on 11/09/2025).

United Nations (2016), *Report of the open-ended intergovernmental expert working group on indicators and terminology relating to disaster risk reduction*. Available at: https://www.undrr.org/quick/11605 (Accessed on 11/09/2025).

Virilio, P. (1984), *L'espace critique*, Christian Bourgois, Paris.

World Bank & GFDRR and Felixx (2021). *A Catalogue of Nature-Based Solutions for Urban Resilience*. World Bank/GFDRR, Washington. Available at: https://documents1.worldbank.org/curated/en/502101636360985715/pdf/A-Catalogue-of-Nature-based-Solutions-for-Urban-Resilience.pdf (Accessed on 11/09/2025).

Scenari di adattamento *design-based* ai rischi climatici nei paesaggi di bonifica del 20° secolo

Alessandro Raffa, https://orcid.org/0000-0002-0296-1863
Politecnico di Torino, Dipartimento di Architettura e Design, Italia
Fondazione Eni Enrico Mattei, Italia
alessandro.raffa@polito.it
alessandro.raffa@feem.it

Abstract. Nel contesto della crisi climatica, i paesaggi costieri di bonifica del 20° secolo (20CRL), frutto del controllo modernista sulla natura, affrontano rischi sistemici crescenti. L'adattamento, però, è ostacolato da lacune culturali, scientifiche e istituzionali, con la ricerca progettuale ancora marginale. ReclaiMEDlanD è un'iniziativa design-based, interdisciplinare e partecipativa che, concentrandosi su due 20CRL italiani, riconsidera il rischio come una lente per ripensare le strutture spaziali e di governance attuali, per accompagnare le comunità verso scenari di adattamento di lungo termine. Il futuro dei 20CRL dipende dall'abbracciare creativamente l'incertezza attraverso il progetto, aprendo la strada a un'agenda collettiva per l'adattamento climatico.

Parole chiave: Adattamento; Rischio; Progetto; Cambiamento Climatico; Paesaggi di bonifica del 20° secolo.

Rischio, metamorfosi e adattamento nei paesaggi costieri di bonifica del 20° secolo (20CRL)

Nell'attuale condizione segnata dal cambiamento climatico e dall'intensificazione degli eventi estremi, il rischio è diventato una lente cruciale per interpretare e trasformare i territori e le forme dell'abitare (Andraos, 2016). I rischi ambientali non sono più percepiti come perturbazioni naturali esterne o episodiche, ma come conseguenze sistemiche della modernità (Beck, 1992). La riconfigurazione tecnica dei paesaggi quali i paesaggi costieri di bonifica del 20° secolo (*20th-century coastal reclaimed landscapes*-20CRL) un tempo celebrati come simboli di progresso –, ha generato vulnerabilità strutturali che oggi richiedono una «metamorfosi» (Beck, 2014; 2016): un cambio di paradigma, epistemico e operativo, che riconosce l'instabilità come condizione costitutiva del presente, trasformando tali paesaggi in luoghi di un cambiamento ontologico. In questo quadro, il rischio si configura come una categoria generativa, capace di destabilizzare modelli deterministici e aprire spazi di innovazione. L'adattamento non è più soltanto protezione dalle minacce, ma pratica creativa e collettiva che mobilità intelligenze spaziali, saperi locali e capacità d'azione condivisa per abitare l'incertezza. In quest'ottica, i 20CRL – prodotti di una modernità diversa – possono essere reinterpretati come territori emblematici della metamorfosi contemporanea. Questo contributo presenta il progetto ReclaiMEDlanD, iniziativa sperimentale internazionale inserita in una più ampia traiettoria di ricerca progettuale sui 20CRL, che assume il rischio come strumento diagnostico e generativo. Attraverso la dimensione critico-prefigurativa del progetto multi-scalare, il progetto re-immagina questi paesaggi come possibili laboratori di resilienza climatica in condizioni di profonda incertezza.

Una ricerca progettuale sui paesaggi costieri di bonifica del 20° secolo

Perché i 20CRL?

I 20CRL rappresentano alcune delle trasformazioni territoriali più vaste dell'area euro-mediterranea e oltre, modellate da interventi infrastrutturali di grande scala. Concepite entro un paradigma tecnico-scientifico, tali trasformazioni incarnano una visione moderna di controllo razionale dell'ambiente fondata sulla produttività agricola – materializzata attraverso la separazione tra terra e acqua, il riordino geometrico dello spazio, la coltivazione intensiva e assetti insediativi funzionalisti. Al contempo, questi paesaggi sono stati campi di sperimentazione per ingegneria, agronomia,

Design-based adaptation scenarios to climate risks in 20th-century reclaimed landscapes

Abstract. In the context of the climate crisis, 20th-century reclaimed coastal landscapes (20CRL) – the result of modernist control over nature – are facing growing systemic risks. Adaptation, however, is hindered by cultural, scientific, and institutional gaps, with design research remaining marginal. ReclaiMEDlanD is a design-based, interdisciplinary, and participatory initiative that, by focusing on two Italian 20CRLs, reconsiders risk as a lens for rethinking current spatial and governance structures, supporting communities toward long-term adaptation scenarios. The future of 20CRLs depends on creatively embracing uncertainty through design, paving the way for a collective agenda for climate adaptation.

Keywords: Adaptation; Risk; Design; Climate change; 20th-century reclaimed landscapes.

Risk, Metamorphosis, and Adaptation in 20th-Century Coastal Reclaimed Landscapes

In the contemporary condition shaped by climate change and the intensification of extreme events, risk has become a crucial lens for interpreting and transforming both territories and forms of inhabitation (Andraos, 2016). Environmental hazards are no longer perceived as external or episodic natural disturbances but as systemic consequences of modernity itself (Beck, 1992). The technical reconfiguration of landscapes such as the 20th-Century Coastal Reclaimed Landscapes (20CRLs)–once celebrated as symbols of progress–has generated structural vulnerabilities that now call for a "metamorphosis" (Beck, 2014; 2016), precisely an epistemic and operational shift acknowledging instability as a constitutive condition of the present, thus turning these landscapes into spaces of ontological transformation.

Within this framework, risk operates as a generative category capable of disrupting deterministic models and opening pathways for innovation. Adaptation becomes not only protection from hazards but a creative and collective practice that mobilises spatial intelligence, local knowledge, and community agency to inhabit uncertainty. Seen through this lens, 20CRLs–products of another modernity–can be reinterpreted as exemplary territories of metamorphosis.

This contribution introduces the ReclaiMEDlanD project, an international experimental initiative within a broader design-research trajectory on 20CRLs, which frames risk as both diagnostic tool and driver of transformation. Through the critical–prefigurative dimension of multi-scalar

ISSN online: 2239-0243 | © 2025 Author(s) | http://www.fupress.com/techne | DOI: 10.36253/techne-18376
Open access, peer-reviewed article published by Firenze University Press (https://www.fupress.com) and distributed, except where otherwise noted, under the terms of the CC BY 4.0 License for content and CC0 1.0 Universal for metadata

scienze sociali, urbanistica e architettura, generando strutture compositive e configurazioni spaziali distintive oggi sempre più riconosciute dalle comunità locali per il loro valore identitario e culturale. Un tempo espressione di un rigido controllo sulla natura, i 20CRL si trovano oggi ad affrontare la sfida dell'adattamento, tra eredità moderniste (Raffa, 2025c), vulnerabilità climatica e rischio sistemico.

Gap Attuali

Nonostante la loro rilevanza, persistono importanti lacune culturali, scientifiche e di governance che ostacolano approcci adattivi nei 20CRL.

Sul piano culturale, tali territori sono ancora percepiti come paesaggi produttivi ma fragili – segnati da obsolescenza infrastrutturale, urbanizzazione incontrollata, degrado ambientale, subsidenza e perdita di biodiversità – condizioni aggravate da innalzamento del mare, alluvioni, siccità e temperature elevate. Questa percezione rafforza un paradigma emergenziale, che marginalizza l'adattamento di lungo periodo.

Sul piano della ricerca, le strategie di adattamento restano per lo più settoriali e orientate alla produttività agricola, trascurando la dimensione spaziale e storico-culturale dei 20CRL. Nonostante contributi significativi (Raffa e Macaione, 2024; Brisotto *et al*., 2023; Nijhuis, 2020; Metta e Onorati, 2019), la ricerca progettuale è ancora marginale e poco integrata nei quadri decisionali.

Sul piano della governance, frammentazione istituzionale, disallineamenti tra politiche, e approcci top-down non radicati nel tessuto sociale compromettono la capacità di avviare trasformazioni adattive durature e condivise.

Riposizionare i 20CRL. Obiettivi e Metodi della Ricerca

La ricerca progettuale in corso affronta questi gap interconnessi esaminando le interdipendenze tra eredità spaziali moderniste, vulnerabilità climatica e traiettorie di adattamento nei 20CRL mediterranei. Attraverso un approccio multi-metodo e centrato sulla dimensione spaziale, la ricerca interpreta tali paesaggi non come fallimenti della modernità, ma come laboratori di resilienza dove i sistemi ereditati – ecologici, infrastrutturali, insediativi – interagiscono con i rischi climatici presenti e futuri, per immaginare trasformazioni adattative. Strutturata attraverso tre metodi interconnessi di indagine, cioè *research on design*, *research-by-design* e *research for design*, la ricerca persegue due obiettivi principali: (i) elaborare una metodologia operativa, individuando principi e procedure, per l'adattamento climatico nei 20CRL; (ii) tradurre al metodologia operativa in un toolkit rivolto a ricercatori e professionisti impegnati nella progettazione dei paesaggi di bonifica mediterranei.

ReclaiMEDlanD. Una sperimentazione progettuale tra rischio, adattamento e public engagement

Il progetto ReclaiMEDlanD1 costituisce un'iniziativa interdisciplinare design-based che riposiziona il rischio come una categoria generativa e diagnostica –una lente concettuale attraverso cui leggere criticamente le strutture spaziali esistenti e co-progettare percorsi adattativi e anticipatori. Sviluppato attraverso la collaborazione tra FEEM-Fondazione Eni Enrico Mattei e FIBER-Florida Institute for Built Environment Resilience/University of Florida, ReclaiMEDlanD esplora il potenziale del progetto multi-scalare di architettura come pratica

design, the project reimagines these landscapes as laboratories for climate resilience under deep uncertainty.

A Design Research on 20CRL

Why 20CRLs?

20CRLs are some of the most extensive territorial transformations in the Euro-Mediterranean region and beyond, shaped by large-scale infrastructural interventions. Conceived within a techno-scientific paradigm, they embody a modern vision of rational environmental control centred on agricultural production–materialised through the separation of land and water, orderly geometric reorganisation of space, intensive cultivation, and functional settlement patterns. These landscapes have also served as sites of innovation in engineering, agronomy, social sciences, urbanism, and architecture, generating distinctive compositional structures and spatial configurations that local communities increasingly recognise for their cultural and identity-bearing value. Once the expressions of rigid control over nature, 20CRLs now face the challenge of adaptation at the intersection of modernist legacies (Raffa, 2025c), climate vulnerability, and systemic risk.

Current Gaps

Despite their relevance, significant cultural, research, and governance gaps continue to hinder adaptive approaches in 20CRLs. Culturally, these territories are still framed as productive yet fragile environments–characterised by infrastructural obsolescence, uncontrolled urbanisation, environmental degradation, subsidence, and biodiversity loss. These conditions are exacerbated by sea-level rise, flooding, drought, and extreme heat. This perception reinforces a paradigm in which climate risk is primarily addressed through emergency response, sidelining long-term, place-based adaptation.

From a research perspective, adaptation strategies remain largely shaped by sectoral, productivity-oriented approaches that marginalise the spatial, historical, and cultural dimensions of these landscapes. Despite notable exceptions (Raffa and Macaione, 2024; Brisotto *et al*., 2023; Nijhuis, 2020; Metta and Onorati, 2019), design research is still underdeveloped and weakly integrated into policy, planning, and design frameworks, leaving the potential of multi-scalar design to drive systemic adaptation largely unexplored.

Governance frameworks further reveal deep fragmentation across institutional levels, producing misaligned policies that insufficiently reflect community aspirations. This fragmentation undermines institutional legitimacy and social cohesion, limiting the capacity to initiate and sustain long-term adaptive transformations.

Reframing 20CRLs. Research Objectives and Methods

An ongoing design research project seeks to address these interconnected gaps by examining the complex entanglements between modern spatial legacies, climate vulnerability, and adaptation in Mediterranean 20CRLs. Through a spatially explicit and multi-method approach, the research reframes 20CRLs not as modernist failures, but as resilience laboratories–territories where inherited ecological, infrastructural, and settlement systems intersect with current and potential climate risks, encouraging people

Tab. 01 | Metodologia, ri-elaborazione di A. Raffa (2025, p. 22)
Methodology, reprocessed by A. Raffa (2025b, p. 22)

critica e prefigurativa, non confinata all'elaborazione di soluzioni predefinite, ma orientata a riformulare i problemi, esporre vulnerabilità strutturali e co-sviluppare strategie di adattamento anticipatorio e di lungo termine in due 20CRL italiani emblematici e tra i più vulnerabili al rischio di innalzamento del livello del mare (ENEA, 2023): Piana di Metaponto (Basilicata) e Bassa Romagna (Emilia-Romagna).

Una Pedagogia del Rischio: Struttura e Metodi

Il percorso di dieci mesi è stato articolato in quattro fasi sequenziali – Percezione del Rischio, Spazializzazione del Rischio, Prioritizzazione Basata sul Rischio e Adattamento Informato dal Rischio (Tab. 1) – concepite per trasformare la comprensione del rischio da minaccia da mitigare a condizione generativa per il progetto, l'innovazione nella governance e la resilienza territoriale (Cvitanovic, 2019). Tale progressione ha costituito una pedagogia del rischio: un percorso metodologico e culturale attraverso cui comunità e istituzioni hanno imparato a interpretare l'incertezza come terreno di azione collettiva e a considerare il rischio quale fondamento per l'indagine collaborativa (Benadusi, 2014). Attraverso un approccio multi-metodo fondato sul *learning-by-doing*, i partecipanti hanno indagato il potenziale dell'adattamento design-based nell'elaborazione di strategie di trasformazione di lungo periodo.

Un aspetto metodologico centrale è stata la dimensione partecipativa, che ha integrato conoscenze tecnico-scientifiche con saperi locali ed esperienziali. Ricercatori ed esperti hanno apportato prospettive disciplinari provenienti dalle scienze del clima, idrologia, ecologia, agronomia, geografia, studi sul patrimonio, pianificazione urbana e architettura, mentre i rappresentanti delle comunità hanno contribuito con esperienze vissute del rischio e dei cambiamenti ambientali. Le autorità locali hanno fornito approfondimenti complementari sui processi di governance e sulle pratiche attuali di gestione del rischio.

La comunicazione del rischio ha svolto un ruolo cruciale – non come strumento unidirezionale di diffusione, ma come mezzo di co-apprendimento, negoziazione e co-creazione. La sequenza delle attività ha progressivamente costruito una comprensio-

| Tab. 01

Activity	Description	Methods	Outputs
1. Risk Perception			
Kick-off Meeting	Introduction of project objectives; framing of systemic climate risk; scoping of territorial exposure	Public meeting; feedback analysis	Stakeholder alignment on approach and objectives; Shared understanding of climate threats;
Online Workshop I	Elicitation of risk perceptions from institutional and civic actors	Participatory appraisal; open discussion; comparative analysis; feedback coding	Typologies of perceived risk defined; narratives collected; identification of institutional gaps perceived
Online Workshop II	Collective reflection on personal and community experiences of risk	Structured dialogue; comparative analysis; feedback coding	Place-based risk perceptions interpreted; socio-spatial dimensions of perceived vulnerability revealed.
2. Risk Spatialization			
Risk-Policy Analysis	Critical reading of planning tools and governance frameworks	Document review; analytical matrices; mapping and comparative analysis	Understanding of current risk governance; identification of institutional misalignments.
Spatial Vulnerability Mapping	GIS-based modeling of hazard exposure and spatial vulnerabilities, focused on flooding and drought	Layer decomposition; multi-layer mapping; hazard overlay techniques	Spatial identification of high-risk zones and exposed systems
Online Progress Meeting	Synthesis of previous phases; mapping presentation; discussion of next steps	Public meeting; stakeholder feedback	Cross-sectoral awareness of risks from spatial and governance perspectives
Online Focus Group I	Stakeholder review and refinement of risk maps	Participatory mapping; iterative validation; feedback coding	Validated maps; spatial prioritization of critical areas
3. *Risk-based Prioritization*			
Online Focus Group II	Evaluation of risks by urgency and potential; selection of representative transects for adaptation	Facilitated decision-making; participatory analysis; feedback coding	Selection of key transects; identification of emblematic case for prototyping adaptation
Field Exploration	Fieldwork across targeted transect sections	Site visit; visual survey;	Empirical confirmation of mapped risks; visual documentation acquisition
4. Risk-informed Adaptation			
Online Seminar	Lectures on design-based adaptation; reflections on challenges/opportunities	Keynote speeches; plenary discussion	Knowledge transfer on design-based adaptation as regenerative opportunity
Scenario Planning Workshop	Exploratory co-design of adaptation strategies for the selected transect	Co-design charrette; small/large group sessions	Spatial diagrams and proposals for adaptive transformation
Symposium	Public and streamed event for project's results dissemination	Keynote presentations; roundtable debates; plenary discussion	Knowledge transfer across all levels; articulation of shared design principles

Tab. 02 | Confronto tra i transetti di Bassa Romagna e piana di Metaponto sul rischio idraulico, elaborazione A. Raffa
Comparison between Bassa Romagna and Metaponto plain transects on hydraulic risks, created by A. Raffa

ne condivisa e multi-scalare dei rischi climatici, in particolare di natura idraulica, nelle due aree di studio. Ciascuna fase ha prodotto risultati che, cumulativamente, hanno rafforzato la profondità analitica e progettuale del processo.

Spazializzazione e Prioritizzazione basate sul Rischio. Un confronto analitico attraverso i rischi idraulici

Il confronto tra i due casi studio mostra come il cambiamento climatico amplifichi i rischi idraulici attraverso precipitazioni più intense, regimi idrologici alterati e l'innalzamento del livello del mare. Entrambi i 20CRL faticano a gestire picchi di piena estremi, stagnazioni prolungate e processi di salinizzazione avanzante. Tali dinamiche danneggiano l'agricoltura (perdite colturali, degrado del suolo, compromissione dei sistemi irrigui) e mettono sotto pressione le reti ecologiche, nelle quali zone umide, corridoi ripariali e foreste costiere manifestano squilibri idrici, declino della vegetazione e ridotta continuità degli habitat. Infrastrutture e insediamenti affrontano pressioni analoghe, con strade, servizi e aree edificate sempre più esposte a condizioni idrologiche problematiche. I siti archeologici, sia in forma esposta che sepolta, evidenziano una vulnerabilità crescente dovuta a umidità, erosione e regimi idrici instabili (Tab. 2).

Le attività di mappatura, condotte sia su base documentale sia in modalità partecipativa, hanno ancorato queste vulnerabilità a specifiche porzioni territoriali, consentendo agli stakeholder di individuare un transetto rappresentativo per ciascun territorio, tra costa e interno, quale test-bed emblematici (Fig. 1). Le esplorazioni sul campo hanno confermato e ulteriormente dettagliato le forme di fragilità mappate. I pattern di rischio emersi hanno rivelato una vulnerabilità sistemica e messo in evidenza l'urgente necessità di attuare strategie di adattamento integrate e multiscalari, capaci di rafforzare la resilienza territoriale di lungo periodo.

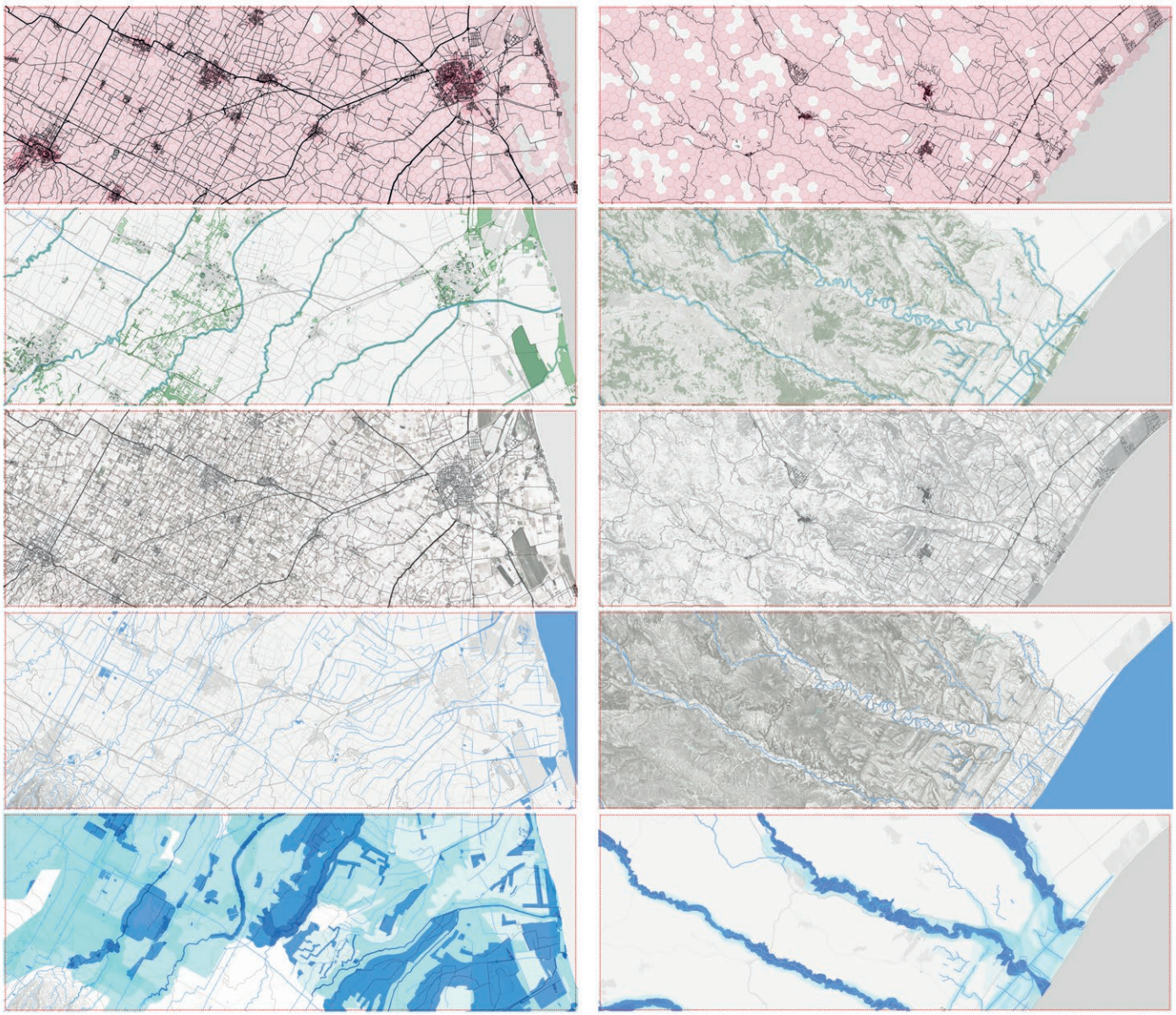
Adattamento Informato dal Rischio: workshop di scenario-planning nel transetto di Metaponto

Il workshop di scenario-planning (Haigh, 2019) ha permesso di sviluppare strategie contestuali di adattamento climatico di lungo periodo utilizzando il transetto di Metaponto come am-

Tab. 02 |

System & Features	General Impacts of hydraulic Risks	Common Risks	Differentiated Risks (Transect). Bassa Romagna (B) and Metaponto Plain (M)
Water system Drainage and irrigation network; embanked rivers; rivers	Overload of canals; river overflows; water stagnation; salinization; contamination of surface and groundwater; interruption of irrigation cycles	River overflows; increased hydraulic pressure on reclamation networks; stress on groundwater systems; reduced drainage efficiency	**B:** Overflows of Lamone Senio (Bagnacavallo), Santerno (Lugo); prolonged stagnation in rural and urban areas (Conselice). **M:** Floods of Basento and Bradano (Metaponto Borgo, Marinella); backflow in coastal ditches near Metaponto Lido.
Ecological system Wetlands; coastal dunes; shores; forests; riparian corridors	Habitat alteration and fragmentation; changes in sediment transport; biodiversity loss; shore and dunes erosion; impact on resources depletion of ecological resources and reduction in ecosystem functions	Impacts on sensitive habitats; alteration and disruption of ecological corridors; reduced ecological resilience;	**B:** Stress in rivers (Lamone) floodplains and wetland (Punta Albarete) and riparian vegetation; coastal pine woods demage and degradation; hydrological imbalance and soil pollution **M:** Erosion of coastal dunes and pine forests in Metaponto Woods; hydromorphic stress in Pantanello; altered sediment flows along the Bradano corridor.
Agricultural system Rural patterns; Windbreaks; hedgerows	Crop loss; soil compaction and degradation; decline in soil fertility and productivity; windbreaks and hedge rows loss	Crop flooding; reduced soil fertility; increased vulnerability of intensive cropping systems	**B:** Orchard and arable-land diffused damage between (from Ravenna to Lugo) **M:** Flooding in orchard/horticultural belts between Metaponto–Bernalda; erosion of sandy soils in Pantanello and Metaponto Scalo.
Infrastructural system Embanked roads/railways; depressed road sections; rural networks; slow mobility networks	Damage to roads, bridges, and underpasses; disruption of mobility networks; impairment of utilities and critical service infrastructures	Road interruptions; underpass flooding; damage to critical infrastructures and service networks	**B:** Flooded underpasses between Lugo–Alfonsine; disruptions on road SP21, SP253 and railways; impacts in industrial areas of Bagnacavallo **M:** Fragility of SP3 "Jonica"; damage on rural roads towards Metaponto Lido; instability of agricultural tracks.
Settlement system Dense urban centers; rural villages; dispersed rural settlements	Damage from flooding and humidity affecting residential areas, productive sites, and services; temporary or prolonged displacement of inhabitants	Impacts on residential and tourist settlements and economic activities; disruption of essential services; increased exposure of vulnerable populations	**B:** Flooding in Lugo, Conselice, Faenza (Lamone-adjacent urban settlements); impacts on productive districts of Cotignola; impacts on coastal tourism facilities **M:** Impacts in Metaponto Lido, Borgo Metaponto; damage to tourist settlements (Pini di Metaponto, Lido Torre).
Archaeological (heritage) sytems Low-lying sites; exposed excavated areas; buried archaeologies	Material degradation from humidity and flooding; sediment deposition; surface erosion; increased vulnerability of heritage assets	Increased exposure of cultural heritage to water, salinity, and soil instability; accelerated degradation of sensitive archaeological sites	**B:** High vulnerability of archaeological sites, i.e., Broze-Age Solarolo flooded, Roman Villa of Classe Ancient Harbour in Ravenna covered with mud. **M:** High vulnerability of the Greeck colonization archaeologies both excavated –i.e., Tavole Palatine– and buried

01 | Confronto tra i transetti di Bassa Romagna (sinistra) e piana di Metaponto (destra) tra sistemi territoriali e rischio idraulico, elaborazione di A. Raffa
Comparison between Bassa Romagna (left) and Metaponto plain (right) transects on territorial systems and hydraulic risks, created by A. Raffa



to imagine adaptive transformations. Structured through three interconnected modes of inquiry–research on design, research-by-design, and research for design–the project pursues two primary objectives: (i) to elaborate a spatially explicit operational methodology, with guiding principles and procedures, for climate adaptation in 20CRLs; and (ii) to translate these methodological insights into a practical toolkit to support researchers and practitioners in designing climate-resilient Mediterranean reclaimed landscapes.

ReclaiMEDlanD. A Design Experimentation Between Risk, Adaptation, and Public Engagement

The ReclaiMEDlanD project[1] is an interdisciplinary design-based initiative (Raffa, 2025a) that repositions risk as a generative and diagnostic category – a conceptual lens through which to critically examine existing spatial structures, and to co-design adaptive and anticipatory pathways. Developed through collaboration between FEEM-Fondazione Eni Enrico Mattei and FIBER-Florida Institute for Built Environment Resilience/University of Florida, the project explores the potential of multi-scalar architectural design as a critical and prefigurative practice. It is not confined to delivering predefined solutions, but oriented towards reframing problems, exposing structural vulnerabilities, and co-developing long-term anticipatory adaptation strategies in two emblematic Italian 20CRLs that are most vulnerable to sea-level rise flooding (ENEA, 2023), precisely the Metaponto plain (Basilicata) and Bassa Romagna (Emilia-Romagna).

A Pedagogy of Risks: Structure and Methods

The ten-month process was articulated into four sequential phases–Risk Perception, Risk Spatialisation, Risk-Based Prioritisation, and Risk-Informed Adaptation (Tab. 1)–designed to shift the understanding of risk from a threat requiring mitigation to a generative condition for design, governance innovation, and territorial resilience (Cvitanovic, 2019). This progression constituted a *pedagogy of risk,* a methodological and cultural pathway through which communities

bito di sperimentazione speculativa. Tale scelta si è fondata su ragioni metodologiche e operative: oltre alla sua rappresentatività, essa presenta un'elevata vulnerabilità a causa di un'economia fortemente dipendente dall'agricoltura, processi di spopolamento, scarsa manutenzione delle infrastrutture di bonifica e assenza di politiche di adattamento – condizioni che amplificherebbero gli impatti di eventi analoghi all'alluvione che ha colpito la Bassa Romagna del 2023.

Partendo da una lettura spaziale delle dinamiche socio-ambientali, dalle proiezioni climatiche per un aumento di +1,5 °C entro il 2100 e dalle criticità emerse nelle precedenti fasi partecipative, sono stati elaborati quattro scenari tematici interconnessi. Pensati non come modelli predittivi, ma come dispositivi euristici, gli scenari hanno favorito una riflessione critica oltre i vincoli dell'attuale pianificazione/progettazione e gestione del rischio, affrontando al contempo la sfida trasversale della rinaturalizzazione introdotta dalla Nature Restoration Law (2024) europea.

A partire dagli scenari, i partecipanti hanno elaborato strategie spaziali di lungo periodo per affrontare i rischi di natura idraulica, attraverso la gestione diffusa delle acque, la riconnessione ecologica, la mobilità e l'abitare resilienti, l'agricoltura adattiva e la protezione del patrimonio archeologico (Tab. 3). Questi contributi hanno informato visioni spaziali specifiche lungo il transetto, delineando traiettorie di trasformazione orientate alla resilienza climatica (Fig. 2).

Risultati, limiti e prospettive future

ReclaiMEDlanD, pur avendo una natura metodologica ed esplorativa, ha prodotto un corpo consolidato di risultati che rafforza sia le capacità analitiche sia quelle operative necessarie per l'adattamento climatico nei 20CRL, offrendo al contempo indicazioni critiche per lo sviluppo della ricerca progettuale in corso.

Sul piano analitico, la sequenza delle attività partecipative ha generato una comprensione condivisa e multi-scalare dei rischi idraulici e climatici nei due territori, rivelandone la natura sistemica, tra pressioni ambientali, percezione pubblica, rigidità infrastrutturali e forme di governance frammentate. Questa comprensione ha inoltre permesso di individuare potenziali leve per processi di trasformazione adattiva. Tuttavia, la disponibilità limitata e la qualità disomogenea dei dati ambientali e idraulici quantitativi – quali serie idrologiche di lungo periodo, misurazioni della subsidenza e modelli di rischio ad alta risoluzione – hanno ridotto le possibilità di integrare in modo efficace l'esplorazione progettuale con valutazioni quantitative robuste.

Sul piano metodologico–operativo, il processo (Raffa, 2025b) ha condotto alla formulazione di una prima elaborazione di linee guida di adattamento trasferibili (Raffa, 2025a), derivate dall'analisi comparativa dei casi e dagli esiti del workshop. Concepite non come soluzioni prescrittive, ma come principi operativi, tali linee guida intendono orientare futuri processi progettuali in 20CRL mediterranei analoghi e richiederanno una sperimentazione iterativa in molteplici contesti. Per mantenere la logica comparativa della ricerca e validare operativamente queste linee guida, un secondo workshop di scenario-planning sarà realizzato sul transetto della Bassa Romagna, rafforzando l'apprendimento inter-territoriale.

A livello di governance, il progetto ha favorito processi di apprendimento collaborativo tra istituzioni, esperti e comunità,

and institutions learned to interpret uncertainty as a terrain for collective action, and to view risk as a foundation for collaborative inquiry (Benadusi, 2014). Through a multi-method, learning-by-doing approach, participants engaged with the potential of design-based adaptation to elaborate long-term transformative strategies.

A central methodological component was the participatory framework, which integrated technical–scientific knowledge with local and experiential insights. Researchers and experts contributed disciplinary perspectives from climate science, hydrology, ecology, agronomy, geography, heritage studies, urban planning, and architecture, while community representatives conveyed personal experiences of risk and environmental change. Local authorities provided complementary insights into governance processes and risk management practices.

Risk communication played a pivotal role–not as a one-directional dissemination tool, but as a medium for co-learning, negotiation, and co-creation. The sequence of activities progressively built a shared, multi-scalar understanding of climate risks, in particular hydraulic, in the two case-study areas. Each phase generated outputs that cumulatively reinforced the analytical and projective depth of the process.

Risk-based Spatialisation and Prioritisation. An analytical comparison through hydraulic risks

The comparison between the two case studies shows how climate change amplifies hydraulic risks through more intense rainfall, altered hydrological regimes, and sea-level rise. Both 20CRLs struggle to manage extreme peak flows, prolonged stagnation, and advancing salinisation. These dynamics damage agriculture (crop losses, soil degradation, compromised irrigation systems) and stress ecological networks, where wetlands, riparian corridors and coastal forests present altered water balances, vegetation decline, and reduced habitat continuity. Infrastructures and settlements face similar pressure with roads, services, and built-up areas increasingly exposed to risky hydrological conditions. Archaeological sites, in both exposed and buried forms, show heightened vulnerability due to humidity, erosion, and unstable water regimes (Tab. 2). Desk-based and participatory mapping anchored these vulnerabilities to specific territorial sections, enabling stakeholders to identify one representative coastal–inland transect per territory as an emblematic risk test-bed (Fig. 1). Field explorations confirmed and further detailed the mapped forms of fragility. The resulting patterns of risk revealed systemic vulnerability and underscored the urgent need to implement integrated, multi-scalar adaptation strategies capable of enhancing long-term territorial resilience.

Risk-Informed Adaptation: Scenario-Planning workshop in the Metaponto transect

The scenario-planning workshop (Haigh, 2019) developed situated long-term climate-adaptation strategies using the Metaponto transect as a speculative test bed. The area was selected for both methodological and operational reasons. Beyond its representativeness, it displays high vulnerability due to an agriculture-dependent economy, depopulation, poor mainte-

Tab. 03 | Scenari sul transetto di Metaponto. Vulnerabilità, Opportunità e Strategie di Adattamento, elaborazione di A. Raffa
Metaponto Transect Scenarios. Vulnerabilities, Opportunities and Adaptation strategies, created by A. Raffa

Infrastructure and Settlement Dynamics
Scenario 1

In 2100, The elevation of the **main roads** has played a crucial role in renewing the region's infrastructure and settlement system. By reducing travel times and mitigating flood risks, the intervention improved territorial mobility between the coast and the interior. However, it also produced significant **side effects**: reduced accessibility to intermediate settlements contributed to their **economic and social marginalization**, while **coastal depopulation** intensified due to climate vulnerabilities and agricultural decline. As a result, populations began to **relocate inland,** repopulating and expanding long-abandoned urban areas. At the same time**, new amphibious living models** and emerging agricultural opportunities are beginning to repopulate coastal zones (Raffa and Brisotto, 2025, p. 34)

Scenario Vulnerabilities

- **Marginalization of intermediate settlements**: Reduced access has led to social and economic decline in areas bypassed by the new infrastructure.
- **Depopulation of coastal and reclaimed areas**: Due to increased climate vulnerability (e.g., flooding, salinization) and the decline of traditional agriculture.
- **Loss of diffuse settlement patterns**: The historical spatial logic of the bonifica landscape is being eroded by urban concentration inland.
- **Displacement of coastal population**:

Scenario Opportunities

- **Improved climate-resilient mobility**: Reduced flood risk and enhanced connectivity between inland and coastal areas;
- **Repopulation of abandoned inland towns**: Infrastructural investment has triggered the revitalization of old urban centers.
- **Emergence of new adaptive living models**: Coastal repopulation driven by **amphibious housing solutions** and **innovative agricultural practices** suited to changing environmental conditions.

Long-Term Adaptation Strategies

- **1.1 Elevation of primary infrastructure** to ensure mobility even during extreme weather events;
- **1.2 Improvements to local road systems** must guarantee agricultural enterprises access to collection and distribution points;
- **1.3 Integration of structural (e.g., levees, mobile barriers) and non-structural solutions (e.g., nature-based solutions)** to create multifunctional infrastructure;
- **1.4 Selective densification in urban areas** less exposed to hydrogeological risks.
- **1.5 Managed retreat strategies** between the coast and inland areas, including the **regeneration of abandoned villages** located in lower-risk zones.
- **1.6 New amphibious housing models** to continue inhabiting coastal territories through flexible and adaptable solutions.
- **1.7 Nature-based regeneration of urban and peri-urban open spaces**, including permeable soils, ecological corridors, rain gardens, tree-lined paths, and urban agriculture.

Amphibious Renaturalization
Scenario 2

In 2100, environmental and agricultural policies have driven the conversion of intensively farmed reclaimed land along the coast into **wetland ecosystems**, radically transforming the landscape and economy of the Metaponto area. Biodiversity has been restored, and watercourses have regained their **ecological functions**, particularly in sediment transport toward the coast. Though the renaturalization reduced arable land, it fostered a **new nature-based economy**, including **eco-tourism, aquaculture, and sustainable wetland management**. Small eco-lodges now dot the coast, and previously degraded soils have regained fertility. However, this shift has challenged traditional farming models, creating tension among farmers unable to adapt, many of whom demand more land for cultivation (Raffa and Brisotto, 2025, p. 35)

Scenario Vulnerabilities

- **Reduction of arable land** leading to tensions with traditional intensive farming models;
- **Difficulty for** some farmers in **adapting** to new sustainable practices;
- **Socio-economic imbalance** due to transition-related disruptions;

Scenario Opportunities

- **Restoration of wetlands and biodiversity**;
- **Recovery of degraded soils and water quality**;
- **Development of eco-tourism and sustainable aquaculture**;
- **Emergence of a nature-based economy**;

Long-Term Adaptation Strategies

- **2.1 Restoration of the coastal system**, through: artificial beach nourishment and dune restoration, artificial reefs and submerged structures, coastal wetlands. Areas for fish farming as coastal protection and the generation of new alternative economies.
- **2.2 Renaturalization of riverbeds and banks**, through: setback of embankments, creation of bypasses and oxbow lakes, recovery of historical riverbeds, implementation of physical structures in riverbeds to redefine sediment ecology between inland and coastal areas.
- **2.3 Afforestation of coastal areas, riverbeds, and riverbanks** to improve biodiversity and ecological performance, and in response to climate risk.
- **2.4 Develop new supply chains linked to food tourism**, which in the long term can become a consolidated economic resource integrated with agriculture.

(Continued)

nance of reclamation infrastructures, and the absence of adaptation policies, conditions that would amplify the impact of events comparable to the 2023 Bassa Romagna flood. Four interconnected thematic scenarios were defined based on a spatial reading of socio-environmental dynamics, climate projections for +1.5 °C by 2100 and critical issues that had emerged from previous participatory phases. Conceived not as predictive models but as heuristic frameworks, they enabled critical reflection beyond current planning, design, and risk-management constraints, while also addressing the cross-cutting challenge of re-naturalisation highlighted by the EU Nature Restoration Law (2024). By reflecting on the scenarios, participants developed long-term spatial strategies to address hydraulic-related risks through distributed water management, ecological reconnection, resilient mobility and housing, adaptive agriculture, and the protection of archaeological heritage (Tab. 3). These contributions informed context-specific spatial visions along the transect, outlining trajectories of transformation oriented toward climate resilience (Fig. 2).

Results, limitations and future directions

The ReclaiMEDlanD process, while methodological and experimental in nature, produced a consolidated body of results that strengthens both the analytical and operational capacities required for climate adaptation in 20CRLs. It provides critical insights for ongoing design research.

Tab. 03 | Scenari sul transetto di Metaponto. Vulnerabilità, Opportunità e Strategie di Adattamento, elaborazione di A. Raffa
Metaponto Transect Scenarios. Vulnerabilities, Opportunities and Adaptation strategies, created by A. Raffa

Tab. 04 |

New *Forms of Existence for 20CRL as Cultural Landscape*
Scenario 3

In 2100, climate change adaptation efforts–especially the restoration of coastal wetlands–have rendered the original reclamation system obsolete, exposing its climatic vulnerabilities. Local people react negatively to re-naturation initiatives, denunciando la perdita del valore culturale. Along the coast, these landscapes have largely given way to renaturalization, while in the inland fringe, remnants of the reclamation and land reform interventions–such as drainage canals, rural road grids, hedgerows, and dispersed settlements–still persist. These elements are now being recovered and reimagined through adaptive reuse. The result is a **post-reclamation landscape** that merges 20th Century **heritage protection with adaptation needs, enabling new recreational and cultural tourism functions,** and supporting **emerging amphibious agricultural practices** (Raffa and Brisotto, 2025, p. 36)

Scenario Vulnerabilities

- **Obsolescence of historical reclamation systems;**
- **Top-down nature restoration planning;**
- **Loss of cultural identity perceived by local communities;**
- **Degradation of land and soil in post-agricultural areas;**

Scenario Opportunities

- **Culturllay-sensitive renaturation of reclamation infrastructure;**
- **Adaptive reuse of 20th century relclamation l abandoned farm houses and rebuilding;**
- **Development of amphibious agriculture and diversified rural economies;**
- **Cultural tourism and recreational uses linked to cultural heritage landscape;**

Long-Term Adaptation Strategies

- **3.1 Make space for agriculture** through solutions such as **amphibious farming** in areas prone to waterlogging, seasonal flooding, or high salinity levels, or through **raised-bed agriculture** where soil quality is inadequate**;**
- **3.2 Regenerate soil** using **phytoremediation forests** and **wetland-based regenerative systems** for abandoned, degraded, or contaminated land, enabling long-term recovery of fertile soils and enhancing biodiversity**;**
- **3.3 Reforest using agroforestry techniques**, contributing to diversified production and enriching both landscape variety and ecological biodiversity**;**
- **3.4 Restore and redesign windbreak hedgerow networks**, considering variability in wind frequency, direction, and intensity across the entire territory**;**
- **3.5 Renaturalize drainage canals** as new **blue-green infrastructure** connecting urban areas, farmland, and the coast–while **preserving historic reclamation structures** as sites of interest**;**
- **3.6 Design and build rainwater storage basins**, at both farm and community scales, to ensure water availability during drought periods**;**
- **3.7 Restore minor access paths** between fields and urban settlements to promote **sustainable mobility** and create new **ecological connections;**

Protection and Enhancement of (Archaeological) Heritage
Scenario 4

In 2100, climate change and the adaptation strategies implemented over the preceding decades have had varied impacts on widespread cultural heritage, particularly **archaeological assets**. **Some** minor sites–either insufficiently protected or located in highly vulnerable areas–have been **irreversibly lost**. **Others**, however, have become the focus of **adaptive reuse and valorization efforts**, establishing new relationships between cultural heritage and the amphibious landscape that now defines the region. Other submerged sites remain dormant, awaiting reactivation through underwater tourism initiatives. In this new paradigm, **archaeological protection has evolved**: while acknowledging the inevitable material loss of some elements, it embraces the opportunity to redefine heritage through new forms of existence, integrated with the surrounding ecological transformations (Raffa and Brisotto, 2025, p. 36)

Scenario Vulnerabilities

- **Loss of minor or unprotected sites** due to flooding, erosion, and soil instability;
- **Material degradation** of archaeological assets caused by increased salinity, humidity, and temperature extremes;
- **Conflict between renaturation efforts and community identity**, particularly where heritage is tied to land use legacies;
- **Inadequate institutional coordination** between cultural protection and climate adaptation frameworks;

Scenario Opportunities

- **Reframing archaeological heritage within a dynamic and evolving amphibious landscape;**
- **Development of new cultural economies, such as underwater tourism and amphibious cultural parks;**
- **Integration of heritage with ecological infrastructure, creating synergies between conservation, adaptation, and landscape design;**
- **Revitalization of marginal spaces through multifunctional uses that combine memory, ecology, and public engagement;**
- **Increased visibility and educational value of archaeological sites through adaptive interpretation strategies;**

Long-Term Adaptation Strategies

- **4.1 Reframe coastal shifts** to reinterpret the relationship between archaeological heritage and the sea, balancing protection, adaptation, and layered historical narratives;
- **4.2 Archaeological buffers**: Abandoned or unproductive areas, floodplains, and renaturalized drainage canals can be designed as **threshold spaces** using **nature-based solutions** to protect archaeological sites from water excess while integrating with ecological and slow-mobility networks;
- **4.3 Amphibious archaeological parks**: Designed to "make room for water" through adaptive pathways, structures, and cooling green infrastructure that respond to floods and rising temperatures;
- **4.4 Submerged archaeological parks**: In areas highly exposed to flooding or permanent water presence, selected sites may be **reinterpreted as underwater heritage** compatible with cultural value and material resilience;
- **4.5 Vegetal reconstructions**: Vegetation is used to **enhance the legibility** of archaeological spaces by tracing paths, highlighting structures, or suggesting original spatial configurations;

Analytically, the sequence of participatory activities generated a shared, multi-scalar understanding of hydraulic and climate risks within the two territories, revealing these risks as *systemic conditions* shaped by climatic pressure, public perceptions, infrastructural rigidity, and fragmented governance. This understanding also exposed potential leverage points for adaptive transformation. However, the limited availability and uneven quality of quantitative environmental and hydraulic data–such as long-term hydrological series, subsidence measurements, and high-resolution risk modelling–constrained the integration of design exploration with robust numerical assessments.

On a methodological–operational level, the process (Raffa, 2025b) led to the formulation of an initial set of transferable adaptation guidelines derived from cross-case analysis and workshop insights (Raffa, 2025a). Conceived not as prescriptive solutions but as *operational principles*, these guidelines are intended to inform future design

02 | Metaponto 2100. Visualizzazione con strategie di adattamento (si veda Tab. 3-7) implementate, durante (sopra) e dopo (sotto) un ciclone tropicale di Cat. 1, elaborazione di A. Raffa con OpenAI

Metaponto 2100. Visualisation with adaptation strategies (see Tab. 3-7) implemented during (top) and after (bottom) a Cat. 1 tropical-like cyclone, created with OpenAI by A. Raffa

rafforzando le capacità anticipatorie e aprendo nuovi spazi di dialogo sull'adattamento di lungo periodo. Ha inoltre valorizzato il ruolo del progetto come strumento di mediazione ed esplorativo, capace di tradurre dinamiche di rischio astratte in conoscenze spazialmente operabili. Al contempo, ha messo in luce criticità persistenti, tra cui la difficoltà di tradurre le visioni in strumenti di policy, la fragilità della continuità dei percorsi partecipativi e la scalabilità disomogenea dei metodi in contesti socio-ecologici eterogenei.

Dal punto di vista della ricerca, gli esiti consolidano la base empirica del più ampio programma di studio sull'adattamento nei 20CRL mediterranei e hanno direttamente alimentato le fasi di *research-by-design* e di *research for design*, informando lo sviluppo della metodologia operativa per l'adattamento dei 20CRL e del toolkit rivolto a ricercatori e professionisti attivi in questi contesti.

Verso un'agenda riflessiva e progettuale per l'adattamento climatico dei 20CRL

ReclaiMEDlanD[2] dimostra il potenziale del progetto come pratica riflessiva, immaginativa e partecipativa, capace di rispondere ai rischi sistemici che interessano i 20CRL. Concettualizzando il rischio non come una minaccia isolata da contenere, ma come una lente generativa attraverso cui interpretare e trasformare le configurazioni spaziali ereditate, il progetto contribuisce a un cambiamento di paradigma che può incidere anche sul piano della governance e della gestione. In linea con la nozione di «catastrofismo emancipativo» (Beck, 2014), ReclaiMEDlanD riformula la crisi climatica come un'opportunità per mettere in discussione i modelli attuali e immaginare futuri plurali, situati e culturalmente radicati, spostando il focus dalla logica del contenimento a quella della trasformazione, dai piani rigidi agli scenari adattivi. ReclaiMEDlanD mostra che l'adattamento al cambiamento



| 02

processes in analogous Mediterranean 20CRLs, and will require iterative testing across multiple contexts. A second scenario-planning workshop focused on strengthening cross-territorial learning will be conducted on the Bassa Romagna transect to maintain the comparative rationale of the research, and to validate these guidelines operationally.

At the governance level, the project fostered collaborative learning among institutions, experts, and communities, enhancing anticipatory capacities and opening new spaces for dialogue on long-term adaptation. It also leverages the role of design as a mediating and exploratory tool, translating abstract risk dynamics into spatially operable knowledge. It also revealed persistent challenges, including the difficulty of translating visions into policy instruments, the fragile continuity of participatory processes, and the uneven scalability of methods across heterogeneous socio-ecological settings.

From a research perspective, the outcomes strengthen the empirical foundation of the broader study on adaptation in Mediterranean 20CRLs, and have directly informed both the research-by-design and research-for-design phases, thus contributing to the development of an operational methodology for 20CRL adaptation, and to the creation of a toolkit for researchers and practitioners working in these contexts.

Toward a Reflexive and Design-Based Climate Adaptation Agenda for 20CRLs

ReclaiMEDlanD[2] demonstrates the potential of spatial design as a reflexive, imaginative, and participatory

climatico nei 20CRL non può essere ridotto a semplici retrofit tecnici o alla pianificazione dell'emergenza. Deve invece essere inteso come un progetto profondamente culturale, politico e spaziale –che abbraccia il rischio come condizione di trasformazione e il progetto come strumento di anticipazione collettiva. Se i paesaggi costieri di bonifica del XX secolo sono nati da un progetto di controllo razionale della natura, la loro rigenerazione nel XXI secolo dipenderà dalla nostra capacità di costruire un'agenda per l'adattamento climatico che impieghi il progetto per abitare il rischio e l'incertezza in modo critico, creativo, e collettivo.

ATTRIBUZIONE, RICONOSCIMENTI, DIRITTI D'AUTORE

L'autore desidera esprimere sincera gratitudine per il supporto del U.S. Department of State, the U.S. Mission to Italy – Public Diplomacy Section e del Consolato Generale degli Stati Uniti a Napoli. Un ringraziamento speciale ai team di FEEM e FIBER (grantee) per il ruolo essenziale svolto nel progetto. Si ringrazia FEEM per il supporto alla pubblicazione.

NOTE

[1] Il progetto è stato finanziato con bando competitivo Annual Program Statement 2023, promosso da U.S. Department of State e U.S. Mission to Italy Public Diplomacy Section.

[2] Nel 2025, il progetto è stato esposto nel Padiglione Italia alla Biennale di Architettura di Venezia ed è stato inoltre riconosciuto da ASviS come buona pratica territoriale. Approfondimenti successivi sono stati premiati con il primo premio ex-aequo al "World Heritage and Food to Feed" Design Ideas Competition, nell'ambito del XXIII International Study Forum "Le Vie dei Mercanti", 20-21 giugno 2025, Napoli e Capri.

REFERENCES

Andraos, A. (2016), "What Does Climate Change (for Architecture)?", in Graham, J. (Ed.), *Climates: Architecture and the Planetary Imaginary*, Columbia Books on Architecture and the City, Lars Müller Publishers, Zurich, CH, pp. 297-301.

Beck, U. (1992), *Risk Society: Towards a New Modernity*, SAGE Publications Ltd, London & New York.

Beck, U. (2014a), "How Climate Change Might Save the World: Metamorphosis", *Harvard Design Magazine*, Wet Matter, Vol. 39, pp. 88-98. Available at: https://www.harvarddesignmagazine.org/articles/how-climate-change-might-save-the-world-metamorphosis/ (Accessed on: 20/07/2025).

Beck, U. (2014b), "Emancipatory catastrophism: What does it mean to climate change and risk society?", *Current Sociology*, Vol. 63, pp.75-88. Available at: https://doi.org/10.1177/0011392114559951 (Accessed on: 30/07/2025).

Beck, U. (2016), *The Metamorphosis of the World: How Climate Change is Transforming Our Concept of the World*, Polity Press, Cambridge, UK & Malden, MA.

Benadusi, M. (2014), "Pedagogies of the Unknown: Unpacking 'Culture' in Disaster Risk Reduction Education", *Journal of Contingencies and Crisis Management*, Vol. 22, pp. 174-183. Available at:

https://doi.org/10.1111/1468-5973.12050 (Accessed on: 30/07/2025).

Brisotto, C., Carney, J., Macaione, I., Raffa, A. (2023), "Climate Change in Reclamation landscapes. Adaptation between module and modularity", *AGATHÓN*, Vol. 14, pp. 62-73. Available at: https://doi.org/10.19229/2464-9309/1442023 (Accessed on: 30/07/2025).

Cvitanovic, C., Howden, M., Colvin, R.M., Norström, A., Meadow, A.M., Addison, P.F.E (2019), "Maximising the benefits of participatory climate adaptation research by understanding and managing the associated challenges and risks", *Environmental Science*, Vol. 94, pp. 20-31. Available at: https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.12.028 (Accessed on: 30/07/2025).

practice capable of responding to the systemic risks affecting 20CRLs. By conceptualising risk not as an isolated threat to be controlled, but as a generative lens through which to read, interpret, and transform inherited spatial configurations, the project contributes to a paradigm shift that also resonates at institutional and policy levels. In line with the notion of «emancipatory catastrophism» (Beck, 2014), ReclaiMEDlanD reframes the climate crisis, and associates risks as an opportunity to challenge up-to-date models, and to envision plural, situated, and culturally grounded futures – shifting focus from containment to transformation, from rigid plans to adaptive scenarios. ReclaiMEDlanD shows that climate adaptation in 20CRLs cannot be reduced to mere technical retrofitting or emergency planning/design. Rather, it must be understood as a deeply cultural, political, and spatial project – one that embraces risk as a condition for transformation, and design as a tool for collective foresight. If 20CRLs issued from a project of rational control over nature, their regeneration in the 21st century will depend on our capacity to construct a climate adaptation agenda that employs design to inhabit risk and uncertainty in a critical, creative, and collective manner.

ACKNOWLEDGMENTS

The Author gratefully acknowledges the support of the U.S. Department of State, the U.S. Mission to Italy – Public Diplomacy Section, and the U.S. Consulate General in Naples. Thank you also to FEEM and FIBER (grantee) teams for their essential role in the project. A special thank you to FEEM for supporting this publication.

NOTES

[1] The project had been funded through the competitive call Annual Program Statement 2023, promoted by the U.S. Department of State and the U.S. Mission to Italy Public Diplomacy Section.

[2] In 2025, the project was exhibited in the Italian Pavilion at the Venice Architecture Biennale, and was also recognised by ASviS as Territorial Best Practice. Further developments were awarded first prize ex-aequo at the "World Heritage and Food to Feed" Design Ideas Competition, as part of the 23rd International Study Forum "Le Vie dei Mercanti", held on June 20–21, 2025, in Naples and Capri.

ENEA, (2019), *Innalzamento del Mar Mediterraneo in Italia. Aree costiere e porti a rischio inondazione al 2100*. Available at: https://www.enea.it/it/Stampa/File/enea-innalzamento-mediterraneo.pdf (Accessed on: 25/07/2025).

Haigh, N. (2019), *Scenario Planning for Climate Change. A Guide for Strategies*, Routledge, London.

Metta, A., Onorati, D. (2019), "Modern rural-scape and contemporary ideology: The case of the Pontine Plain", *SHS Web of Conferences*, Vol. 63, 12002. Available at: https://doi.org/10.1051/shsconf/20196312002 (Accessed on: 30/07/2025).

Nijhuis, S. (2020), "The Noordoostpolder: A Landscape Planning Perspective on the Preservation and Development of Twentieth-Century Polder Landscapes in the Netherlands", in Hein, C. (Ed.), *Adaptive Strategies for Water Heritage*, Springer, Cham., CH, pp. 212-229. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-00268-8_11(Accessed on: 30/07/2025).

Raffa, A. (2025a), *ReclaiMEDlanD(scapes). Ecologie climatiche tra adattamento, progetto e partecipazione*. FEEM: Milano. Available at: https://www.feem.it/publications/reclaimedlandscapes-ecologie-climatiche-tra-adattamento-progetto-e-partecipazione/ (Accessed on: 30/07/2025).

Raffa, A. (2025b), "ReclaiMEDlanD(scapes): an Outsider design experiment for adaptive futures", *ANUARI d'Arquitectura i Societat research journal*, Vol. 5, pp. 334-359. Available at: https://doi.org/10.4995/anuari.2025.24316 (Accessed on 20/12/2025).

Raffa, A. (2025c), "Twentieth-Century Reclaimed Landscapes. The architecture of Fascist Political Ecology in the Agro Pontino and Its Path Dependencies", *U+D Urbanform and Design,* Vol. 22/23, pp.90-95. Available at: https://doi.org/10.36158/2384-9207.UD22_23.2024_2025.013 (Accessed on 20/12/2025).

Raffa, A. and Brisotto, C. (2025), "ReclaiMEDlanD. Le ragioni, il processo, il metodo", in Raffa, A. (Ed.), *ReclaiMEDlanD(scapes). Ecologie climatiche tra adattamento, progetto e partecipazione*, FEEM, Milano, pp.19-37. Available at: https://www.feem.it/publications/reclaimedlandscapes-ecologie-climatiche-tra-adattamento-progetto-e-partecipazione/ (Accessed on: 30/07/2025).

Raffa, A. and Macaione, I. (2024), "Reclaimed landscapes. The Pontine Marshes as a Design Prototype for a New Alliance", in Mundula, S., Santus, K. and Sapone, A. (Eds.), *Terrarium. Earth Design: Ecology, Architecture and Landscape*, Mimesis, Milano, pp. 392-403. Available at: https://doi.org/10.7413/1234-1234032 (Accessed on: 30/07/2025).

‘‘Green Nexus Hub’’: verso un paradigma progettuale per la gestione ecosistemica del rischio urbano

Just Accepted: November 28, 2025 **Published:** July 29, 2026

Martina Corti, https://orcid.org/0009-0002-2464-2318 martina.corti@unifi.it
Diletta Struzziero, https://orcid.org/0009-0000-7232-9882 diletta.struzziero@edu.unifi.it
Stefano Follesa, https://orcid.org/0000-0002-1300-1251 stefano.follesa@unifi.it
Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Firenze, Italia

Abstract. Il contributo affronta il rischio urbano come condizione sistemica e introduce il “Green Nexus Hub” quale paradigma progettuale per la rigenerazione ecosistemica degli spazi residuali. Attraverso pratiche e metodologie del Design, tali luoghi sono interpretati come infrastrutture socio-ecologiche capaci di riattivare servizi ecosistemici latenti e attivare processi inclusivi. La ricerca integra una revisione critica della letteratura con l’analisi di tre casi studio – Marsiglia (Francia), Bogotá (Colombia) e Napoli Est (Italia) – selezionati per evidenziare tensioni e potenzialità ricorrenti. I risultati delineano una cornice operativa per strategie urbane orientate alla resilienza trasformativa, alla giustizia ecologica e all’innovazione progettuale.

Parole chiave: Spazi residuali; Servizi ecosistemici; Design sistemico; Agricoltura urbana; Resilienza trasformativa.

Introduzione

L’intensificarsi delle crisi ambientali, sociali e climatiche impone un ripensamento sistemico delle strategie di trasformazione urbana. In questo quadro, il concetto di rischio acquisisce una dimensione ecologica e relazionale, oltrepassando l’interpretazione puramente emergenziale. Come evidenziato dal “Global Risk Report” (World Economic Forum, 2024), i rischi socio-climatici costituiscono oggi le principali minacce sistemiche, strettamente legate a insicurezza alimentare, degrado ecosistemico e marginalizzazione sociale.
A livello europeo, la “EU Adaptation Strategy” (European Commission, 2021) e la “Nature Restoration Law” (European Parliament and Council of the European Union, 2024) riconoscono alle città un ruolo centrale nella rigenerazione ecosistemica; tuttavia, permane uno scarto significativo tra l’apparato teorico delle politiche e la loro effettiva traduzione in interventi situati. Parallelamente, la crescente attenzione verso le NbS (Nature-based Solutions) mette in luce limiti ricorrenti quali frammentarietà, tecnicismo e scarsa aderenza ai contesti locali.
In tale scenario, il presente contributo propone un paradigma progettuale che interpreta il rischio come condizione sistemica generativa per la riattivazione dei servizi ecosistemici latenti nei margini urbani. Il modello proposto – il “Green Nexus Hub” – opera come matrice concettuale e operativa fondata su un approccio sistemico e transdisciplinare, offrendo sia un quadro interpretativo per leggere i margini come infrastrutture socio-ecologiche latenti, sia un impianto progettuale per guidare processi trasformativi situati. In questa prospettiva, il Design assume una funzione mediatrice tra natura, tecnologia e comunità, attivando processi collaborativi e configurazioni adattive capaci di tradurre visioni sistemiche in pratiche operative.
Attraverso l’analisi di contributi teorici su resilienza urbana, infrastrutture relazionali ed ecologia, il lavoro intende contribuire al dibattito sulla gestione ecosistemica del rischio in ambito urbano, proponendo una visione progettuale capace di integrare natura, tecnologia e processi partecipativi nei contesti vulnerabili, e di orientare future sperimentazioni progettuali e operative.

Rischio, città e servizi ecosistemici

La crescente attenzione al concetto di rischio nelle pratiche progettuali urbane riflette una trasformazione profonda delle categorie attraverso cui interpretiamo lo spazio antropico. Il rischio, da fenomeno eccezionale e

‘‘Green Nexus Hub’’: towards a design paradigm for ecosystem-based urban risk management

Abstract. The contribution addresses urban risk as a systemic condition, and introduces the “Green Nexus Hub” as a design paradigm for the ecosystemic regeneration of residual spaces. Through design practices and methodologies, these sites are reinterpreted as socio-ecological infrastructures capable of reactivating latent ecosystem services, and of fostering inclusive processes. The research integrates a critical review of the literature with the analysis of three case studies – Marseille (France), Bogotá (Colombia), and East Naples (Italy) – selected to highlight recurrent tensions and potentialities. The findings outline an operational framework for urban strategies oriented toward transformative resilience, ecological justice, and design innovation.

Keywords: Residual spaces; Ecosystem services; Systemic Design; Urban Agriculture; Transformative resilience.

Introduction

The intensification of environmental, social, and climatic crises necessitates a systemic rethinking of urban transformation strategies. Within this context, the concept of risk acquires an ecological and relational dimension, surpassing a purely emergency-focused interpretation. As highlighted by the “Global Risk Report” (World Economic Forum, 2024), socio-climatic risks now constitute the primary systemic threats, closely linked to food insecurity, ecosystem degradation, and social marginalisation.
At the European level, the “EU Adaptation Strategy” (European Commission, 2021) and the “Nature Restoration Law” (European Parliament and Council of the European Union, 2024) recognise cities as central actors in ecosystemic regeneration. However, a significant gap remains between the theoretical framework of policies and their effective translation into situated interventions. Simultaneously, the increasing attention to Nature-based Solutions (NbS) highlights recurring limitations such as fragmentation, technicism, and poor alignment with local contexts.
In this scenario, the present contribution proposes a design paradigm that interprets risk as a generative systemic condition for the reactivation of latent ecosystem services in urban margins. The proposed model – “Green Nexus Hub” – functions as both a conceptual and operational matrix grounded in a systemic and transdisciplinary approach, offering a framework to interpret urban margins as latent socio-ecological infrastructures, as well as a design apparatus to guide situated transformative processes. In this perspective, Design assumes a mediating

ISSN online: 2239-0243 | © 2025 Author(s) | http://www.fupress.com/techne | DOI: 10.36253/techne-18629
Open access, peer-reviewed article published by Firenze University Press (https://www.fupress.com) and distributed, except where otherwise noted, under the terms of the CC BY 4.0 License for content and CC0 1.0 Universal for metadata

localizzato, si configura oggi come condizione sistemica e permanente, inscritta nel tessuto urbano sotto forma di fragilità ecologiche, disuguaglianze spaziali e tensioni socio-climatiche. Esposito (2025) descrive la città contemporanea come un SET (Sistema Socio-Ecologico-Tecnologico) complesso, aperto e adattivo, influenzato da dinamiche multiscalari, incertezza sistemica e crisi interdipendenti; in tale prospettiva, il progetto urbano è chiamato a fungere da motore di trasformazioni capaci di rispondere a tali sfide.

Parallelamente, il concetto di servizi ecosistemici urbani si è consolidato come chiave interpretativa per riconoscere il valore funzionale e relazionale degli ecosistemi, anche nei contesti fortemente antropizzati. Il framework CICES (2018) ha fornito un linguaggio condiviso per classificarli in servizi di regolazione, approvvigionamento, supporto e culturali. In questo scenario si colloca l'ascesa delle NbS, concepite per rispondere a sfide sociali generando benefici per biodiversità e benessere umano (Cohen-Shacham *et al*., 2016); tuttavia, la loro implementazione resta spesso frammentaria e tecnocratica, ancorata a logiche ingegneristiche o estetizzanti che non incidono sulle cause strutturali della vulnerabilità urbana (Frantzeskaki, 2019).

Per questo i servizi ecosistemici non possono essere intesi come dati oggettivi, ma come processi dinamici co-prodotti da ambienti, comunità e istituzioni (Anguelovski *et al*., 2020; Andersson *et al*., 2019). Riconoscerli implica una presa di posizione epistemica capace di valorizzare saperi situati, pratiche collettive e relazioni socio-ecologiche che emergono nei margini urbani. In tale direzione, il Service Design opera come dispositivo di mediazione tra attori, protocolli e interfacce tecno-ecologiche, attivando processi di coinvolgimento sociale e mediazione interdisciplinare e trasformando NbS puntuali in infrastrutture relazionali resilienti e inclusive.

Crisi ecosistemica e rischio urbano

Nel dibattito contemporaneo sul progetto urbano, il rischio emerge come condizione multifattoriale derivante dalla convergenza di cambiamenti climatici, frammentazione ecologica, impermeabilizzazione dei suoli, precarietà abitativa ed erosione dei legami sociali. La letteratura recente mostra come tali processi stiano generando nuove vulnerabilità per ecosistemi e popolazioni, aggravando la crisi ecosistemica (Langemeyer *et al*., 2025) e producendo ingiustizie spaziali. Eventi di stress come ondate di calore o piene fluviali possono innescare effetti a cascata su infrastrutture, economie e comunità, accentuando disuguaglianze soprattutto nei contesti più fragili. Ne deriva l'urgenza di riconoscere la vulnerabilità socio-ecologica dello spazio urbano, intesa come intersezione tra esposizione ai pericoli e sensibilità dei sistemi umani e naturali integrati, così da orientare valutazioni sistemiche capaci di intercettare bisogni di popolazioni ed ecosistemi esposti.

Il concetto di servizio ecosistemico (Haines-Young and Potschin, 2018) offre un quadro teorico per comprendere come gli ambienti urbani, anche marginali e residuali, possano riattivare servizi latenti e generare potenzialità rigenerative. In questa prospettiva, i margini diventano territori di co-produzione ecologica, dove la materialità del residuo si intreccia con pratiche sociali e culturali di cura. Tuttavia, una gestione eccessivamente tecnico-funzionale tende a oscurare la dimensione ecologica, sociale e culturale dei servizi ecosistemici, contribuendo

role between nature, technology, and communities, activating collaborative processes and adaptive configurations capable of translating systemic visions into operative practices.

Through the analysis of theoretical contributions on urban resilience, relational infrastructures, and ecology, this paper aims to contribute to the debate on ecosystemic risk management in urban contexts by proposing a design vision capable both of integrating nature, technology, and participatory processes in vulnerable settings, and of guiding future design experiments and operational developments.

Risk, cities and ecosystem services

The increasing attention to the concept of risk in urban design practices reflects a profound transformation in the categories through which we interpret anthropic space. Risk, once considered an exceptional and localised phenomenon, is now understood as a systemic and enduring condition, embedded in the urban fabric in the form of ecological fragilities, spatial inequalities, and socio-climatic tensions. Esposito (2025) describes the contemporary city as a SET (Socio-Ecological-Technological System) that is complex, open, and adaptive, influenced by multi-scalar dynamics, systemic uncertainty, and interdependent crises. In this perspective, urban design is called to act as a driver of transformations capable of addressing these challenges.

At the same time, the concept of urban ecosystem services has been consolidated as an interpretative key to recognise the functional and relational value of ecosystems, even in heavily anthropised contexts. The CICES framework (2018) provides a shared language for classifying them into regulation, for provisioning, supporting, and cultural services. In this scenario, the rise of Nature-based Solutions (NbS) emerges, conceived to respond to social challenges while generating benefits for biodiversity and human well-being (Cohen-Shacham *et al*., 2016). However, their implementation often remains fragmented and technocratic, anchored in an engineering or aesthetic rationale that fails to address the structural causes of urban vulnerability (Frantzeskaki, 2019).

Hence, ecosystem services cannot be considered objective data, but dynamic processes co-produced by environments, communities, and institutions (Anguelovski *et al*., 2020; Andersson *et al*., 2019). Recognising them implies an epistemic stance capable of valuing situated knowledge, collective practices, and socio-ecological relationships emerging in urban margins. In this direction, Service Design operates as a mediating device among actors, protocols, and techno-ecological interfaces, activating processes of social engagement and interdisciplinary mediation, and transforming localised NbS into resilient and inclusive relational infrastructures.

Ecosystemic crisis and urban risk

In contemporary urban design debates, risk emerges as a multifactorial condition resulting from the convergence of climate change, ecological fragmentation, soil sealing, housing precarity, and the erosion of social ties. Recent literature shows how these processes generate new vulnerabilities for ecosystems and populations, exacerbating the ecosystemic crisis (Langemeyer *et al*., 2025) and producing spatial injustices. Stress

alla produzione di rischio urbano come effetto della loro cancellazione o invisibilità nei contesti più vulnerabili.
La letteratura invita dunque a superare letture riduttive del rischio, passando da modelli di resilienza adattiva a resilienza trasformativa (Meerow and Newell, 2019), orientata a riorganizzazione ecosistemica, rigenerazione sociale e giustizia socio-ambientale. Tale distinzione chiarisce la differenza tra rischio emergenziale – evento acuto che richiede risposte immediate tramite protezione civile e misure tecniche – e rischio trasformativo, fenomeno sistemico e duraturo derivante dall'interazione tra pressioni ambientali, vulnerabilità sociali e deficit infrastrutturali, affrontabile solo tramite *governance* multilivello, coordinamento interistituzionale e interventi adattativi a lungo termine. Di conseguenza, il progetto urbano non può limitarsi a misure reattive o tecniche, ma deve integrare sin dall'inizio visioni di equità e partecipazione per evitare interventi incapaci di cogliere la natura interconnessa dei sistemi urbani (Mahajan, 2025).
In questo quadro, diviene essenziale costruire modelli progettuali interdisciplinari capaci di tradurre la complessità socio-ecologica in configurazioni adattive e collaborative, obiettivo a cui il "Green Nexus Hub" intende contribuire.

Approccio teorico-metodologico

L'approccio metodologico si configura come un percorso di ricerca teorico-critica volto alla costruzione progressiva del paradigma del "Green Nexus Hub". Esso si fonda su un impianto sistemico e transdisciplinare che integra gli studi su resilienza urbana, servizi ecosistemici e Design per la sostenibilità (Bistagnino, 2011), con l'obiettivo di esplorare le connessioni tra natura, tecnologia e comunità nella gestione ecosistemica del rischio. Tale impostazione si colloca nel quadro del Research through Design (Koskinen *et al*., 2011), valorizzando la dimensione sperimentale e cognitiva del progetto.
Alla riflessione teorica è affiancata un'analisi critica della letteratura internazionale sulle NbS e sui rischi urbani, finalizzata a evidenziarne limiti e potenzialità nei processi di adattamento. In parallelo, tre contesti urbani – Marsiglia, Bogotá e Napoli Est – sono indagati come casi esplorativi paradigmatici, selezionati per la loro capacità di attivare sperimentazioni situate in spazi residuali e di rivelare traiettorie progettuali trasferibili. La scelta risponde a criteri di eterogeneità geografica e istituzionale, nonché alla presenza di pratiche consolidate di NbS e rigenerazione socio-ecologica.
Le informazioni derivano da *desk analysis* di piani e report istituzionali, letteratura scientifica e osservazioni dirette con attori locali. La comparazione adotta una griglia a quattro dimensioni:

1. attori e sistemi di *governance*;
2. dispositivi spaziali e NbS;
3. impatti ambientali e sociali;
4. condizioni di trasferibilità e adattamento.

Gli indicatori qualitativi includono continuità ecologica (connessioni verdi, permeabilità dei suoli), microclima (ombreggiamento, mitigazione delle isole di calore), infrastrutturazione sociale (reti di cura, intensità d'uso, inclusione) e governance (patti collaborativi, apertura decisionale, rischi di gentrificazione). Le evidenze sono state triangolate con documenti di piano, dati tecnici e osservazioni dirette per aumentarne l'affidabilità comparativa.

events, such as heatwaves or river floods, can trigger cascading effects on infrastructures, economies, and communities, intensifying inequalities, particularly in the most vulnerable contexts. This underscores the urgency of recognising the socio-ecological vulnerability of urban space, understood as the intersection between hazard exposure and the sensitivity of integrated human and natural systems, in order to inform systemic assessments capable of identifying the needs of exposed populations and ecosystems.
The concept of ecosystem services (Haines-Young and Potschin, 2018) provides a theoretical framework for understanding how urban environments, including marginal and residual spaces, can reactivate latent services and generate regenerative potential. From this perspective, margins become territories of ecological co-production, where the materiality of residual spaces intertwines with social and cultural care practices. However, overly technical-functional management tends to obscure the ecological, social, and cultural dimensions of ecosystem services, contributing to the production of urban risk as a consequence of their erasure or invisibility in vulnerable contexts.
The literature thus calls for moving beyond reductive interpretations of risk, shifting from adaptive resilience to transformative resilience (Meerow and Newell, 2019), oriented toward ecosystemic reorganisation, social regeneration, and socio-environmental justice. This distinction clarifies the difference between emergency risk – an acute event requiring immediate responses through civil protection and technical measures – and transformative risk, a systemic and enduring phenomenon resulting from the interaction of environmental pressure, social vulnerabilities, and infrastructural deficits, which can only be addressed through multi-level *governance*, inter-institutional coordination, and long-term adaptive interventions. Consequently, urban design cannot be limited to reactive or technical measures. It must, instead, integrate equity and participatory visions from the outset to avoid interventions that are unable to capture the interconnected nature of urban systems (Mahajan, 2025).
Within this framework, it becomes essential to construct interdisciplinary design models capable of translating socio-ecological complexity into adaptive and collaborative configurations, a goal to which the Green Nexus Hub seeks to contribute.

Theoretical–methodological approach

The methodological approach is configured as a theoretically critical research path aimed at the progressive construction of the Green Nexus Hub paradigm. It is based on a systemic and transdisciplinary framework that integrates studies on urban resilience, ecosystem services, and Design for sustainability (Bistagnino, 2011) with the objective of exploring connections between nature, technology, and communities in the ecosystemic management of risk. This approach, which is typical of Research through Design (Koskinen *et al*., 2011), emphasises the experimental and cognitive dimensions of the project.
The theoretical reflection is complemented by a critical analysis of international literature on Nature-based Solutions (NbS) and urban risks aimed

Spazi residuali e potenzialità rigenerative

Gli spazi residuali urbani, tradizionalmente interpretati come espressioni di degrado o inefficienza, rappresentano riserve critiche di potenzialità ecosistemiche e sociali, in grado di contribuire alla gestione del rischio mediante processi rigenerativi situati. Come evidenziato da Gandy (2022), nei margini metropolitani la vegetazione spontanea, le infrastrutture obsolete e le pratiche informali di riuso generano costellazioni ecologiche ibride che rafforzano la resilienza urbana. In prospettiva affine, Clément (2004) teorizza il *tiers paysage* come laboratori evolutivi fondamentali per la biodiversità, mentre Reckwitz (2022) considera tali spazi come wild infrastructures: reti ecologiche e sociali non pianificate che, se riconosciute e valorizzate, assumono la funzione di infrastrutture socio-ecologiche capaci di mitigare rischio e disuguaglianze. Questi spazi costituiscono la matrice empirica su cui si fonda il paradigma del "Green Nexus Hub".

Tali territori non hanno solo valore ecologico, ma anche politico e sociale. La letteratura sui *commons* urbani (Foster and Iaione, 2016) mostra come la riappropriazione collaborativa degli spazi marginali generi nuove forme di *governance* basate sulla cura condivisa, sulla produzione collettiva di valore e sulla riduzione delle vulnerabilità sociali. Tuttavia, studi recenti hanno anche segnalato i rischi della *green gentrification*, evidenziando come interventi di rinaturalizzazione possano talvolta accentuare disuguaglianze spaziali ed escludere le comunità più fragili.

Il potenziale rigenerativo degli spazi residuali si intreccia strettamente con la gestione del rischio. Tali spazi possono agire come infrastrutture socio-ecologiche diffuse, riducendo così vulnerabilità ambientali e sanitarie.

Dal punto di vista operativo, approcci come l'*Interim Design* (Salvadori and Valente, 2018) o l'*Adaptive urbanism* (Frantzeskaki, 2019) offrono strumenti progettuali flessibili per attivare spazi residuali con micro-infrastrutture leggere, reversibili e co-progettate, trasformando i margini urbani in campi di sperimentazione ecologica e sociale.

Esempi emblematici rafforzano tale prospettiva. Il "Tempelhofer Feld" a Berlino, riconvertito in parco urbano nel 2010, rappresenta un caso di riuso adattivo capace di trasformare un'infrastruttura dismessa in laboratorio di biodiversità, pratiche agroecologiche e inclusione sociale (Colomb, 2012). A Medellín, il programma "Parques Biblioteca" (2004–2011) ha rigenerato aree marginali attraverso dispositivi che integrano funzioni ecologiche e culturali, rafforzando sicurezza e coesione comunitaria (Brand and Dávila, 2011). In Europa meridionale, i giardini condivisi di Milano e le reti di orti urbani a Napoli Est dimostrano come le comunità possano riattivare terreni abbandonati generando al tempo stesso servizi ecosistemici ed *empowerment* sociale (Cellamare, 2016).

Tali evidenze sono confermate da studi sistematici: Haase *et al.* (2017) mostrano come la rigenerazione di spazi abbandonati in città europee produca benefici ambientali misurabili – riduzione del deflusso superficiale, incremento della biodiversità, mitigazione del surriscaldamento – mentre Pagano *et al.* (2019) documentano impatti positivi in termini di benessere psicologico, senso di appartenenza e capitale sociale.

Alla luce di ciò, gli spazi residuali possono evolversi in infrastrutture socio-ecologiche in grado di contribuire alla gestione sistemica del rischio.

at highlighting their limitations and potential in adaptation processes. In parallel, three urban contexts – Marseille, Bogotá, and Naples East – are investigated as paradigmatic exploratory cases, selected for their capacity to activate situated experiments in residual spaces, and to reveal transferable design trajectories. The selection criteria include geographical and institutional heterogeneity, as well as the presence of established NbS and socio-ecological regeneration practices.

Information was gathered through *desk analyses* of plans and institutional reports, scientific literature, and direct observations with local actors. The comparison is structured along a four-dimensional grid:

1. actors and *governance* systems;
2. spatial devices and NbS;
3. environmental and social impact;
4. conditions of transferability and adaptation.

Qualitative indicators include ecological continuity (green connections, soil permeability), microclimate (shading, heat island mitigation), social infrastructure (care networks, intensity of use, inclusion), and governance (collaborative agreements, decision-making openness, risks of gentrification). The evidence was triangulated with planning documents, technical data, and direct observations to enhance the reliability of the comparative analysis.

Residual spaces and regenerative potential

Urban residual spaces, traditionally interpreted as expressions of degradation or inefficiency, are critical reservoirs of ecological and social potential, capable of contributing to risk management through situated regenerative processes. As highlighted by Gandy (2022), in metropolitan margins spontaneous vegetation, obsolete infrastructures, and informal reuse practices generate hybrid ecological constellations that strengthen urban resilience. Similarly, Clément (2004) theorises the *tiers paysage* as evolutionary laboratories that are essential for biodiversity. Reckwitz (2022), instead, describes these spaces as *wild infrastructures,* unplanned ecological and social networks that, if recognised and valorised, function as socio-ecological infrastructures capable of mitigating risk and inequalities. These spaces constitute the empirical matrix on which the Green Nexus Hub paradigm is founded.

These territories hold not only ecological value but also political and social significance. The literature on urban *commons* (Foster and Iaione, 2016) shows how collaborative reclamation of marginal spaces generates new forms of *governance* based on shared care, collective value creation, and reduction of social vulnerabilities. However, recent studies have also highlighted the risks of *green gentrification*, indicating that renaturalisation interventions may sometimes exacerbate spatial inequalities and exclude the most vulnerable communities.

The regenerative potential of residual spaces is closely intertwined with risk management. Such spaces can function as distributed socio-ecological infrastructures, reducing environmental and health vulnerabilities. From an operational perspective, approaches such as *Interim Design* (Salvadori and Valente, 2018) or *Adaptive Urbanism* (Frantzeskaki, 2019) provide flexible design tools to activate residual spaces with lightweight, reversible, and co-

Verso il "Green Nexus Hub" Gli spazi marginali mostrano la capacità di generare ecologie ibride, pratiche comunitarie e forme emergenti di *governance*; il "Green Nexus Hub" nasce per sistematizzare tali dinamiche, traducendo processi oggi frammentari in un modello progettuale riconoscibile. La sua intuizione centrale consiste nell'assumere il rischio come condizione generativa da cui attivare trasformazioni socio-ecologiche (Bulkeley *et al*., 2016), immaginando nuove alleanze tra natura, tecnologia e comunità. Tale impostazione si innesta nei quadri istituzionali internazionali che promuovono letture sistemiche del rischio: il "Sendai Framework" (UNISDR, 2015) propone un approccio multiscalare; la "EU Adaptation Strategy" (European Commission, 2021) attribuisce alle città un ruolo sperimentale; la "Nature Restoration Law" sancisce la centralità della rigenerazione ecosistemica.

Il "Green Nexus Hub" rappresenta il tentativo di tradurre questi principi in pratiche progettuali situate, capaci di operare nei territori fragili. Il termine "nexus" evidenzia la natura relazionale del modello, inteso come nodo che connette dimensioni ecologiche, tecnologiche e sociali. Il Design sistemico (Bistagnino, 2011) fornisce il quadro teorico per interpretare il progetto come processo circolare e interdipendente, mentre l'*Interim urbanism* ne rafforza l'orientamento adattivo, valorizzando la temporaneità come dispositivo di apprendimento e *governance* flessibile del rischio. La matrice concettuale del "Green Nexus Hub" articola dimensioni ecologica, sociale e tecnologica in un insieme di principi interpretativi, mentre il modello operativo li traduce in linee guida e strumenti adattabili. Le due dimensioni non sono distinte rigidamente: la teoria orienta l'azione, e le sperimentazioni sul campo retroalimentano la struttura, con il Design come dispositivo cognitivo che produce interpretazioni attraverso la pratica.

Il "Green Nexus Hub" integra infrastrutture ecologiche e culturali. Il cibo assume un ruolo chiave come vettore simbolico e relazionale: colture locali, pratiche agroecologiche e saperi comunitari connettono rigenerazione ambientale e coesione sociale, in continuità con gli *urban food commons* (Tornaghi and Dehaene, 2020). In parallelo, sensoristica ambientale *low-tech* e *citizen science* traducono dati climatici ed ecosistemici in conoscenza condivisa (Raymond *et al*., 2017), trasformando la gestione del rischio in processo di apprendimento collettivo. Tecnologie emergenti – *digital twins*, Internet of Nature, biomonitoraggio tramite eDNA – ampliano la capacità informativa e supportano la *governance* adattativa, facilitando cicli di *test–learn–adapt* propri dell'*Interim Design*.

La validità del paradigma trova riscontro nell'analisi comparativa di tre contesti paradigmatici. A Marsiglia, i vuoti urbani rivelano le tensioni tra rigenerazione formale e pratiche informali di riuso (Morel, 2010), indicando la necessità di mediazioni progettuali capaci di trasformare i residui produttivi in infrastrutture socio-ecologiche. Bogotá mostra il valore delle pratiche agroecologiche come strategie di sopravvivenza e laboratori di giustizia ambientale (Pérez-Rincón *et al*., 2019), generando nuovi servizi ecosistemici di prossimità. Napoli Est rappresenta un osservatorio delle forme auto-organizzate di cura, dove pratiche di rigenerazione spontanea hanno convertito spazi contaminati in luoghi di resilienza e produzione culturale (Cellamare, 2019), anticipando logiche di *Interim Design*. La comparazione evidenzia differenze di scala e *governance*, ma anche pattern convergenti – natura–comunità, uso transitorio,

designed micro-infrastructures, transforming urban margins into fields of ecological and social experimentation. Emblematic examples reinforce this perspective. "Tempelhofer Feld" in Berlin, converted into an urban park in 2010, is a case of adaptive reuse capable of transforming a decommissioned infrastructure into a laboratory of biodiversity, agroecological practices, and social inclusion (Colomb, 2012). In Medellín, the "Parques Biblioteca" programme (2004–2011) regenerated marginal areas through interventions integrating ecological and cultural functions, enhancing security and community cohesion (Brand and Dávila, 2011). In Southern Europe, the shared gardens in Milan and urban gardening networks in Naples East demonstrate how communities can reactivate abandoned lands while simultaneously generating ecosystem services and social *empowerment* (Cellamare, 2016).

These findings are further supported by systematic studies. Indeed, Haase *et al.* (2017) show that the regeneration of abandoned urban spaces in European cities produces measurable environmental benefits–reduced surface runoff, increased biodiversity, and mitigation of heat islands–while Pagano *et al.* (2019) document positive impacts in terms of psychological well-being, sense of belonging, and social capital.

In light of this evidence, residual spaces can evolve into socio-ecological infrastructures capable of contributing to systemic urban risk management.

Towards the "Green Nexus Hub"

Marginal urban spaces demonstrate the capacity to generate hybrid ecologies, community practices, and emergent forms of *governance*. The "Green Nexus Hub" was conceived to systematise these dynamics, translating currently fragmented processes into a recognisable design model. Its central insight lies in treating risk as a generative condition from which to activate socio-ecological transformations (Bulkeley *et al*., 2016), envisioning new alliances between nature, technology, and communities. This approach aligns with international institutional frameworks that promote systemic understandings of risk. The "Sendai Framework" (UNISDR, 2015) proposes a multi-scalar approach; the "EU Adaptation Strategy" (European Commission, 2021) assigns cities an experimental role; and the "Nature Restoration Law" enshrines the centrality of ecosystem restoration.

The "Green Nexus Hub" is an attempt to translate these principles into situated design practices capable of operating in fragile contexts. The term "nexus" highlights the relational nature of the model, understood as a node connecting ecological, technological, and social dimensions. Systems Design (Bistagnino, 2011) provides the theoretical framework to interpret the project as a circular and interdependent process, while Interim Urbanism reinforces its adaptive orientation, valuing temporality as a device for learning and flexible risk *governance*. The conceptual matrix of the "Green Nexus Hub" articulates ecological, social, and technological dimensions into a set of interpretative principles, while the operational model translates them into adaptable guidelines and tools. The two dimensions are not rigidly separated. Indeed, theory guides action, and field experiments feedback into the structure, with Design functioning as a

governance collaborativa – che confermano la trasferibilità del paradigma e guidano il passaggio dalla matrice concettuale al modello operativo.
Sul piano operativo, il "Green Nexus Hub" orienta il progetto verso quattro priorità:
1. continuità ecologica e permeabilità dei suoli;
2. patti di collaborazione e pratiche collettive;
3. sensoristica ambientale e *citizen science*;
4. *governance* inclusiva e misure anti-gentrificazione.

Gli output si configurano come linee guida adattive e contestuali, strumenti dinamici più vicini a protocolli di apprendimento che a modelli prescrittivi, coerenti con la logica iterativa del Green Nexus Hub.
Il paradigma proposto si configura come dispositivo epistemico e progettuale aperto, orientato a trasformare margini e vuoti in infrastrutture socio-ecologiche, coniugando teoria e pratica, istituzioni e comunità, politiche globali e sperimentazioni locali. La sua forza risiede nella capacità di mostrare come il rischio possa essere governato attraverso nuove ecologie urbane e forme emergenti di cittadinanza ecologica.

Riflessioni finali

Il contributo ha mostrato come il rischio urbano non sia un'anomalia episodica, ma una condizione strutturale delle città contemporanee e, al tempo stesso, una leva generativa per la trasformazione socio-ecologica. In questo scenario, gli spazi residuali assumono un ruolo strategico, poiché capaci di riattivare servizi ecosistemici latenti, sostenere pratiche di cura collettiva e sperimentare forme di *governance* collaborativa, configurandosi come infrastrutture diffuse di resilienza trasformativa.
Su tali basi, il "Green Nexus Hub" è stato delineato come paradigma progettuale aperto: un dispositivo adattivo e situato che assume il rischio come catalizzatore di innovazione ecologica e sociale. Più che un modello definito, esso si configura come un orizzonte concettuale e operativo in evoluzione, idoneo a orientare future sperimentazioni progettuali e nuovi sviluppi teorici, intrecciando giustizia ecologica, resilienza trasformativa e forme di *governance* inclusiva.
La sua applicabilità risulta significativa sia nei contesti europei policentrici, dove reti di spazi residuali possono divenire infrastrutture socio-ecologiche di prossimità, sia in una prospettiva internazionale, grazie alla presenza di criteri, indicatori e strumenti di prototipazione situata che ne facilitano la trasferibilità. In tale quadro, il Design emerge come infrastruttura cognitiva delle transizioni eco-sociali, capace di integrare conoscenza, azione e cura in una visione di resilienza trasformativa.

REFERENCES

Andersson, E., Langemeyer, J., Haase, D., Scheuer, S., Olsson, L. and McPhearson, T. (2019), "Enabling green and blue infrastructure to improve contributions to human well-being and equity in urban systems", *BioScience*, Vol. 69, n.7, pp. 566-574. Available at: https://doi.org/10.1093/biosci/biz058.

Anguelovski, I., Connolly, J.J.T., Pearsall, H., Shokry, G., Checker, M., Maantay, J. and Gould, K. (2020), "Why green 'climate gentrification' threatens poor and vulnerable populations", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 117, n.52, pp. 26139-26143. Available at: https://doi.org/10.1073/pnas.1920490117.

Bistagnino, L. (2011), *Design sistemico: progettare la sostenibilità produttiva e ambientale*, 2nd ed., Slow Food Editore, Bra.

cognitive device that generates interpretations through practice.
The "Green Nexus Hub" integrates ecological and cultural infrastructures. Food plays a key role as a symbolic and relational vector. Local crops, agroecological practices, and community knowledge connect environmental regeneration and social cohesion, in continuity with *urban food commons* (Tornaghi and Dehaene, 2020). Simultaneously, *low-tech* environmental sensors and *citizen science* transform climatic and ecosystem data into shared knowledge (Raymond *et al.*, 2017), converting risk management into a collective learning process. Emerging technologies – *digital twins*, the Internet of Nature, eDNA biomonitoring – expand informational capacity and support adaptive *governance*, facilitating *test–learn–adapt* cycles typical of *Interim Design*.
The validity of the paradigm is confirmed through the comparative analysis of three paradigmatic contexts. In Marseille, urban voids reveal tensions between formal regeneration and informal reuse practices (Morel, 2010), indicating the need for design mediation capable of transforming residual productive spaces into socio-ecological infrastructures. Bogotá demonstrates the value of agroecological practices as survival strategies and laboratories of environmental justice (Pérez-Rincón *et al.*, 2019), generating new proximate ecosystem services. Naples East serves as an observatory of self-organised care practices, where spontaneous regeneration initiatives have converted contaminated areas into spaces of resilience and cultural production (Cellamare, 2019), anticipating the *Interim Design* rationale. The comparison highlights differences in scale and *governance*, also converging patterns – nature–community, temporary use, collaborative *governance* – confirming the transferability of the paradigm and guiding the transition from conceptual matrix to operational model.
Operationally, the "Green Nexus Hub" directs design toward four priorities:
1. ecological continuity and soil permeability;
2. collaboration agreements and collective practices;
3. environmental sensors and *citizen science*;
4. inclusive *governance* and anti-gentrification measures.

The outputs are configured as adaptive and context-sensitive guidelines, as dynamic tools that are closer to learning protocols than prescriptive models, consistently with the iterative rationale of the "Green Nexus Hub".
The proposed paradigm constitutes an open epistemic and design device aimed at transforming margins and urban voids into socio-ecological infrastructures, integrating theory and practice, institutions and communities, global policies and local experimentation. Its strength lies in demonstrating how risk can be governed through new urban ecologies and emergent forms of ecological citizenship.

Concluding reflections

This paper has demonstrated that urban risk is not an episodic anomaly but a structural condition of contemporary cities and, simultaneously, a generative lever for socio-ecological transformation. In this context, residual spaces assume a strategic role, as they are capable of reactivating latent ecosystem services, supporting collective care practices, and experimenting

Brand, P. and Dávila, J.D. (2011), "Mobility innovation at the urban margins: Medellín's Metrocables", *City*, Vol. 15, n.6, pp. 647-661. Available at: https://doi.org/10.1080/13604813.2011.609007.

Bulkeley, H., Castán Broto, V., Edwards, G. and Fuller, S. (2016), *An urban politics of climate change: experimentation and the governing of socio-technical transitions*, Routledge, London.

Cellamare, C. (2016), *Fuori raccordo: abitare l'altra Roma*, Donzelli, Roma.

Clément, G. (2004), *Manifeste du tiers paysage*, Sujet/Objet, Paris.

Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C. and Maginnis, S. (2016), *Nature-based solutions to address global societal challenges*, IUCN, Gland. Available at: https://portals.iucn.org/library/node/46191 (Accessed on 31/07/2025).

Colomb, C. (2012), *Staging the new Berlin: place marketing and the politics of urban reinvention post-1989*, Routledge, London.

Esposito, D. (2025), "A ladder of urban resilience: an evolutionary framework for transformative governance of communities facing chronic crises", *Sustainability*, Vol. 17, n.13, p. 6010. Available at: https://doi.org/10.3390/su17136010.

European Commission (2021), *Forging a climate-resilient Europe: the new EU strategy on adaptation to climate change*, COM(2021) 82 final, European Commission, Brussels. Available at: https://eur-lex.europa.eu (Accessed on 02/08/2025).

European Parliament and Council of the European Union (2024), *Regulation (EU) 2024/1991 on nature restoration*, Official Journal of the European Union, Brussels. Available at: https://eur-lex.europa.eu (Accessed on 10/09/2025).

Foster, S.R. and Iaione, C. (2016), "The city as a commons", *Yale Law & Policy Review*, Vol. 34, n.2, pp. 281-349.

Frantzeskaki, N. (2019), "Seven lessons for planning nature-based solutions in cities", *Environmental Science & Policy*, Vol. 93, pp. 101-111. Available at: https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.10.004.

Gandy, M. (2022), *Natura urbana: ecological constellations in urban space*, MIT Press, Cambridge, MA.

Haines-Young, R. and Potschin, M. (2018), *Common international classification of ecosystem services (CICES) V5.1 and guidance on the application of the revised structure*, Centre for Environmental Management, University of Nottingham. Available at: https://cices.eu (Accessed on 31/07/2025).

Haase, D., Kabisch, N., Haase, A., Andersson, E., Banzhaf, E., Baró, F. and Wolff, M. (2017), "Greening cities – to be socially inclusive? About the alleged paradox of society and ecology in cities", *Habitat International*, Vol. 64, pp. 41-48. Available at: https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2017.04.005.

Koskinen, I., Zimmerman, J., Binder, T., Redström, J. and Wensveen, S. (2011), *Design research through practice: from the lab, field, and showroom*, Morgan Kaufmann, Burlington, MA.

Langemeyer, J., Busse, S., Arabas, A., Benati, G., Bergier, T., Maestre-Andrés, S. and Melo, I. (2025), "Social-ecological justice in cities: a spatial vulnerability approach", *npj Urban Sustainability*, Vol. 5, n.1, p. 46. Available at: https://doi.org/10.1038/s44223-025-00046.

Mahajan, S. (2025), "Urban resilience through adaptive multifutures and nature-based solutions", *npj Urban Sustainability*, Vol. 5, n.1, p. 29. Available at: https://doi.org/10.1038/s44223-025-00029.

Meerow, S. and Newell, J.P. (2019), "Urban resilience for whom, what, when, where, and why?", *Urban Geography*, Vol. 40, n.3, pp. 309-329. Available at: https://doi.org/10.1080/02723638.2018.1533261.

Morel, B. (2010), "Marseille-Provence 2013, capitale européenne de la culture: la vision de l'urbaniste et du politique", *Méditerranée*, Vol. 114, pp. 31-34.

Pagano, A., Pluchinotta, I., Pengal, P., Cokan, B. and Giordano, R. (2019), "Engaging stakeholders in the design of nature-based solutions for resilient cities: lessons from the GrowGreen project", *Sustainability*, Vol. 11, n.18, p. 4953. Available at: https://doi.org/10.3390/su11184953.

Pérez-Rincón, M., Vargas-Morales, J. and Martínez-Alier, J. (2019), "Mapping and analyzing ecological distribution conflicts in Andean countri-

with collaborative *governance*, thus functioning as distributed infrastructures of transformative resilience.

On this basis, the "Green Nexus Hub" has been delineated as an open design paradigm, an adaptive and situated device that positions risk as a catalyst for ecological and social innovation. Rather than a fixed model, it constitutes a conceptual and operational horizon in evolution, suitable for guiding future design experiments and theoretical developments, and for intertwining ecological justice, transformative resilience, and inclusive forms of *governance*.

Its applicability is significant both in polycentric European contexts, where networks of residual spaces can become socio-ecological infrastructures of proximity, and at an international scale, facilitated by the presence of criteria, indicators, and situated prototyping tools, which enhance transferability. Within this framework, Design emerges as a cognitive infrastructure for eco-social transitions. It is capable of integrating knowledge, action, and care within a vision of transformative resilience.

es", *Ecological Economics*, Vol. 156, pp. 267-278. Available at: https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.09.017.

Raymond, C.M., Frantzeskaki, N., Kabisch, N., Berry, P., Breil, M., Nita, M.R. and Calfapietra, C. (2017), "A framework for assessing and implementing the co-benefits of nature-based solutions in urban areas", *Environmental Science & Policy*, Vol. 77, pp. 15-24. Available at: https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.07.008.

Reckwitz, A. (2022), *The society of singularities*, Polity Press, Cambridge.

Salvadori, I. and Valente, R. (2018), "Spazio comunitario collaborativo multi-uso a San Francisco (USA)", *AGATHÓN | International Journal of Architecture, Art and Design*, n.4, pp. 105-112.

Tornaghi, C. and Dehaene, M. (2020), "The prefigurative power of urban political agroecology: rethinking the urbanisms of agroecological transitions for food system transformation", *Agroecology and Sustainable Food Systems*, Vol. 44, n.5, pp. 594-610. Available at: https://doi.org/10.1080/21683565.2019.1680593.

UNISDR (2015), *Sendai framework for disaster risk reduction 2015–2030*, United Nations Office for Disaster Risk Reduction, Geneva. Available at: https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030 (Accessed on 20/07/2025).

World Economic Forum (2024), *The global risks report 2024*, World Economic Forum, Geneva. Available at: https://www.weforum.org/reports/global-risks-report-2024 (Accessed on 18/08/2025).

Rischi e opportunità nel patrimonio rurale: il caso dell'ambiente costruito di Yuanjia

Just Accepted: November 28, 2025 **Published:** July 29, 2026

Barbara Galli[1], https://orcid.org/0000-0002-3136-3838 barbara.galli@polimi.it
Emilio Faroldi[2], https://orcid.org/0000-0003-0353-7201 emilio.faroldi@polimi.it
Yupeng Wang[3], wang-yupeng@xjtu.edu.cn
[1] Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito, Politecnico di Milano, Italia
[2] Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito, Politecnico di Milano, Italia
[3] Department of Environmental Building Design, Urban Planning, Xi'an Jiaotong University, China

Abstract. Il saggio analizza la rigenerazione del villaggio di Yuanjia (Shaanxi) come caso paradigmatico per comprendere la costruzione della memoria collettiva nella Cina contemporanea. La trasformazione, avviata nel 2007, intreccia turismo, governance comunitaria e tecnologie costruttive, generando un paesaggio che si presenta come tradizionale, ma che in realtà combina strategie di riqualificazione, logiche di mercato e processi di innovazione. Il progetto solleva questioni cruciali e invita a riflettere sull'autenticità come categoria relazionale e instabile, prodotta dalla selezione e dalla spettacolarizzazione delle pratiche. Il caso studio mostra anche la capacità delle comunità rurali cinesi di reinterpretare la tradizione in forme compatibili con la modernità, conferendo al patrimonio un ruolo attivo nello sviluppo locale.

Parole chiave: Rigenerazione rurale; Memoria collettiva; Patrimonio rurale; Nuove tecnologie; Autenticità.

Introduzione: contesto politico, culturale e normativo

Il significato di autenticità e la definizione di patrimonio sono oggetto di un dibattito ampio e stratificato. In questo saggio il patrimonio è interpretato in chiave critica, ispirata a Nora (1984), Choay (1992), Lowenthal (1998) e Guo (2014): non come eredità neutrale, ma costruzione intenzionale, pensata per rispondere a esigenze contemporanee oltre che a continuità storiche. La memoria collettiva si configura quindi come una pratica selettiva e spesso conflittuale, all'interno della quale istituzioni e comunità negoziano significati e valori. Nel dibattito accademico cinese, questa dinamica viene letta anche attraverso la lente della *cunluo wenhua* (cultura del villaggio), che pone l'accento sulla continuità rituale e sull'agency locale, un aspetto che trova solo un riscontro parziale nei quadri teorici occidentali.
Queste dinamiche – apparentemente non traducibili in modo lineare tra sistemi concettuali diversi – sono palesate nei progetti di rigenerazione rurale in particolare in Cina, che spesso non mirano soltanto a proteggere e tutelare il patrimonio, ma anche a riscrivere il passato, trasformandolo in risorsa politica, economica e simbolica. Per cogliere appieno tali fenomeni, è fondamentale mettere in dialogo le teorie occidentali con la filosofia cinese, in particolare quella di Fei Xiaotong, secondo cui la continuità di una comunità rurale non dipende dalla permanenza materiale delle case, ma dalla persistenza delle relazioni sociali e dei rituali che danno significato alla vita collettiva (Fei, 1992). L'autenticità è quindi percepita come continuità sociale e simbolica più che come conservazione materiale. Questa lettura va a superare una concezione rigidamente materica del patrimonio, e introduce una prospettiva dinamica, che mette al centro i processi culturali.
Tali principi trovano riscontro nella *Rural Revitalisation Strategy*, presentata dal Segretario Generale Xi Jinping durante il XIX Congresso Nazionale del Partito Comunista Cinese (Xi, 2017). La strategia prevede un piano di modernizzazione integrata delle campagne, articolato in cinque obiettivi: prosperità industriale, vivibilità ecologica, civiltà rurale, governance efficace e qualità della vita (Zeng, 2022). Gli interventi reinterpretano spesso la tradizione attraverso pratiche di selezione e visi-

Risks and opportunities in rural heritage: the case of Yuanjia village's built environment

Abstract. This essay examines the regeneration of Yuanjia Village (Shaanxi) as a paradigmatic case for understanding the construction of collective memory in contemporary China. Initiated in 2007, the transformation intertwines tourism, community governance, and construction technologies, yielding a landscape that appears traditional while, in fact, it combines redevelopment strategies, market dynamics, and innovative processes. The project raises crucial questions and encourages reflection on authenticity as a relational and unstable category, shaped through selection and spectacularisation processes. The case study further illustrates the capacity of Chinese rural communities to reinterpret tradition in ways compatible with modernity, thereby assigning an active role to heritage in local development.

Keywords: rural regeneration; collective memory; rural heritage; new technologies; authenticity.

Introduction: political, cultural, and regulatory context

The concepts of authenticity and heritage are subjects of a broad and complex debate. This essay interprets heritage from a critical perspective, inspired by Nora (1984), Choay (1992), Lowenthal (1998), and Guo (2014). It is not viewed as a neutral inheritance but as an intentional construct, devised to respond both to contemporary needs and to historical continuity. Collective memory is, therefore, configured as a selective and frequently conflictual practice within which institutions and communities negotiate meanings and values. In the academic debate, the meaning of authenticity and the definition of Heritage are the subjects of a wide-ranging and multi-layered discussion. In the Chinese scholarly debate, this dynamic is also framed through the lens of *cunluo wenhua* (village culture), which emphasises ritual continuity and local agency, an aspect only partially reflected in Western theoretical frameworks.
This perspective – apparently not directly translatable between different conceptual systems – is evident in rural regeneration projects in China, which often aim not only to protect and preserve heritage but also to rewrite the past, transforming it into a political, economic, and symbolic resource.
To understand these phenomena fully, it is essential to bring Western theories into dialogue with Chinese philosophy, especially the thought of Fei Xiaotong, who argued that the continuity of a rural community rests not on the material permanence of its houses but on the persistence of social relationships and rituals that endow collective life with meaning (Fei, 1992). Authen-

ISSN online: 2239-0243 | © 2025 Author(s) | http://www.fupress.com/techne | DOI: 10.36253/techne-17863
Open access, peer-reviewed article published by Firenze University Press (https://www.fupress.com) and distributed, except where otherwise noted, under the terms of the CC BY 4.0 License for content and CC0 1.0 Universal for metadata

bilità istituzionale. Come dimostrato da Hobsbawm e Ranger (1983) e da Su (2011), ogni tradizione è il risultato di processi di scelta e reinterpretazione.
Nel pensiero cinese, inoltre, la selezione non è percepita come falsificazione, ma come parte naturale della trasmissione culturale, in cui armonia sociale e continuità simbolica prevalgono sulla fedeltà materiale.
Un passaggio cruciale per la stesura della *Rural Revitalisation Strategy* è la pubblicazione, nel 2012, delle liste nazionali dei villaggi tradizionali, aggiornate periodicamente (Zhou, Zhong and Liu, 2015). Tali elenchi non solo censiscono gli insediamenti a rischio, ma hanno anche un effetto performativo, attribuendo riconoscimento ufficiale e valore identitario ai villaggi. In questo modo non registrano solo una realtà preesistente, ma contribuiscono a definirla, attribuendo nuovi valori a questi luoghi (Chen *et al*., 2020).
L'integrazione delle politiche di rivitalizzazione con la valorizzazione turistica, spesso adottata negli interventi di riqualificazione, accentua questa dinamica (Gullino and Larcher, 2013). Il *Piano Strategico di Rivitalizzazione Rurale (2018–2022)*, le *Linee guida per lo sviluppo sostenibile del turismo rurale* e il *14° Piano Quinquennale*[1] sottolineano la necessità di preservare la cultura rurale anche in chiave turistica, mettendo in relazione tutela e consumo culturale (Ministero dell'Agricoltura Cinese, 2018; Turismo Cinese, 2021). Se da un lato le norme mirano a contrastare spopolamento, invecchiamento e impoverimento delle campagne (Han, 2020); dall'altro non offrono strumenti adeguati a evitare il rischio di trasformare la memoria in spettacolo, semplificando la complessità storica in immagini facilmente fruibili.
La tensione bivalente tra salvaguardia culturale e consumo turistico rappresenta, dunque, uno dei principali nodi critici della rigenerazione rurale contemporanea.
In questo contesto si colloca il villaggio di Yuanjia, nella provincia dello Shaanxi, che già dal 2007 –
prima della formalizzazione della *Rural Revitalisation Strategy* – è stato oggetto di un processo di rigenerazione che combina innovazione architettonica, gestione comunitaria e valorizzazione turistica. Yuanjia non è solo un esempio di successo economico e culturale, ma un laboratorio sperimentale in cui si manifestano le tensioni stesse della rigenerazione rurale: tra conservazione e mercato, autenticità e simulazione, memoria vissuta e memoria spettacolarizzata. Si tratta, dunque, di un osservatorio privilegiato per condurre un'analisi su autenticità percepita e pratiche di selezione del passato, operate dalle istituzioni e dagli attori locali.

Metodologia e approccio analitico

L'analisi della rigenerazione di Yuanjia e delle dinamiche connesse alla memoria collettiva si fonda su un approccio multidisciplinare, che integra semiotica culturale, antropologia e storia dell'architettura. L'obiettivo non è descrivere unicamente gli interventi materiali o le policy istituzionali, ma comprendere i processi che trasformano il patrimonio da traccia storica a risorsa economica e dispositivo identitario.
Particolarmente utili, per leggere le problematiche della riqualificazione rurale, sono le teorie di Roland Barthes (1977), che interpreta architetture, materiali e tecniche costruttive non come strumenti funzionali, ma come segni, portatori di narrazioni e

ticity is thus perceived more as social and symbolic continuity than as material preservation.
This interpretation goes beyond a rigidly material concept of heritage by introducing a dynamic perspective centred on cultural processes.
These principles found expression in the *Rural Revitalisation Strategy* presented by General Secretary Xi Jinping during the 19th National Congress of the Chinese Communist Party (Xi, 2017). The strategy set out a plan for integrated modernisation of the countryside organised around five objectives, precisely industrial prosperity, ecological sustainability and liveability, rural civilisation, effective governance, and quality of life (Zeng, 2022).
The interventions often reinterpret tradition through practices of selection and institutional visibility. As Hobsbawm, Ranger (1983), and Su (2011) demonstrate, every tradition is ultimately the outcome of choice and reinterpretation processes.
Moreover, within Chinese thought, selection is not regarded as falsification but as a natural component of cultural transmission in which social harmony and symbolic continuity are accorded primacy over material fidelity.
A crucial step in shaping the *Rural Revitalisation Strategy* was the publication in 2012 of national lists of traditional villages, which have since been periodically updated (Zhou, Zhong, and Liu, 2015). These lists not only census settlements at risk, but also have a performative effect, officially recognising and conferring identity value on the villages. In doing so, they do not merely record a pre-existing reality but contribute to defining it, attributing new values to these places (Chen *et al*., 2020).
The integration of revitalisation policies with tourism-promoting initiatives, often pursued in redevelopment projects, accentuates this dynamic (Gullino and Larcher, 2013). The *Rural Revitalisation Strategic Plan (2018–2022)*, the *Guidelines for Sustainable Rural Tourism Development*, and the *14th Five-Year Plan*[1] emphasise the need to preserve rural culture, including through its touristic dimension, thereby linking conservation with cultural consumption (Ministry of Agriculture of China, 2018; Chinese Tourism, 2021). While regulations aim to counter depopulation, ageing, and impoverishment of the countryside (Han, 2020), they do not provide adequate tools to prevent the risk of turning memory into a spectacle, of simplifying historical complexity into easily consumable images.
Yuanjia Village in the Shaanxi Province lies within this context. Since 2007 – before the formalisation of the *Rural Revitalisation Strategy* – it has undergone a regeneration process combining architectural innovation, community management, and the development of tourism. Yuanjia is not only an example of economic and cultural success but also an experimental laboratory in which the central tensions of rural regeneration are made manifest, precisely between conservation and market, authenticity and simulation, lived memory and spectacularised memory. Hence, it is a privileged observatory for analysing perceived authenticity and the practices of selective memory enacted by institutions and local actors.

ideologie. Decodificarli consente di identificare le intenzionalità politiche e culturali che guidano gli interventi nei villaggi rurali.
A partire da tali assunti, l'architettura si configura come un linguaggio attraverso cui si articola un discorso identitario, non sempre coincidente con la continuità storica. Junxi Qian (2023) ha evidenziato, in relazione con l'ambito cinese, che per molte comunità rurali ricostruire un edificio non equivale a falsificare la storia, ma a mantenerne vivo lo spirito, affinché il luogo continui a essere abitato culturalmente.
Analogamente, l'antropologia culturale mostra come la memoria non sia mai un deposito neutrale, ma una pratica sociale, selettiva e politica, negoziata tra comunità, istituzioni e attori economici. Applicata al caso del villaggio di Yuanjia, situato nella provincia di Shaanxi, questa lettura evidenzia come il patrimonio non testimonia solo il passato, ma sia continuamente reinventato per rispondere a esigenze di mercato e legittimazione politica.
La storia dell'architettura, inoltre, contribuisce a distinguere tra restauro, ricostruzione e invenzione – differenziazione essenziale per chiarire la diversità tra ricostruzioni "in stile" ed evidenze storiche, rendendo più trasparente il rapporto tra innovazione e tradizione.
Nella tradizione cinese, la pratica della ricostruzione è considerata una modalità legittima di conservazione, fondata sull'idea di rigenerare lo spirito del luogo più che i materiali originali. Questo livello analitico è cruciale in contesti in cui la ricostruzione diventa strategia economica e turistica, producendo nuove forme di autenticità "percepita".
L'autenticità non può quindi essere ridotta a parametro tecnico, ma deve essere interpretata come categoria relazionale, che emerge dall'interazione fra memoria storica, pratiche costruttive e strategie di valorizzazione.
La ricerca si basa su tre tipologie di fonti:

1. Documenti ufficiali, utili a delineare il quadro politico e normativo.
2. Osservazioni dirette e rilievi *in situ*, indispensabili per distinguere tra restauro e nuove costruzioni.
3. Letteratura specialistica, necessaria per collocare Yuanjia all'interno dei dibattiti globali sulla patrimonializzazione.

Questo intreccio metodologico consente di misurare la distanza tra retorica e pratiche effettive, dimostrando come l'autenticità sia prodotta, contestata e mercificata attraverso scelte materiali, narrative e politiche e come la memoria sia continuamente riscritta attraverso pratiche culturali e istituzionali, evitando sia la celebrazione acritica della conservazione sia la deresponsabilizzazione del progetto architettonico.

Rigenerazione del villaggio di Yuanjia

Yuanjia costituisce un caso paradigmatico di rigenerazione rurale, in cui memoria collettiva, innovazione tecnologica e turismo convergono in modo ambivalente. Fondato nel periodo Jianlong della dinastia Song Settentrionale (961) dalla famiglia Yuan, il villaggio clanico è organizzato secondo i principi del Fengshui (Bruun, 2008), che codificano nello spazio un equilibrio tra uomo e natura (Huang and Zhang, 2020).
La politica delle *Township and Village Enterprises* (TVEs) (Fu and Balasubramanyam, 2003), promossa dal governo cinese alla fine degli anni '70, ne modificò l'assetto tradizionale. Furono introdotte nuove attività a carattere industriale, che alterarono

Methodology and analytical approach

The analysis of Yuanjia's regeneration and the dynamics surrounding collective memory rests on a multidisciplinary approach, integrating cultural semiotics, anthropology, and architectural history. The purpose is not merely to describe material interventions or institutional policies, but to examine the processes through which heritage is transformed from a historical trace into an economic resource and an identity-making device.
The theories of Roland Barthes (1977) are particularly useful for examining the challenges of rural redevelopment. He interprets architecture, materials, and construction techniques not as merely functional tools but as signs conveying narratives and ideologies. Decoding these signs allows to identify the political and cultural intentions that inform projects in rural villages.
From this perspective, architecture operates as a language through which an identity discourse is articulated, without always being aligned with historical continuity. In the Chinese context, Junxi Qian (2023) has emphasised that for many rural communities, reconstructing a building is not regarded as falsifying history, but as sustaining its spirit, thereby ensuring that the place remains culturally inhabited.
Likewise, cultural anthropology reveals that memory is never a neutral repository but a social, selective, and political practice, negotiated among communities, institutions, and economic actors. Applied to the case of Yuanjia Village in the Shaanxi Province, this perspective indicates that heritage does not merely testify to the past but is continually reinvented to meet market demands and political legitimation.
Architectural history further contributes with the distinction between preservation, reconstruction, and invention – an essential differentiation for clarifying the boundary between "in-style" reconstructions and historical evidence, thereby rendering the relationship between innovation and tradition more transparent.
In Chinese tradition, the practice of reconstruction is regarded as a legitimate mode of preservation based on the idea of regenerating the spirit of the place rather than its original materials. This analytical dimension is crucial in contexts where reconstruction becomes an economic and touristic strategy, leading to new forms of "perceived" authenticity.
Hence, authenticity cannot be reduced to a technical parameter but must be understood as a relational category, emerging from the interaction between historical memory, construction practices, and valorisation strategies.
The research draws on three types of sources, namely official documents, which are useful for outlining the political and regulatory framework; direct observations and on-site surveys essential for distinguishing between preservation and new construction; and specialist literature, which is necessary for situating Yuanjia within global debates on heritage-making.
This methodological interplay allows us to assess the gap between rhetoric and actual practices, revealing how authenticity is produced, contested, and commodified through material, narrative, and political choices. It also highlights how memory is continuously reshaped by cultural and institutional practices, thus avoiding both

01 | Immagine storica delle attività agricole, Museo Storico del villaggio di Yuanjia
Historical image of agricultural activities, Historical Museum of Yuanjia village



| 01

la coerenza vernacolare (Fig. 1) a favore dell'industrializzazione rapida. L'autenticità, intesa come integrità fisica del patrimonio, fu compromessa, ma emersero nuove narrazioni identitarie. Lo sviluppo economico rallentò con la recessione degli anni '90, avviando un rapido declino socioeconomico e culturale. Il villaggio cessò di essere supporto vivente delle pratiche quotidiane e si trasformò in spazio residuale.

Nel 2007, sotto la guida del segretario Guo Zhanwu, fu avviato un processo di valorizzazione turistica (Fig. 2) che portò alla fondazione di una società collettiva. L'operazione, presentata come riqualificazione, produsse in realtà una teatralizzazione semplificata della tradizione (Xie, Zhang and Han, 2024).

Questa duplice e contrastante matrice – che ha guidato l'intervento – emerge anche da alcuni colloqui informali fatti ai residenti (2025), in questa prima fase di analisi. Le interviste, pur non costituendo un campione rappresentativo, offrono indicazioni qualitative rilevanti sulla percezione locale. Oltre alle dinamiche generali già evidenziate, le brevi testimonianze raccolte dagli studenti durante le visite in loco chiariscono come la trasformazione del villaggio sia percepita dalla popolazione locale. I colloqui informali con diversi gruppi di residenti – in particolare giovani impegnati nelle attività commerciali, artigiani rientrati dall'emigrazione urbana e residenti anziani – mostrano una valutazione complessa del processo.

Alcuni giovani commercianti hanno sottolineato come la rigenerazione abbia permesso di tornare al villaggio senza rinunciare a un reddito stabile, evidenziando il ruolo positivo del turismo nel creare nuove opportunità economiche. Divergente è invece la lettura di alcuni residenti più anziani che hanno espresso la preoccupazione che la cultura locale sia progressivamente piegata alle necessità dei visitatori, segnalando una distanza crescente tra ritualità vissute e pratiche rese "visibili" per il pubblico esterno.

Le testimonianze confermano la natura ambivalente della rigenerazione che si presenta sia come generatrice di valore economico e di ritorno sociale, ma è anche accompagnata da un senso diffuso di trasformazione selettiva della memoria. Il senso di

uncritical celebration of preservation and the abdication of responsibility in architectural design.

Regeneration of Yuanjia village

Yuanjia is a paradigmatic case of rural regeneration in which collective memory, technological innovation, and tourism converge in an ambivalent manner. Founded during the Jianlong period of the Northern Song dynasty (961) by the Yuan family, the clan village was organised according to the principles of Fengshui (Bruun, 2008), which spatially encodes a balance between humans and nature (Huang and Zhang, 2020).

The policy of *Township and Village Enterprises* (TVEs) (Fu and Balasubramanyam, 2003), promoted by the Chinese government in the late 1970s, disrupted its traditional layout. New industrial activities were introduced, compromising vernacular coherence (Fig. 1) in favour of rapid industrialisation. Authenticity, understood as the physical integrity of heritage, was undermined, yet new identity narratives emerged. Economic development slowed down during the recession of the 1990s, triggering a rapid socioeconomic and cultural decline. The village ceased to sustain daily practice and degenerated into a residual space.

In 2007, a tourism-led revitalisation process was initiated under the leadership of Secretary Guo Zhanwu (Fig. 2), culminating in the establishment of a collective company. Although presented as redevelopment, the initiative produced a simplified theatricalisation of tradition (Xie, Zhang, and Han, 2024).

This dual and contrasting matrix – which guided the intervention – also emerges from informal interviews conducted with residents (2025) during this initial analysis phase. The interviews, although not a representative sample, provide relevant qualitative insights into local perceptions. In addition to the already highlighted general dynamics, the brief testimonies collected by students during site visits clarify how the transformation of the village is perceived by the local population. Informal interviews with different groups of residents – particularly young people engaged in commercial activities, artisans returning from urban migration, and elderly residents – reveal a complex evaluation of the process. Some young entrepreneurs emphasised that the regeneration allowed them to return to the village without giving up a stable income, highlighting the positive role of tourism in creating new economic opportunities. Conversely, some older residents expressed concern that local culture is progressively adapted to the needs of visitors, signalling a growing gap between lived rituals and practices made "visible" for external audiences. The testimonies confirm the ambivalent nature of regeneration, which appears both as a generator of economic value and social return, also accompanied by a widespread sense of selective transformation of memory. A sense of belonging coexists with a partial loss of spontaneity and symbolic depth. Such ambivalence is typical of contemporary heritage-making processes, in which memory is simultaneously valorised and reinterpreted according to market demands. This aspect is further amplified by the decision to preserve only a few selected historical buildings (the Qinqiong Tomb and a minor temple). This design choice, which can be contested on philological grounds, reflects

02 | Vista del villaggio, Museo Storico del villaggio di Yuanjia
View of the village, Historical Museum of Yuanjia village

appartenenza convive così con una perdita parziale di spontaneità e di profondità simbolica. Tale ambivalenza è tipica dei processi di heritage-making contemporanei, nei quali la memoria viene al tempo stesso valorizzata e reinterpretata in funzione del mercato

Aspetto ampliato anche dalla decisione di salvaguardare solo alcuni e selezionati edifici storici (la Tomba di Qinqiong e un tempio minore). Tale scelta progettuale – criticabile sul piano filologico –, riflette la priorità cinese della funzione sociale sulla conservazione materiale (Jia *et al*., 2025), che produce un paesaggio culturale coerente, ma semplificato, nel quale la stratificazione storica è sostituita da una narrativa più lineare e facilmente comunicabile.

L'operazione di *Heritage design* porta alla perdita della stratificazione storica, sostituita da un'immagine semplificata omogeneizzata, con nucleo centrale fortificato e buffer zone. Si delinea così un'operazione che legge l'Heritage come *performance*, nella quale il patrimonio è continuamente rappresentato attraverso pratiche discorsive e spaziali (Smith, 2006).

La fase successiva, con la Strada degli Snack, la Strada dei Laboratori e la Guanzhong Ancient Town (Fig. 3), trasformò il villaggio in un parco tematico rurale. La comunità ha acquisito un ruolo attivo nella gestione, ma i flussi turistici e finanziari introdussero dinamiche di mercato che tendevano a standardizzare le pratiche locali. Oggi la vita quotidiana è presentata come prodotto da consumare, e l'autenticità non è definita dalla

02 |



03 | Il cancello principale dell'area fortificata, foto di Barbara Galli
The main gate of the fortification area, photo by Galli



continuità storica, ma dalla capacità di soddisfare le aspettative dei visitatori (Gao and Wu, 2017).
Nel 2023 il villaggio, che attualmente si estende per 3,5 km² e ospita circa 600 residenti permanenti, è stato visitato da oltre 8 milioni di turisti con un fatturato stimato di 1,2 miliardi di RMB e con un incremento di posti di lavoro che si attesta su 3.000 unità nel campo del turismo e delle attività affini e complementari (Gao and Wu, 2017; Liu *et al.*, 2024; Zeng, 2022). Il turismo, infatti, rappresenta attualmente i due terzi del fatturato annuale e ha promosso la rinascita di alcune attività artigianali locali. Tuttavia, vi è il rischio di una crescente dipendenza da un unico settore e la formazione di un paesaggio orientato al consumo, in cui la memoria diventa risorsa economica. I numeri riflettono quindi al tempo stesso la vitalità e la fragilità di un processo che trasforma il patrimonio in strumento di sviluppo e di rappresentazione (Tab. 1).
Il progetto, dunque, seppur economicamente efficace, rivela vulnerabilità come pressione ambientale, estetica omogeneizzata e sostituzione della stratificazione con scenografia. Yuanjia esemplifica il paradosso delle rigenerazioni rurali: salvato dall'oblio, rischia di ridursi a simulacro (Gao *et al.,* 2019).

La buffer zone come dispositivo di controllo e narrazione

Particolarmente interessante nel progetto di riqualificazione di Yuanjia è la buffer zone che funge da dispositivo urbanistico e narrativo, costruendo una cornice coerente che conferisce credibilità al villaggio come patrimonio autentico.
Come osserva Guo Zhan (2010): «Il perimetro di protezione non solo salvaguarda lo spazio fisico, ma delimita simbolica-

the Chinese priority of social function over material conservation (Jia *et al.*, 2025) by producing a coherent yet simplified cultural landscape in which historical stratification is replaced by a more linear and easily communicable narrative.
The heritage-design operation led to the loss of historical stratification, which was replaced by a homogenised, simplified image featuring a fortified central core and surrounding buffer zones. The operation thus conceptualises heritage as performance in which the past is continuously represented through discursive and spatial practices (Smith, 2006).
A subsequent phase, marked by the establishment of the Snack Street, the Workshop Street, and Guanzhong Ancient Town (Fig. 3), transformed the village into a rural theme park. The community assumed an active role in management, yet tourist and financial flows introduced market dynamics tending to standardise local practices. Today, daily life is presented as a consumable product, and authenticity is defined not by historical continuity but by the capacity to meet the expectations of visitors (Gao and Wu, 2017). By 2023, the village, which currently covers 3.5 km² and hosts around 600 permanent residents, had received over 8 million visitors, generating an estimated revenue of 1.2 billion RMB and creating 3,000 jobs in tourism and related sectors (Gao and Wu, 2017; Liu *et al.*, 2024; Zeng, 2022). Tourism currently accounts for two-thirds of annual revenue, and has promoted the revival of some local artisanal activities. However, there is a risk of growing dependence on a single sector and the formation of a consumption-oriented landscape in which memory becomes

Tab. 01 | Indicatori chiave della trasformazione di Yuanjia
Key Indicators of Yuanjia's Transformation

| Tab. 01

Indicator	Value	Notes / Source
Permanent resident population	~600 people	Liu *et al.*, 2024
Village area	3.5 km²	Liu *et al.*, 2024
Annual visitors (2023)	>8 million	Zeng, 2022; Gao & Wu, 2017
Estimated annual revenue	1.2 billion RMB	Zeng, 2022
Jobs generated	~3,000 jobs	Gao & Wu, 2017; Liu *et al.*, 2024
Tourism share of total income	~2/3 of total income	Zeng, 2022
Number of active tourism and craft businesses	>200	Gao & Wu, 2017

04 | Dettaglio della via principale nella buffer zone, foto di Barbara Galli
Detail of the main street in the buffer zone, photo by Galli

mente i confini della memoria e determina chi ha diritto a partecipare a quella narrazione». La buffer zone produce una topografia selettiva in cui l'interno è valorizzato mentre l'esterno è marginalizzato.
Per i residenti, la sua presenza influenza le dinamiche sociali, in quanto le abitazioni incluse nell'area vincolata acquisiscono valore simbolico ed economico, mentre quelle esterne rischiano una marginalizzazione crescente. Ne deriva una distribuzione asimmetrica di vantaggi e svantaggi. La buffer zone diventa quindi anche un dispositivo di selezione sociale, oltre che urbanistica.
In un confronto internazionale, la buffer zone richiama le pratiche UNESCO, spesso utilizzate per proteggere paesaggi culturali, ma che talvolta rischiano di imporre confini rigidi.
A Yuanjia, essa assume un valore peculiare, creando le condizioni per un paesaggio costruito *ad hoc* (Fig. 4). Non è un confine neutrale, ma uno dispositivo che tende a omologare e riscrivere la storia, trasformando in parte la tutela in uno strumento di spettacolarizzazione turistica. È, dunque, un confine performativo che non solo protegge, ma produce autenticità, trasformando la pianificazione in pratica estetico-politica.

Tecnologie costruttive: ricostruzione e modernità tecnica

Un elemento cruciale nella costruzione della buffer zone è l'uso delle tecnologie costruttive come mediatori della memoria storica (Qian, 2014). Le tecniche moderne non vanno a cancellare la materialità originaria, ma la traducono in forme percepibili, rendendo il passato compatibile con le esigenze di sicurezza e sostenibilità (Su, 2011).

Le facciate mantengono proporzioni tradizionali, ma sono in parte realizzate con materiali e sistemi contemporanei. In questo compromesso, la fedeltà visiva prevale su quella materiale, spostando l'autenticità dal livello filologico a quello percettivo, e alimentando la tensione tra memoria storica e spettacolarizzazione (Su, 2011).
Le tecnologie agiscono come dispositivi narrativi, guidando i visitatori attraverso un racconto predisposto che va dalla memoria clanica al turismo moderno. La tecnica non è soltanto uno strumento costruttivo, ma un segno, la cui funzione narrativa prevale su quella materiale, orientando l'interpretazione collettiva più che riprodurre fedelmente la realtà storica. In questo modo il progetto tecnologico genera nuova memoria collettiva, selezionando ciò che deve essere mostrato e ciò che deve essere nascosto.

| 04



an economic resource. The figures thus reflect both the vitality and the fragility of a process that transforms heritage into a tool for development and representation (Tab. 1). The project, although economically effective, reveals vulnerabilities such as environmental pressure, homogenised aesthetics, and the replacement of historical stratification with scenography. Yuanjia exemplifies the paradox of rural regeneration. Rescued from oblivion, it risks being reduced to a simulacrum (Gao *et al.*, 2019).

The buffer zone as a control and narrative device

A particularly significant aspect of Yuanjia's redevelopment project is the buffer zone, which functions as both a planning and narrative device by establishing a coherent frame that lends credibility to the village as authentic heritage.
As Guo Zhan (2010) notes, «the protective perimeter not only safeguards the physical space but symbolically delineates the boundaries of memory and determines who has the right to participate in that narrative». The buffer zone generates a selective topography in which the interior is privileged while the exterior is marginalised.
For residents, its presence influences social dynamics as houses within the protected area acquire symbolic and economic value, whereas those left outside risk heightened marginalisation. This produces an unequal distribution of advantages and disadvantages. The buffer zone thus functions not only as a planning device but also as a mechanism of social selection.
In terms of international comparison, the buffer zone resembles UNESCO

05 | Dettaglio di un edificio nella buffer zone, foto di Barbara Galli
Detail of a building in the buffer zone, photo by Galli

Nella buffer zone, la tecnologia garantisce usabilità e attrattiva, ma non trasmette la complessità stratificata della memoria. Le costruzioni funzionano quindi come traduzioni culturali, trasformando il passato in forme percepibili e consumabili, mediando tra autenticità storica e spettacolarizzazione turistica (Fig. 5).

Autenticità e memoria collettiva

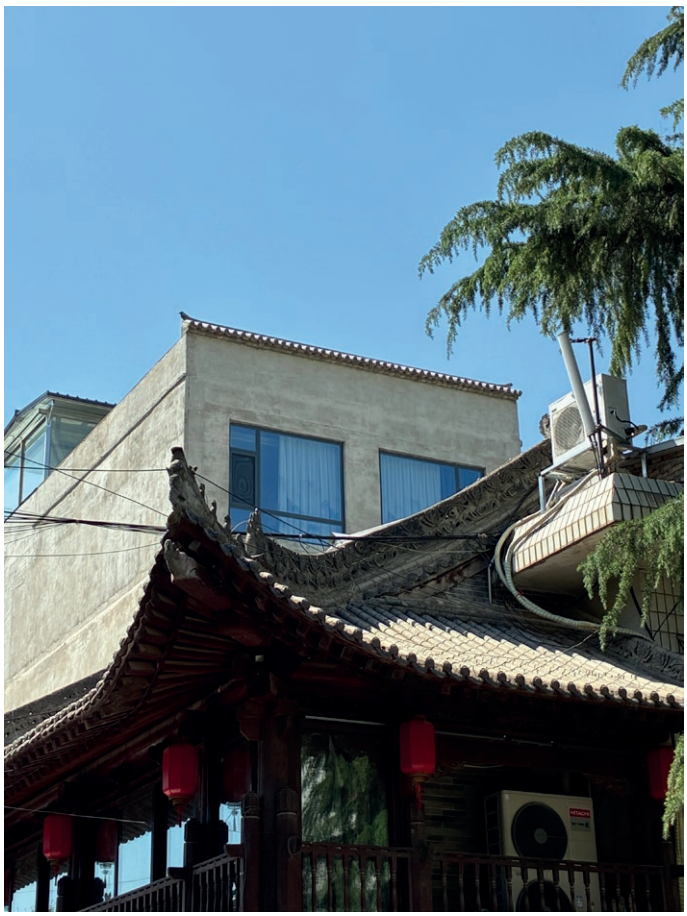
Il caso di Yuanjia evidenzia la tensione tra autenticità e simulazione ricorrente negli interventi di riqualificazione delle architetture rurali. A Yuanjia, l'autenticità emerge come mediazione tra memoria, valori culturali e bisogni contemporanei.
In Cina, infatti, l'autenticità è frequentemente intesa come continuità di valori e pratiche collettive (*zhonghe* – armonia bilanciata), piuttosto che come fedeltà materiale. Ciò spiega anche l'accettazione sociale delle ricostruzioni.
Tuttavia, si tratta, però, di un equilibrio fragile, costantemente minacciato dalla pressione turistica e dalle esigenze di mercato (Graham, Ashworth and Tunbridge, 2000; Huang and Zhang, 2020). Il turismo agisce come motore ambivalente, perché da una parte stimola la riscoperta di saperi e mestieri, mentre dall'altra semplifica rituali e pratiche per il consumo. Di conseguenza, Yuanjia funziona come laboratorio di contraddizioni, in cui la comunità è protagonista, ma opera all'interno di gerarchie ridefinite dal mercato (Jiang and Zhou, 2020).
Le architetture non sono intese semplicemente come forme, ma come segni che veicolano ideologie. La memoria diventa, dunque, una pratica conflittuale e, senza gestione critica, rischia di ridursi a coreografia turistica.

practices, often employed to protect cultural landscapes but at times imposing rigid boundaries. However, in Yuanjia, it assumes a distinctive significance by creating conditions for a deliberately constructed landscape (Fig. 4). It is not a neutral boundary, but a device that tends to homogenise and re-script history by partially transforming preservation into a device for touristic spectacularisation. It is, therefore, a performative boundary that not only protects but also produces authenticity, turning planning into an aesthetic-political practice.

Construction technologies: reconstruction and technical modernity

A crucial element in the construction of the buffer zone is the use of construction technologies as mediators of historical memory (Qian, 2014). Modern building techniques do not erase the original materiality but translate it into perceptible forms, making the past compatible with safety and sustainability requirements (Su, 2011).
The façades retain traditional proportions but are partly constructed with contemporary materials and systems. In this compromise, visual fidelity takes precedence over material fidelity by transferring authenticity from a philological to a perceptual level and, thereby, reinforcing the tension between historical memory and spectacularisation (Su, 2011).
Technologies serve as narrative devices, guiding visitors through a prearranged story that extends from clan memory to modern tourism. Technique is not merely a constructive tool but a sign, whose narrative function prevails over its material dimension by shaping collective interpretation rather than faithfully reproducing

Studi recenti mostrano che i visitatori valutano l'autenticità meno in base alla fedeltà materiale e più in termini di coerenza narrativa (Zeng, 2022). Ciò richiama la nozione di autenticità percepita, incentrata sulla coerenza dell'esperienza, e si collega al dibattito sulle dissonanze del patrimonio, che mette in evidenza la compresenza di interpretazioni conflittuali all'interno di paesaggi patrimoniali commercializzati. Yuanjia si configura così come uno spazio ibrido, al tempo stesso artefatto culturale e prodotto turistico, esemplare per comprendere il patrimonio in contesti inter-culturali.
Su un piano comparativo, Yuanjia può essere messo in relazione con la ricostruzione postbellica di Varsavia o con la gestione turistica di villaggi giapponesi come Shirakawa-go. Questi casi suggeriscono che l'autenticità risiede meno nella fedeltà materiale e più nella capacità di sostenere valori identitari condivisi. Sebbene un confronto sistematico esuli dagli obiettivi di questo saggio, tali parallelismi mostrano come Yuanjia partecipi a un più ampio discorso globale sulla ricostruzione del patrimonio in risposta alle esigenze contemporanee (Smith, 2006; Zeng,


05

2022). I progetti di riqualificazione, spesso guidati da imperativi economici, raramente preservano le stratificazioni originali, costruendo paesaggi "ideali". Questo aspetto riecheggia anche in altri progetti, sebbene le modalità di attuazione differiscano; casi esemplari quali Lijiang Old Town o Wuzhen, sono caratterizzati da modelli di valorizzazione del patrimonio di tipo prevalentemente aziendale e top-down (Shepherd and Yu, 2013). La peculiarità dell'intervento di rigenerazione di Yuanjia è il suo valore cooperativo, in cui la comunità mantiene la proprietà e la gestione della maggior parte delle attività. Questo aspetto risulta estremamente positivo, in quanto cerca di promuovere un'interazione tra patrimonio, vita quotidiana e capacità locale di iniziativa, con la finalità di ridurre il distacco che spesso caratterizza gli interventi top-down. Tuttavia, tale modello partecipativo non può garantire di per sé l'autenticità, che risulta comunque in parte negoziata e performativa, socialmente inclusiva, ma esteticamente orchestrata e funzionale all'economia. Inoltre, la necessità di rielaborare il paesaggio costruito porta a utilizzare tecniche costruttive e nuove tecnologie che rafforzano questa ambivalenza come le facciate tradizionali che celano strutture in acciaio e installazioni digitali. L'autenticità diventa quindi, una categoria relazionale, esposta al rischio che la spettacolarizzazione prevalga sulla memoria storica.

Conclusioni

Il caso di Yuanjia dimostra che la costruzione della memoria collettiva nei villaggi rurali è raramente neutra e spesso risulta dinamica, relazionale e conflittuale. La rigenerazione coincide con strategie economiche, urbanistiche, architettoniche e tecnologiche che trasformano il patrimonio in esperienza condivisa e veicolo di identità collettiva (Ashworth and Tunbridge, 2000; Smith, 2006; Graham *et al*., 2020).

In questi progetti, le nuove tecnologie sono spesso impiegate non per conservare il passato, ma per riscriverlo, poiché gli edifici funzionano come dispositivi narrativi che guidano la percezione dei visitatori e contribuiscono alla coesione sociale (Xie *et al*., 2024).

Yuanjia anticipa diversi principi della *Rural Revitalisation Strategy* del 2017, tra cui integrazione tra protezione e sviluppo, partecipazione della comunità e armonia paesaggistica. Tuttavia, il caso evidenzia anche limiti, come la tendenza alla spettacolarizzazione, alla gentrificazione e alla dipendenza dal turismo di massa (Zeng, 2022). Yuanjia mostra così il paradosso di molte rigenerazioni rurali, in cui un'autenticità sostenibile dal punto di vista economico si riduce spesso a simulacro culturale. Il villaggio appare "reale" più per ciò che comunica e commercializza che per ciò che conserva (Zeng, 2022; Su, 2011).

Allo stesso tempo, Yuanjia funge da laboratorio di resilienza e compromesso, e la sua autenticità, come osserva Su (2011), non è fedeltà al passato, ma costruzione negoziata tra comunità, istituzioni e mercato. La rivitalizzazione rurale in Cina non si limita a preservare il passato, ma mira a trasformarlo in una risorsa viva capace di sostenere lo sviluppo, coesione sociale e identità nazionale (Gao *et al*., 2019). Contemporaneamente, Yuanjia testimonia la resilienza delle comunità rurali cinesi, in grado di trasformare la tradizione in una risorsa condivisa e vitale, coerente con la visione di rinascita armoniosa promossa dalle politiche nazionali.

Alla luce di queste riflessioni, il saggio propone di ridefinire il concetto di autenticità in chiave interculturale, intesa non come

historical reality. Technological design thus generates new forms of collective memory by selecting what should be displayed and what should remain hidden.

Within the buffer zone, technology ensures both usability and visual appeal, yet it fails to convey the layered complexity of memory. Constructions thus operate as cultural translations rather than preservation devices, transforming the past into perceptible and consumable forms, and mediating between historical authenticity and touristic spectacularisation (Fig. 5).

Authenticity and collective memory

The case of Yuanjia underscores the tension between authenticity and simulation, a recurring feature in rural architectural regeneration projects. In Yuanjia, authenticity emerges as a form of mediation between memory, cultural values, and contemporary needs.

In China, authenticity is frequently conceived as the continuity of collective values and practices (*zhonghe* – balanced harmony), rather than as material fidelity. This helps to explain the widespread social acceptance of reconstructions.

Yet this fragile equilibrium is perpetually threatened by tourist pressure and market demands (Graham, Ashworth, and Tunbridge, 2000; Huang and Zhang, 2020). Tourism acts as an ambivalent driver. Indeed. it stimulates the rediscovery of traditional knowledge and crafts, while reducing rituals and practices to consumable form. Consequently, Yuanjia operates as a laboratory of contradictions in which the community plays a leading role but functions within hierarchies redefined by the market (Jiang and Zhou, 2020). Architecture is not simply understood as forms but as signs conveying ideologies. Memory thus becomes a conflictual practice, which, without critical management, risks being reduced to a tourist choreography.

Recent studies show that visitors assess authenticity less by material fidelity than by narrative coherence (Zeng, 2022). This recalls the notion of perceived authenticity centred on experiential coherence, and resonates with the debate on heritage dissonances, which emphasises the coexistence of conflicting interpretations within a commodified heritage landscape. Yuanjia thus appears as a hybrid space, both cultural artefact and tourist product, exemplary for understanding heritage processes in intercultural contexts.

On a comparative level, Yuanjia can be related to the post-war reconstruction of Warsaw or the touristic management of historic Japanese villages such as Shirakawa-go. These cases suggest that authenticity lies less in material fidelity than in the capacity to sustain shared identity values. Although a systematic comparison exceeds the scope of this essay, such parallels show that Yuanjia participates in a broader global discourse on the reconstruction of heritage to meet contemporary needs (Smith, 2006; Zeng, 2022).

This aspect also resonates with other projects, despite differences in implementation modes. Exemplary cases such as Lijiang Old Town or Wuzhen are characterised by predominantly corporate, top-down heritage-valorisation models (Shepherd and Yu, 2013).

The distinctive feature of Yuanjia's regeneration process is its cooperative structure in which the community

categoria statica e universale, ma come costruzione culturale in continua ridefinizione. Yuanjia diventa così un caso esemplare per interrogarsi sull'autenticità come categoria mobile e performativa, capace di riflettere i rapporti tra memoria, comunità e mercato e di ridefinirsi continuamente attraverso di essi.

NOTA

[1] I documenti sono disponibili in lingua inglese al seguente sito internet: http://www.jgs.gov.cn.

REFERENCES

Ahlers, A.L. (2014), *Rural Policy Implementation in Contemporary China: New Socialist Countryside*, Routledge, London.

Barthes, R. (1970), *L'Empire des signes*, Albert Skira, Geneve.

Barthes, R. (1977), *Image, musique, texte*, Éditions du Seuil, Paris.

Chen, K. *et al.* (2020), "Land use transitions and urban-rural integrated development: Theoretical framework and China's evidence", *Land Use Policy*, Vol. 92. Available at: https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104465.

Choay, F. (1992), *L'allégorie du patrimoine*, Éditions du Seuil, Paris.

Fei, X. (1992), *From the soil: The foundations of Chinese society*, University of California Press, Berkeley.

Fu, X. and Balasubramanyam, V.N. (2003), "Township and village enterprises in China", *Journal of Development Studies*, Vol. 39, n. 4, pp. 27-46. Available at: https://doi.org/10.1080/713869424.

Gao, J. and Wu, B. (2017), "Revitalizing traditional villages through rural tourism: A case study of Yuanjia Village, Shaanxi Province, China", *Tourism Management*, Vol. 63, pp. 223-233. Available at: https://doi.org/10.1016/j.tourman.2017.04.003.

Gao, J. and Zhang, L. (2019), *Rural revitalisation in China: Policies and practices*, Springer, Cham.

Gao, S., Huang, S. and Huang, Y. (2009), "Rural tourism development in China", *International Journal of Tourism Research*, Vol. 11, pp. 439-450. Available at: https://doi.org/10.1002/jtr.712.

Gullino, P. and Larcher, F. (2013), "Integrity in UNESCO World Heritage Sites: A comparative study for rural landscapes", *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 14, n. 5, pp. 389-395. Available at: https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.10.005.

Guo, Z. (2010), "Interview with Guo Zhan. 3 August 2010, Brasilia, Brazil", *Oral Archives of the World Heritage Convention*. Available at: https://whc.unesco.org/en/oralarchives/guo-zhan/ (Accessed on 07/08/2025).

Guo, Z. (2014), *Cultural heritage in China: Preservation and development*, Cultural Relics Publishing House, Beijing.

Han, J. (2020), "Prioritizing agricultural, rural development and implementing the rural revitalisation strategy", *China Agricultural Economic Review*, Vol. 12, n. 1, pp. 14-19. Available at: https://doi.org/10.1108/CAER-02-2019-0026.

Hobsbawm, E. and Ranger, T. (1983), *The invention of tradition*, Cambridge University Press, Cambridge.

Huang, M. and Zhang, S. (2020), "Research on the rural tourism development strategy of Shaanxi Yuanjia Village based on SWOT analysis", *Tourism Overview*, Vol. 2, pp. 83-85. Available at: https://aipub.cn/1A017v05s (Accessed on 21/08/2025).

Jia, H. *et al.* (2025), "The spatial distribution characteristics and driving factors of traditional villages' tourism transformation level in Shaanxi, China", *Land*, Vol. 14, n. 8. Available at: https://doi.org/10.3390/land14081602.

Jiang, Z. and Zhou, J. (2020), "Implications of the characteristic folk tourism model of Yuanjia Village in Liquan County, Shaanxi Province for rural economic development", *Marketing World*, Vol. 29, pp. 126-127. Available at:

retains ownership and management of most activities. This is a significant positive element as it seeks to promote interaction between heritage, everyday life, and local initiative, thereby reducing the detachment often produced by top-down interventions.

However, such a participatory model cannot guarantee authenticity, which remains partly negotiated and performative, socially inclusive yet aesthetically orchestrated and functional to the economy.

Regeneration projects, often driven by economic imperatives, seldom preserve original stratifications, constructing "ideal" landscapes instead. Construction techniques and new technologies reinforce this ambivalence as traditional façades conceal steel structures and digital installations. Authenticity thus becomes a relational category subject to the risk that spectacularisation may prevail over historical memory.

Conclusions

The case of Yuanjia demonstrates that the construction of collective memory in rural villages is seldom neutral but is typically dynamic, relational, and conflictual. Regeneration coincides with economic, urban, architectural, and technological strategies that transform heritage into both a shared experience and a vehicle for collective identity (Ashworth and Tunbridge, 2000; Smith, 2006; Graham, Gao, and Zhang, 2020).

In such projects, new technologies are often employed not to preserve the past but to rewrite it, since buildings function as narrative devices that shape visitors' perception, and contribute to social cohesion (Xie, Zhang, and Han, 2024).

Yuanjia prefigures several principles of the 2017 *Rural Revitalisation Strategy*, including the integration of protection and development, community participation, and landscape harmony. Yet the case also exposes limitations, such as a tendency toward spectacularisation, gentrification, and dependence on mass tourism (Zeng, 2022). Yuanjia thus exemplifies the paradox of many rural regeneration projects in which economically sustainable authenticity often degenerates into a cultural simulacrum. The village appears more "real" for what it communicates and commercialises, rather than for what it preserves (Zeng, 2022; Su, 2011).

At the same time, Yuanjia serves as a laboratory of resilience and compromise. Its authenticity, as Su (2011) observes, is not fidelity to the past but rather a negotiated construction between community, institutions, and the market. Rural revitalisation in China does not simply aim to preserve the past but seeks to transform it into a living resource capable of sustaining development, social cohesion, and national identity (Gao *et al.*, 2019). Simultaneously, Yuanjia bears witness to the resilience of Chinese rural communities, which transform tradition into a shared and vital resource consistent with the vision of harmonious renewal promoted by national policies.

In light of these reflections, this essay proposes a redefinition of authenticity in an intercultural perspective, understood not as a static and universal category but as a cultural construct undergoing continuous reconfiguration. Yuanjia thus becomes an exemplary case for interrogating the notion of authenticity as a mobile and performative category capable of reflecting the relationships between memory, com-

https://www.zhangqiaokeyan.com/academic-journal-cn_shaanxi-social-science_thesis/02012115062278.html (Accessed on 19/08/2025).

Liu, S. *et al.* (2022), "Toward classification-based sustainable revitalisation: Assessing the vitality of traditional villages", *Land Use Policy*, Vol. 116. Available at: https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106060.

Liu, Y. *et al.* (2024), "A study on identifying the spatial characteristic factors of traditional streets based on visitor perception: Yuanjia Village, Shaanxi Province", *Buildings*, Vol. 14, n. 6. Available at: https://doi.org/10.3390/buildings14061815.

Lowenthal, D. (1998), *The heritage crusade and the spoils of history*, Cambridge University Press, Cambridge.

Park, E., Choi, B.K. and Lee T.J. (2019), "The role and dimensions of authenticity in heritage tourism", *Tourism Management*, Vol. 74, pp. 99-109. Available at: https://doi.org/10.1016/j.tourman.2019.03.001.

Qian, J., He, S., Liu, L. (2013), "Aestheticisation, rent-seeking, and rural gentrification amidst China's rapid urbanisation: The case of Xiaozhou village, Guangzhou", *Journal of Rural Studies*, Vol. 32, pp. 331-345. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2013.08.002.

Shepherd, R.J., & Yu, L. (2013), *Heritage Management, Tourism, and Governance in China. Managing the Past to Serve the Present*, Springer, New York.

Smith, L. (2006), *Uses of heritage*, Routledge, London.

Su, X. (2011), *Heritage production and tourism in China*, Springer, Berlin.

Xi, J. (2017), *Secure a decisive victory in building a moderately prosperous society in all respects and strive for the great success of socialism with Chinese characteristics for a new era: Report to the 19th National Congress of the Communist Party of China*. Xinhua News Agency, Beijing. Available *at:* https://www.xinhuanet.com/english/download/Xi_Jinping%27s_report_at_19th_CPC_

National_Congress.pdf (Accessed: 07/07/2025).

Xie, K., Zhang, Y. and Han, W. (2024), "Architectural heritage preservation for rural revitalisation: Typical case of traditional village retrofitting in China", *Sustainability*, Vol. 16, n. 2. Available at: https://doi.org/10.3390/su16020681.

Zeng, H. (2022), "Analysis on the sustainable development of rural tourism in Yuanjia Village of Shaanxi Province under the Rural Revitalisation Strategy", *International Journal of Frontiers in Sociology*, Vol. 4, n. 9, pp. 104-108. Available at: https://doi.org/10.25236/IJFS.2022.040916.

Zhou, R., Zhong, L. and Liu, J. (2015), "Research on rural world heritage sites: Connotation and tourism utilization", *Geographical Research*, Vol. 34, n. 5, pp. 991-1000. Available at: https://doi.org/10.11821/dlyj201505017.

munity, and the market, and of continuously redefining itself through these relationships.

NOTE

[1] The documents are available in English at the following website: http://www.jgs.gov.cn.

Strumenti digitali *knowledge-based* per un approccio proattivo alla gestione del rischio climatico nel progetto urbano

Martina Di Palma, https://orcid.org/0000-0002-8094-2158 martina.dipalma@unina.it
Marina Rigillo, https://orcid.org/0000-0003-4865-0961 mrigillo@unina.it
Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II, Italia

Abstract. La ricerca affronta la gestione del rischio climatico nel progetto urbano, con un focus sui sistemi informativi digitali *knowledge-based*. Questi tool sono analizzati per il loro impatto sulla decisione progettuale, in quanto strumenti di conoscenza atti ad integrare, già in fase meta-progettuale, le strategie di mitigazione e adattamento della città rispetto al rischio climatico in una logica proattiva e *site-specific*. Attraverso il metodo di *scoping review*, il paper seleziona venti tool informativi già presenti in letteratura e li confronta secondo i criteri di interoperabilità, accessibilità e usabilità come definiti dalle norme ISO. Il confronto consente di valutare le funzionalità dei tool informativi nelle fasi di conoscenza, mappatura e monitoraggio proprie del progetto ambientale.

Parole chiave: Approccio proattivo; Approcci *knowledge-based*; Tecnologie informative; Rischio climatico; Sistemi di supporto decisionale.

Introduzione

Il rischio climatico è responsabile di danni significativi all'ambiente costruito e agli ecosistemi (IPCC, 2022; UNDRR, 2009), veicolando la condizione di multirischio come elemento di permanenza nella ricerca di risposte progettuali per il benessere e la sicurezza della città contemporanea. In questo scenario, la Strategia di Adattamento Climatico della Commissione Europea (CE, 2021) recepisce la condizione di complessità insita nei processi di gestione del rischio ed orienta le proprie politiche verso azioni per la riduzione della vulnerabilità e per il potenziamento della capacità di *preparedness* al cambiamento climatico. Tale approccio veicola una visione integrata e sistemica della progettazione e del territorio, e definisce un'innovazione di tipo metodologico perché unisce la domanda di resilienza dell'ambiente fisico all'investimento in innovazione tecnologica e sociale. La Commissione Europea spinge, così, per accelerare il compimento dei propri obiettivi di adattamento climatico attraverso un approccio proattivo e fortemente pragmatico, focalizzato sull'utilizzo di tool digitali e sullo sviluppo di soluzioni low-cost e low-tech (EC, 2022).

Tra queste, le *Nature-Based Solutions* (NbS) hanno acquisito una crescente rilevanza nel campo della progettazione ambientale. La loro introduzione nel novero delle possibili soluzioni per l'intervento ambientale sancisce infatti l'acquisizione del concetto di servizio ecosistemico (ES) nella cultura tecnologica del progetto, veicolando la sperimentazione di approcci progettuali finalizzati ad integrare i cicli biologici in un set di prestazioni per l'abitare. Ciò determina la necessità, da parte dei progettisti, di interloquire con altri ambiti disciplinari per gestire le informazioni per il progetto sia nelle fasi preliminari, sia nella validazione di processi decisionali, sia nelle fasi ex post di monitoraggio e gestione.

Su questa linea, studi recenti (Mussinelli *et al.*,2021, Losasso *et al.*, 2020) hanno evidenziato la necessità di sperimentare metodi progettuali che uniscano modelli quantitativi e conoscenze consolidate, adoperando le tecnologie digitali per integrare la conoscenza delle dinamiche evolutive tipiche dei materiali naturali con le prassi del progetto ambientale. Una prospettiva preconizzata da Romano Del Nord, che teorizzò l'informazione quale strumento ordinatore del progetto, facendone l'elemento chiave di un processo cognitivo per l'organizzazione del molteplice, significativo delle configurazioni materiali e simboliche che caratterizzano il nostro rapporto con l'ambiente (Bologna and Torricelli, 2021).

La standardizzazione dei processi digitali nelle prassi del progetto descrive, oggi, l'emergere di nuovi modelli cognitivi fon-

Digital knowledge-based tools for a proactive approach to climate-risk management in urban design

Abstract. This research addresses climate-risk management in urban design with a focus on knowledge-based digital information systems. These tools are examined for their impact on design decision making as means of knowledge that enable designers to integrate mitigation and adaptation strategies already in early meta-design phases, adopting a proactive and site-specific approach. Through a scoping review, the paper selects twenty information tools documented in the literature and compares them according to the criteria of interoperability, accessibility, and usability as defined by ISO standards. The comparative assessment of the tools makes it possible to evaluate their functional contribution to the phases of knowledge production, mapping, and monitoring that characterise environmental urban design.

Keywords: Proactive approach; Knowledge-based approaches; Information technologies; Climate Risk; Decision-Support Systems.

Introduction

Climate risk causes significant damage to the built environment and ecosystems (IPCC, 2022; UNDRR, 2009), shaping multi risk conditions as a persistent factor in the search for design responses that support the well-being and safety of contemporary cities. In this context, the European Commission's Climate Adaptation Strategy (EC, 2021) acknowledges the inherent complexity of risk management processes and orients European policies toward actions aimed at reducing vulnerability and strengthening preparedness to climate change. This approach promotes an integrated and systemic vision of design and territorial processes, introducing a methodological innovation that aligns the resilience requirements of the physical environment with investment in technological and social innovation. The European Commission thus encourages an acceleration of adaptation objectives through a proactive and pragmatic framework centred on the use of digital tools and on the development of low-cost, low-tech solutions (EC, 2022).

Within this landscape, Nature-Based Solutions (NbS) have gained increasing relevance in environmental design. Their integration within the spectrum of possible interventions formalises the adoption of the ecosystem-services concept within the technological culture of design, fostering experimentation with approaches aimed at integrating biological cycles into performance frameworks for inhabitation. This generates the need for designers to collaborate with other disciplines

ISSN online: 2239-0243 | © 2025 Author(s) | http://www.fupress.com/techne | DOI: 10.36253/techne-18695
Open access, peer-reviewed article published by Firenze University Press (https://www.fupress.com) and distributed, except where otherwise noted, under the terms of the CC BY 4.0 License for content and CC0 1.0 Universal for metadata

dati su una logica ricorsiva e generativa, in cui il sistema decisionale si configura come un ambiente informativo condiviso, un ecosistema della conoscenza in cui i dati e i modelli si arricchiscono reciprocamente. Il progetto ambientale supera così gli approcci empirici tradizionali per rispondere in maniera strategica e informata alla complessità dei sistemi urbani e delle sfide climatiche contemporanee, ripensandone gli obiettivi e le priorità di sviluppo.

A partire dallo scenario delineato, la ricerca che qui si presenta è stata realizzata nell'ambito del progetto *Marie Curie – Transition with Resilience for Evolutionary Development* – TREND (g.a. 823952) in cui sono stati affrontati i temi dell'introduzione delle NbS nei processi decisionali territoriali.

Il presente articolo si focalizza sulla relazione tra conoscenza informata e decisione progettuale per il progetto di riduzione del rischio climatico in area urbana, estendendo ai tool digitali il concetto di tecnologia appropriata, proprio della disciplina (Gangemi, 1991). Il principio di appropriatezza è qui inteso come discriminante per valutare in modo analitico la qualità delle performance offerte dai tool selezionati nel descrivere, mappare e modellare i servizi ecosistemici erogati dalle aree verdi urbane, operando in una logica *site-specific* e "regolativa" (Ciribini, 1990). I tool informativi definiscono infatti lo scenario cognitivo e operativo contemporaneo, offrendo la possibilità di tenere insieme le condizioni fisico-spaziali del progetto e le specifiche esigenze di prestazioni ambientali individuate. In questa direzione, il concetto di tecnologia appropriata consente di definire soluzioni tecniche specificamente tarate per adattarsi alle condizioni locali di rischio, valorizzare le risorse disponibili e assicurare efficienza del progetto di adattamento climatico, evitando l'imposizione di modelli estranei alla natura e alla storia del luogo.

Lo studio individua, attraverso il metodo della *scoping review*, venti tool consolidati in letteratura e li sistematizza alla luce dei requisiti di usabilità, qualità del sistema e interoperabilità, assumendo come quadro di riferimento gli standard UNI/ISO e i principi di IT compliance basati su norme internazionali per la qualità del *software* e dei dati. Ne deriva un criterio di schedatura basato sull'analisi comparativa, finalizzato a mettere in evidenza la specificità con cui i diversi tool supportano le azioni conoscitive e progettuali per la gestione del rischio climatico. Nella tabella di sintesi dei risultati, ciascun tool è descritto attraverso una sintesi anagrafica essenziale e nelle sue caratteristiche spaziali, metodologiche e operative.

L'analisi comparativa dei tool individuati guida la discussione dei risultati, tra cui si evidenzia l'esistenza di una sorta di invariante strutturale, comune a tutti i tool analizzati, riferibile alla capacità di simulare i processi ambientali e di riferirli correttamente alla specificità del progetto a scala territoriale e urbana. Tale risultato conferma la completa acquisizione di tali strumenti nelle discipline del progetto e sostiene vieppiù il loro utilizzo e sviluppo per il progetto ambientale orientato alla gestione del rischio climatico.

Metodologia

Lo studio vuole verificare l'efficacia dei tool informativi digitali *knowledge-based* e *model-based* nel supporto ai processi decisionali per il progetto ambientale in ambito urbano. Intende inoltre valutare se l'utilizzo di tool informativi basati su tali approcci consenta di produrre filiere decisionali informate,

to manage information for the project during preliminary phases, for validating decision-making processes, and in ex-post monitoring and management.

Recent studies (Mussinelli *et al.*, 2021; Losasso *et al.*, 2020) highlight the need to experiment with design methods that combine quantitative models and consolidated knowledge, using digital technologies to integrate understanding of the evolutionary dynamics of natural materials with the practices of environmental design. A perspective anticipated by Romano Del Nord, who viewed "information" as the organising tool of design: a cognitive process for structuring multiplicity and attributing meaning to the material and symbolic configurations that define our relationship with the environment (Bologna and Torricelli, 2021).

The standardisation of digital processes within design practices reveals the emergence of new cognitive models grounded in recursive and generative logic, in which the decision-support environment operates as a shared informational ecosystem. Within this knowledge ecosystem, data and models mutually reinforce one another. Environmental design thus moves beyond traditional empirical approaches to respond in a strategic and targeted manner to the complexity of urban systems and contemporary climate challenges, rethinking objectives and development priorities. Within this framework, the research presented here was conducted as part of the Marie Curie project *Transition with Resilience for Evolutionary Development – TREND* (g.a. 823952) which investigated the integration of NbS into territorial decision-making. This article focuses specifically on the characteristics of urban design and on climate risk as a primary driver of urban investment. The study addresses the relationship between informed knowledge and design decisions, extending to digital tools the notion of appropriate technology typical of the discipline (Gangemi, 1991). Here, appropriateness represents an analytical criterion for evaluating the quality of the performance provided by selected digital tools in describing, mapping, and modelling ecosystem services delivered by urban green areas, operating in a site-specific and "regulative" logic (Ciribini, 1990). Information tools constitute the current cognitive and operational landscape, enabling designers to relate physical–spatial project conditions with specific environmental-performance requirements. Within this direction, the concept of appropriate technology supports the identification of technical solutions tailored to local risk conditions, enhancing available resources and ensuring the efficiency of climate-adaptation design, avoiding the imposition of models disconnected from the nature and history of place.

Through a scoping-review method, the study identifies twenty tools consolidated in the literature and systematises them through usability, system-quality and interoperability requirements, employing UNI standards and rules of IT compliance. The research proposes a cataloguing framework based on comparative analysis to understand the specificity of different digital tools in supporting knowledge and design actions for climate-risk reduction. In the summary table of results, each tool is presented with essential metadata and spatial, methodological, and operational features.

The comparative analysis highlights an invariant structural feature shared

adattive e contestualizzate rispetto alla specificità del sito e agli obiettivi di progetto (Ochoa and Urbina, 2017).

La metodologia della ricerca è organizzata in quattro fasi (Fig. 1):
- Fase 1: *Scoping Review*, finalizzata a perimetrare il campo d'indagine.
- Fase 2: Analisi Comparativa, finalizzata a definire i criteri per una descrizione standardizzata dei tool selezionati, uniformandoli in termini di caratteristiche funzionali attraverso un framework analitico.
- Fase 3: Selezione dei requisiti informativi specifici, già validati dalla comunità scientifica, funzionali al riconoscimento del tool nelle sue funzioni di supporto al progetto.
- Fase 4: Verifica di compliance funzionale per verificare la rispondenza agli standard informativi internazionali dei tool selezionati e la rispondenza operativa degli stessi alla specificità del progetto.

La ricerca utilizza le norme UNI-ISO 9241, UNI-CEI-ISO 25010, ISO 19100 per definire i criteri di comparazione dei tool informativi, valutandoli come requisiti funzionali coerenti con gli *standard* internazionali di qualità e interoperabilità.

Fase 1: Scoping review

La *scoping review* è finalizzata a restituire lo stato dell'arte della ricerca scientifica rispetto all'utilizzo dei tool digitali per la mappatura e la valutazione dei servizi ecosistemici, con particolare attenzione al loro contributo nella prevenzione e gestione dei rischi climatici attraverso la progettazione delle NbS. La scelta del metodo è motivata dalla necessità di indagare un campo di studi in rapida evoluzione e molto eterogeneo, in cui coesistono strumenti informativi generati in ambiti disciplinari differenti e spesso privi di una sistematizzazione consolidata (Arksey and O'Malley, 2005).

La *scoping review* lavora attraverso un *funnel process*, organizzato in tre fasi (Fig. 2):
1. Ricognizione estensiva della letteratura (*WHAT*).
2. Contestualizzazione dei risultati, con un focus tematico relativo agli approcci metodologici effettivamente orientati all'operazionalizzazione[1] dei servizi ecosistemici in procedure di *assessment*, *accounting*, *monitoring* and *mapping* (*HOW*),
3. Selezione di articoli di ricerca aventi ad oggetto l'analisi di tool informativi già sperimentati nell'ambito della pianificazione urbana, dei progetti di adattamento climatico e delle strategie meta-progettuali di resilienza climatica (*WHY*).

Le stringhe sono state formulate combinando catene di termini chiave e sono stati utilizzati operatori booleani per garantire un bilanciamento tra sensibilità, in termini di ampiezza della ricerca, e specificità, in termini di pertinenza dei risultati.

Fase 2: Analisi comparativa

Questa fase prevede la comparazione qualitativa dei *tool* digitali selezionati nella Fase 1. Lo studio adotta l'approccio di Wrisberg, De Haes e Triebswetter (2002) poiché specificamente ideato per le esigenze della progettazione ambientale.

across the tools: the ability to simulate environmental processes and relate them correctly to the specificity of design at territorial and urban scales. This result confirms the complete acquisition of these tools in the project disciplines and further supports their use and development for the environmental project focused on climate risk management.

Methodology

The study aims to verify the effectiveness of knowledge-based and model-based digital information tools in supporting decision-making processes for urban environmental projects. It also aims to assess whether the use of information tools based on these approaches allows for the creation of informed, adaptive, and contextualized decision-making chains with respect to the specific characteristics of the site and the project objectives (Ochoa and Urbina, 2017).

The methodology is structured into four phases (Fig. 1):
- Phase 1: Scoping Review. Aimed at defining the scope of the investigation.
- Phase 2: Comparative Analysis. Aimed at defining the criteria for the descriptive standardization of the selected tools, standardizing them in terms of characteristics and objectives through an analytical framework.
- Phase 3: Selection of specific information requirements, already validated by the scientific community, functional to the recognition of the tool in its project support functions.
- Phase 4: Compliance verification. Assessment of tools according to international information standards and evaluation of their operational suitability for climate-oriented urban design.

The study employs UNI-ISO 9241, UNI-CEI-ISO 25010, and ISO 19100 standards as references for comparative evaluation, considering them as functional requirements aligned with international criteria on quality and interoperability.

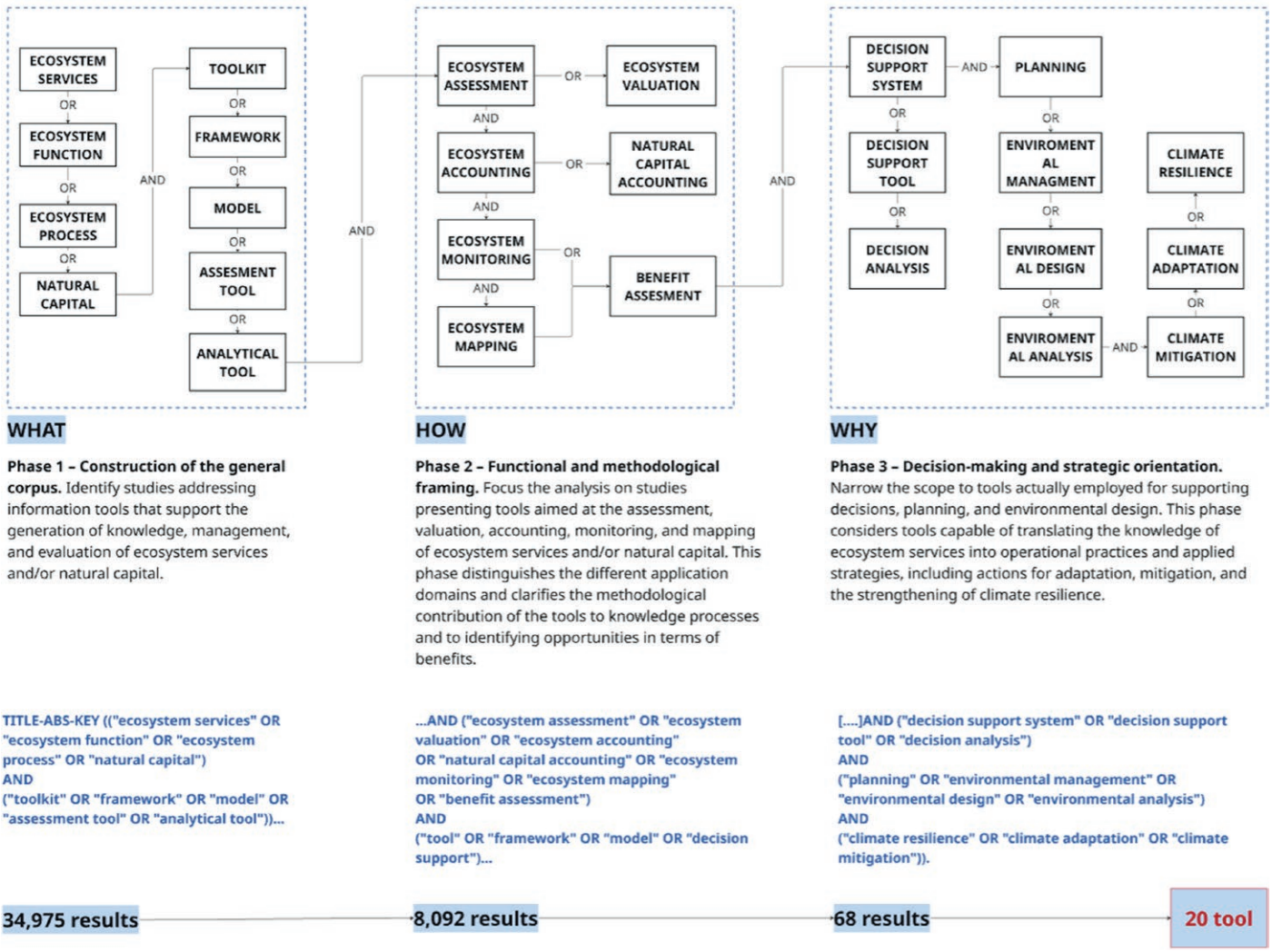
Phase 1: Scoping review

The scoping review analyses the scientific literature on digital tools for mapping and evaluating ecosystem services, with particular attention to their contribution to preventing and managing climate risks. The method responds to the need to explore a rapidly evolving and heterogeneous research field where information tools arise from diverse disciplinary domains and often lack consolidated systematisation (Arksey and O'Malley, 2005).

The scoping review follows a funnel process structured into three stages (Fig. 2):
1. Extensive literature reconnaissance (WHAT).
2. Thematic contextualisation, focusing on methodological approaches oriented to the operationalization[1] of ecosystem services in assessment, accounting, monitoring, and mapping (HOW).
3. Selection of research articles analysing information tools already applied in urban planning, climate-adaptation projects, and meta-design strategies of climate resilience (WHY).

Search strings were formulated through combinations of key terms and Boolean operators to balance sensitivity and specificity.

01 | Schema riassuntivo del percorso metodologico della scoping review in tre fasi
Summary diagram of the three-phase scoping-review methodological pathway



Phase 2: Comparative analysis
This phase involves the qualitative comparison of the digital tools selected in Phase 1. The study adopts the approach developed by Wrisberg, De Haes and Triebswetter (2002), as it is specifically conceived for the needs of environmental design.
The comparison fields were defined on the basis of an essential set of attributes (fields 1-4) and additional fields related to the functioning of the tool (Tab. 1):
- year of development and updates, used to measure the maturity and the evolutionary continuity of the tool;
- type of information system, distinguishing between dedicated software, biophysical models, methodological frameworks and operational toolkits;
- intellectual property of the tool;
- application domain, with reference to the main areas of use such as spatial planning, natural resource management, environmental accounting or NbS assessment;
- key indicators produced, related to the metrics returned by the tools;
- scenario or modelling approach, including what-if analyses, dynamic simulations, comparative assessments and optimisation procedures;
- specificity of the tool with respect to different types of climate risk;
- applicability at the urban scale;
- essential bibliographic references.

Phase 3: Selection of information requirements
The identification of specific information requirements is aimed at defining a minimum set of criteria for verifying the compliance of the tools. The analysis uses UNI-ISO standards as the essential reference, as they provide an institutionally recognised framework in terms of methodological robustness and comparability of outcomes.
Tab. 02 indicates the descriptive criteria used to select the information requirements derived from the analysis of the standards:
- UNI EN ISO 9241-11:2018 - *Ergonomics of human-system interaction*;
- UNI CEI ISO/IEC 25010:2023 - *System and Software Quality Models;*
- ISO 19100 - *Geographic Information Standards*

For each requirement, the definition provided in the standard, the application scope and the descriptive subcategories functional to the characterisation of usability, system quality and interoperability were reported.

Phase 4: Compliance verification
The compliance assessment was structured on two complementary levels.
The first level concerns the verification of adherence to international information standards and the alignment of tools with the main normative references on usability (UNI EN ISO 9241-11:2018), system quality (UNI CEI ISO/IEC 25010:2023) and interoperability (ISO 19100 family), with their respective operational subcategories: effectiveness, efficiency and user satisfaction; functional suitability, reliability, maintainability and portability; metadata quality, presence of OGC services, information traceability and semantic consistency. Based on technical documentation, supported formats, degree of standardization and methodological transparency, each tool was assigned a synthetic score on an ordinal scale from 1 to 5 (Tab. 3).

I campi di comparazione sono stati definiti in base ad una anagrafica essenziale (campi 1-4) e ad altri campi (5-9) relativi al funzionamento del tool (Tab. 1):

1. anno di sviluppo e aggiornamenti, utilizzati per misurare la maturità e la continuità evolutiva dello strumento;
2. tipologia di sistema informativo, distinguendo tra software dedicati, modelli biofisici, *framework* metodologici e *toolkit* operativi;
3. proprietà intellettuale del tool;
4. dominio di applicazione, con riferimento ai principali ambiti d'uso quali pianificazione territoriale, gestione delle risorse naturali, contabilità ambientale o valutazione delle NBS;
5. indicatori chiave elaborati, relativi alle metriche restituite dai tool;
6. approccio di scenario o modellazione, comprendendo analisi *what-if*, simulazioni dinamiche, valutazioni comparative e procedure di ottimizzazione;
7. specificità del tool rispetto alle diverse tipologie di rischio climatico;
8. applicabilità alla scala urbana;
9. riferimenti bibliografici essenziali.

Fase 3: Selezione dei requisiti informativi

L'individuazione di specifici requisiti informativi è finalizzata alla definizione di un set minimo di criteri per verificare la compliance dei tool. La ricerca utilizza come riferimento essenziale le norme UNI-ISO in quanto definiscono un quadro istituzionalmente riconosciuto in termini di solidità metodologica e confrontabilità degli esiti.

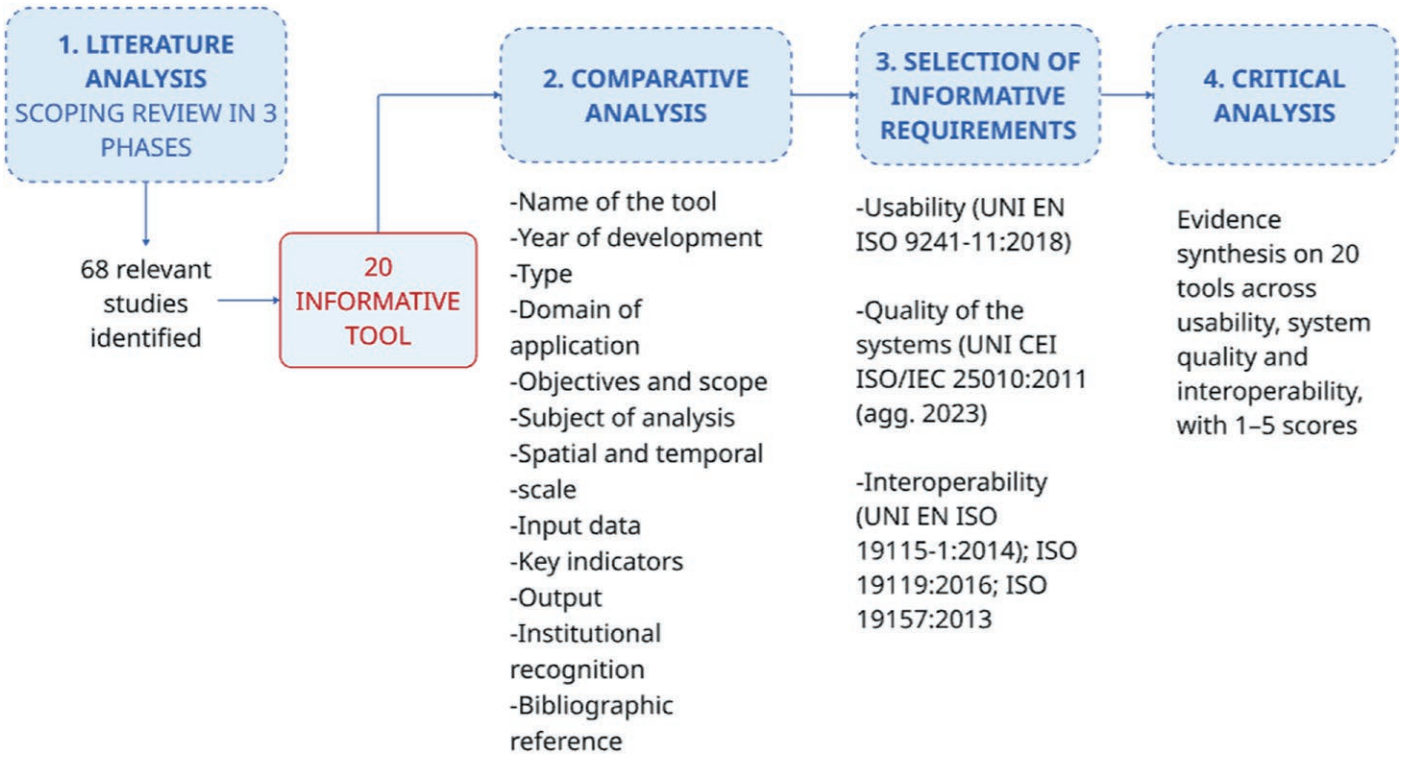
La Tabella 2 indica i criteri di descrizione utilizzati per selezionare i requisiti informativi derivanti dall'analisi delle norme:

- UNI EN ISO 9241-11:2018 - *Ergonomics of human-system interaction*;
- UNI CEI ISO/IEC 25010:2023 - *System and Software Quality Models.*
- ISO 19100 - *Geographic Information Standards*

Per ognuno dei requisiti individuati è stata riportata la definizione contenuta nella norma, l'ambito di applicazione e le sottocategorie descrittive funzionali alla caratterizzazione dei requisiti in termini di usabilità, qualità del sistema e interoperabilità.

Fase 4: Verifica di compliance

La verifica di *compliance* è stata strutturata in due livelli complementari.



Tab. 01 | La tabella comparativa riporta i tool informativi identificati attraverso una scoping review in tre fasi, organizzati mediante campi omogenei; l'insieme deriva dall'analisi di 34.975 contributi, da cui sono stati selezionati 68 studi pertinenti e individuati 20 tool digitali

Comparative analysis of the information tools emerging from literature

Tab. 01 |

Tool	Year (first release; updates)	Type	Application domain	Objectives and scope	Object of analysis	Scale (spatial; temporal)	Input data	Key indicators	Output	Institutional recognition	Reference
InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs)	2006; continuously updated	Suite of open-source GIS models	Natural resource management; land-use planning (terrestrial, freshwater, marine)	Quantifies and maps multiple ecosystem services for current and future scenarios to inform decisions	Supply and (optionally) economic value of services (e.g., carbon, water, pollination)	Spatial: local–national; Temporal: comparative scenarios (non-dynamic)	Land use/land cover, biophysical layers, tabular parameters	Biophysical provision per service; optional monetary valuation	Thematic maps, quantitative metrics, reports	Natural Capital Project; widely adopted in policy and research	Sharp et al. (2014), InVEST User Guide.
ARIES (Artificial Intelligence for Environment & Sustainability)	2007; major releases 2009, 2014; updates	AI-based modeling framework (k.LAB)	Ecosystem services assessment; natural capital accounting; policy analysis	Dynamically models service flows (supply–use–benefit) and multiscale scenarios	Service flow networks linking ecosystems and beneficiaries	Spatial: regional–global; Temporal: dynamic, time-step modelling	Geospatial data; integrated databases via k.LAB; defaults available	Service-specific metrics (e.g., t CO_2, m^3 regulated water) and flow measures	Maps of supply, use and flows; trade-off analyses	Developed by Univ. Vermont & BC3; adopted in UN SEEA; referenced by IUCN	Villa et al. (2014), ARIES methodology and applications.
i-Tree Eco	~2006; continuously updated	Stand-alone software (urban forest assessment)	Urban forestry; urban green infrastructure planning	Quantifies urban forest structure and environmental services/values	Urban trees and associated ecosystem services	Spatial: site–city; Temporal: periodic snapshots (repeatable)	Field inventory (plots or census); meteorological and air-quality data; optional GIS	Pollutant removal, stormwater avoided, carbon storage/sequestration; monetary values	Detailed statistical reports and benefit valuation	USDA Forest Service; municipal standard internationally	Nowak et al. (2008), UFORE/i-Tree Eco documentation.
Co$ting Nature	2009; v2 2012; v3 2017	Web-based policy support system	Natural capital accounting; scenario/policy analysis	Assesses 18 services, human pressures and future threats; evaluates land-use/climate scenarios	Natural ecosystems, ES capacity and beneficiaries	Spatial: global (1 km/1 ha) with regional zoom; Temporal: comparative scenarios	Global GIS datasets; optional local data; scenario inputs	Relative indices (0–1) for ES; conservation priority; threat/risk indices	Interactive maps, statistical summaries, rankings	King's College London & AmbioTeK; included in IUCN recommended tools	Mulligan et al. (2015; 2020), Co$ting Nature documentation.
TESSA (Toolkit for Ecosystem Service Site-based Assessment)	2013; updates	Methodological toolkit (guided worksheets)	Site-scale ES assessment; conservation planning	Guides step-by-step assessment comparing current vs. alternative site states	ES provided by a site and its beneficiaries	Spatial: local (site/protected area); Temporal: comparative (non-dynamic)	Field data, stakeholder inputs/interviews, simple maps	Qualitative/quantitative indicators per service and scenario	Completed worksheets, comparison tables, concise valuation summaries	BirdLife Int., Univ. of Cambridge, RSPB; widely used in conservation	Peh et al. (2013), Ecosystem Services.
OPAL (Offset Portfolio Analyzer & Locator)	2015; 2016	Open-source GIS tool	Biodiversity offsets; impact assessment	Designs portfolios of offset sites to compensate biodiversity and ES losses for affected communities	Project footprints and candidate offset areas	Spatial: project landscape; Temporal: static scenario comparison	Land cover/habitat, hydrology/water quality, community/beneficiary data	Impact and offset benefit metrics (e.g., habitat loss/gain; sediment/nutrient change)	Priority maps; portfolio comparisons; summary tables	Natural Capital Project & The Nature Conservancy; referenced by IFC PS6	Mandle et al. (2016), Environmental Modelling & Software.
LUCI / Nature Braid (Land Utilisation & Capability Indicator)	~2013; updates	High-resolution GIS modelling tool	Land and catchment management; spatial planning	Identifies "opportunity areas" to improve ES and reduce trade-offs	Hydrological regulation, erosion control, carbon, agricultural outputs	Spatial: catchment–regional (5–10 m feasible); Temporal: comparative (non-dynamic)	DEM, land cover, soils, rainfall; local calibration parameters	Service-specific potential/regulation indices (flood, erosion, etc.)	Heatmaps of priorities; change metrics for interventions	Developed in UK/NZ; cited in UK ENCA resources	Jackson et al. (2013), LUCI/Polyscape methodology.
MIMES (Multiscale Integrated Model of Ecosystem Services)	~2010; published 2015; updates	Spatially explicit dynamic systems platform	Coupled socio-ecological dynamics; policy scenarios	Simulates linkages between ecosystems and the economy across scales	Socio-ecological systems (stocks, flows, sectors)	Spatial: local–global; Temporal: dynamic (daily–annual steps)	Environmental GIS, time series (drivers), economic data; stakeholder scenarios	Natural capital stocks, ES flows, economic indicators	Time-series maps/graphs; alternative futures comparisons	Recognized by IUCN (advanced ES model)	Boumans et al. (2015), Ecosystem Services.
SolVES (Social Values for Ecosystem Services)	2010; v3 2017	GIS application (ArcGIS/stand-alone)	Cultural ecosystem services mapping	Quantifies and maps perceived social values using public survey/PGIS data	Stakeholder-expressed cultural values and landscape correlates	Spatial: local–regional; Temporal: snapshot (repeatable)	Participatory value points/zones; land cover; accessibility/other covariates	Social Value Index by value type (e.g., scenic, recreation)	Value-intensity maps; correlation/summary tables	USGS; recommended for cultural ES assessments	Sherrouse et al. (2011; 2017), SolVES documentation.
EcoMetrix (Functional Assessment for ES)	~2013; updates	Proprietary decision-support software/service	Project-level ES impact assessment	Uses functional scoring to evaluate ES performance and scenario change	Landscape units/functions (~15–20 services)	Spatial: project/local landscape; Temporal: static comparison	Site data (habitat, hydrology, species), land cover, measured attributes	Performance scores (0–1) per function; gain/loss by scenario	Scorecards, heatmaps, explanatory reports	Used in U.S. mitigation and corporate projects; cited in national toolkits	EcoMetrix Solutions Group (2013), Method overview.
Envision	2007; updates	Agent-based platform with integrated GIS	Alternative futures; integrated landscape assessment	Simulates landscape change from biophysical processes and actor/policy decisions	Coupled human–natural systems (urban, forest, basins)	Spatial: regional (parcel/30 m feasible); Temporal: dynamic (annual–decadal)	Land use/ownership, process model parameters, actor/policy rules, scenarios	Land-cover change, biodiversity indices, hydrology, wildfire risk, ES, socio-economic metrics	Time-step maps, indicator trajectories, scenario comparisons	Extensive academic use; reference for adaptation planning	Bolte et al. (2007); Hulse et al. (2009).
ESTIMAP (Ecosystem Services Mapping Tool)	2014; updates	Modular GIS model collection (JRC)	Policy-oriented ES mapping (EU-wide to local)	Produces harmonized ES capacity/supply maps by service	Service-specific capacity/supply (e.g., recreation, pollination, cooling)	Spatial: EU (1 km) to municipal (10–100 m); Temporal: static (scenario by recomputation)	CORINE/land cover, population density, service-specific layers	Relative/score-based indicators per service	Service maps (potential/supply) for further analysis	European Commission JRC; core to MAES; national uptake	Zulian et al. (2014; 2018).
MESH (Mapping Ecosystem Services to Human well-being)	2019	Integrated toolkit bundling InVEST models	Landscape planning in data-scarce regions; SDGs	Lowers entry barriers; quantifies key services and ES–SDG trade-offs under scenarios	Five core services linked to SDG contributions	Spatial: regional–national; Temporal: static scenario comparison	Preloaded global datasets; optional local refinement; scenario narratives	Biophysical outputs per service; SDG-related indicators	Dashboards, maps, trade-off charts	Developed by Bioversity/CIAT & NatCap; piloted with ministries	Johnson et al. (2019), Ecological Applications.

RIOS (Resource Investment Optimization System)	2013	GIS-based prioritization tool	Watershed management; water funds	Optimizes spatial allocation of conservation/restoration for water services per unit cost	Watershed services (sediment, nutrients, baseflow, flood attenuation)	Spatial: watershed–basin; Temporal: non-dynamic (often paired with hydrologic models)	DEM, soils, land cover, beneficiaries, intervention costs; optional hydrologic outputs	Priority/cost-effectiveness indices and expected benefits	Priority maps; investment portfolios with expected outcomes	Natural Capital Project/The Nature Conservancy; widely applied	Natural Capital Project (2015), Theoretical documentation; Gale et al. (2016).
ROOT (Restoration Opportunities Optimization Tool)	2015; revised 2018	Restoration planning and optimization software	Forest and landscape restoration	Prioritizes restoration sites to maximize co-benefits under constraints	Potential uplift: water quality, connectivity, carbon, social benefits	Spatial: landscape–national; Temporal: static optimization (benefit horizon)	Baseline condition layers (erosion, fragmentation, carbon), social/constraints	Expected benefit metrics per objective; agreement/robustness indices	Priority and agreement maps; benefit summaries	Co-developed with IUCN; used in ROAM processes	Hawthorne et al. (2015); Beatty et al. (2018).
ESR (Ecosystem Services Review)	2008; extended 2011	Methodological framework (review/process)	Corporate/project planning; ES risk/opportunity	Identifies ES dependencies/impacts and develops management strategies	Priority services relevant to enterprise/project	Spatial: org./site; Temporal: operational–strategic horizon	Checklists, interviews, existing evidence/expert input	Qualitative rankings; priority ES and risk/opportunity profiles	Matrices and action-oriented reports	WRI & WBCSD; referenced by IFC Performance Standard 6	Hanson et al. (2008); Landsberg et al. (2011).
RBI (Rapid Benefit Indicators)	2017	Multi-criteria, non-monetary evaluation framework	Ecological restoration; urban GI	Rapidly assesses ES benefits of restoration using standardized indicators	Post-restoration benefits across selected services	Spatial: project/site; Temporal: before–after comparison	Available environmental data; expert judgment under guidance	0–5 (or similar) indicator scores per benefit/service	Radar plots and tables comparing pre/post conditions	U.S. EPA; included in community GI toolkits	Mazzotta et al. (2016); Bousquin et al. (2018).
B£ST (Benefits Estimation Tool)	2015; updates	Excel-based calculator toolkit	Urban GI and SuDS	Estimates multiple benefits (physical and monetary) to build business cases	Urban ES: stormwater, water quality, cooling, air quality, carbon, biodiversity, amenity, health	Spatial: site/project; Temporal: static with present-value analysis	Project descriptors; parameter defaults and local coefficients	Quantified benefits per category and monetized values	Summary spreadsheets and comparative charts	CIRIA; widely used by UK authorities and consultancies	CIRIA (2015), User Guide; Ellis et al. (2016).
GI-Val (Green Infrastructure Valuation Toolkit)	2010	Calculator toolkit (Excel + guidance)	Local green infrastructure projects	Provides rapid economic estimates of GI benefits using documented coefficients	Recreation, property uplift, health, water management, climate	Spatial: neighbourhood–city; Temporal: static evaluations	Site information; documented valuation coefficients	Monetary estimates per benefit category	Summary tables for cost–benefit analysis	Natural Economy Northwest with partners; early UK reference	eftec & NENW (2010), Toolkit documentation.
NAIS (Natural Assets Information System)	2006	Proprietary DB + modelling system	Regional natural capital accounting	Maps and monetizes ES via benefit-transfer linked to land cover; scenario comparisons	Land-cover-based ES values per unit area	Spatial: regional; Temporal: snapshot with scenario options	Land cover; embedded ES valuation database	Dollar values by service and area; total natural asset value	Value-density maps and summary tables	Developed by Spatial Informatics Group; precursor to later valuation tools	Troy & Wilson (2006), Landscape and Urban Planning.

Il primo livello vuole accertare la rispondenza agli *standard* informativi internazionali e l'aderenza dei tool ai principali riferimenti normativi in materia di usabilità (UNI EN ISO 9241-11:2018), qualità dei sistemi (UNI CEI ISO/IEC 25010:2023) e interoperabilità (famiglia ISO 19100), con le relative sottocategorie operative:

– efficacia, efficienza e soddisfazione d'uso;
– funzionalità, affidabilità, manutenibilità e portabilità;
– qualità dei metadati, presenza di servizi OGC, tracciabilità informativa e coerenza semantica.

Sulla base della documentazione tecnica, dei formati supportati, del grado di standardizzazione e della trasparenza metodologica, a ogni tool è stato attribuito un punteggio sintetico su scala ordinale da 1 a 5 come riportato nella Tab. 3. Successivamente i tool sono stati inseriti in una matrice di valutazione che ne evidenzia convergenze, differenze e lacune rispetto alla compliance informativa (Tab. 4).

Il secondo livello di verifica è finalizzato alla compliance operativa, strutturata traducendo i requisiti informativi ricavati dagli standard su usabilità, qualità dei sistemi e interoperabilità per

The tools were subsequently inserted into an evaluation matrix highlighting convergences, differences and gaps with respect to information compliance (Tab. 4).

The second level of assessment concerns operational compliance, obtained by translating the information requirements derived from the standards for usability, system quality and interoperability into operational conditions specific to the use of the tools in urban climate adaptation projects (Tab. 05).

The matrix operates across five operational dimensions:

1. interoperability, understood as integration with open GIS/BIM formats and compliance with OGC standards necessary to ensure data continuity and usability;
2. applied usability, referring to the tool's ability to process climate scenarios based on specific parameters - extreme temperatures, intense precipitation, water stress - through transparent and replicable procedures;
3. system quality, assessed through the use of ecosystem indicators consistent with the MAES framework (EC, 2013);
4. accessibility and transparency, concerning interface readability for users with different competence levels and the traceability of data sources and calculation processes;
5. flexibility and adaptability, meaning the tool's ability to modulate methods and outputs according to intervention scales and specific risk typologies, supporting site- and hazard-specific approaches.

Finally, the five identified requirements were specified into a set of ten essential performance criteria through which to verify the appropriateness of digital tools in relation to the operational needs of decision-making processes typical of urban design:

– ability to operate across multiple scales;
– modelling capacity;
– development of design scenarios;
– accessibility for non-expert users;
– availability of open data;
– interoperability with GIS/BIM environments and dedicated plug-ins;
– type of outputs produced (models, drawings, graphs, tables);
– presence of outputs specific to climate vulnerability;
– presence of outputs related to ecosystem services.

The performance assessment (Tab. 5) was carried out using synthetic judgements (yes, no, partly).

Tab. 05 verifies the extent to which the three evaluation domains -usability, interoperability and system quality- are effectively applied within the operational conditions of urban design. The integrated analysis of the two tables (Tabs. 4, 5) allows the identification of tools that are coherent both with international standards and with the specific requirements of climate adaptation in urban contexts.

Results

Phase 1: Scoping review

The scoping review selected contributions published in peer-reviewed journals and in technical reports of international organisations (Fig. 2). Purely conceptual contributions, non-replicable proprietary tools, publications without reference to natural capital or climate risk, and tools with a limited application domain were excluded,

Tab. 02 | Requisiti informativi selezionati da norme UNI
Information requirements selected from UNI standards

Tab. 03 | Criteri di valutazione per la definizione dei punteggi dei tool sulla base dei requisiti individuati
Evaluation criteria for defining tool scores based on the identified requirements

l'impiego dei tool nel progetto urbano orientato all'adattamento climatico in condizioni operative specifiche (Tab. 5).

La matrice lavora su cinque dimensioni funzionali:
1. interoperabilità, intesa come integrazione con formati GIS/BIM aperti e conformità agli standard OGC, necessari a garantire continuità e uso dei dati;
2. usabilità applicata, riferita alla capacità del software di elaborare scenari climatici basati su parametri specifici – temperature estreme, precipitazioni intense, stress idrico – attraverso procedure trasparenti e replicabili;
3. qualità dei sistemi, valutata tramite l'impiego di indicatori ecosistemici coerenti con il quadro MAES (CE, 2013);
4. accessibilità e trasparenza, riguardanti la leggibilità delle interfacce per utenti con diversi livelli di competenza e la tracciabilità delle fonti e dei processi di calcolo;
5. flessibilità e adattabilità, ossia la capacità del tool di modulare metodi e output in relazione alle scale di intervento e alle specifiche tipologie di rischio, così da supportare approcci *site-* e *hazard-specific*.

Infine, le cinque dimensioni funzionali sono state specializzate in dieci prestazioni essenziali attraverso cui verificare l'appropriatezza dei tool digitali rispetto all'operatività dei processi decisionali tipici del progetto urbano:
- capacità di operare su più scale;
- capacità di modellare;
- sviluppo di scenari progettuali;
- accessibilità per utenti non esperti;
- disponibilità di dati *open*;
- interoperabilità con ambienti GIS/BIM e *plug-in* dedicati;

Tab. 02 |

Requirement	Reference Standard	Definition	Application Scope	Operational Subcategories
Usability	UNI EN ISO 9241-11:2018 – *Ergonomics of human–system interaction – Part 11: Usability – Definitions and concepts*	Usability is the extent to which a system can be used by specified users to achieve specified goals with effectiveness, efficiency, and satisfaction within a defined context of use.	Human–system interaction; assessment of software and digital interfaces in defined use contexts	• Effectiveness • Efficiency • Satisfaction • Context of use (users, tasks, environment)
System Quality	UNI CEI ISO/IEC 25010:2011 (rev. 2023) – *Systems and software engineering – System and software quality models*	Defines quality characteristics for software and information systems, distinguishing product quality and quality in use.	Software engineering; comparative assessment of information systems and digital applications	• Functional suitability • Reliability • Usability • Performance efficiency • Maintainability • Portability • Security • Compatibility
Interoperability & Metadata	ISO 19100 family: ISO 19115-1:2014 (metadata); ISO 19119:2016 (services); ISO 19157:2013 (data quality)	Establishes principles for metadata, data quality and interoperability of geographic information, ensuring traceability and compatibility.	Geographic information, GIS, environmental datasets, spatial data infrastructures	• Metadata (description, format, lineage) • Data quality (completeness, accuracy, consistency, resolution) • OGC services (WMS, WFS, WCS)

Tab. 03 |

Requirement	1–Insufficient	2 – Weak	3 – Adequate	4 – Good	5 – Excellent
Usability (ISO 9241-11)	Goals not achieved; confusing screens; tasks take too long; no guidance or feedback; no accessibility features.	Goals achievable only with a lot of effort; inconsistent screens; little documentation; high mental load; low user satisfaction.	Goals achievable with moderate effort; basic manual and a few examples; average learning curve; acceptable error handling; suitable for typical use.	Clear, guided steps and reproducible examples; efficient to use; few errors and easy recovery; high satisfaction in common contexts.	Very effective and efficient for different user types and settings; easy to learn; built-in accessibility and good support resources.
System Quality (ISO/IEC 25010)	Frequent crashes or errors; slow or unstable; no maintenance; poor compatibility; security not addressed.	Stability varies; uneven performance; patchy documentation; maintenance is ad-hoc; limited compatibility; weak security controls.	Functions and performance generally consistent; basic maintainability and portability; essential logs; standard security practices, not formalized.	High reliability; stable and optimized performance; modular design with versioning; good portability and compatibility; structured maintenance and security procedures.	Mature quality process with automated testing; full monitoring and diagnostics; security hardening and vulnerability management; clear architecture; proven scalability; robust security policies.
Interoperability (ISO 191xx)	Uses closed formats; no useful metadata; no standard web map/data services; no data lineage or quality info.	Basic exports but incomplete metadata; key details missing (e.g., coordinate system, scale, time); difficult to integrate.	Standard GIS formats with minimal metadata (title, coordinate system, date); import and export work; standard web services not consistent.	Complete metadata and data-quality information; standard web map/data services available; source and responsibility declared; aligned with relevant public standards.	End-to-end interoperability: standards-compliant catalogs, persistent identifiers, versioning and full traceability, public conformance tests, semantic descriptions, stable machine-to-machine access.

Tab. 04 | Verifica di compliance attraverso il set minimo di requisiti informativi
Critical analysis through the minimum set of information requirements

Tab. 05 | Verifica di compliance delle prestazioni operative orientate al progetto di gestione del rischio climatico
Critical analysis of operational performance related to the climate risk management project

Tool	SDSS type	Interoperability (ISO 191xx)	System quality (ISO/IEC 25010)	Usability (ISO 9241-11)
InVEST	Model-based	3	4	4
ARIES	Hybrid (Model + Data-based)	4	4	3
i-Tree Eco	Hybrid (Data + Model-based)	3	4	4
Co$ting Nature	Hybrid (Model + Data-based)	3	4	4
TESSA	Knowledge-based + Participatory	2	3	4
OPAL	Model-based	3	3	3
LUCI / Nature Braid	Model-based	3	3	3
MIMES	Model-based	3	4	3
SolVES	Hybrid (Data + Knowledge-based)	3	3	3
EcoMetrix	Hybrid (Knowledge + Model-based)	2	3	3
Envision	Model-based	3	4	3
ESTIMAP (JRC)	Model-based	4	4	4
MESH	Hybrid (Model + Data-based)	3	3	4
RIOS	Model-based	3	3	3
ROOT	Model-based (optimization)	3	4	3
ESR	Knowledge-based	2	3	4
RBI	Knowledge-based + Participatory	2	3	4
B£ST	Hybrid (Knowledge + Data-based)	2	3	4
GI-Val	Knowledge-based	2	3	4
NAIS	Hybrid (Data + Knowledge-based)	2	3	3

Tool	Multiscale capacity	Modelling capability	Design scenarios	Accessible to non-experts	Open data	GIS/BIM interoperability	Project outputs	Informative outputs	Climate vulnerability outputs	Ecosystem services outputs
InVEST	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ARIES	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
i-Tree Eco	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Co$ting Nature	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
TESSA	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
OPAL (Offset Portfolio Analyzer)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
LUCI / Nature Braid	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
MIMES	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
SolVES	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
EcoMetrix / ESII	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Envision (scenario platform)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ESTIMAP (JRC)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
MESH	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
RIOS	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ROOT	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ESR (Corporate Ecosystem Services Review)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
RBI (Rapid Benefit Indicators)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
B£ST / BeST (Benefits of SuDS Tool)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
GI-Val	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
NAIS (Natural Assets Information System)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

– tipologia degli *output* prodotti (modelli, disegni, grafici, tabelle);
– presenza di *output* specifici per la vulnerabilità climatica;
– presenza di *output* relativi ai servizi ecosistemici.

La verifica delle prestazioni (Tab. 5) è stata effettuata tramite giudizi sintetici (sì, no, in parte).
La Tab. 5 verifica in che misura i tre ambiti valutativi - usabilità, interoperabilità e qualità dei sistemi - trovino effettiva applicazione nelle condizioni operative del progetto urbano. L'analisi integrata delle due tabelle (Tabb. 4; 5) permette di individuare i tool che risultano coerenti sia con gli standard internazionali sia con requisiti specifici dell'adattamento climatico nei contesti urbani.

Risultati

Fase 1: Scoping review

La scoping review ha selezionato contributi pubblicati in riviste peer-reviewed e nei report tecnici di organizzazioni internazionali (Fig. 2). Sono stati esclusi contributi puramente concettuali, strumenti proprietari non replicabili, le pubblicazioni prive di riferimento al *natural capital* e al rischio climatico, e i tool con ambito di applicazione limitato, passando da un primo risultato di 34.975 prodotti a 68. Dall'analisi di questi ultimi è stato possibile estrapolare 20 tool digitali, che sono stati organizzati in tre cluster:
– Modelli quantitativi data-/model-based, come InVEST, LUCI, Co$ting Nature, i-Tree Eco, MIMES, RIOS, ROOT, ESTIMAP e B£ST, fondati su input geospaziali strutturati, che restituiscono mappe o scenari di ottimizzazione dei servizi ecosistemici. La letteratura indica questi tool come particolarmente efficaci per la valutazione dei rischi idrologici (Bagstad *et al*., 2013);
– Strumenti knowledge-based, tra cui ARIES, Envision, MESH, NAIS, che integrano modelli dinamici e basi di conoscenza, consentendo una rappresentazione dei processi complessi e delle interazioni tra fattori ecologici e socioeconomici. La letteratura evidenzia la maggiore flessibilità di questi tool nell'analisi di scenari multirischio a fronte di una richiesta di competenze modellistiche avanzate (Boumans *et al*., 2015);
– Toolkit qualitativi e framework di valutazione, come TESSA, SolVES, EcoMetrix, ESR, RBI, GI-Val e OPAL, che si caratterizzano per l'uso di survey e protocolli partecipativi, nonché di approcci qualitativi alla valutazione. La letteratura caratterizza questi tool per la loro limitata standardizzazione (Dumitru et. al, 2021; EC, 2021).

Fase 2: Analisi Comparativa

La comparazione dei venti tool (Tab. 1) restituisce un quadro articolato che mette in evidenza traiettorie di sviluppo tecnologico e differenze strutturali rilevanti.
I modelli biofisici più maturi (InVEST, ARIES, LUCI, MIMES, ESTIMAP, Co$ting Nature) presentano architetture metodologiche consolidate, capacità di simulare processi eco-idrologici e di tradurre dinamiche ambientali in indicatori interpretabili a scala territoriale e urbana, confermando il loro ruolo nei processi di supporto alle decisioni. Accanto a questi, strumenti orientati alla valutazione operativa (i-Tree Eco, B£ST, GI-Val, RBI, EcoMetrix, TESSA, SolVES, ESR) mostrano un'elevata immediatezza applicativa e una struttura orientata alla quan-

reducing an initial set of 34,975 results to 68. From the analysis of these, it was possible to extract 20 digital tools, which were organised into three clusters:
– Quantitative data-/model-based models, such as InVEST, LUCI, Co$ting Nature, i-Tree Eco, MIMES, RIOS, ROOT, ESTIMAP and B£ST, based on structured geospatial inputs, producing maps or optimisation scenarios for ecosystem services. The literature identifies these tools as particularly effective for the assessment of hydrological risks (Bagstad *et al*., 2013);
– Knowledge-based tools, including ARIES, Envision, MESH, NAIS and some applications of MIMES, which integrate dynamic models and knowledge bases, enabling the representation of complex processes and interactions among ecological and socioeconomic factors. The literature highlights the greater flexibility of these tools in multi-risk scenario analysis, though requiring more advanced modelling skills (Boumans *et al*., 2015);
– Qualitative toolkits and evaluation frameworks, such as TESSA, SolVES, EcoMetrix, ESR, RBI, GI-Val and OPAL, characterised by the use of surveys and participatory protocols, and qualitative approaches to assessment. The literature notes the limited standardisation of these tools (Dumitru *et al*., 2021; EC, 2021).

Phase 2: Comparative analysis

The comparison of the twenty tools (Tab. 1) provides an articulated framework that highlights technological development trajectories and significant structural differences.
The most mature biophysical models (InVEST, ARIES, LUCI, MIMES, ESTIMAP, Co$ting Nature) exhibit consolidated methodological architectures, the ability to simulate eco-hydrological processes, and the capacity to translate environmental dynamics into indicators interpretable at territorial and urban scales, thereby confirming their role within decision-support processes. Alongside these, tools oriented towards operational evaluation (i-Tree Eco, BeST/B£ST, GI-Val, RBI, EcoMetrix, TESSA, SolVES, ESR) demonstrate high application immediacy and a structure geared toward quantifying benefits for urban climate-adaptation projects, though with more limited modelling capabilities. Their metrics range from hydrological indicators, carbon storage and environmental quality to economic and socio-spatial indices, with heterogeneous degrees of standardisation that influence the comparability of results.
Only a subset of the tools explicitly integrates event typologies (e.g., flooding, erosion, runoff), while others incorporate climate risks indirectly through the modelling of regulating ecosystem services, with varying levels of coherence between simulated processes and urban vulnerability phenomena.
The scalability of information between territorial and urban levels is equally heterogeneous: some tools are designed specifically for urban contexts, others can be adapted provided that local data are available, while several require complex calibrations or present limited operational domains.
It is noted, in particular, that tools such as InVEST, ARIES, LUCI, ESTIMAP, i-Tree Eco and MIMES were developed by research centres and public agencies with stable governance supported by

tificazione dei benefici per il progetto urbano di adattamento climatico, pur con una minore potenzialità modellistica.
Le metriche spaziano da indicatori idrologici, stoccaggio di carbonio e qualità ambientale a indici economici e socio-spaziali, con livelli disomogenei di standardizzazione che condizionano la comparabilità dei risultati. Solo una parte dei tool integra in modo esplicito le tipologie di evento (es. alluvioni, erosione, deflussi), mentre gli altri incorporano i rischi climatici in forma indiretta tramite la modellazione dei servizi ecosistemici di regolazione, con livelli variabili di coerenza tra processo simulato e fenomeni di vulnerabilità urbana.
La scalabilità dell'informazione tra il livello territoriale e quello urbano è altrettanto eterogenea: alcuni strumenti sono progettati per il contesto urbano, altri risultano adattabili previa disponibilità di dati locali, mentre diversi tool richiedono calibrazioni complesse o presentano ambiti d'uso limitati.
Si osserva, infine, che InVEST, ARIES, LUCI, ESTIMAP, i-Tree Eco, MIMES sono stati sviluppati da centri di ricerca e agenzie pubbliche con governance stabile su finanziamenti pubblici di programma nazionali finalizzati al potenziamento del capitale naturale. Questi *tools* garantiscono maggiore continuità evolutiva, trasparenza metodologica e affidabilità dei dataset, differentemente quelli nati in altri contesti che presentano una maggiore variabilità nella documentazione e nella replicabilità.

Fase 3: Selezione dei requisiti informativi
La Tab. 2 restituisce la relazione tra i requisiti informativi e i domini applicativi per il progetto. In particolare, si osserva che il requisito dell'usabilità riferisce soprattutto all'interazione uomo-computer attraverso l'utilizzo di interfacce digitali ed è focalizzato sulle caratteristiche di efficacia, efficienza e soddisfazione dell'utente.
Il requisito della qualità dei sistemi aiuta a mettere in evidenza la relazione tra qualità del sistema di informazioni e la specificità dei software digitali. Il requisito si declina attraverso le caratteristiche di appropriatezza funzionale, di affidabilità (reliability), di accessibilità (intesa come appropriatezza all'utilizzo) e per la capacità di lavorare attraverso dinamiche di autoapprendimento, compatibilità e sicurezza informatica.
Il requisito dell'interoperabilità è funzionale ad individuare le filiere di conoscenza realizzabili attraverso l'utilizzo di strumenti GIS. In questo senso, è importante osservare che l'applicabilità del requisito richiede una particolare attenzione rispetto alla presenza di metadati strutturati, con dataset verificabili e coerenti con gli obiettivi del tool, che devono operare con dataset completi, accurati ed organizzati con una coerenza temporale, logica e spaziale.

Fase 4: Verifica di compliance
L'incrocio dei risultati della Tab. 4 e Tab.5 chiarisce il potenziale contributo dei venti tool selezionati rispetto alla loro efficacia nel progetto di adattamento climatico in area urbana (Bagstad *et al*., 2013; Grêt-Regamey *et al*., 2017).
Si osserva che InVEST, ARIES, LUCI e ESTIMAP hanno la più ampia rispondenza ai requisiti: operano su più scale, integrano capacità di modellazione spaziale avanzata, supportano la costruzione di scenari e producono output informativi strutturati (mappe, tabelle, grafici) collegabili a indicatori di vulnerabilità climatica e di servizi ecosistemici. Questi tool sono maggiormente idonei a essere integrati nei *workflow* di pianificazione e

national public funding programmes aimed at strengthening natural capital. These tools ensure greater evolutionary continuity, methodological transparency and dataset reliability, unlike those developed in other contexts, which show higher variability in documentation and replicability.

Phase 3: Selection of information requirements
Tab. 2 shows the relationship between information requirements and application domains for the project. In particular, it is observed that the requirement of usability refers primarily to human-computer interaction through the use of digital interfaces, and is focused on the characteristics of effectiveness, efficiency and user satisfaction. The requirement of system quality helps to highlight the relationship between the quality of the information system and the specificity of digital software. The requirement is articulated through the characteristics of functional appropriateness, reliability, accessibility (understood as appropriateness of use and the ability to operate through forms of selflearning), compatibility and cybersecurity. The requirement of interoperability is functional to identifying the knowledge chains made possible through the use of GIS tools. In this sense, it is important to note that the applicability of the requirement demands particular attention to the presence of structured metadata, with verifiable datasets consistent with the objectives of the tool and organised with temporal, logical and spatial coherence.

Phase 4: Compliance verification
The systematic cross-reading of the results of Tab. 4 and Tab. 5 clarifies the potential contribution of the twenty selected tools with respect to their effectiveness in decision-making processes oriented towards climate adaptation in urban areas (Bagstad *et al.*, 2013; Grêt-Regamey *et al.*, 2017). It is observed that InVEST, ARIES, LUCI and ESTIMAP show the highest compliance: they operate across multiple scales, integrate advanced spatial modelling capacities, support scenario development, and produce structured informational outputs (maps, tables, graphs) that can be linked to indicators of climate vulnerability and ecosystem services. These tools are more suitable for integration into planning and evaluation workflows, particularly where methodological coherence and traceability of results are required.
The tools i-Tree Eco, Co$ting Nature, MESH, RIOS, ROOT fall into an intermediate range, while TESSA, ESR, RBI and GI-Val show systematically lower values with respect to the requirements considered. More specifically, the analysis concerning information compliance (Tab. 4) shows that InVEST, ARIES, i-Tree and ESTIMAP meet only part of the basic information requirements, while Tab. 05 shows that the criteria of IT compliance - data transparency, replicability, interoperability and usability - are not shared by all the selected tools, and several remain confined to experimental or sectoral applications (NAIS, GI-Val, EcoMetrix).
Regarding the second level of compliance – focused on the operational performance of the tool within climate-oriented design – InVEST, ARIES, LUCI and ESTIMAP guarantee broad operability with respect to project needs, while i-Tree Eco, Co$ting Nature, MESH, RIOS and ROOT, despite their ability to model hydrological or

valutazione, soprattutto dove sono richieste coerenza metodologica e tracciabilità dei risultati.
I tool i-Tree Eco, Co$ting Nature, MESH, RIOS, ROOT si collocano in una fascia intermedia, mentre TESSA, ESR, RBI, GI-Val mostrano valori sistematicamente più bassi rispetto ai requisiti considerati.
Più dettagliatamente, l'analisi condotta circa la compliance informativa (Tab. 4) mostra che i tool InVEST, ARIES, iTree, ESTIMAP soddisfano solo una parte dei requisiti informativi di base, mentre la Tab. 5 mostra che i criteri di compliance informativa (trasparenza dei dati, replicabilità, interoperabilità e usabilità) non sono patrimonio di tutti i tool selezionati, così che molti tra questi restano confinati a un impiego sperimentale o settoriale (NAIS, GI-Val, EcoMetrix).
Riguardo il secondo livello di compliance, tarata sull'operatività del tool nell'ambito del progetto climatico, InVEST, ARIES, LUCI e ESTIMAP garantiscono un'ampia operabilità rispetto alle esigenze del progetto, mentre I-Tree Eco, Co$ting Nature, MESH, RIOS, ROOT presentano una non sufficiente accessibilità per utenti non esperti, nonostante abbiano la capacità di modellare processi idrologici o biofisici. In questi casi, la traduzione degli output in materiali direttamente utilizzabili nel progetto (schemi, elaborati grafici, matrici di priorità) richiede competenze specialistiche e adattamenti metodologici aggiuntivi.
Infine, TESSA, ESR, RBI, GI-Val, a prevalente impianto qualitativo o conoscitivo, mostrano performance sistematicamente più basse rispetto ai requisiti considerati: la modellazione è assente o limitata, gli output restano in larga parte descrittivi e la rappresentazione della vulnerabilità climatica è indiretta, così da essere più adatti a fasi preliminari piuttosto che a sviluppare una conoscenza analitica di supporto operativo al progetto.

Discussione dei risultati in forma di conclusione

I tool informativi digitali dimostrano un valore scientifico e operativo significativo, poiché traducono standard e conoscenze specialistiche in un supporto informativo utile alla localizzazione degli interventi e alla definizione di strategie di adattamento climatico. Essi risultano pienamente efficaci nei processi di riduzione del rischio quando integrati in sistemi di supporto di tipo *knowledge-based*, intesi come architetture cognitive capaci di organizzare l'informazione a partire da esigenze decisionali chiaramente definite, in coerenza con gli standard internazionali ISO, con requisiti di interoperabilità verificabili e con l'uso di indicatori pertinenti al contesto decisionale.
Dall'interpretazione dei risultati emergono i limiti e le opportunità aperte dallo studio. Da un lato, si verifica la piena rispondenza della domanda di ricerca al dibattito internazionale e alle richieste di operatività del contesto professionale e scientifico. In particolare, il concetto di "appropriatezza" riferito ai tool digitali risulta pienamente applicabile rispetto al set di requisiti di usabilità ed efficacia dei tool stessi. Appropriatezza rimanda qui a un contesto in cui utenti, sistemi digitali e norme interagiscono nella definizione e nell'impiego dell'informazione, costituendo la condizione per un uso dei dati realmente aderente al processo decisionale.
Dall'altro lato emergono alcuni limiti che incidono sulla possibilità di utilizzare efficacemente i tool nei processi progettuali orientati alla gestione proattiva del rischio climatico. Il

biophysical processes, do not provide sufficient accessibility for non-expert users. In these cases, translating tool outputs into materials directly usable in design processes (schemes, graphic elaborations, priority matrices) requires specialised competences and additional methodological mediation.
Finally, TESSA, ESR, RBI and GI-Val, predominantly qualitative or knowledge-oriented, show systematically lower performance in relation to the considered requirements: modelling is absent or limited, outputs remain largely descriptive, and the representation of climate vulnerability is indirect, making them more suitable for preliminary phases rather than analytical methodologies for operational project support.

Discussion of results as conclusion

Digital tools present significant scientific and operational value, as they translate standards and specialised knowledge into an information support useful for locating interventions and defining climate adaptation strategies. They prove fully effective in risk-management processes when integrated into knowledge-based support systems, understood as structures capable of organising information according to clearly defined decision-making needs, in coherence with international ISO standards, verifiable interoperability requirements and the use of indicators pertinent to the decision context.
The interpretation of the results highlights both limitations and opportunities. On the one hand, the research question aligns with the international debate and the operational needs of the professional and scientific context. In particular, the notion of "appropriateness" applied to digital tools is consistent with the set of usability and effectiveness requirements. Here, appropriateness refers to a context in which users, digital systems and norms interact in defining and using information, establishing the conditions for data to be genuinely aligned with the decision-making process.
On the other hand, three limitations emerge, affecting the effective use of tools in design processes oriented towards proactive climate-risk management. The first concerns the climatic representation of context, which in most cases is not constructed at the scale or morphological structure of the city. Risk assessment is therefore often reduced to systems of indicators developed for territorial or regional analyses, with a loss of detail that reduces the ability of the model to return local conditions relevant to urban design. The second concerns the nature of outputs, still predominantly analytical. Maps, graphs and tables provide useful evidence but are not organised to support the construction of operational alternatives or to allow comparative evaluation of site-specific project options. The third concerns interoperability. The incompleteness of metadata, heterogeneity of formats and partial adherence to standards compromise the integration of datasets from different sources and their traceability throughout the process. This affects continuity between analysis and design and the ability to update models, verify assumptions and reorient priorities.
The analysis of results highlights the existence of an ecosystem of digital tools converging towards integrated and multiscalar models, although the operational context remains marked by significant differences in their capacity to effectively inform urban de-

primo riguarda la rappresentazione climatica del contesto, che nella maggior parte dei casi non è costruita sulla scala e sulla struttura morfologica della città. La valutazione del rischio viene quindi spesso ricondotta a sistemi di indicatori sviluppati per analisi territoriali o regionali, con una perdita di dettaglio che riduce la capacità del modello di restituire le condizioni locali rilevanti per il progetto urbano. Un secondo limite concerne la natura degli output, ancora prevalentemente analitica. Mappe, grafici e tabelle forniscono evidenze utili, ma non sono organizzati per sostenere la costruzione di alternative operative né per consentire valutazioni comparative tra opzioni progettuali *site- specific*. Il terzo limite riguarda l'interoperabilità. L'incompletezza dei metadati, la disomogeneità dei formati e l'aderenza parziale agli standard compromettono l'integrazione di dataset provenienti da fonti diverse e la loro tracciabilità lungo le fasi del processo. Ciò incide sulla continuità tra analisi e progetto e sulla possibilità di aggiornare i modelli, verificare gli assunti e riorientare le priorità di azione. L'analisi dei risultati evidenzia l'esistenza di un ecosistema di tool digitali in progressiva convergenza su modelli integrati e multiscalari, anche se il contesto operativo resta segnato da differenze rilevanti nella capacità di informare compiutamente il progetto urbano. Il confronto svolto si basa sulla documentazione tecnica disponibile e richiederà verifiche applicative in contesti urbani per valutare appieno le prestazioni operative. L'evoluzione futura di questi tool sarà rilevante per comprendere in che misura potranno sostenere pratiche progettuali capaci di interpretare la complessità dei sistemi eco-sociotecnici e di tradurla in scelte più informate e contestualmente consapevoli.

sign. The comparison is based on the available technical documentation and will require applications in urban contexts to fully assess operative performance. The future development of these tools will be relevant for understanding the extent to which they may support design practices capable of addressing the complexity of eco-socio-technical systems and translating it into more informed and contextually grounded decisions.

ATTRIBUTION, ACKNOWLEDGMENTS, COPYRIGHT
The introduction and conclusions sections were edited by Marina Rigillo.
The sections on methodologies and results were edited by Martina Di Palma.
The manuscript is original and unpublished; all rights are reserved by the authors.

NOTES
[1] Operationalization is the process by which theoretical concepts are translated into applicable procedures, indicators, and methods, so that they can be used in assessment, accounting, monitoring, and mapping practices (Parikka, 2023).
[2] The book identifies tools for chain analysis, linking the demand for environmental information with the supply of relevant data. The comparative analysis presented is consistent with the comparison methods typical of Environmental Decision Support Systems (EDSS) and Spatial Decision Support Systems (SDSS) (McIntosh *et al.*, 2011).
[3] The text of the standard updated to 2023 was used.
[4] ISO 19115-1:2014 was used for metadata, ISO 19119:2016 for services, and ISO 19157:2013 for data quality.

ATTRIBUZIONE, RICONOSCIMENTI, DIRITTI D'AUTORE
Le sezioni relative all'introduzione e conclusioni sono state curate da Marina Rigillo.
Le sezioni relative a metodologie e risultati sono state curate da Martina Di Palma.
Il manoscritto è originale e inedito; tutti i diritti sono riservati agli autori.

NOTE
[1] In inglese *operationalization* è il processo con cui concetti teorici sono tradotti in procedure, indicatori e metodi applicabili, così da essere impiegati in pratiche di *assessment*, *accounting*, *monitoring* e *mapping* (Parikka, 2023)
[2] Il libro individua gli strumenti per l'analisi di catena, ponendo in relazione la domanda di informazioni ambientali con l'offerta di dati pertinenti. L'analisi comparativa presentata è coerente con i metodi di comparazione tipici degli *Environmental Decision Support Systems* (EDSS) e dei *Spatial Decision Support Systems* (SDSS) (McIntosh *et al.*, 2011)
[3] Si è utilizzato il testo della norma aggiornato al 2023
[4] Sono state utilizzate le ISO 19115-1:2014 per i metadati, ISO 19119:2016 per i servizi, ISO 19157:2013 per la qualità dei dati

REFERENCES
Bagstad, K.J., Semmens, D.J., Waage, S. and Winthrop, R. (2013), "A comparative assessment of decision-support tools for ecosystem services quantification and valuation", *Ecosystem Services*, Vol. 5, pp. 27-39. Available at: https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.07.004

Bologna, R. and Torricelli, M.C. (2021), *Romano Del Nord. Teoria e prassi del progetto di architettura*, Firenze University Press, Firenze.

Boumans, R., Roman, J., Altman, I. and Kaufman, L. (2015), "The Multiscale Integrated Model of Ecosystem Services (MIMES): Simulating the interactions of coupled human and natural systems", *Ecosystem Services*, Vol. 12, pp. 30-41. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.01.004

Ciribini, G. (1990), *La normativa dell'impatto ambientale: Piano di fattibilità*, Alinea, Firenze.

Di Palma, M., Rigillo, M. and Leone, M.F. (2024), "Remote sensing technologies for mapping ecosystem services: An analytical approach for urban green infrastructure", *Sustainability*, Vol. 16, n. 14, 6220. Available at: http://dx.doi.org/10.3390/su16146220

Dumitru, A. and Wendling, L. (Eds.) (2021), *Evaluating the Impact of Nature-Based Solutions: A Handbook for Practitioners*, Publications Office of the European Union, Luxembourg. Available at: https://data.europa.eu/doi/10.2777/244577 (Accessed on 02/02/2025)

European Commission (2013), *Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services (MAES): An Analytical Framework for Ecosystem Assessments under Action 5 of the EU Biodiversity Strategy to 2020*, European Commission, Brussels. Available at: https://ec.europa.eu/environment/nature/knowledge/ecosystem_assessment/pdf/MAESWorkingPaper2013.pdf (Accessed on 15/05/2024)

European Commission (2021), *Forging a Climate-Resilient Europe – The New EU Strategy on Adaptation to Climate Change (COM/2021/82 final)*, European Commission, Brussels. Available at: https://eur-lex.europa.

eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021DC0082 (Accessed on 15/05/2024)

European Commission (2021), *Evaluating the Impact of Nature-Based Solutions: A Handbook for Practitioners*, Publications Office of the European Union, Luxembourg. Available at: https://data.europa.eu/doi/10.2777/244577 (Accessed on 02/02/2025)

European Commission and European Environment Agency (2022), *Climate-ADAPT Strategy 2022-2024: Sharing Knowledge for a Climate-Resilient Europe*, European Commission and European Environment Agency, Brussels. Available at: https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/about/climate-adapt-strategy (Accessed on 15/05/2024)

Gangemi, V. (1991), *Architettura e tecnologia appropriata*, Franco Angeli, Milano.

Grêt-Regamey, A., Altwegg, J., Sirén, E.A., van Strien, M.J. and Weibel, B. (2017), "Integrating ecosystem services into spatial planning — A spatial decision support tool", *Landscape and Urban Planning*, Vol. 167, pp. 206-219. Available at: https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.05.003

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2022), "Executive summary",in Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Tignor, M., Poloczanska, E.S., Mintenbeck, K., Alegría, A., Craig, M., Langsdorf, S., Löschke, S., Möller, V., Okem, A. and Rama, B. (Eds.),*Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the IPCC*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 3-33. Available at: http://dx.doi.org/10.1017/9781009325844.001

ISO (2014), *ISO 19101-1:2014 Geographic Information – Reference Model – Part 1: Fundamentals*, International Organization for Standardization, Geneva.

ISO (2018), ISO 9241-11:2018 Ergonomics of Human-System Interaction – Part 11: Usability: Definitions and Concepts, International Organization for Standardization, Geneva.

ISO/IEC (2023), *ISO/IEC 25010:2023 Systems and Software Engineering – Systems and Software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – Product Quality Model*, International Organization for Standardization, Geneva.

Losasso, M., Lucarelli, M.T., Rigillo, M. and Valente, R. (Eds.) (2020), *Adattarsi al clima che cambia. Innovare la conoscenza per il progetto ambientale*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna.

McIntosh, B.S., Voinov, A., Jetter, A., Kolagani, N., Rizzoli, A.E., White, L., … and Jakeman, A.J. (2011), "Environmental decision support systems (EDSS) development – Challenges and best practices", *Environmental Modelling & Software*, Vol. 26, n. 12, pp. 1389-1402. Available at: https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.09.009

Mulligan, M. (2015),*Co$ting Nature: A Policy Support System for Ecosystem Services Assessment*,King's College London. Available at: https://www.policysupport.org/costingnature (Accessed on 15/05/2024)

Mussinelli, E. and Tartaglia, A. (2021), "Organising knowledge according to site-specific criteria",in Bologna, R., Losasso, M., Mussinelli, E. and Tucci, F. (Eds.), *Dai distretti urbani agli eco-distretti / From Urban Districts to Eco-Districts*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna.

Nowak, D.J., Crane, D.E. and Stevens, J.C. (2006), "Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States", *Urban Forestry & Urban Greening*, Vol. 4, n. 3-4, pp. 115-123. Available at: https://doi.org/10.1016/j.ufug.2006.01.007

Ochoa, V. and Urbina-Cardona, N. (2017), "Tools for spatially modeling ecosystem services: Publication trends, conceptual reflections and future challenges", *Ecosystem Services*, Vol. 26, pp. 155-169. Available at: https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.06.011

Parikka, J. (2023), *Operational Images: From the Visual to the Invisual*, University of Minnesota Press, Minneapolis.

Peh, K.S.-H., Balmford, A., Field, R.H., Lamb, A., Birch, J.C., Bradbury, R.B. *et al.* (2013), "TESSA: A toolkit for rapid assessment of ecosystem services at sites of biodiversity conservation importance", *Ecosystem Services*, Vol. 5, pp. e51-e57. Available at: https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.06.003

Sharp, R., Tallis, H.T., Ricketts, T., Guerry, A.D., Wood, S.A., Chaplin-Kramer, R. *et al.* (2018), *InVEST 3.6 User's Guide*, The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy and World Wildlife Fund. Available at: https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest (Accessed on 15/05/2024)

Sherrouse, B.C., Clement, J.M. and Semmens, D.J. (2011), "A GIS application for assessing, mapping, and quantifying the social values of ecosystem services", *Applied Geography*, Vol. 31, n. 2, pp. 748-760. Available at: https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.08.002

United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR) (2009), *UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction*, UNDRR. Available at: https://www.undrr.org/publication/2009-unisdr-terminology-disaster-risk-reduction (Accessed on 18/10/2022)

Villa, F., Bagstad, K.J., Voigt, B., Johnson, G.W., Portela, R., Honzák, M. and Batker, D. (2014), "A methodology for adaptable and robust ecosystem services assessment", *PLoS ONE*, Vol. 9, n. 3, e91001. Available at: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0091001

Wrisberg, N., Udo de Haes, H.A. and Triebswetter, U. (Eds.) (2002), *Analytical Tools for Environmental Design and Management in a Systems Perspective: The Combined Use of Analytical Tools*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Zulian, G., Polce, C. and Maes, J. (2014), "ESTIMAP: A GIS-based model to map ecosystem services in the European Union", *Annali di Botanica*, Vol. 4, pp. 1-7. Available at: https://doi.org/10.4462/annbotrm-11807

Local Climate Zones per la conoscenza e il progetto *climate-risk oriented* degli insediamenti urbani

Just Accepted: November 28, 2025 **Published:** July 29, 2026

Antonio Sferratore, https://orcid.org/0009-0009-8203-6819
Vittorio Miraglia, https://orcid.org/0009-0005-1817-4142
Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II, Napoli, Italia
antonio.sferratore@unina.it
vittorio.miraglia@unina.it

Abstract. La ricerca integra classificazioni morfometriche (LCZ) e tassonomie urbane (PNACC, progetto RETURN) per supportare l'adattamento al rischio climatico. A Napoli, la mappatura LCZ è stata affinata con dati morfometrici e approcci GIS-based, migliorandone l'accuratezza. L'integrazione con tassonomie urbane climate-oriented ha permesso di associare a ciascuna LCZ, uniforme per caratteristiche geometriche, superficiali, di copertura del suolo, termico-radiative e metaboliche, azioni mirate, valutate attraverso gli indicatori qualitativi e quantitativi del PNACC. Lo studio propone un metodo multiscalare e replicabile per la definizione di azioni climate risk-oriented misurabili e calibrate sui singoli contesti urbani.

Parole chiave: Rischio climatico; Progettazione ambientale; *Local climate zones*; Tassonomie urbane; Insediamenti urbani.

Introduzione

Il cambiamento climatico rappresenta una delle sfide più critiche del nostro tempo, con implicazioni dirette sulla vivibilità e resilienza delle aree urbane. Le città, densamente popolate e infrastrutturate, sono particolarmente vulnerabili agli impatti di eventi estremi quali ondate di calore, alluvioni, siccità e innalzamento del mare. La complessità fisica e funzionale del tessuto urbano amplifica tali effetti, richiedendo strategie adattive fondate su una conoscenza approfondita del contesto morfoclimatico (IPCC, 2022; EC, 2018; Rosenzweig *et al*., 2018).
I progressi nei sistemi di osservazione della Terra e nelle tecniche di apprendimento automatico hanno prodotto set di dati ad alta risoluzione su topografia, copertura del suolo urbano e popolazione, oltre che su rischi climatici presenti e futuri. Tuttavia, tali strumenti restituiscono descrizioni autonome dei pericoli e delle componenti di rischio considerate (Mills *et al*., 2017).
In questo quadro, la gestione del rischio climatico urbano necessita di un approccio scientificamente fondato, multidisciplinare e orientato alla territorializzazione delle misure di adattamento (CMCC, 2023). Le strategie, intese come azioni di pianificazione per ridurre gli effetti negativi dei futuri impatti, devono considerare le vulnerabilità locali per inserirsi in una visione regionale, nazionale e internazionale con un approccio multiscalare (Rovers *et al*., 2014). In chiave progettuale, gli approcci dovranno saper conservare, modificare e gestire lo spazio urbano in consapevolezza degli scenari di crisi climatica (Angelucci, 2015), con strumenti capaci di andare oltre la sola dimensione morfologica o funzionale e di includere aspetti ambientali, culturali e sociali (Mussinelli *et al*., 2022). Comprendere la complessità di tali scenari implica la necessità di semplificare i dati, facilitando il calcolo, senza perdere la variabilità che contraddistingue i tessuti urbani e le loro interazioni fisiche e socioeconomiche (D'Ambrosio *et al*. 2023).
A livello internazionale, diversi studi hanno analizzato la parametrizzazione urbana per individuare relazioni tra fattori ambientali e caratteristiche morfologiche (Oke, 1988). Dopo Chandler (Chandler, 1965), Ellefsen (Ellefsen, 1984) e Oke (Oke, 2006), la classificazione delle Local Climate Zones (LCZ) di Stewart e Oke (Stewart e Oke, 2012) è divenuta riferimento consolidato. La LCZ definisce porzioni di territorio omogenee per copertura superficiale, materiali ed attività umane; 10 classi riguardano le aree edificate (building types) e 7 l'uso dei suoli (land cover types). A ciascuna classe sono associati parametri standardizzati geometrici, superficiali, termici e metabolici. Il framework, oggi ampiamente adottato in letteratura (Demuze-

Local climate zones for knowledge and climate-risk-oriented design of urban settlements

Abstract. The research integrates morphometric classifications (LCZ) and urban taxonomies (PNACC, RETURN project) to support climate risk adaptation. In Naples, LCZ mapping has been refined with morphometric data and GIS-based approaches, improving its accuracy. Integration with climate-oriented urban taxonomies has made it possible to associate each LCZ, uniform in terms of geometric, surface, land cover, thermal-radiative, and metabolic characteristics, with targeted actions, evaluated through the qualitative and quantitative indicators of the PNACC. The study proposes a multiscale and replicable method for defining measurable climate risk-oriented actions calibrated to individual urban contexts.

Keywords: Climate risk; Environmental design; Local climate zones; Urban taxonomies; Urban settlements.

Introduction

Climate change is one of the most critical challenges of our time, with direct implications for the liveability and resilience of urban areas. Cities, being densely populated and featuring heavy infrastructure density, are particularly vulnerable to the impacts of extreme events such as heatwaves, floods, droughts, and sea level rise. The physical and functional complexity of urban fabric amplifies these effects, making adaptive strategies grounded in a profound understanding of local morphoclimatic contexts essential (IPCC, 2022; EC, 2018; Rosenzweig *et al*., 2018).
Recent advances in Earth observation systems and machine learning techniques have generated high-resolution datasets on topography, urban land cover, and population, as well as on present and future climate risks. However, these tools provide autonomous descriptions of hazards and risk components (Mills *et al*., 2017).
Within this framework, urban climate risk management requires a scientifically sound, multidisciplinary approach oriented towards the territorialisation of adaptation measures (CMCC, 2023). Strategies, viewed as planning actions to reduce the negative effects of future impacts, must consider local vulnerabilities in order to fit into a regional, national, and international vision with a multi-scale approach (Rovers *et al*., 2014). In terms of design, approaches must be able to preserve, modify, and manage urban space in awareness of climate crisis scenarios (Angelucci, 2015), with tools capable of going beyond the morphological or functional dimension alone, and of including environmental, cultural, and social aspects

ISSN online: 2239-0243 | © 2025 Author(s) | http://www.fupress.com/techne | DOI: 10.36253/techne-18603
Open access, peer-reviewed article published by Firenze University Press (https://www.fupress.com) and distributed, except where otherwise noted, under the terms of the CC BY 4.0 License for content and CC0 1.0 Universal for metadata

re, Bechtel, *et al*., 2019; Ching, Mills, *et al*., 2018; Mills, Bechtel, *et al*., 2017), trova nella piattaforma open-source WUDAPT1 uno strumento globale per mappe climatiche urbane georeferenziate e comparabili. Per molte città, la classificazione è utile non solo per analisi microclimatiche a supporto dell'identificazione dei rischi climatici in ambiente urbano, ma anche come base per scenari di riqualificazione in ottica di adattamento e mitigazione (Alexander & Mills, 2014; Han *et al*., 2024).

Bechtel ha tuttavia evidenziato la necessità di sviluppi nello schema WUDAPT, soprattutto per le città europee a causa della loro morfologia complessa (Gal *et al*., 2015; Lopes *et al*., 2017); tale considerazione risulta valida anche nel contesto nazionale (Zonato *et al*., 2020; Buccolieri *et al*., 2022; Turchetti, 2023; Vavassori *et al*., 2024; Gerundo *et al*., 2024). Tra le metodologie più promettenti figurano approcci GIS-based integrati con *database open-source* (Levlovics *et al*., 2013; Wang *et al*., 2018; Hidalgo *et al*., 2019). Diversi autori hanno inoltre utilizzato la LCZ per integrare conoscenza climatica e progettazione urbana, delineando azioni di adattamento e riduzione del rischio in relazione alle caratteristiche morfologiche e ambientali (Middel *et al*., 2014; Mills *et al*., 2017; Nazarian *et al*., 2019; Maharof *et al*., 2020; Musco *et al*., 2020; Tomasi *et al*., 2021; Liu *et al*., 2023).

In Italia, il PNACC (MASE, 2023) è il principale riferimento normativo per l'adattamento, offrendo un catalogo di azioni suddivise per settori e territori e promuovendo strategie locali basate sulla conoscenza del rischio. Tuttavia, l'applicazione risulta disomogenea per la mancanza di strumenti operativi in grado di tradurre le linee generali in misure localizzate (Moraci *et al*., 2020; Cremonini *et al*., 2023).

Tra le esperienze nazionali, in coerenza con il quadro delineato si segnalano il Piano Territoriale Metropolitano (PTM) elaborato dalla Città Metropolitana di Milano nell'ambito di Life MASTER ADAPT 2016-2020 e l'Abaco per la transizione climatica (Maragno *et al*., 2022) sviluppato dall'Università Iuav di Venezia e finanziato da Fondazione Cariplo (2018). Nel primo caso, il PTM associa le LCZ a strategie di adattamento, verificandone gli effetti su caratteristiche geometriche, superficiali e termiche, e consentendo di testarne l'applicabilità in contesti urbani simili. Nel secondo, l'Abaco supporta le Pubbliche Amministrazioni nell'individuazione di misure atte a compensare vulnerabilità locali e potenziare servizi ecosistemici, adottando la logica del transetto per tipizzare il territorio dell'Alto Adriatico e orientare le misure in base alla tipologia territoriale (Maragno *et al*., 2022). Questi modelli semplificano la scelta delle misure per ciascun tessuto urbano, favorendo l'integrazione disciplinare come requisito essenziale nell'adattamento (Losasso e Rigillo, 2024).

Il presente lavoro si colloca in questo filone, proponendo un approccio che integra l'analisi morfometrica delle LCZ con una lettura tassonomica del sistema urbano derivata dal PNACC. L'approccio è stato sperimentato nel progetto di ricerca RETURN con l'obiettivo di offrire uno strumento conoscitivo e operativo a supporto delle decisioni locali. La ricerca integra le LCZ con una tassonomia, coerente con la suddivisione del PNACC negli ambiti Grey e Green, per costruire una matrice conoscitiva capace di rappresentare per ciascuna LCZ criticità climatiche, caratteristiche tipologiche e possibili strategie. Il caso studio del distretto di Soccavo, nella Città Metropolitana

(Mussinelli *et al*., 2022). Understanding the complexity of these scenarios implies the need to simplify data, facilitating calculation without losing the variability that characterises urban fabrics and their physical and socio-economic interactions (D'Ambrosio *et al*. 2023).

At the international level, several studies have analysed urban parameterisation to identify relationships between environmental factors and morphological characteristics (Oke, 1988). Following Chandler (Chandler, 1965), Ellefsen (Ellefsen, 1984), and Oke (Oke, 2006), the classification of Local Climate Zones (LCZ) by Stewart and Oke (Stewart and Oke, 2012) has become an established reference. The LCZ defines homogeneous portions of territory in terms of surface cover, materials, and human activities. Ten classes concern built-up areas (building types), and seven concern land cover types. Each class is associated with standardised geometric, surface, thermal, and metabolic parameters. The framework now widely adopted (Demuzere, Bechtel, *et al*., 2019; Ching, Mills, *et al*., 2018; Mills, Bechtel, *et al*., 2017) finds in the open-source platform WUDAPT1 a global tool for georeferenced and comparable urban climate maps. For many cities, the classification is useful not only for microclimatic analyses to support the identification of climate risks in urban environments, but also as a basis for redevelopment scenarios with a view to adaptation and mitigation (Alexander & Mills, 2014; Han *et al*., 2024).

However, Bechtel highlighted the need for developments in the WUDAPT[1] scheme, especially for European cities due to their complex morphology (Gal *et al*., 2015; Lopes *et al*., 2017). This consideration is also valid in the national context (Zonato *et al*., 2020; Buccolieri *et al*., 2022; Turchetti, 2023; Vavassori *et al*., 2024; Gerundo *et al*., 2024;). The most promising methodologies include GIS-based approaches integrated with open-source databases (Levlovics *et al*., 2013; Wang *et al*., 2018; Hidalgo *et al*., 2019). Several authors have also used LCZ to integrate climate knowledge and urban design, outlining adaptation and risk reduction actions in relation to morphological and environmental characteristics (Middel *et al*., 2014; Mills *et al*., 2017; Nazarian *et al*., 2019; Maharof *et al*., 2020; Musco *et al*., 2020; Tomasi *et al*., 2021; Liu *et al*., 2023).

In Italy, the PNACC (MASE, 2023) is the main regulatory reference for adaptation, offering a catalogue of actions divided by sector and territory, and promoting local strategies based on risk awareness. However, its application is uneven due to the lack of operational tools capable of translating general guidelines into localised measures (Moraci *et al*., 2020; Cremonini *et al*., 2023).

Among national experiences, we would like to mention the Metropolitan Territorial Plan (PTM) developed by the Metropolitan City of Milan as part of Life MASTER ADAPT 2016-2020, and the Abacus for Climate Transition[2] (Maragno *et al*., 2022) developed by the IUAV University of Venice, and funded by Fondazione Cariplo (2018). In the first case, the PTM associates LCZs with adaptation strategies, verifying their effects on geometric, surface, and thermal characteristics, and allowing their applicability to be tested in similar urban contexts. In the second case, the Abacus supports public administrations in

01 | Rappresentazione schematica della metodologia adottata
Schematic representation of the methodology adopted

di Napoli, ha consentito di testare la validità del modello in un contesto complesso e vulnerabile.

Metodologia e sperimentazione

La metodologia adottata si basa su un approccio integrato finalizzato alla definizione di un modello conoscitivo che coniughi classificazioni climatiche e tassonomie urbane per migliorare la gestione del rischio climatico. L'iter sperimentale è articolato in tre fasi principali (Fig. 1):

- raccolta dei dati, mappatura e ottimizzazione delle Local Climate Zones,
- integrazione delle LCZ con tassonomie urbane e analisi spaziale,
- selezione delle strategie e azioni di adattamento in relazione agli elementi delle tassonomie e ai cataloghi esistenti.

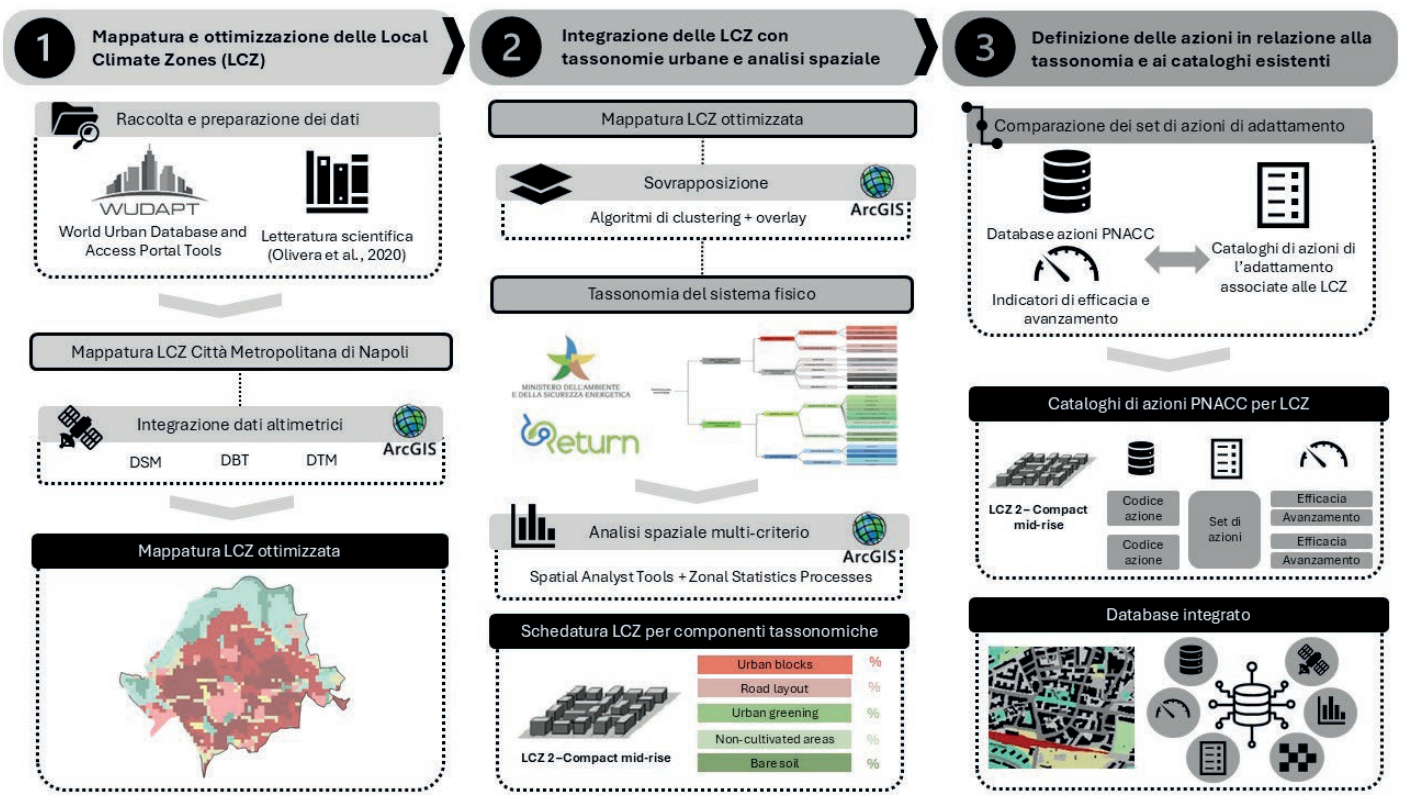
Raccolta dei dati

Il primo passo ha riguardato la raccolta di dataset topografici e morfometrici specifici per la città di Napoli. Sono stati utilizzati dati open-source e istituzionali: il database topografico comunale (DBT), i modelli digitali di terreno (DTM) e di superficie (DSM) forniti dalla Regione Campania, e dati catastali e censuari relativi al sistema edificato. Questi dati sono stati normalizzati e georeferenziati in ambiente GIS per garantire coerenza e interoperabilità.

Parallelamente, è stato acquisito il layer LCZ open-source sviluppato da Olivera *et al.* (Olivera *et al.*, 2020) per la Città Metropolitana di Napoli dalla piattaforma WUDAPT e ottenuto tramite classificazione automatizzata su immagini satellitari Landsat (Fig. 2). Poiché la risoluzione e la qualità del layer iniziale non erano sufficienti a descrivere dettagliatamente le variabili morfologiche di un contesto urbano complesso come Napoli, si è proceduto a un'ottimizzazione mediante integrazione con i dati morfometrici locali.

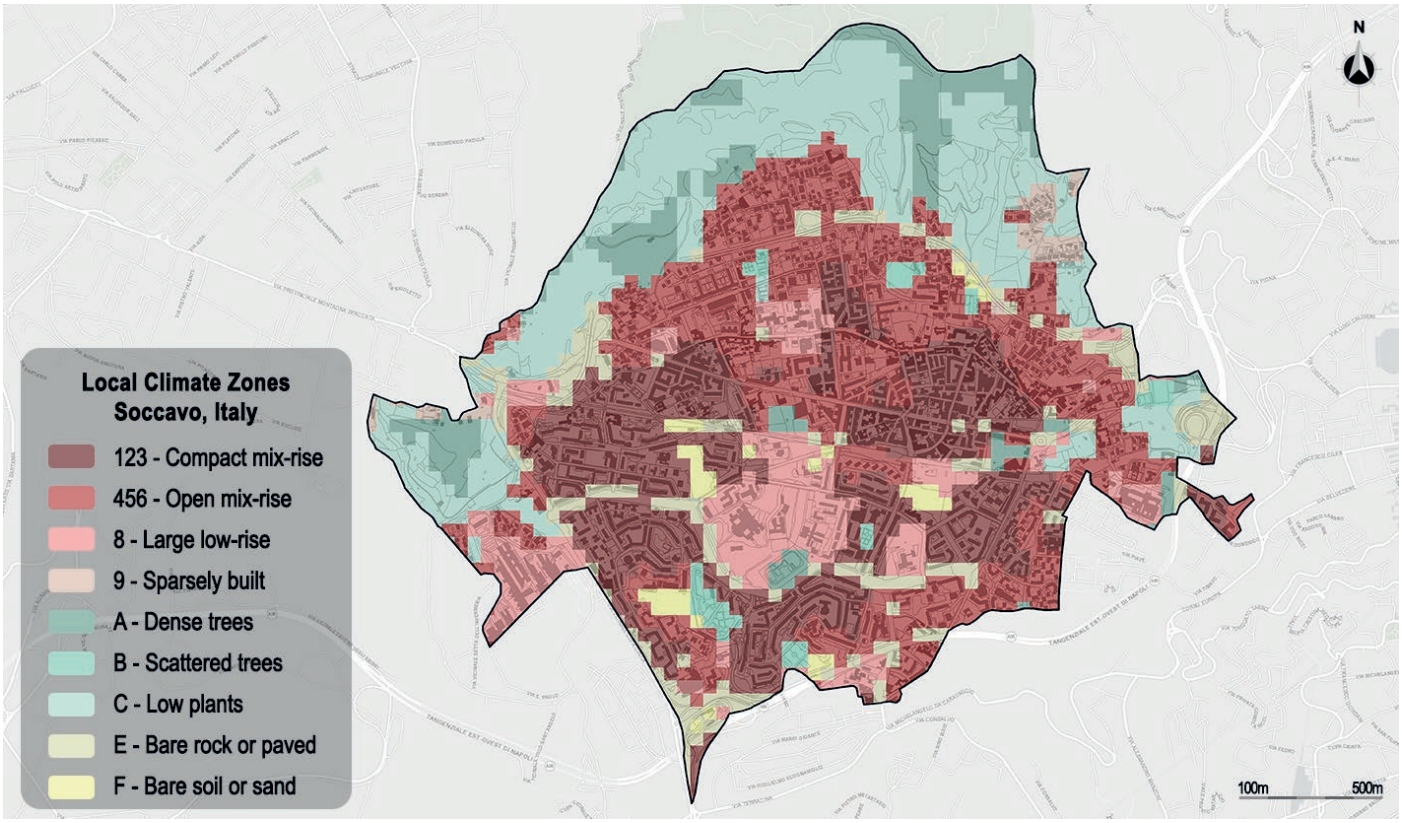
Ottimizzazione delle Local Climate Zones

L'ottimizzazione delle LCZ è stata effettuata mediante l'integrazione di parametri fisici come l'altezza degli edifici, la densità edilizia, la percentuale di superfici impermeabili, la presenza di spazi verdi e la tipologia degli usi del suolo. L'analisi spaziale in ambiente GIS è stata condotta utilizzando moduli specifici per la sovrapposizione, la segmentazione e la classificazione morfologica. I modelli DTM e DSM sono stati utilizzati per estrarre informazioni sulle variazioni altimetriche per la definizione



02 | Mappatura secondo la tassonomia RETURN per l'area di studio di Soccavo (NA)
Mapping according to the RETURN taxonomy for the study area of Soccavo (NA)

02 |



della tridimensionalità degli ambienti urbani, in combinazione con dati catastali e ortofoto ad alta risoluzione.

Integrazione delle LCZ con tassonomie urbane
La seconda fase ha riguardato l'integrazione delle LCZ con la tassonomia del sistema urbano fisico sviluppata nell'ambito del progetto RETURN in relazione alle disposizioni del PNACC, per il quale si adotta una scomposizione dell'insediamento urbano in ambiti settoriali (Grey, Green e Soft). L'integrazione si rende necessaria in quanto da un lato le LCZ permettono di verificare l'efficacia delle strategie in termini di adattamento attraverso la potenziale variazione dei parametri associati alla

identifying measures to compensate for local vulnerabilities and enhance ecosystem services, adopting the transect rationale to typify the Upper Adriatic territory and orient measures according to territorial type (Maragno *et al*., 2022). These models simplify the choice of measures for each urban fabric, promoting disciplinary integration as an essential requirement for adaptation (Losasso and Rigillo, 2024).
This study follows the rational trend described by proposing an approach that integrates the morphometric analysis of LCZs with a taxonomic interpretation of the urban system derived from the PNACC. The approach was tested in the RETURN research project with the aim of offering a cognitive and operational tool to support local decision-making. The research integrates LCZs with a taxonomy consistent with the PNACC's division into Grey and Green areas to construct a knowledge matrix capable of representing climate criticalities, typological characteristics, and possible strategies for each LCZ. The case study of the Soccavo district in the Metropolitan City of Naples allowed the validity of the model to be tested in a complex and vulnerable context.

Methodology and Experimentation
The methodology adopted is based on an integrated approach aimed at defining a knowledge model that combines climate classifications and urban taxonomies to improve climate risk management. The experimental process is divided into three main phases (Fig. 1):
– data collection, mapping, and optimisation of Local Climate Zones (LCZs);
– integration of LCZs with urban taxonomies and spatial analysis;
– selection of adaptation strategies and actions in relation to taxonomic elements and existing catalogues.

Data Collection
The first step involved collecting specific topographic and morphometric datasets for the city of Naples. Open-source and institutional data were used, including the municipal topographic database (DBT), digital terrain models (DTM), and digital surface models (DSM) provided by the Campania Region, besides cadastral and census data relating to the built environment. This data was normalised and georeferenced in a GIS environment to ensure consistency and interoperability.
The open-source LCZ layer developed by Olivera *et al.* (Olivera *et al*., 2020) for the Metropolitan City of Naples was concomitantly acquired from the WUDAPT platform, and obtained through automated classification on Landsat satellite images (Fig. 2). Since the resolution and quality of the initial layer were not sufficient to describe in detail the morphological variables of a complex urban context such as Naples, optimisation was carried out by integrating local morphometric data.

Optimisation of Local Climate Zones
LCZ optimisation was carried out by integrating physical parameters such as building height, building density, percentage of impervious surfaces, presence of green spaces, and land use types. Spatial analysis in a GIS environment was conducted using specific modules for overlaying, segmentation, and morphological classification.

03 | Schede di analisi della composizione tassonomica delle LCZ-123 e LCZ-456. Mentre, nel caso delle LCZ123, si registra una netta prevalenza di LCZ2, l'analisi di dettaglio dei parametri morfotipologici associati ai tessuti per le LCZ-456 e la successiva riclassificazione di determinati elementi tassonomici fa registrare una variazione di prevalenza in favore dei Building aggregates delle LCZ6.

Analysis sheets of the taxonomic composition of LCZ-123 and LCZ-456. While, in the case of LCZ123, there is a clear prevalence of LCZ2, detailed analysis of the morphotypological parameters associated with the tissues for LCZ-456 and the subsequent reclassification of certain taxonomic elements shows a variation in prevalence in favour of the Building aggregates of LCZ6

classificazione; dall'altro, la tassonomia approfondisce nel dettaglio la composizione fisica degli insediamenti urbani e perfeziona la schematizzazione dei tessuti a scala più ampia operata dalle LCZ, individuando gli elementi più idonei a recepire gli indirizzi di pianificazione disposti dal PNACC.

Nello specifico, la tassonomia prevede la scomposizione dell'ambito settoriale *Grey* nel sistema delle *Built-up areas*, di cui fanno parte i *Building blocks* (*Urban blocks, Residential units* e *Building aggregates*) e gli spazi aperti pavimentati (*Road layout, Urban voids*), e dei Sistemi Tecnologici (*Water, Communication, Sewage, Energy, Mobility*). Il sistema *Green* è costituito da *Vegetated areas* (*Woods, Forests, Parks, Gardens, Agricultural areas, Urban greening, non-cultivated areas*) e Unvegetated areas (*Dunes, Bare soil*); il sistema *Blue*, da *Water bodies* (*Rivers, Riverside, Lakes*) e *Shoreline* (*Beaches* e *Dunes*). L'area di studio del distretto urbano di Soccavo è riportata di seguito in Fig. 3.

Per ottenere la mappatura degli elementi tassonomici, è stato necessario partire dal DBT dell'area di studio e associare ogni elemento ai relativi sistemi e sottosistemi della tassonomia (Tab. 1).

Successivamente, attraverso l'uso di strumenti GIS di analisi spaziali e statistica zonale sono stati identificati gli elementi fisici prevalenti in ciascuna LCZ e associati agli specifici sottosistemi della tassonomia. Ciò ha permesso di restituire un quadro integrato delle caratteristiche dell'area, evidenziando le potenzialità e le criticità climatiche di ciascun tessuto urbano. A valle del processo sono state realizzate delle schede sintetiche per ciascuna LCZ, delle quali si riporta un esempio per la LCZ-123 in Fig. 4.

Dai risultati si evince che la prevalenza dei tessuti appartiene al livello *Grey* (85,26%), in linea con i parametri di caratterizzazione della LCZ-123. Scendendo nel dettaglio del quinto livello di classificazione tassonomica, si evince che la prevalenza dei Building blocks è legata ai Residential units. L'integrazione dell'altezza degli edifici, determinante per la distinzione delle singole LCZ 1, 2 e 3, chiarisce che la maggioranza degli edifici appartenenti alla classe delle Residential units ha un'altezza compresa tra i 3 e i 10 metri. Questo risultato ha permesso di definire, con un elevato grado di precisione, che la LZC-123 può considerarsi quasi esclusivamente una LCZ-2. In Fig. 4 è illustrato il dettaglio delle misurazioni, sia in termini assoluti (in km2) sia in termini relativi (%).

Dalla tabella si evince che le *Residential Units*, che risultano costituire la tipologia edilizia prevalente nell'intera area di stu-



| 03

Tab. 01 | Associazione tra elementi del DBT e sistemi della tassonomia RETURN
Association between DBT elements and taxonomy systems

dio (77,04%), sono connotate da caratteristiche dell'edificato che per 84,91% in termini superficiali appartengo alla LCZ-2. La medesima analisi è stata effettuata sulla LCZ-456. Come nel caso precedente, l'analisi tassonomica risulta coerente con i parametri della LCZ-456; tuttavia, l'analisi di dettaglio dei tessuti integrando il parametro relativo all'altezza degli edifici non ha desunto una prevalenza assoluta di un tessuto edilizio specifico. Per migliorare il livello di dettaglio, è stata sviluppata un'ulteriore analisi sulle similitudini delle aree urbane espresse in termini di valori dei parametri geometrici e fisici utilizzati ai fini dell'individuazione delle singole LCZ. Attraverso dei processi di analisi spaziale e statistica zonale è stata individuata un'errata attribuzione della LCZ-465 in alcune aree urbane. Di seguito in Fig. 5 è illustrato, a titolo esemplificativo, un isolato campione. Come si desume dalle rappresentazioni, risulta necessario integrare un'analisi del tessuto urbano di maggior dettaglio per poter distinguere in maniera più efficace i caratteri che determinano l'appartenenza alle singole LCZ.
L'edificato selezionato (in azzurro) risulta appartenente alla LCZ-456 nonostante abbia una distribuzione degli elementi tassonomici e parametri geometrici e superficiali (*aspect ratio*, altezza degli edifici, percentuali di superficie coperta, superficie permeabile e impermeabile) coincidenti con la classificazione della LCZ2. Tale condizione si registra in numerose aree urbane, per le quali è stato necessario riattribuire la corretta LCZ. A valle del processo si verifica una variazione delle percentuali dei tessuti riscontrati nella LCZ-456, come illustrato in Fig. 4.
Si registra una prevalenza del tessuto di *Building aggregates* (67.77%) con una preponderanza del 78,26% di edifici appartenenti alla LCZ6, a discapito di una riduzione della copertura del tessuto di tipo Residential units, ricollocato nella corretta LCZ (2).
Quest'analisi di dettaglio ha permesso di incrementare l'accuratezza della classificazione LCZ e di poter stimare in termini quantitativi il potenziale patrimonio edilizio interessato da interventi di adattamento.

Selezione e confronto delle strategie e azioni di adattamento
La fase conclusiva ha previsto la selezione di strategie di adattamento climatiche dal Database di azioni del PNACC in relazione agli elementi della tassonomia individuati per ogni LCZ. Il database fornisce una panoramica delle misure proposte specificando, per ogni azione,
- la categoria di appartenenza;
- l'ambito settoriale (Soft, Green o Grey);
- gli indicatori per monitorare sia i progressi che l'efficacia dell'azione;
- le fonti normative di riferimento;
- una stima dei costi;
- gli enti coinvolti nell'attuazione.

La selezione delle azioni da attuare è stata effettuata sulla base di analisi condotte a scala distrettuale, privilegiando quelle più coerenti con le caratteristiche ambientali, sociali e infrastrutturali del contesto di riferimento. A ciascuna azione è stata

Tab. 01 |

DBT LABEL	RETURN TAXONOMY LABEL				
	1° LEVEL	2° LEVEL	3° LEVEL	4° LEVEL	5° LEVEL
Area attrezzata del suolo	Physical system	Grey sectoral areas	Built up areas	Outdoor spaces	Urban voids
Area di circolazione pedonale	Physical system	Grey sectoral areas	Built up areas	Outdoor spaces	Road layout
Area di circolazione veicolare	Physical system	Grey sectoral areas	Built up areas	Outdoor spaces	Road layout
Area priva di vegetazione	Physical system	Green sectoral areas	Green system	Vegetated areas	Non-cultivated areas
Area stradale	Physical system	Grey sectoral areas	Built up areas	Outdoor spaces	Road layout
Area verde	Physical system	Green sectoral areas	Green system	Vegetated areas	Urban greening
Attrezzatura sportiva	Physical system	Grey sectoral areas	Built up areas	Outdoor spaces	Urban voids
Bosco	Physical system	Green sectoral areas	Green system	Vegetated areas	Woods
Coltura agricola	Physical system	Green sectoral areas	Green system	Vegetated areas	Agricultural areas
Edificio	Physical system	Grey sectoral areas	Built up areas	Building blocks	Urban blocks / Residential units / Building aggregates
Forma naturale del terreno	Physical system	Green sectoral areas	Green system	Unvegetated areas	Dunes
Formazione particolare	Physical system	Green sectoral areas	Green system	Vegetated areas	Forests
Opera portuale e di difesa delle coste	Physical system	Grey sectoral areas	Technological system	Water	Water network
Pascolo o Incolto	Physical system	Green sectoral areas	Green system	Vegetated areas	Non-cultivated areas
Sede di trasporto su ferro	Physical system	Grey sectoral areas	Technological system	Mobility	Mobility Infrastructures
Viabilità mista secondaria	Physical system	Grey sectoral areas	Built up areas	Outdoor spaces	Road layout

04 | Campione esemplificativo dell'associazione incorretta delle LCZ rispetto alle tassonomie individuate
Sample of the incorrect association of LCZs with the identified taxonomies

LCZ1 – Compact high-rise
+
LCZ2 – Compact midrise
+
LCZ2 – Compact low-rise

LCZ	LCZ AREA	LCZ COVER RATIO	2L_PNACC	2L AREA	2L COVER RATIO	3L_PNACC	3L AREA	3L COVER RATIO	4L_PNACC	4L AREA	4L COVER RATIO	5L_PNACC	5L AREA	5L COVER RATIO
LCZ 123 – Compact mixed rise	1,19044	23,26%	Green sectoral areas	0,17548	14,74%	Green system	0,17548	14,74%	Vegetated areas	0,17548	14,74%	Agricoltural areas	0,01325	1,11%
												Non-cultivated areas	0,06426	5,40%
												Urban greening	0,09797	8,23%
			Grey sectoral areas	1,01494	85,26%	Built up areas	1,01064	84,90%	Building blocks	0,34452	28,94%	?	0,02206	1,85%
												Building aggregates	0,05360	4,50%
												Residential units	0,24843	20,87%
												Urban blocks	0,02043	1,72%
									Outdoor spaces	0,66612	55,96%	Road layout	0,47722	40,09%
												Uraban voids	0,18890	15,87%
					85,26%	Technological system	0,00430	0,36%	Mobility	0,00430	0,36%	Mobility Infrastructures	0,00430	0,36%

dunque associata la relativa classe di elementi della tassonomia del sistema fisico quale ipotetico ambito di applicazione. Pur rappresentando un passaggio chiave della ricerca, il processo di associazione opera una semplificazione in relazione alla specificità locale e dunque risulta suscettibile di variazioni rispetto alle esigenze dei singoli contesti. La validità dell'operazione sta nell'obiettivo di fornire al progettista un criterio orientativo di selezione delle azioni in relazione agli obiettivi e che consenta una iniziale valutazione sul processo da intraprendere in termini di efficacia e avanzamento.

Per collegare obiettivi e azioni del Database PNACC con interventi specifici di adattamento e riduzione del rischio climatico, le azioni sono state confrontate con diversi set di interventi e review di letteratura (Akhbari *et al*, 2015; Aminipuori *et al.*, 2019, Musco *et al.*, 2020; Rahmani&Sharifi, 2021; Li *et al.*, 2024; Friesen&Taubenbock, 2025) che hanno indagato l'efficacia di strategie a scala locale in relazione a ciascuna LCZ. Tra questi, il set di Musco[2] emerge come repertorio aggiornato di interventi in relazione al contesto italiano. La scomposizione in categorie di azioni proposta dal contributo include: forestazione urbana, tetti verdi, SuDS (canali e scoli), pavimentazioni permeabili, superfici fredde, urban shading, pareti verdi, raccolta acque meteoriche, sistemi di allarme rapido, fontane per il microclima.

Conoscendone la localizzazione in termini di LCZ, a ciascun elemento tassonomico del distretto di Soccavo è stata associata la relativa categoria di azione, adottando la scomposizione in categorie di interventi proposta da Musco *et al.*, e in coerenza con la configurazione morfo-tipologica e le vulnerabilità climatiche dell'area. L'output è un set di interventi misurabili per efficacia e avanzamento, come previsto dal PNACC, in relazione alle caratteristiche dei singoli contesti classificati tramite LCZ (Fig. 5). Come riportato sinteticamente in Fig. 5, ogni azione e i relativi indicatori possono essere legati a uno o più obiettivi del PNACC. Ad esempio, per i "Tetti verdi", gli obiettivi variano se applicati in centri storici (tipicamente associati alle LCZ 2, 3) o in tessuti consolidati a maglia larga (LCZ 6, 8, 10). Nel primo caso emergono interventi sperimentali di adattamento nello spazio pubblico e privato; nel secondo, con minori vincoli e più verde urbano, prevale la costituzione di infrastrutture verdi e supporto ai servizi ecosistemici. Dall'analisi emerge che alle LCZ con edifici compatti e alti (LCZ2), si associano interventi combinati di urban shading, vegetazione verticale e superfici fredde; mentre le zone residenziali a bassa densità (LCZ4-6) richiedono NbS, SuDS e de-impermeabilizzazione, per creare infrastrutture verdi e potenziare i servizi ecosistemici dei sistemi green e blue. Il processo ha evidenziato un'omogeneità delle proposte per ciascun LCZ in rapporto agli obiettivi del PNACC, con risultati favorevoli in termini di riproducibilità e come base per linee guida di adattamento climatico locale a partire dalle Local Climate Zones.

DTM and DSM models were used to extract information on elevation variations for the definition of the three-dimensionality of urban environments, in combination with cadastral data and high-resolution orthophotos.

Integration of LCZs with Urban Taxonomies

The second phase involved integrating LCZs with the physical urban system taxonomy developed as part of the RETURN project[3] in relation to the provisions of the PNACC, which breaks down urban settlements into sectoral areas (Grey, Green, and Soft). This integration is necessary because LCZs allow to verify the effectiveness of adaptation strategies through the potential variation of parameters associated with the classification. The taxonomy, instead, provides a detailed analysis of the physical composition of urban settlements, and refines the larger-scale schematisation of urban fabrics carried out by the LCZs, identifying the elements most suitable for implementing the planning guidelines set out in the PNACC.

Specifically, the taxonomy provides for the breakdown of the Grey sector into the system of Built-up areas, which includes Building blocks (Urban blocks, Residential units, and Building aggregates), and paved open spaces (Road layout, Urban voids), and Technological Systems (Water, Communication, Sewage, Energy, Mobility). The Green system consists of Vegetated areas (Woods, Forests, Parks, Gardens, Agricultural areas, Urban greening, non-cultivated areas), and Unvegetated areas (Dunes, Bare soil). The Blue system consists of Water bodies (Rivers, Riverside, Lakes), and Shoreline (Beaches and Dunes). The study area of the Soccavo urban district is shown below in Fig. 3.

For mapping the taxonomic elements, the DBT of the study area was used to associate each feature with the relevant systems and subsystems of the taxonomy (Fig. 1).

Subsequently, through the use of GIS spatial analysis and zonal statistics tools, the prevailing physical elements in each LCZ were identified and associated with specific subsystems of the taxonomy. This made it possible to provide an integrated picture of the area's characteristics, highlighting the potential and critical climate issues of each urban fabric. Following the process, summary sheets were created for each LCZ, an example of which is shown for LCZ-123 in Fig. 4.

The results show that the majority of fabrics belong to the Grey level (85.26%), in line with the characterisation parameters of LCZ-123. Going into detail on the fifth level of taxonomic classification, it can be seen that the prevalence of building blocks is linked to residential units.

The integration of building height, which is decisive for the distinction between individual LCZ 1, 2, and 3, clarifies that the majority of buildings belonging to the residential unit class have a height between 3 and 10 metres. This result has made it possible to define, with a high degree of precision, that LZC-123 can be considered almost exclusively an LCZ-2. Fig. 4 shows the details of the measurements, both in absolute terms (in km^2) and in relative terms (%).

The table shows that residential units, which are the most common type of building in the entire study area (77.04%), are characterised by building features that, in terms of surface

Tab. 02 | Azioni di adattamento (PNACC) con associazione diretta con gli elementi della tassonomia relativi al sistema fisico
Adaptation actions (PNACC) with direct association with taxonomy elements related to the physical system

Tab. 02 |

CODE	OBJECTIVE	ACTIONS	INDICATORS	TAXONOMY ELEMENT CLASS
IU008	Support ecosystem services-based solutions	Increased territorial connectivity – green infrastructure	Effectiveness: Absolute (sqm) and relative (%) increase in public green area Progress: surface area (ha) redeveloped as urban green	Outdoor spaces (road layout, urban voids); Vegetated areas (parks, woods, forests, gardens, agricultural areas, urban greening, non-cultivated areas); Unvegetated areas (dunes, bare soil)
IU015	Reduce impacts through green infrastructure	Reforestation of urban area and creation of green spaces within cities	Effectiveness: Absolute (sqm) and relative (%) increase in public green area Progress: surface area (ha) redeveloped as urban green	Outdoor spaces (road layout, urban voids); Vegetated areas (parks, woods, forests, gardens, agricultural areas, urban greening, non-cultivated areas); Unvegetated areas (dunes, bare soil)
FO005	Increasing resilience in the forest sector and the maintenance of ecosystem services by promoting sustainable forest planning and management	Planting and maintenance of agroforestry systems	Effectiveness: absolute (ha) and relative (%) increase in the land covered by the protected regiment (Natura 2000) Progress: number of interventions in the field of green infrastructure, territorial area (ha) falling under the protected areas regime (Natura 2000)	Vegetated areas (woods, forests, agricultural areas, non-cultivated areas); Water bodies (rivers, riverside, lakes); Shoreline (beaches, dunes)
RI004	Increase or change the speed and volume of water runoff	Redevelopment of watercourses in consideration of the maintenance of vital flows and ecological quality in situations of changes in future thermos-pluviometric regimes	Effectiveness: improvement of the ecological status of the waters Progress: Surface area (ha or sq km) subjected to interventions	Outdoor spaces (road layout, urban voids); Vegetated areas (parks, gardens, agricultural areas, urban greening, non-cultivated areas); Unvegetated areas (bare soil) Water (water network); Water bodies (rivers, riverside, lakes); Shoreline (beaches, dunes)
RI006	Preventing and mitigating the effects of extreme events with non-invasive interventions, mitigating environmental impacts, and increasing the resilience of hazardous activities	Adaptation measures through non-invasive interventions on watercourses, also based on the principles of naturalistic engineering and sustainable land use practice, aimed at preventing and mitigating the effects of extreme events due to climate change	Effectiveness: improvement of the ecological status of the waters Progress: surface area (ha or sqkm) subjected to interventions: mapping of flood/ flood forecasting and warning systems	Vegetated areas (parks, woods, forests, gardens, agricultural areas, urban greening, non-cultivated areas); Water (water network); Water bodies (rivers, riverside, lakes); Shoreline (beaches, dunes)
RI001	Improving the efficiency of water infrastructure	Increased connectivity of water infrastructure Maintenance of the multi-function water network	Effectiveness: increased availability of water resources Progress: extension of interconnected networks; overall length of the network	Vegetated areas (agricultural areas, non-cultivated areas); Water (water network); Sewage (sewage network)
TR003		Evaluate synergy and co-benefits of sustainable mobility (mitigation and adaptation)	Effectiveness: decreased transport delays Progress: number of products recognized as typical in response to climate change	Outdoor spaces (road layout); Mobility (mobility infrastructures);
EN001	Promote and increase better managements of energy demand for heating and cooling	Adaptation of existing buildings	Effectiveness: decrease in the number of days the systems are open Progress: number of plants with low environmental impact techniques; number of structures and or km of support infrastructures and fire protections	Building blocks (urban blocks, residential units, building aggregates); Energy (electricity network, gas network);
EN008	Promote experimental adaptation interventions in peri-urban areas and public spaces (improvement of the efficiency of the water supply system; improvement of thermal comfort and quality of living)	Experimental interventions of adaptation at building scale	Effectiveness: reduction of the number of buildings in energy class F and G Progress: extension of municipalities, suburbs, historic centers involved in projects.	Building blocks (urban blocks, residential units, building aggregates); Outdoor spaces (road layout, urban voids); Vegetated areas (parks, woods, forests, gardens, agricultural areas, urban greening, non-cultivated areas); Water (water network).

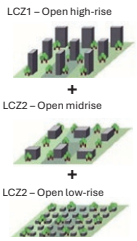
area, belong to LCZ-2 in 84.91% of cases. The same analysis was carried out on LCZ-456. As in the previous case, the taxonomic analysis is consistent with the parameters of LCZ-456; however, the detailed analysis of the fabric by integrating the parameter relating to the height of the buildings did not reveal an absolute prevalence of a specific building fabric.
To further improve the level of detail, an additional analysis was developed on the similarities of urban areas expressed in terms of the values of geometric and physical parameters used to identify individual LCZs. Through spatial and zonal statistical analysis processes, an incorrect attribution of LCZ-465 was identified in some urban areas. Fig. 5 below shows a sample block as an example.
As can be seen from the representations, it is necessary to integrate a more detailed analysis of the urban fabric in order to effectively distinguish the characteristics that determine membership of individual LCZs.
The selected building (in blue) belongs to LCZ-456 despite having a distribution of taxonomic elements, and of geometric and surface parameters (aspect ratio, building height, percentage of covered surface, permeable and impermeable surface) that coincide with the classification of LCZ2. This condition is found in numerous urban areas. Hence the need to reassign the correct LCZ. Following the process, there is a variation in the percentages of fabrics found in LCZ-456, as shown in Fig. 4.
There is a prevalence of Building aggregates (67.77%) with a preponderance of 78.26% of buildings belonging to LCZ6 at the expense of a reduction in the coverage of Residential units, which have been relocated to the correct LCZ (2).
This detailed analysis has made it possible to increase the accuracy of the LCZ classification, and to estimate, in quantitative terms, the potential building stock affected by adaptation measures.

Selection and Comparison of Adaptation Strategies

The final phase focused on selecting climate adaptation strategies from the PNACC Action Database linked to the

05 | Diagramma di processo e schede esemplificative delle azioni di adattamento associate alle LCZ in relazione agli obiettivi del Database PNACC. Elaborazione degli autori a partire da Musco *et al.* (2020)

Process diagram and example sheets of adaptation actions associated with LCZs in relation to the objectives of the PNACC Database. Prepared by the authors based on Musco et al. (2020)



LCZ	LCZ AREA	LCZ COVER RATIO	2L_PNACC	2L AREA	2L COVER RATIO	3L_PNACC	3L AREA	3L COVER RATIO	4L_PNACC	4L AREA	4L COVER RATIO	5L_PNACC	5L AREA	5L COVER RATIO
LCZ 456 – Open mixed-rise	1,34668	26,31%	Green sectoral areas	0,49688	36,90%	Green system	0,49688	36,90%	Vegetated areas	0,49688	36,90%	Agricoltural areas	0,14811	11,00%
												Non-cultivated areas	0,11918	8,85%
												Urban greening	0,20389	15,14%
												Woods	0,02570	1,91%
			Grey sectoral areas	0,84971	63,10%	Built up areas	0,84221	62,54%	Building blocks	0,30632	22,75%	Altro	0,02738	2,03%
												Building aggregates	0,05678	4,22%
												Residential units	0,20071	14,90%
												Urban blocks	0,02144	1,59%
									Outdoor spaces	0,53589	39,79%	Road layout	0,31652	23,50%
												Uraban voids	0,21936	16,29%
						Technological system	0,00750	0,56%	Mobility	0,00750	0,56%	Mobility Infrastructures	0,00750	0,56%

Discussione dei risultati L'analisi ha restituito in primo luogo una mappatura più accurata delle Local Climate Zones per l'area urbana di Soccavo, nella Città Metropolitana di Napoli; la distribuzione eterogenea delle LCZ che ne emerge è coerente con la complessità della morfologia urbana, dei fattori di densità edilizia e della topografia dell'area.

L'integrazione con la tassonomia urbana proposta nella ricerca RETURN ha fornito un quadro delle caratteristiche fisiche e funzionali degli insediamenti urbani coerente con le indicazioni della classificazione delle LCZ e disponibile sia in ambiente GIS (Fig. 6) che sotto forma di schedatura sintetica. Da esso si evince che la composizione di ciascuna LCZ in termini di elementi fisici corrisponde alla descrizione fornita da Stewart e Oke. Ciò fornisce un esito positivo in merito alla linearità della metodologia adottata in termini scalari, supportato da un grado di accuratezza del processo di riclassificazione ritenuto sufficiente (maggiore dell'80% per le LCZ123 e del 78% per le LCZ456) e validata attraverso gli indicatori caratteristici delle LCZ (aspect ratio, altezza degli edifici, superfici permeabili/impermeabili). Tuttavia, considerando i fattori di caratterizzazione tendenzialmente differenti delle LCZ per le città europee e la necessità di miglioramento del dato di input tramite verifiche puntuali, per testare ulteriormente la robustezza della metodologia sarebbe necessario verificare ulteriormente la rispondenza di ciascuna classe ai valori specifici per il caso studio secondo la metodologia proposta da Olivera *et al.*, e riferita al caso studio di Lisbona.

L'associazione tra gli elementi del DBT e la tassonomia rappresenta invece un fattore rilevante di replicabilità che apre a ulteriori sperimentazioni in quanto la classificazione del DBT risulta omogenea a scala nazionale. Infatti, l'omogeneità della classificazione per elementi del DBT, a livello nazionale, costituisce un fattore strategico per la replicabilità dell'approccio in differenti contesti, permettendo confronti sistematici e l'elaborazione di mappe climatiche locali coerenti. L'integrazione del framework LCZ con la tassonomia RETURN apre inoltre la strada alla costruzione di strumenti operativi orientati al clima, grazie alla selettività della tassonomia nel riconoscere gli elementi del sistema fisico più idonei a favorire l'adattamento attraverso soluzioni ecosistemiche per il contrasto dei rischi climatici e la predisposizione di condizioni di sviluppo di nuovi assetti innovativi. In questo senso, si sottolinea come le potenziali trasformazioni si riferiscano, per esempio, all'applicazione di NBS o soluzioni verdi, al miglioramento delle prestazioni tecnologiche o all'efficienza energetica, o alle azioni di progettazione di aree verdi che contrastino gli impatti climatici, migliorando l'organizzazione e la qualità del verde.

taxonomic elements identified for each LCZ. The database provides an overview of proposed measures, specifying for each action:

- category of intervention;
- sectoral domain (Soft, Green, or Grey);
- indicators for monitoring both progress and effectiveness;
- relevant regulatory references;
- estimated costs;
- stakeholders involved in implementation.

The selection of actions to be implemented was based on analyses conducted at the district level, prioritising those most consistent with the environmental, social, and infrastructural characteristics of the context in question. Each action was, therefore, associated with the relevant class of elements in the physical system taxonomy as a hypothetical scope of application. Despite being a key step in the research, the association process simplifies local specificities and is, therefore, subject to variations depending on the needs of individual contexts. The validity of the operation lies in its aim to provide designers with a guideline for selecting actions in relation to objectives, allowing for an initial assessment of the process to be undertaken in terms of effectiveness and progress.

To link the objectives and actions of the PNACC Database with specific climate adaptation and risk reduction interventions, the actions were compared with different sets of interventions and literature reviews (Akhbari *et al.*, 2015; Aminipuori *et al.*, 2019; Musco *et al.*, 2020; Rahmani & Sharifi, 2021; Li *et al.*, 2024; Friesen&Taubenbock, 2025) that investigated the effectiveness of local-scale strategies in relation to each LCZ. Among these, the Musco set emerges as an updated repertoire of interventions in relation to the Italian context. The breakdown into categories of actions proposed by the contribution includes urban forestry, green roofs, SuDS (channels and drains), permeable paving, cool surfaces, urban shading, green walls, rainwater harvesting, early warning systems, and microclimate fountains.

Knowing their location in terms of LCZ, each taxonomic element of the Soccavo district was associated with the relevant category of action, adopting the breakdown into categories of interventions proposed by Musco *et al.*, consistently with the morpho-typological configuration and climatic vulnerabilities of the area. The output is a set of interventions that can be measured in terms of effectiveness and progress, as required by the PNACC, in relation to the characteristics of the individual contexts classified by LCZ (Fig. 5).

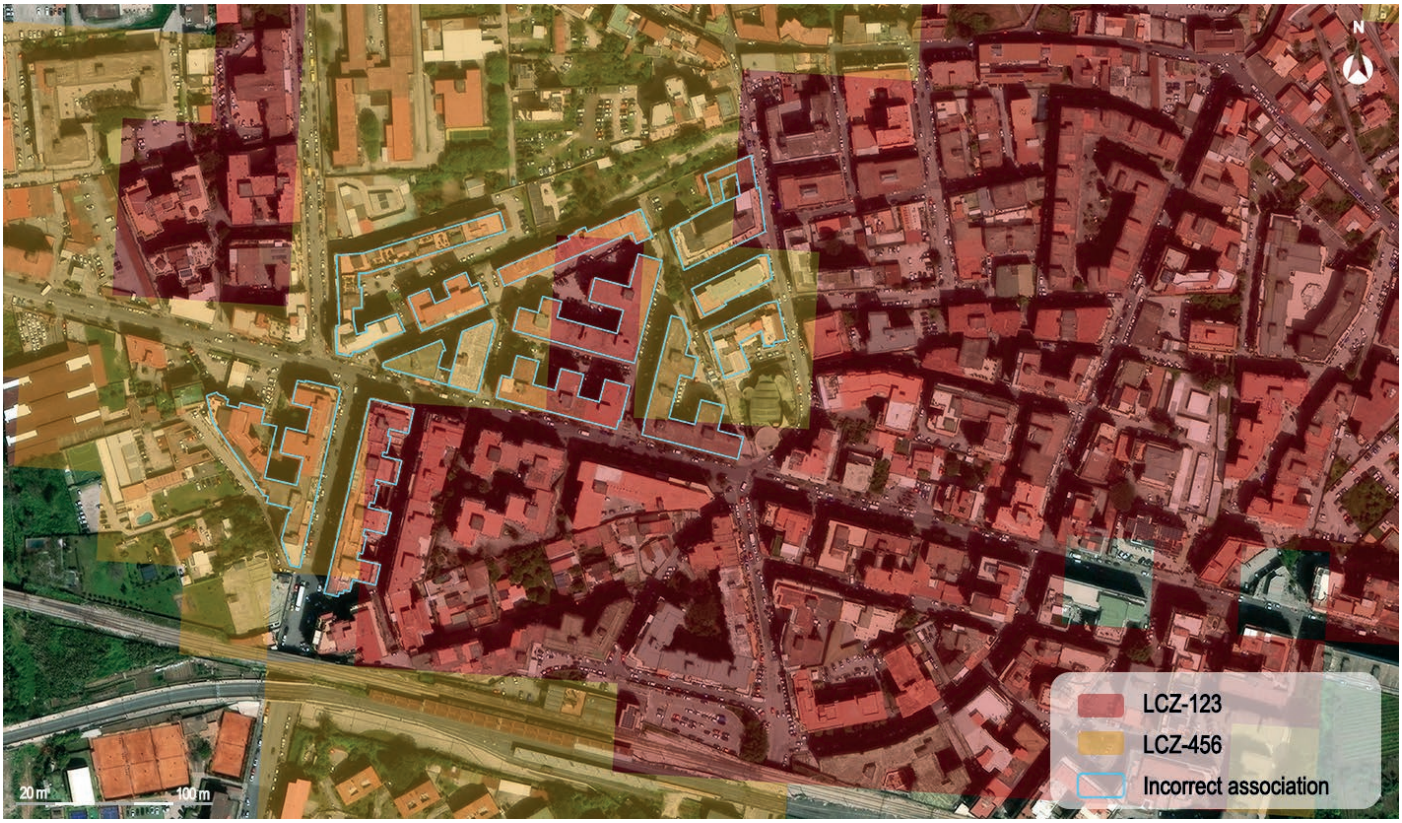
As summarised in Fig. 5, each action and its indicators can be linked to one or more PNACC objectives. For example, for "green roofs," the objectives vary when applied in historic centres (typically associated with LCZ 2, 3) or in consolidated, large-mesh fabrics (LCZ 6, 8, 10). In the first case, experimental adaptation measures in public and private spaces emerge; while the creation of green infrastructure and support for ecosystem services prevails in the second, with fewer constraints and more urban greenery.

The analysis shows that LCZs with compact, tall buildings (LCZ2) are associated with combined interventions of urban shading, vertical vegetation, and cool surfaces, while low-density residential areas (LCZ4-6) require NbS, SuDS, and de-impermeabili-

06 | Struttura del database. A ciascun elemento del Database è associata la relativa LCZ, le classi di elementi tassonomici (da 1L_5L) e il codice relativo ai potenziali obiettivi di adattamento da PNACC (ACT_PNACC)

Database structure. Each element of the Database is associated with the relevant LCZ, the taxonomic element classes (from 1L_5L), and the code relating to the potential adaptation objectives from PNACC (ACT_PNACC)

06 |



Ciò comporta la l'introduzione di capacità reattive agli impatti climatici sia per i sistemi *Grey* che per i sistemi Green tramite ulteriori elementi *Grey* o *Green*, suggerendo una "contaminazione" della compartimentazione netta proposta dal PNACC in favore di una lettura della complessità degli insediamenti urbani attraverso sottosistemi composti *Grey-Green*, che apre ad ulteriori approfondimenti. Allo stesso modo, le schede sintetiche riportate in Fig. 5 e riferite alla catalogazione delle azioni in relazione agli obiettivi di adattamento per ciascuna LCZ rappresentano un output innovativo e replicabile a supporto della definizione di strumenti operativi e linee guida capaci di tradurre le indicazioni della pianificazione nazionale in misure

sation to create green infrastructure and enhance the ecosystem services of green and blue systems. The process highlighted the homogeneity of the proposals for each LCZ in relation to the PNACC objectives, with favourable results in terms of reproducibility, and as a basis for local climate adaptation guidelines starting from the Local Climate Zones.

Discussion of Results

The analysis primarily provided a more accurate mapping of Local Climate Zones for the urban area of Soccavo, in the Metropolitan City of Naples. The heterogeneous distribution of LCZs that emerges is consistent with the complexity of urban morphology, building density factors, and topography of the area.

Integration with the urban taxonomy proposed in the RETURN research provided a picture of the physical and functional characteristics of urban settlements, consistently with the LCZ classification guidelines, and available both in a GIS environment (Fig. 6) and in the form of a summary file. This shows that the composition of each LCZ in terms of physical elements corresponds to the description provided by Stewart and Oke. It provides a positive outcome in terms of the linearity of the methodology adopted in scalar terms, supported by a degree of accuracy of the reclassification process considered sufficient (greater than 80% for LCZ123 and 78% for LCZ456), and validated through the characteristic indicators of the LCZ (aspect ratio, building height, permeable/impermeable surfaces). However, considering the generally different characterisation factors of LCZs for European cities, and the need to improve input data through specific checks, additional tests on the robustness of the methodology would require further verification of the compliance of each class with specific values for the case study, according to the methodology proposed by Olivera *et al.* and referred to in the Lisbon case study.

The association between the elements of the DBT and the taxonomy is, instead, a relevant factor of replicability that opens up further experimentation, as the DBT classification is homogeneous on a national scale. The homogeneity of the classification by DBT elements at the national level is a strategic factor for the replicability of the approach in different urban contexts, allowing for systematic comparisons and the development of consistent local climate maps. The integration of the LCZ framework with the RETURN taxonomy also paves the way for the construction of climate-oriented operational tools. This results from the selectivity of the taxonomy in recognising the elements of the physical system most suitable for promoting adaptation through ecosystem solutions to combat climate risks, and from the creation of conditions for the development of new innovative structures. In this sense, it should be noted that the potential transformations refer, for example, to the application of NBS or green solutions, the improvement of technological performance or energy efficiency, or the design of green areas that counteract climate impacts, improving the organisation and quality of green spaces. This involves introducing the capacity to respond to climate impacts for both Grey and Green systems through additional Grey or Green elements, suggesting 'contamination' of the clear

localizzate e misurabili. Un ulteriore sviluppo potrebbe riguardare l'integrazione delle LCZ con indicatori climatici osservati in situ (temperature, umidità, ventilazione), al fine di calibrare il modello di conoscenza e migliorarne la capacità predittiva rispetto ai fenomeni legati all'isola di calore urbana nei contesti mediterranei[4].

La ricerca propone un approccio innovativo alla gestione del rischio climatico urbano, basato sull'integrazione delle Local Climate Zones con la tassonomia urbana del PNACC. Utilizzando conoscenze trasversali su insediamenti urbani e impatti dei rischi climatici, si integrano set di dati open-source per offrire un primo supporto operativo alla valutazione dell'efficacia di strategie e azioni di adattamento. L'originalità del framework metodologico proposto risiede nella convergenza tra strumenti di conoscenza riconosciuti nel contesto internazionale e tassonomie orientate al progetto locale coerenti con il quadro normativo nazionale. Ne deriva un sistema sinergico di conoscenza e intervento volto ad interfacciarsi con i gap rilevati in letteratura rispetto all'applicazione di strategie tramite strumenti capaci di tradurre obiettivi nazionali e regionali in misure localizzate e misurabili (Cortekar, 2016), basati su approcci di conoscenza non deterministici e sensibili alla complessità degli insediamenti urbani.

Conclusioni

Tali strumenti facilitano una lettura comparata tra aspetti morfologici e ambientali, individuando punti critici per indagini di dettaglio e fornendo indirizzi progettuali che integrano logiche di riduzione del rischio nelle prime fasi di programmazione gestione. Nel contesto italiano, nonostante l'adozione su larga scala di strategie basate sulla combinazione di LCZ ed interventi di adattamento a scala locale risulti limitata, il crescente interesse scientifico e tecnico riscontrato suggerisce orizzonti applicativi promettenti, quali, ad esempio, l'integrazione con l'indagine dei rapporti tra morfologia urbana, consumi energetici ed efficacia delle strategie di raffrescamento in termini di mitigazione alla base della struttura dei PAESC (Piano d'Azione per l'Energia Sostenibile e il Clima), quale strumento principale attraverso cui gli enti locali possono contribuire agli obiettivi europei di neutralità climatica e adattamento.

La ricerca riconosce tuttavia la necessità di sviluppi futuri, soprattutto nella validazione empirica del modello, nell'analisi delle potenziali variazioni della classificazione LCZ in relazione alle azioni applicate e nell'estensione a contesti territoriali più ampi e complessi dal punto di vista morfologico e topografico, rispetto ai quali le applicazioni rivolte alle LCZ potrebbero rivelarsi inadeguate. L'efficacia dell'associazione tra azioni e obiettivi di adattamento del PNACC dovrà essere verificata per ciascun intervento in rapporto al miglioramento del comfort termico e microclimatico urbano attraverso la variazione dei parametri LCZ e monitorata tramite indicatori di avanzamento ed efficacia previsti dal Database PNACC.

Il contributo si rivolge dunque a ricercatori, progettisti e policy maker impegnati nella gestione del rischio climatico, mirando a integrare sperimentazioni internazionali e ricerche nazionali per lo sviluppo di misure di adattamento efficaci e localizzate, coerenti con le specificità dei contesti urbani come terreno di confronto essenziale per affrontare le sfide presenti e future.

compartmentalisation proposed by the PNACC in favour of an interpretation of the complexity of urban settlements through Grey-Green composite subsystems, thus opening further avenues for exploration. Similarly, the summary sheets shown in Fig. 5, which catalogue actions in relation to the adaptation objectives for each LCZ, are an innovative and replicable output to support the definition of operational tools and guidelines capable of translating national planning guidelines into localised and measurable measures. Further development could concern the integration of LCZs with climate indicators observed in situ (temperature, humidity, ventilation), in order to calibrate the model, and to improve its predictive capacity with respect to phenomena related to the urban heat island in Mediterranean contexts[4].

Conclusions

The research proposes an innovative approach to urban climate risk management, based on the integration of Local Climate Zones with the PNACC urban taxonomy. Using cross-cutting knowledge on urban settlements and climate risk impacts, open-source datasets are integrated to provide initial operational support for assessing the effectiveness of adaptation strategies and actions. The originality of the proposed methodological framework lies in the convergence between internationally recognised knowledge tools and local project-oriented taxonomies that are consistent with the national regulatory framework. The result is a synergistic system of knowledge and intervention aimed at addressing the gaps identified in the literature with regard to the application of strategies through tools capable of translating national and regional objectives into localised and measurable measures (Cortekar, 2016), based on non-deterministic knowledge approaches that are sensitive to the complexity of urban settlements.

These tools facilitate a comparative reading of both morphological and environmental aspects, identifying critical points for detailed investigation, and providing design guidelines that integrate a risk reduction rationale in the preliminary stages of planning and management. In the Italian context, despite the limited large-scale adoption of strategies based on a combination of LCZ and local-scale adaptation measures, growing scientific and technical interest suggests promising applications, such as integration with the investigation of relationships between urban morphology, energy consumption, and the effectiveness of cooling strategies in terms of mitigation at the basis of the SEAP (Sustainable Energy and Climate Action Plan) structure as the main tool through which local authorities can contribute to European climate neutrality and adaptation objectives.

However, the research acknowledges the need for future developments, especially in the empirical validation of the model, in the analysis of potential variations in the LCZ classification in relation to the actions applied, and in the extension to larger and more complex territorial contexts from a morphological and topographical point of view, for which LCZ applications may prove inadequate. The effectiveness of the association between actions and adaptation objectives of the PNACC will have to be verified for each intervention in relation to the improvement of urban thermal and microclimatic comfort by varying LCZ parameters,

ATTRIBUZIONE, RICONOSCIMENTI, DIRITTI D'AUTORE

"Introduzione", "Selezione e confronto delle strategie e azioni di adattamento" A.S.; "Raccolta dei dati"; "Ottimizzazione delle Local Climate Zones" V.M. "Integrazione delle LCZ con tassonomie urbane", "Discussione dei risultati", "Conclusioni" A.S., V.M.

Il contributo si colloca nel contesto della ricerca PNRR RETURN - multi-risk science for resilient communites under a changing climate. Spoke 5 - TS1: Urban and metropolitan settlement, responsabili scientifici: prof. Domenico Calcaterra, prof. Andrea Prota. Coordinatori nazionali Spoke 5 - TS1: prof. M. Losasso, prof. A. Prota, dott. M. Pittore; progetto finanziato con il bando nazionale Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza Partenariato Esteso PE3.

I soggetti coinvolti per lo Spoke TS1 sono gli Atenei di Bologna, Milano, Firenze, Cà Foscari, Cagliari, Napoli Federico II (capofila), Palermo, Torino e altri partners (Alma Viva, Autostrade, FS, Dipartimento Protezione Civile, OBS).

Ruolo degli Autori nella ricerca: componenti unità di ricerca UNINA in qualità di massa critica e massa aggregata.

NOTE

[1] La piattaforma online WUDAPT è accessibile al seguente link: https://www.wudapt.org/

[2] Per ulteriori approfondimenti in merito al set di azioni è possibile fare riferimento al link di seguito: https://www.comune.milano.it/aree-tematiche/ambiente/resilienza/adattamento-ai-cambiamenti-climatici.

[3] La tassonomia è stata sviluppata nell'ambito delle attività del Task 5.2.2 ed applicata al caso studio di Soccavo nel Task 5.4.3. Il lavoro, in fase di pubblicazione, fa riferimento ai Deliverable ad essi associati, rispettivamente il DV2.2 e il DV4.4.

[4] A questo proposito si segnala l'iniziativa LCZ-ODC, proposta da ASI (Agenzia Spaziale Italiana) e Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale del Politecnico di Milano (POLIMI-DICA) del programma "I4DP_SCIENCE" (Innovation for Downstream Preparation for Science). L'iniziativa, rivolta sia ad architetti, ingegneri, osservatori meteorologici che uffici tecnici di pubbliche amministrazioni (ad es. ARPA, città metropolitane) si prefigge l'"identificazione delle Local Climate Zones e studio della loro correlazione con la temperatura dell'aria nella Città Metropolitana di Milano tramite l'integrazione di dati geospaziali e tecnologie di Osservazione della Terra in ambiente Open Data Cube". L'evento rappresenta una testimonianza dell'interesse multidisciplinare e trasversale nel contesto nazionale all'integrazione dei dati e delle immagini satellitari a supporto delle analisi ambientali e microclimatiche in ambito urbano e alla correlazione in termini progettuali degli strumenti di lettura forniti dalle LCZ a supporto delle amministrazioni locali.

REFERENCES

Akbari, H., Cartalis, C., Kolokotsa, D., Muscio, A., Pisello, A. L., Rossi, F., … Zinzi, M. (2016), "Local climate change and urban heat island mitigation techniques–the state of the art. Journal of Civil Engineering and Management", Vol. 22, n.1, pp. 1-16. Available at: https://doi.org/10.3846/13923730.2015.1111934.

Alexander, P.J., Mills, G. (2014). "Local Climate Classification and Dublin's Urban Heat Island", *Atmosphere*, Vol. 5, n. 4, pp. 755-774. Available at: https://doi.org/10.3390/atmos5040755.

Angelucci, F., Rui Braz, A., di Sivio, M., Ladiana, D. (2015), *The Technological design of Resilient Landscape. Il progetto tecnologico del paesaggio resiliente*, FrancoAngeli, Milano. ISBN 9788891741264

Chandler, T.J. (1965), *The Climate of London*, Hutchinson, Londra.

Ching, J., Mills, G., Bechtel, B., *et al.* (2018), "WUDAPT: An Urban Weather, Climate, and Environmental Modeling Infrastructure for the Anthropocene", *Bulletin of American Meteorological Society*, vol. 99, n. 9, pp. 1907-1924.

Cortekar, J., Bender, S., Brune, M., Groth, M. (2016), "Why climate change adaptation in cities needs customised and flexible climate services", *Climate Services*, Vol. 4, pp. 42-51.

and monitored through progress and effectiveness indicators provided by the PNACC Database.

The contribution is, therefore, aimed at researchers, designers, and policy makers involved in climate risk management. The aim is to integrate international experiments and national research for the development of effective and localised adaptation measures that are consistent with the specificities of urban contexts as an essential arena for addressing present and future challenges.

ATTRIBUTION, ACKNOWLEDGMENTS, COPYRIGHT

"Introduction", "Selection and comparison of adaptation strategies and actions" A.S.; "Data collection"; "Optimisation of Local Climate Zones" V.M. "Integration of LCZs with urban taxonomies", "Discussion of results", "Conclusions" A.S., V.M.

The experimental work is part of the PNRR RETURN Project – Multi-Risk Science for Resilient Communities under a Changing Climate, Spoke 5 – TS1: Urban and Metropolitan Settlement. Scientific supervisors: Prof. Domenico Calcaterra, Prof. Andrea Prota. National coordinators of Spoke 5 – TS1: Prof. M. Losasso, Prof. A. Prota, Dr. M. Pittore. The project is funded under the national call of the Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza – Extended Partnership PE3.

Institutions involved in Spoke TS1 include the Universities of Bologna, Milan, Florence, Ca' Foscari, Cagliari, Naples Federico II (lead), Palermo, Turin, and other partners (Alma Viva, Autostrade, FS, Department of Civil Protection, OBS).

Role of the Authors in the Research: Members of the UNINA research unit acting as critical mass and aggregated team.

NOTES

[1] The WUDAPT online platform can be accessed at the following link: https://www.wudapt.org/

[2] For further information on the set of actions, please refer to the following link: https://www.comune.milano.it/aree-tematiche/ambiente/resilienza/adattamento-ai-cambiamenti-climatici.

[3] The taxonomy was developed as part of Task 5.2.2 and applied to the Soccavo case study in Task 5.4.3. The work, currently being published, refers to the associated Deliverables, DV2.2 and DV4.4, respectively.

[4] In this regard, we would like to highlight the LCZ-ODC initiative, proposed by ASI (Italian Space Agency), and by the Department of Civil and Environmental Engineering of the Politecnico di Milano (POLIMI-DICA) as part of the "I4DP_SCIENCE" (Innovation for Downstream Preparation for Science) programme. The initiative, aimed at architects, engineers, meteorological observers, and technical offices of public administrations (e.g., ARPA, metropolitan cities), aims to "identify Local Climate Zones and study their correlation with air temperature in the Metropolitan City of Milan through the integration of geospatial data and Earth Observation technologies in an Open Data Cube environment." The event is a testament to the multidisciplinary interest in Italy in integrating satellite data and images to support environmental and microclimatic analysis in urban areas, and in correlating the reading tools provided by LCZs in terms of design.

Cremonini, L., Georgiadis, T., Nardino M., Rossi, F., Rossi, A., Pinca, G., Fazzini, M. (2023), "Tools for Urban Climate Adaptation Plans: A Case Study on Bologna and Outcomes for Heat Wave Impact Reduction", *Challenges*, Vol. 14, n. 4, pp. 48. Available at: https://doi.org/10.3390/challe14040048.

D'Ambrosio, V., Di Martino, F., Tersigni, E. (2023), "Towards Climate Resilience of the Built Environment: A GIS-Based Framework for the Assessment of Climate-Proof Design Solutions for Buildings", *Buildings*, Vol. 13, n.7, pp. 1658. Available at: https://doi.org/10.3390/buildings13071658.

D'Onofrio, D., Vaccaro, F., Mazzocchi M. (2020), "Urban heat island assessment and mitigation strategies: an overview", *Sustainability*, Vol. 12, n. 12, pp. 4913. Available at: https://doi.org/10.3390/su12124913

Demuzere, M., Bechtel, B., Middel, A., Mills, G. (2019), "Mapping Europe into local climate zones", *PLOS ONE*, Vol. 14, n.4. Available at: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0214474

Ellefsen, R., (1991), "Mapping and measuring buildings in the urban canopy boundary layer in ten US cities", *Energy and Buildings*, Vol. 15–16, pp. 1025–1049. Available at: https://doi.org/10.1016/0378-7788(91)90097-M.

European Commission (EC) (2018), *Commission staff working document – Adaptation preparedness scoreboard Country fiches, accompanying the document Report from the Commission to the European Parliament and the Council on the implementation of the EU Strategy on adaptation to climate change*, SWD (2018) 460 final.

European Environment Agency (2020), *Urban Adaptation to Climate Change in Europe*. EEA Report No 09/2020. Available at: https://doi.org/10.2800/649947

Fondazione CMCC (2023), *Annual report 2023*. Available at: https://files.cmcc.it/Annual_Report/AR_2023_cmcc.pdf

Friesen, J., & Taubenböck, H. (2025), "The world's largest cities under climate change and their adaptive capacity to rising heat", *Scientific Reports*, Vol. 15, n.1, 32671. Available at: https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5579273/v1

Gál, T., Bechtel, B., Unger, J. (2015), "Comparison of two different Local Climate Zone mapping methods", presented at ICUC9 - 9th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment.

Gerundo, C., Stanganelli, M. (2024), "A Methodological Approach to Improve the Definition of Local Climate Zones in Complex Morphological Contexts. Application to the Case Study of Naples Metropolitan Area", 12th International Conference on Innovation in Urban and Regional Planning (INPUT2023) L'Aquila (IT), 6-8 settembre 2023, pp. 610-620. ISBN 978-3-031-54096-7.

Han, J., Mo, N., Cai, J. *et al.* (2024), "Advancing the local climate zones framework: a critical review of methodological progress, persisting challenges, and future research prospects", *Humanit. Soc. Sci. Commun.*, Vol. 11, pp. 538. Available at: https://doi.org/10.1057/s41599-024-03072-8.

Hidalgo, J., Dumas, G., Masson, V., Petit, G., Bechtel, B., Bocher, E., Foley, M., Schoetter, R., Mills, G. (2019), "Comparison between local climate zones maps derived from administrative datasets and satellite observations", *Urban Climate*, Vol. 27, pp. 64-89. Available at: 10.1016/j.uclim.2018.10.004.

IPCC (2022), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. Available at: https://doi.org/10.1017/9781009325844.

Levlovics, E., Gál, T., Unger, J. (2013), *Mapping local climate zones with a vector-based GIS method*. Aerul şi Apa: Componente ale Mediului, pp. 423-430.

Li, H., Zhao, Y., Wang, C., Ürge-Vorsatz, D., Carmeliet, J., Bardhan, R. (2024). "Cooling efficacy of trees across cities is determined by background climate, urban morphology, and tree trait", *Communications earth & environment*, Vol. 5, n.1, pp. 754. Available at: https://doi.org/10.1038/s43247-024-01908-4.

Liu, A., Ma, X., Du, M., Su, M., Hong, B. (2023), "The cooling intensity of green infrastructure in local climate zones: A comparative study in China's cold region", *Urban Climate*, Vol. 51, pp. 101631. Available at: https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101631.

Lopes, P., Fonte, C., See, L., Bechtel, B. (2017), "Using OpenStreetMap data to assist in the creation of LCZ maps", in 2017 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE) (1-4), IEEE. Available at: https://ieeexplore.ieee.org/document/7924630/.

Losasso, M., Rigillo, M., (2024), "L'adattamento climatico alla scala territoriale e urbana: acqua, suolo e vegetazione", in *Ambiente Rischio Comunicazione*, n.19. L'acqua. È un problema?, pp. 76-79. ISSN 2240-1520.

Maharoof, N., Emmanuel, R., Thomson, C., (2020), "Compatibility of local climate zone parameters for climate sensitive street design: Influence of openness and surface properties on local climate", *Urban Climate*, Vol. 33, 100642. Available at: https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100642.

Maragno, D., Litt, G., Ferretto, L., Gerla, F. (2022). *Abaco per la transizione climatica. Primo catalogo per pianificare l'adattamento nell'Alto Adriatico*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/363055875_ABACO_PER_LA_TRANSIZIONE_CLIMATICA_Primo_catalogo_per_pianificare_l'adattamento_nell'Alto_Adriatico#fullTextFileContent.

Middel, A., Häb, K., Brazel, A. J., Martin, C.A., Guhathakurta, S. (2014), "Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix Local Climate Zones", *Landscape and urban planning*, Vol. 122, pp. 16-28. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.11.004.

Mills, G., Bechtel, B., Alexander, P., Theeuwes, N., Foley, M., Ching, J., Ren, C., Yong, X., (2017), "Using WUDAPT to explore urban exposure to climate risks in selected cities", in Brotas L., Roaf S., Nicol F. (eds.), Proceedings of 33rd PLEA International Conference: Design to Thrive - PLEA 2017, vol. 2, pp. 1797-1804, NCEUB 2017, Network for Comfort and Energy Use in Buildings, Edinburgo, ISBN 978-099289575-4.

Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE) (2023), *PNACC – Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici. Allegato II: Metodologie per la definizione di strategie e piani locali di adattamento ai cambiamenti climatici*. Available at: :https://www.mase.gov.it/sites/default/files/archivio/allegati/clima/PNACC_AllegatoII_metodologie_definizione_strategie_piani_locali_adattamento.pdf (accessed on 17 May 2025).

Moraci, F., Errigo, M. F., Fazia, C., Campisi, T., Castelli, F. (2020), "Cities under Pressure: Strategies and Tools to Face Climate Change and Pandemic" *Sustainability*, vol. 12, n.18, pp. 7743. Available at: https://doi.org/10.3390/su12187743.

Musco, F., Maragno, D., Litt, G. (2020), *Abaco di azioni di adattamento ai cambiamenti climatici*. Available at: https://air.iuav.it/bitstream/11578/306140/1/Abaco_LAST_low.pdf.

Mussinelli E., Tartaglia, A. (2021). "Organizzare la conoscenza secondo criteri site-specific / Organising knowledge according to site-specific criteria", in Bologna, R., Losasso, M., Mussinelli, E., Tucci, F. (Eds.) (2021). *Dai distretti urbani agli eco-distretti. Metodologie di conoscenza, programmi strategici, progetti pilota per l'adattamento climatico/ From Urban Districts to Eco-districts. Knowledge Methodologies, Strategic Programmes, Pilot Projects for Climate Adaptation*, Maggioli, Santarcangelo di Romagna, IT.

Mussinelli, E.., Schiaffonati, F., Torricelli, M. C. (2022), "For a necessary change", *TECHNE: Journal of Technology for Architecture and Environment*, Vol. 23, pp. 15–20. Available at: https://doi.org/10.36253/techne-12915.

Nazarian, N., Dumas, N., Kleissl, J., Norford, L. (2019), "Effectiveness of cool walls on cooling load and urban temperature in a tropical climate", *Energy and Buildings*, Vol. 187, pp. 144-162. Available at: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.01.022.

Oke T.R., Mills, G, Christen, A., Voogt, J.A. (2017), *Urban Climates*, Cambridge University Press, Cambridge.

Oke, T. R. (2006), "Towards better communication in urban climate", *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 84, pp. 179-190.

Oke, T.R. (1988), "Street Design and Urban Canopy Layer Climate", *Energy and Buildings*, Vol. 11, pp. 103-113.

Oliveira, A., Lopes, A., Niza, S. (2020), "Local climate zones datasets from five Southern European cities: Copernicus based classification maps of Athens, Barcelona, Lisbon, Marseille and Naples", *Data in Brief*, Vol. 31, p. 105802. Available at: https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105802.

Rahmani, N., Sharifi, A. (2025), "Urban heat dynamics in Local Climate Zones (LCZs): A systematic review", *Building and Environment*, Vol. 267, p. 112225. Available at: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112225.

Rosenzweig, C., Solecki, W., Romero-Lankao, P., Mehrotra, S., Dhakal, S., Ali Ibrahim, S. (2018), "Pathways to urban transformation", in *Climate Change and Cities: Second Assessment Report of the Urban Climate Change Research Network (ARC3.2),* C. Rosenzweig, W. Solecki, P. Romero-Lankao, S. Mehrotra, S. Dhakal, and S. Ali Ibrahim, Eds., Cambridge University Press.

Rovers, V., Bosch, P., Albers, R., Hove, B., Blocken, B., Dobbelsteen, A., Spit, T.J.M., Dikmans, M., Boonstra, B., Brolsma, R.J. *et al.* (2014), *Climate Proof Cities - Final Report.*

Santamouris, M. (2015), "Regulating the damaged thermostat of the cities—status, impacts and mitigation challenges". *Energy and Buildings*, Vol. 91, pp. 43–56. Available at: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.052.

Schiaffonati, F., Mussinelli, E., Gambaro, M. (2011), "Tecnologia dell'Architettura per la progettazione ambientale | Architectural Technology for Architecture and Environment", *TECHNE: Journal of Technology for Architecture and Environment*, Vol. 1, pp. 48-53. Available at: https://doi.org/10.13128/Techne-9434.

Spano, D., Mereu, V., Bacciu, V., Barbato, G., Buonocore, M., Casartelli, V., Ellena, M., Lamesso, E., Ledda, A., Marras, S., Mercogliano, P., Monteleone, L., Mysiak, J., Padulano, R., Raffa, M., Ruiu, M.G.G., Serra, V., Villani, V. (2021), *Analisi del rischio. I cambiamenti climatici in sei città italiane.* Lecce, Italia: Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici – CMCC. Available at: https://www.doi.org/10.25424/cmcc/analisi_del_rischio_2021.

Stewart, I. D., Oke, T.R. (2012), "Local climate zones for urban temperature studies", *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 93, n. 12, pp. 1879–1900. Available at: https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1.

Tomasi, M., Favargiotti, S., van Lierop, M., Giovannini, L., Zonato, A. (2021), "Verona Adapt. Modelling as a Planning Instrument: Applying a Climate-Responsive Approach in Verona, Italy", *Sustainability*, Vol. 13, n. 12, pp. 6851. Available at: https://doi.org/10.3390/su13126851.

Turchetti, G. (2023), "Rome Local Climate Zone (RLCZ): decision-making support tool for the historical city", *TECHNE: Journal of Technology for Architecture and Environment*, Vol. 25, pp. 173-181. Available at: https://doi.org/10.36253/techne-13715.

Vavassori, A., Oxoli, D., Venuti, G., Brovelli, M. A., Siciliani de Cumis, M., Sacco, P., Tapete, D. (2024), "A combined Remote Sensing and GIS-based method for Local Climate Zone mapping using PRISMA and Sentinel-2 imagery", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 131, 103944, ISSN 1569-8432. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.103944.

Wang, R., Ren, C., Xu, Y., Ka-Lun, Lau, K., Shi, Y. (2018), "Mapping the local climate zones of urban areas by GIS-based and WUDAPT methods: A case study of Hong Kong", *Urban Climate*, Vol. 24, pp. 567-576. Available at: https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.10.001.

Zeidler, J., Renaud, F.G., Diallo, A.M. (2018), "Climate change adaptation in urban areas: reflections on the role of spatial planning", *Sustainability*, Vol. 10, n.12, pp. 4482. Available at: https://doi.org/10.3390/su10124482.

Zonato, A., Martilli, A., Di Sabatino, S., Zardi, D., Giovannini, L. (2020), "Evaluating the performance of a novel WUDAPT averaging technique to define urban morphology with mesoscale models", *Urban Climate*, Vol. 31, p. 100584. Available at: https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100584.

Disastri e Vulnerabilità: un approccio dinamico multidimensionale

Maddalena Coccagna[1], https://orcid.org/0000-0003-0447-1363
Elisabetta Schiavone[2], https://orcid.org/0009-0000-7329-1070
Stefano Zanut[3], https://orcid.org/0009-0000-8653-3470
[1] Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Ferrara, Italia
[2] Soluzioni Emergenti, Italia
[3] CERPA Italia ets, Italia

cnm@unife.it
elisabetta.schiavone@soluzioniemergenti.it
stefano.zanut@gmail.com

Abstract. Il Sendai Framework for Disaster Risk Reduction, ha evidenziato la natura multidimensionale e dinamica della vulnerabilità. Dalla seconda metà del secolo scorso, sono stati sviluppati strumenti, di diversa natura, con l'obbiettivo di individuare predittivamente o di quantificare le diverse vulnerabilità, spesso con scarsi risultati operativi. La ricerca CORE (Science and Human Factors for Resilient Society) fa parte di una nuova serie di metodi che favoriscono processi di co-produzione della conoscenza, in collaborazione argomentativa e dinamica tra i primi soccorritori e le persone con minori capacità di adattamento, allo scopo di valutare gli elementi intersezionali legati alle disuguaglianze e la presenza di rischi sistemici. Dal confronto critico di conoscenze, esperienze e percezioni, basati su scenari, è possibile individuare problemi nascosti, proporre soluzioni dinamiche e pianificare interventi per la resilienza funzionale del costruito e dell'ambiente.

Parole chiave: Vulnerabilità; Co-produzione; Coping; Resilienza funzionale.

La natura multidimensionale della vulnerabilità

Nel corso dell'ultimo secolo, il riconoscimento del ruolo delle attività umane sull'ambiente – sfociato poi nella definizione di "antropocene" – si è evoluto in parallelo alla ricerca dei fattori utili a valutare come questi impatti incidono sulle comunità, allo scopo di ridurli (*Disaster Risk Reduction*) e, più di recente, di imparare a gestirli (*Disaster Risk Management*). L'adozione del Quadro di Sendai ha messo in evidenza la natura multidimensionale della vulnerabilità (UNISDR, 2016), imponendo una riflessione collettiva sullo studio dei fattori interdipendenti e intersezionali che producono impatti socialmente diversi a seconda delle dinamiche spaziali, dell'evento e dei tipi di vulnerabilità (Orru *et al*., 2025, Schobert *et al*., 2023).

Fare emergere possibili vulnerabilità contribuisce a mettere in luce la presenza di specificità locali, anche culturali, oltre agli strumenti e alle reti di supporto – anche informali – che già vengono attuate, necessariamente da integrare a quelle istituzionali o esterne. Il coinvolgimento attivo riduce la limitata, o inadeguata, autosufficienza percepita dalle persone in caso di catastrofe (Fig. 1), che si traduce poi in una maggiore necessità di assistenza (Orru *et al*., 2021).

Dalle analisi di vulnerabilità occorre trarre indicazione per una migliore caratterizzazione e progettazione di servizi, edifici e spazi d'uso quotidiano, affinché possano esprimere la loro utilità "anche" in emergenza, secondo il principio della resilienza funzionale (Krüger, 2019).

L'analisi delle vulnerabilità nella gestione delle emergenze

Misurare e valutare la vulnerabilità permette di orientare i pianificatori e progettisti nel ridurre a monte i problemi e la scelta di strategie di adattamento di lungo periodo delle comunità (Clark *et al*., 2025). Se la "vulnerabilità" è uno dei concetti chiave esplorati nella letteratura sui disastri, fino al secolo scorso era però ritenuta una caratteristica di Paesi, regioni o edifici (UNDRO, 1976) piuttosto che delle società o degli individui (UNISDR, 2016). Solo negli ultimi anni viene letta come feno-

Disasters and Vulnerability: a multidimensional dynamic approach

Abstract. The Sendai Framework for Disaster Risk Reduction highlighted the multidimensional and dynamic nature of vulnerability. Since the second half of the last century, several tools have been developed to predictively identify or quantify vulnerabilities, often with poor operational results. The CORE research (Science and Human Factors for Resilient Society) is part of a new set of methods that enable knowledge co-production processes through argumentative and dynamic collaboration between first responders and people with reduced adaptive capacity. The aim is to assess intersectional factors linked to inequalities, and the presence of systemic risks. A critical comparison of knowledge, experiences, and perceptions, based on scenarios, allows to identify hidden problems, to propose dynamic solutions, and to improve the functional resilience of both buildings and the environment.

Keywords: Vulnerability; Co-production; Coping; Functional resilience.

The multidimensional nature of vulnerability

Over the last century, the role of human activities on the environment – which later led to the adoption of the term "Anthropocene" period – evolved alongside the search for suitable issues to assess how these impacts affect communities, with the aim of reducing them (*Disaster Risk Reduction*) and, more recently, of learning how to manage them (*Disaster Risk Management*). The adoption of the *Sendai Framework* highlighted the multidimensional and changing nature of vulnerability (UNISDR, 2016), enforcing collective reasoning on interdependent and intersectional features that give different social impacts depending on spatial dynamics, the event, and types of vulnerability (Orru *et al*., 2025, Schobert *et al*., 2023).

Exposing potential vulnerabilities helps to highlight local specificities – including cultural ones – and the existing tools and support networks, even informal ones, ready to be integrated into either institutional or external groups. Active involvement reduces either limited or inadequate self-sufficiency as perceived by people in the event of a disaster (Fig. 1), which results in a greater need for external assistance (Orru *et al*., 2021).

Vulnerability analyses must provide guidance to enhance the characterisation and design of services, buildings and spaces for daily use, so that they can express their usefulness "even" in emergencies, according to the principle of functional resilience (Krüger, 2019).

ISSN online: 2239-0243 | © 2025 Author(s) | http://www.fupress.com/techne | DOI: 10.36253/techne-18574
Open access, peer-reviewed article published by Firenze University Press (https://www.fupress.com) and distributed, except where otherwise noted, under the terms of the CC BY 4.0 License for content and CC0 1.0 Universal for metadata

01 | Fase di analisi comune per l'"anticipazione" degli interventi in emergenza e addestramento, con il coinvolgimento delle persone con disabilità e delle loro associazioni

Joint analysis phase for the "anticipation" of emergency interventions and training, with the involvement of people with disabilities and their associations

02 | Attività addestrativa con l'impiego di tecniche specifiche di soccorso. Coinvolgere direttamente i portatori d'interesse li fa diventare proattivi nei confronti dell'azione di soccorso e migliora le prestazioni dei soccorritori, nel rispetto delle specifiche necessità

Training activities using specific rescue techniques. Directly involving stakeholders makes them proactive in the rescue effort, improving the performance of rescuers in accordance with specific needs



01



02

meno dinamico (Thomas *et al*., 2013), in relazione alle capacità di coping1 delle persone in uno specifico scenario (Fig. 2), al prolungarsi dell'emergenza o al sovrapporsene di altre (de Ruiter, 2022).

Le metodologie disponibili in letteratura sono moltissime (Beccari et al, 2016), quelle con approccio quantitativo utilizzano soprattutto modelli deduttivo-gerarchici o, in minor misura, analisi che comprendono una selezione di componenti principali, come il *Social Vulnerability Index* (SoVI), basate su una riduzione dei fattori. Studi recenti ne hanno però messo in dubbio la replicabilità, la coerenza interna e la reale efficacia, soprattutto al di fuori del contesto specifico in cui sono stati validati (Cutter, 2024), La mancanza di informazioni può infatti portare a colmare la mancanza di dati con previsioni (Spielman *et al*., 2020).

I metodi basati sull'analisi di scenari, in alternativa o a completamento di analisi quantitative, facilita l'approccio intersezionale (Kuran at al., 2020) ponendo in relazione tra loro le "dimensioni" della vulnerabilità (sociale, economica, politica e ambientale), le capacità e bisogni specifici degli individui, la disponibilità delle reti di supporto sociale sul territorio (formali ed informali) e la vulnerabilità delle infrastrutture, degli edifici e dei servizi. Riconosciuti i limiti di questi strumenti, legati alla scelta del linguaggio e ai tempi necessari affinché persone con competenze diverse possano capire le domande e porre attenzione a molti fattori, si stanno diffondendo pratiche creative per darne diversa rappresentazione (Wachtendorf e Kendra, 2007; Pozek, 2022). La visione di film può ad esempio aiutare nella discussione di fenomeni, comportamenti o strategie, così come le

Vulnerability analysis in emergency management

The process of quantifying and assessing vulnerability provides guidance for planners and designers in reducing the root causes, and in choosing long-term adaptation strategies for communities (Clark *et al*., 2025). While "vulnerability" is a key concept in the literature on disasters, from a social perspective (Thomas *et al*., 2013), until the last century it was considered a unique characteristic of countries, regions, or buildings (UNDRO, 1976), rather than of societies or individuals (UNISDR, 2016). Only in recent years has it been interpreted as a dynamic phenomenon related to the individual's coping[1] capabilities in a specific scenario (Fig. 2), as the emergency persists, or as other emergencies overlap (de Ruiter, 2022).

There are many methodologies available in the literature (Beccari et al, 2016). Those with a quantitative approach mainly use deductive-hierarchical models or, to a lesser extent, analyses may include a selection of key components, such as the *Social Vulnerability Index* (SoVI), based on fewer factors. However, recent studies have questioned their replicability, internal coherence, and actual effectiveness, mainly outside their specific validation context (Cutter, 2024). The lack of information may lead to filling the data gap with predictions (Spielman *et al*., 2020).

Scenario-based methods facilitate an intersectional approach as an alternative or complement to quantitative analyses (Kuran *et al*., 2020) by linking the vulnerability "dimensions" (social, economic, political, and environmental), the specific skills and needs of individuals, the availability of local social support networks (formal and informal), and the vulnerability of infrastructure, buildings, and services. The limitations of these tools have been acknowledged, mainly concerning the choice of language and the time needed for people with different skills to understand the issues, and to pay attention to many factors. Creative practices are widely adopted to visualise them differently (Wachtendorf and Kendra, 2007; Pozek, 2022). For instance, watching films may contribute to a discussion on phenomena, behaviours, or strategies, just as theatrical practices can allow the trialling of scenarios (Boal, 2013). Speculative design is used to uncover unrealistic, radical, or bizarre elements, thus drawing attention to the rationale behind procedures or beliefs with the aim of addressing system gaps. Design thinking may be used to test the universality of a solution, for example by studying marginal and extreme cases, generating multiple solutions, and then assigning hierarchies and priorities.

The narrative approach allows us to study how different people either perceive or are influenced by the same event. In this case, research focuses on personal stories and experiences to understand how individuals construct meanings based on their experiences. A study developed in Sweden (Jarnkvist, 2020) used this method to investigate how homeowners relate to and describe climate risks, specifically which factors make them inclined to adapt their homes to new risks (Slovic, 2010). These outputs can be used to create different storytelling modes for communication campaigns, to provide incentives, and to analyse aggregated data with new filters. The widespread use of AI-powered semantic analysis tools has dramatically reduced the

pratiche teatrali possono consentire la sperimentazione di scenari (Boal, 2013). L'uso del design speculativo per fare emergere elementi improbabili o radicali o buffi, attirando l'attenzione sul perché di procedure o credenze, allo scopo di intervenire sulle lacune nei sistemi, così come attraverso il *design thinking* si può testare l'universalità di una soluzione, ad esempio studiando i casi marginali o estremi, generando più soluzioni dello stesso problema e quindi attribuendo gerarchie e priorità.
L'approccio narrativo consente di mettere in luce come persone diverse percepiscono lo stesso evento o se ne sentono coinvolti; qui la ricerca si concentra sulle storie personali e sulle esperienze, cioè su come gli individui sono capaci di costruire significati, a partire da ciò che vivono. Uno studio svolto in Svezia (Jarnkvist, 2020), ha usato questo approccio per indagare come i proprietari di case si relazionano e descrivono i rischi climatici, facendo emergere quali fattori li rendono più o meno propensi ad adattare le proprie abitazioni ai nuovi rischi (Slovic, 2010). Questi risultati possono essere utilizzati per creare *storytelling* differenti per informare, fornire incentivi, analizzare i dati aggregati con nuovi filtri, ecc.; la diffusione delle analisi semantiche attraverso l'IA abbrevia oggi i tempi di analisi delle interviste, a cura di un panel di esperti, anche pre-evidenziando pattern ricorrenti nelle narrazioni.

Il toolkit CORE per implementare la Cultura della Sicurezza

L'obiettivo generale del progetto *sCience and human factor for Resilient Society* (CORE)2 è rendere le comunità meglio preparate ad affrontare e superare i disastri, valorizzando gli strumenti di interazione fra i cittadini, i soccorritori e le istituzioni. Si tratta di un percorso complementare ad altri studi svolti nell'ambito del *Societal Resilience Cluster* (SRC), costituito nel 2021 attraverso il *Crisis Management Innovation Network Europe* (CMINE) per rendere disponibili trasversalmente le conoscenze acquisite e favorire la costruzione di esperienze operative comuni, replicabili in modalità open source; ad esempio altre ricerche hanno utilizzato i medesimi fattori per indirizzare i soccorsi, attraverso un sistema di triage (BuilDERS).
CORE si avvale di strumenti che contribuiscono a individuare sul proprio territorio le vulnerabilità (di sistema e legate alla comunità), per poi gestire spazi di discussione legati agli scenari (avvalendosi di canva con alcuni elementi pre-costruiti) e accompagnando le persone nella eventuale costruzione di soluzioni condivise, a fronte delle criticità emerse, oppure applicando una sezione del toolkit ad un problema specifico individuato dagli stakeholders.
Il primo strumento strategico di CORE (Deliv. 3.1) è rappresentato dall'analisi dei meccanismi di vulnerabilità, evidenziando le caratteristiche personali o i fattori fisici, mentali, sociali, economici e ambientali che modificano la suscettibilità all'impatto dei pericoli. Questa tabulazione permette di esaminare puntualmente le possibili esigenze dei soggetti più esposti in caso di emergenza, durante e dopo la crisi, attraverso momenti di confronto guidati fra gli *stakeholders* (Karma *et al*., 2024). Nei processi di Co-produzione del Modello di Conoscenza infatti, non è solo la competenza dei partecipanti a renderli efficaci ma anche la possibilità di esaminare i fenomeni in modo dialogico, argomentando su come le situazioni si sono o si possono evolvere nel tempo. Qui la collaborazione ha un ruolo centrale nel loro *empowerment*, proiettando un senso di scopo sociale

time to scrutinise the interview sessions conducted by a panel of experts, and can even pre-sharpen recurring patterns in narratives.

The CORE toolkit for implementing a Culture of Safety

The overall objective of the *sCience and human factors for Resilient Society* (CORE) project[2] is to better prepare communities to face and overcome disasters by enhancing the tools for interaction between citizens, emergency responders, and institutions. This project complements other studies carried out within the Societal Resilience Cluster (SRC) established in 2021 through the Crisis Management Innovation Network Europe (CMINE) to make the knowledge acquired available across the board, thus promoting the development of shared operational experiences replicable in an open-source contest. Other research used the same factors within a triage system to manage relief operations (BuilDERS).
CORE tools help identify local vulnerabilities (both system and community-related), manage discussion spaces related to the scenarios (using canvases with some predefined elements), and guide people in the potential construction of shared solutions either by addressing emerging critical issues or by applying only a section of the toolkit to a specific problem, as identified by stakeholders.
The first CORE strategic tool (Delivery 3.1) is the analysis of vulnerability mechanisms to highlight the personal characteristics or physical, mental, social, economic and environmental factors that can alter their susceptibility to the impact of hazards. This framework allows us to identify people most exposed in the event of an emergency, both during and after the crisis, through guided discussions with stakeholders (Karma *et al*., 2024). Indeed, it is not only the competence of participants that makes them effective in the processes of Co-production of the Knowledge Model, but also the opportunity to examine phenomena in a dialogic way, arguing about how situations have evolved or may evolve over time. Collaboration plays a central role in their empowerment, projecting a sense of social purpose even before being able to make use of their technical or experiential expertise (Clark, 2025). The ability to cope with adverse effects reduces vulnerability (Eklund, 2023) thanks to the availability of resources necessary to act (cognitive, economic, etc.) or as a result of the ability to manage and use them (Birkmann, 2013).
The *Human Centredness and Safety Culture Measurement* Toolkit (CORE, 2023) includes three sequential phases, the first quantitative and the others qualitative:

1. online surveys (define the level of local "safety culture"[3], giving an overview of the stakeholders)
2. semi-structured interviews (examine the reasons behind stage 1 results, highlighting mechanisms, causes, effects and interrelationships between the topics that emerge)
3. focus groups (which have a more narrative approach and are aimed at studying attitudes, feelings, beliefs, experiences, and reactions).

Questionnaires and interviews are different based on the type of interviewee (citizen, public authority, and rescuer). The focus groups' benefit from the graphic support of canvas

Tab. 01 | Esempio elaborato da: Toolkit CORE, Fase 2 (focus: Attitudine alla Sicurezza), per mettere in relazione la percezione sull'importanza dei Comportamenti Correlati alla Sicurezza da parte dei cittadini e delle figure istituzionali (CORE, 2023)

Developed by: CORE Toolkit, Phase 2 (focus: Attitudes to Safety), to relate how citizens and institutional figures perceive the importance of Safety-Related Behaviours (CORE, 2023)

Tab. 01 |

Citizens		**Public authority and First Responders**	
In your everyday duties, in what extent compliance with rules and procedures is necessary to mitigate events/disasters consequences?	- Can you explain why? - Do you see around you any of these regulations (on buildings, land use, road safety, crowding, pandemics, etc.) usually broken or whose infraction is usually tolerated? What is your position about? - Have you ever thought at possible consequences of breaking such regulations? In which case would consequences be acceptable? - Do you think that some rules driven by public safety goals are an (unacceptable) obstacle for other competing collective or personal goals? Explain. - Have you ever felt "obliged" to break rules because of more important/urgent objectives? Explain	In your everyday duties, in what extent compliance with rules and procedures is necessary to mitigate events/disasters consequences?	- Does generally people encourage each other to stick to the rules/procedures? - Have you ever found yourself in a situation where to be effective you needed to break rules or adapt procedures? - Have you ever been encouraged to break the rules by a co-worker or a supervisor? - Are there rules or procedures in your organization that are considered of minor importance and that can be broken without consequences? If yes, why they are not improved?

ancora prima di potersi avvalere della loro competenza tecnica o esperienziale (Clark, 2025). La capacità di far fronte agli effetti avversi riduce la vulnerabilità (Eklund, 2023), perché si dispone delle risorse necessarie per agire (cognitive, economiche, ecc.) o si è in grado di gestirle e utilizzarle (Birkmann, 2013).

Il Toolkit *Human centeredness and safety culture measurement* (CORE, 2023) prevede tre fasi consequenziali, la prima quantitativa e le altre qualitative:

1. i sondaggi online (definiscono il livello di "cultura della sicurezza"[3] locale, dando una panoramica delle parti interessate)
2. le interviste semi-strutturate (esaminano le motivazioni alla base dei risultati della fase 1, evidenziando meccanismi, cause, effetti e interrelazioni tra i temi emersi)
3. i focus group (hanno approccio più narrativo e sono indirizzati a studiare atteggiamenti, sentimenti, convinzioni, esperienze e reazioni).

Questionari e interviste sono diversi in base alla tipologia dell'intervistato (cittadino, istituzioni e soccorritore), i focus group utilizzano il supporto grafico di *canvas* (Deliv. 5.1) e i processi dialogici sono favoriti dall'introduzione in modo strutturale di brainstorming e fasi divergenti e convergenti. Le interviste possono essere svolte con singoli soggetti oppure indagare ambiti, trasversali al gruppo di indagine, così da confrontare le prassi normalmente previste e quelle che le persone adottano effettivamente per risolvere problemi quotidiani (Tab. 1). Fare emergere soluzioni alternative o difficoltà può contribuire a modificare le regole o a indicare criticità.

Il Toolkit CORE è stato implementato anche attraverso analisi controfattuali, sia esaminando eventi calamitosi reali già accaduti sia verificando impatti a partire dalle esigenze di uno specifico target (ad esempio le persone sorde) in presenza di scenari differenti. L'adozione di queste pratiche nei diversi Paesi e tra team trasversali ha contribuito a evidenziare gli effetti a

(Delivery 5.1), and dialogic processes are favoured by the structural introduction of brainstorming, and of divergent and convergent phases. Interviews can be conducted either with individual subjects or explore specific areas across the survey group, so as to compare common expected practices with those people adopt to solve everyday problems (Table 1). Identifying alternative solutions or difficulties can help change the rules or highlight critical issues.

The Toolkit CORE has been implemented through counterfactual analyses, both examining actual disasters that had already occurred, and by assessing impacts based on the needs of a specific target group (e.g., deaf people) in different scenarios. The adoption of these practices, across countries and functional teams, helped highlight the cascading effects of some phenomena, as well as the strategies that could be adopted to prevent and manage them.

The CORE Toolkit foresees three final discussion *panels,* namely one for obstacles and opportunities at the individual and community scale, one dedicated to teamwork among responders, and one for field rescue operations. The analysis of Human-Environment Interaction in CORE is broken down into usability and affordability of the built environment; *egressibility*[4]; risk perception and psycho-physiological response in an emergency; awareness and interest in learning; local knowledge; active citizenship and responsibility.

Applicability and Prospects

Although the processing techniques adopted in CORE are not new, their combination is effective, particularly the choice to propose basic frameworks and canvases aimed at engaging the most vulnerable stakeholders, and at identifying critical issues and intervention methods, both preventatively and during emergencies. The effectiveness of the Toolkit was verified through prototyping actions carried out during the research, as specified below:

a) The adoption of replicable and scientifically validated frameworks, thus making the various applications comparable at the local level and across different targets, encouraging open-source implementations.
b) The development of a data-driven action plan for resource optimisation, given that the emerging observations provide specific insights for each target and scenario.
c) The measurement of the effectiveness of civil protection activities from a human-centred perspective, either during the simulation stage or after the event, through systematic integration of the eight key elements of Safety Culture (i.e., trust, learning from mistakes, or leadership).
d) Applicability, even starting from the needs of a single group, for example to analyse the critical issues that arise, or to focus on an activity or service and examine how one or more targets, or one or more responders may intervene effectively, each aware of their own role in risk management.

The tools are structured to provide in-depth analysis (Fig. 3) and be adaptable to the expected outcome, both short and long-term. Critical reading of the results could be facilitated by the involvement of stakeholders who deal with designing and not only with

cascata di alcuni fenomeni e le strategie adottabili per prevenirli e gestirli.
Il Toolkit prevede tre *canvas* di discussione: uno per ostacoli e opportunità alla scala della persona e della comunità, uno dedicato al lavoro di team dei soccorritori e uno alle operazioni di soccorso sul campo. L'analisi della *Human-Environment Interaction* viene scomposta in: usabilità e *affordance* dell'ambiente costruito, *egressibility*[4], percezione del rischio e risposta psico-fisiologica in caso di emergenza; consapevolezza e interesse a imparare; conoscenze locali, cittadinanza attiva e responsabilità.

Applicabilità e prospettive Seppure le tecniche di lavoro adottate in CORE non siano nuove, risulta efficace la loro combinazione, in particolare la scelta di proporre schemi e canva base, finalizzati a coinvolgere gli *stakeholders* più vulnerabili e a individuare criticità e metodi per intervenire, sia preventivamente sia durante le emergenze. Le azioni prototipali svolte durante la ricerca hanno consentito di verificare l'efficacia del Toolkit, in particolare attraverso:

a) L'adozione di schemi replicabili e scientificamente validati, così da rendere confrontabili le varie applicazioni a livello locale e su target diversi, favorendone l'implementazione *open-source*.
b) La costruzione di un piano d'azione *data-driven* per l'ottimizzazione delle risorse, dato che le osservazioni emerse consentono approfondimenti specifici per ogni target e scenario.
c) La misurazione dell'efficacia delle attività di protezione civile in ottica *human-centered*, in fase di simulazione o dopo l'evento, attraverso l'integrazione sistematica degli otto elementi chiave della cultura della sicurezza (come la fiducia, l'apprendimento dagli errori o la leadership).
d) L'applicabilità anche a partire dalle esigenze di un singolo gruppo, ad esempio per analizzare criticità che si sono manifestate, oppure focalizzando l'attenzione su una attività o un servizio ed esaminando come uno o più target o uno o più soccorritori potrebbero intervenire con efficacia, ognuno consapevole del proprio ruolo nella gestione del rischio.

Gli strumenti sono strutturati per avere approfondimenti (Fig. 3) ed essere adattabili al risultato atteso, a breve e lungo termine. La lettura critica dei risultati potrebbe essere notevolmente facilitata aggiungendo agli stakeholders non solo coloro che si occupano di emergenza ma anche di progettazione, come i membri degli Ordini locali o gruppi di lavoro nazionali. L'uso del Toolkit, così come evidenziato dai test svolti dai diversi partner e inclusi fra i materiali di progetto, si presta a supportare anche esperienze di progettazione anticipatoria (Fanzini and Rotaru, 2019) oppure di formazione professionale, facendo emergere le conoscenze dall'ambito dell'emergenza, per indirizzarle al miglioramento diffuso del costruito (negli Stati Uniti è stato adottato lo slogan: "*Build-Back-Better*").
L'analisi della vulnerabilità sociale in emergenza, proprio in quanto legata al territorio, dovrebbe essere svolta in sinergia con le azioni di promozione dell'accessibilità (es. i PEBA, Piani di Eliminazione delle Barriere Architettoniche), delle *Green Infrastructures* (vedi BISE, 2013) e delle *Nature Based Solutions* (vedi NBS, 2025), così che i cittadini e le istituzioni coinvolti abbiano occasione di inquadrare le possibili scelte nell'ambito degli scenari, definendo priorità e massimizzando gli investimenti. La *call-to-action* di queste azioni, cioè il miglioramen-

emergencies, for example members of local professional communities or national working groups. As highlighted by the tests conducted by various partners and included among project materials, the Toolkit is suitable to support anticipatory planning experiences (Fanzini and Rotaru, 2019) or training projects for professionals, thus allowing knowledge from the emergency context to emerge for widespread improvement of the built environment, even after emergencies (the slogan: "Build-Back-Better" has been adopted in the United States).
Since the analysis of social vulnerability in emergencies is dedicated to a specific territory, it should be carried out in synergy with actions to promote accessibility (e.g., PEBA, Plans for the Elimination of Architectural Barriers), *Green Infrastructures* (see BISE, 2013), and *Nature Based Solutions* (see NBS, 2025), so that citizens and institutions involved have the opportunity to frame any option within the scenarios, defining priorities and maximising investments. The call to action for these initiatives can only happen concurrently, thus improving the usability of spaces and services, and their effectiveness during emergencies.
Using the social vulnerability analysis filter is essential at all levels of design. Those conceiving strategic infrastructure, services, or buildings (e.g., stations, energy or ICT networks, hospitals) must consider the variability of support needs (Orru and Nævestad, 2023; Schobert *et al.*, 2023). Other activities must guarantee assistance, even assuming an overload of requests ("surge") or the possibility of remaining isolated (Orru *et al.*, 2025), such as, for example, canteens, Emergency Assistance Centres (AACs), day centres, nursing homes, or kindergartens. Civil Protection Plans already identify buildings with different emergency uses ("dual use"), e.g., gyms used as shelter areas or dormitories, but in the design stage they are rarely foreseen among the possible use scenarios.
Other useful synergies can be expected with the tools developed to calibrate housing needs (e.g., the Innodata Portal[5] of the Emilia-Romagna region) to design play landscape or green spaces, or to promote inclusive solutions for climate change adaptation (Gaspari *et al.*, 2020). Designing open spaces with care is a key area for reducing vulnerabilities, not only when designated for waiting areas or reception camps (Villagra-Islas and Alves, 2016) but, above all, to encourage the construction of identities and social networks (Aldrich and Meyer, 2015) or for prevention. The latter can be achieved, for example, by studying dual uses that favour water drainage, shading, the separation of green areas in the event of fires, or the creation of wind corridors (Mussinelli *et al.*, 2018).
Today the methods for assessing social vulnerabilities during emergencies are being consolidated, primarily aimed at improving communication and relationships between citizens and operators (e.g., LINKS6 or RiskPACC7) but with great potential for knowledge transfer also in the field of building regulations, technical training and for defining bottom-up solutions. CORE's experience has shown how to systematise the experience of those who have already experienced both the effects of disasters and possible solutions, thus strengthening the safety culture in daily planning.

03 | Nella ipotesi degli autori, le opportunità tecniche di resilienza – non attualmente previsti come output separato – potrebbero essere facilmente sistematizzati e diventare parte delle strategie di pianificazione, incentivazione e formazione (*Disaster Prepardness*), prevedendo momenti di interazione con esperti e progettisti. Rielaborazione degli autori di *Natural and Man-made Disaster Scenarios Analysis*, D2.1 (CORE, 2023)

In the authors' hypothesis, the Resilience Opportunities – not currently foreseen as a separate output – may be easily systematised and become part of planning, incentive and training strategies (Disaster Preparedness), providing moments of interaction with experts and designers. Reworked by the authors of Natural and Man-made Disaster Scenarios Analysis, D2.1 (CORE, 2023)

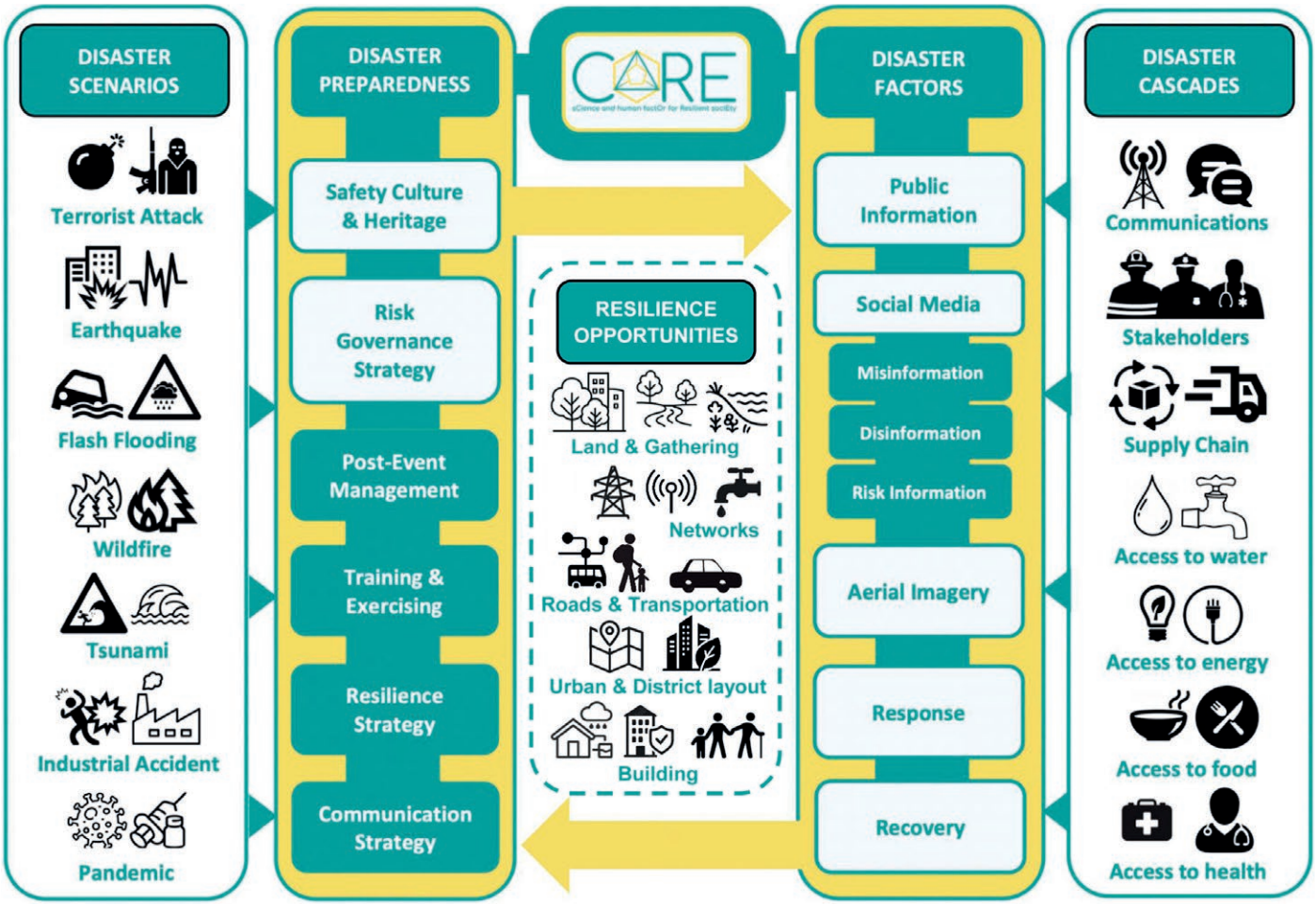
to della fruibilità di spazi e servizi e la loro efficacia in fase di emergenza, non può che avvenire contestualmente.

Usare il filtro dell'analisi delle vulnerabilità sociali è indispensabile a tutti i livelli della progettazione. Chi progetta infrastrutture, servizi o edifici strategici (p.es. stazioni, reti di energia o ICT, ospedali) non può non tenere conto delle diverse esigenze di supporto (Orru e Nævestad, 2023; Schobert *et al*., 2023). Altre attività devono garantire l'assistenza ipotizzando il sovraccarico di richieste ("surge") o la possibilità di rimanere isolate (Orru *et al*., 2025), ad esempio: mense, Centri di Assistenza e Urgenza (CAU), centri diurni, RSA o asili. I Piani di Protezione Civile individuano già edifici con diversa destinazione in emergenza ("doppio uso"), ad esempio le palestre impiegate come Aree di Ricovero o dormitori, però in fase progettuale difficilmente sono previsti fra gli scenari di impiego possibili.

Altre utili sinergie sono prevedibili con gli strumenti sviluppati per calibrare il fabbisogno abitativo (ad esempio il Portale Innodata[5] della regione Emilia-Romagna), per progettare aree verdi o attrezzate o per favorire soluzioni inclusive di adattamento al cambiamento climatico (Gaspari *et al*., 2020). La cura nella progettazione degli spazi aperti è infatti un ambito chiave per ridurre le vulnerabilità, non solo quando destinati ad aree di attesa o a campi di accoglienza (Villagra-Islas e Alves, 2016) ma, soprattutto, per favorire la costruzione di identità e la promozione di reti sociali (Aldrich e Meyer, 2015) oppure per fare prevenzione, ad esempio studiando doppi usi che favoriscano il drenaggio dell'acqua, l'ombreggiamento, la separazione di aree verdi per limitare la diffusione degli incendi o creando corridoi di ventilazione (Mussinelli *et al*., 2018).

I metodi di valutazione delle vulnerabilità sociali in fase di emergenza sono dunque in fase di consolidamento, oggi indirizzate soprattutto al miglioramento della comunicazione e relazione fra cittadini e operatori (es. LINKS[6] o RiskPACC[7]) ma con un grande potenziale di trasferimento delle conoscenze

03 |



nell'ambito dei regolamenti edilizi, della formazione tecnica e della definizione di soluzioni dal basso. L'esperienza di CORE ha mostrato come sia possibile sistematizzare l'esperienza di chi dei disastri ha già sperimentato sia gli effetti sia le possibili soluzioni, così da contribuire a rafforzare la cultura sicurezza nella progettazione quotidiana.

NOTE

[1] Con 'coping' si intendono le strategie mentali e comportamentali che una persona mette in atto per gestire o fronteggiare situazioni problematiche.

[2] CORE, Progetto finanziato nell'ambito di Horizon2020 e parte del *Societal Resilience Cluster*. https://www.euproject-core.eu/ (Accessed on 01/09/2025).

[3] Nel Toolkit CORE si fa riferimento alla "Dimensione della Sicurezza" come descritta in: CANSO (2008)

[4] Il termine caratterizza gli svantaggi nell'allontanamento in caso di emergenza di alcune tipologie di persone e la necessità di predisporre soluzioni ad hoc (Proulx and Pineau, 1996).

[5] Portale web progettato da ART-ER su iniziativa della Regione Emilia-Romagna e finanziato dal POR – Fondo Sociale Europeo 2014-2020. Available at: https://emiliaromagnainnodata.art-er.it/ (Accessed on 01/09/2025).

[6] LINKS è una ricerca europea finalizzata a rafforzare l'uso dei social media e del *crowdsourcing* per migliorare la resilienza sociale, https://links-project.eu/project/ (Accessed on 01/09/2025).

[7] RiskPACC è una ricerca europea che studia la percezione del rischio e le azioni utili a migliorare l'interazione tra protezione civile e cittadini, https://www.riskpacc.eu/ (Accessed on 01/09/2025).

REFERENCES

Aldrich, D.P., Meyer, M.A. (2015), "Social capital and community resilience", *Am. Behav. Sci.*, 59(2), pp. 254-269. Available at: https://doi.org/10.1177/0002764214550299

Beccari B. (2016), "Comparative Analysis of Disaster Risk, Vulnerability and Resilience Composite Indicators", *PLOS Currents Disasters*, vol. 14 (1). Available at: 10.1371/currents.dis.453df025e34b682e9737f95070f9b970

Birkmann, J., Cardona, O.D., Carreño, M.L. *et al.* (2013), "Framing vulnerability, risk and societal responses: the MOVE framework". *Natural Hazards*, vol. 67, pp. 193-211. Available at: https://doi.org/10.1007/s11069-013-0558-5

BISE, *Biodiversity Information System for Europe* (2013). Available at: https://biodiversity.europa.eu/green-infrastructure (Accessed on 01/09/2025).

Boal, A. (2013), *Theatre of the Oppressed*, Theatre Communications Group.

BuilDERS, *Building Resilience in Europe*. Available at: https://buildersproject.eu/ (Accessed on 01/09/2025).

CANSO – Civil Air Navigation Services Organisation (2008), *Safety Culture Definition and Enhancement Process*. Available at: https://www2023.icao.int/NACC/Documents/Meetings/2018/ASBU18/OD-10-Safety%20Culture%20Definition%20and%20Enhancement%20Process.pdf

Clark, N., Boersma, K., Raju, E. et al (2025), Strengthening all-of-society approaches for disaster resilient societies through competency building: A European research agenda, *Int. J. Disaster Risk Reduction*, vol.121, 105345. Available at: https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2025.105345.

CMINE, SRC – Societal resilience cluster of projects. Available at: https://www.cmine.eu/topics/20936 (Accessed on 01/09/2025)

CORE (2023), *Human centeredness and safety culture measurement toolkit*, Deliv. 5.1.1. Available at: https://www.euproject-core.eu/achievements/public-deliverables.html (Accessed on 01/09/2025).

NOTES

[1] Coping refers to the mental and behavioural strategies a person implements to either manage or deal with problematic situations.

[2] CORE, Project funded under Horizon2020 and part of the Societal Resilience Cluster. https://www.euproject-core.eu/ (Accessed on 01/09/2025).

[3] The CORE Toolkit refers to the "Security Dimension" as described in: CANSO (2008).

[4] This term characterises the disadvantage of several people during an evacuation, and the need to define ad hoc solutions to achieve equal safety levels (Proulx and Pineau, 1996).

[5] Web portal designed by ART-ER on the initiative of the Emilia-Romagna Region and funded by the POR - European Social Fund 2014-2020. Available at: https://emiliaromagnainnodata.art-er.it/ (Accessed on 01/09/2025).

[6] LINKS is a European research project aimed at strengthening the use of social media and crowdsourcing to improve social resilience, https://links-project.eu/project/ (Accessed on 01/09/2025).

[7] RiskPACC is a European research project that studies risk perception and useful actions to improve the interaction between civil protection and citizens, https://www.riskpacc.eu/ (Accessed on 01/09/2025).

Cutter, S.L. (2024), "The origin and diffusion of the social vulnerability index (SoVI)", *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 109, 104576. Available at: https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104576.

de Ruiter, M.C., van Loon, A.F. (2022), "The challenges of dynamic vulnerability and how to assess it", *iScience*, vol. 25(8), 104720. Available at: https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104720.

Eklund, L.G., Sibilia, A., Salvi, A. *et al.* (2023), *Towards a European wide vulnerability framework*, Publications Office of the European Union, Luxembourg, https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC118850

Fanzini, D. and Rotaru, I. (2018), "Anticipazione progettuale come strumento per la resilienza sociale dell'ambiente costruito", *Techne*, n.15, pp.101-107; DOI: 10.13128/Techne-22089

Gaspari, J., Gianfrate, V., Ginocchini, G., Bigi, M. (2020), "Accessibility as design tool: a comfortable environment through the public space", *Techne*, vol. 19, pp. 223-231. Available at: https://doi.org/10.13128/techne-7786

Jarnkvist K. (2020), "Intersectional perspectives of house owner narratives on climate risks", *Journal of Risk Research*, vol. 23(9), pp.1211-1224. Available at: https://doi.org/10.1080/13669877.2019.1646314.

Karma, S., Zanut, S., Crișan, M. *et al.* (2024), "People Vulnerability before, during and after a Disaster: A Dynamic Taxonomic Approach", *IntechOpen*. Available at: doi: 10.5772/intechopen.1005205

Krüger, M. (2019), "Building instead of imposing resilience: revisiting the relationship between resilience and the state", *Int. Polit. Sociol*., vol. 13(1), pp. 53-67. Available at: https://doi.org/10.1093/ips/oly025.

Kuran, C.H.A., Morsut, C., Kruke, B.I. *et al.* (2020), "Vulnerability and vulnerable groups from an intersectionality perspective", *Int. J. Disaster Risk Reduction*, vol. 50, 101826. Available at: https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101826.

Mussinelli, E., Tartaglia, A., Bisogni, G.L., Malcevschi, S. (2018), "The role of Nature-Based Solutions in architectural and urban design", *Techne*, vol. 15, pp. 116-123. Available at: https://doi.org/10.13128/Techne-22112

NBS, Nature-Base Solutions. Available at: https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/environment/nature-based-solutions_en (Accessed on 01/09/2025).

Orru, K., Hansson, S. and Nero, K. (2025), "Social vulnerability triage: a dynamic scenario-based system for disaster planning and response", *Journal of Risk Research*, vol. 28(6), pp. 549-570. Available at: https://doi.org/10.1080/13669877.2025.2522660.

Orru, k., Nævestad, T.O. (2023), "What makes individuals fall through the safety nets during disasters?", special issue in *Int. J. Disaster Risk Reduction*, vol. 96, 103874. Available at: https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103874.

Orru, K., Hansson, S., Gabel, F. *et al.* (2021), "Approaches to 'vulnerability' in eight European disaster management systems", *Disasters*, vol. 46, 742–767. Available at: https://doi.org/10.1111/disa.12481.

Pozek, N. (2022), *Avoiding "failure of imagination": Informing scenario planning with creative practices*, UN Office for Disaster Risk Reduction, GAR Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction Available at: https://www.undrr.org/media/80338/download?startDownload=20250903 (Accessed on 01/09/2025).

Proulx, G.; Pineau, J. (1996), *Review of evacuation strategies for occupants with disabilities*, Internal Report (National Research Council of Canada. Institute for Research in Construction); no. IRC-IR-712, 1996-04-01. Available at: https://doi.org/10.4224/40003083.

Schobert, M., Orru, K., Gabel, F. *et al.* (2023), "The three A's of social capital in crises: challenges with the availability, accessibility and activatability of social support", *Int. J. Disaster Risk Reduction*, vol. 92, 103704. Available at: https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103704.

Slovic, P. (2010), *The feeling of risk: New perspective on Risk Perception*, Earthscan from Routledge, New York.

Spielman, S.E., Tuccillo, J., Folch, D.C. *et al.* (2020), "Evaluating social vulnerability indicators: criteria and their application to the Social Vulnerability Index", *Natural Hazards*, vol. 100, pp.417-436. Available at: https://doi.org/10.1007/s11069-019-03820-z.

Thomas, D.S., Phillips, B.D., Lovekamp, W.E., Fothergill A. (a cura di) (2013), *Social Vulnerability to Disasters*, CRC Press, London.

UNDRO – United Nations Disaster Relief Organization (1976), *Guidelines for Disaster Prevention. Volume I: Pre-disaster Physical Planning of Human Settlements*, United Nations, Geneva.

UNISDR (2016), *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030*, Climate-ADAPT. Available at: http://www.preventionweb.net/files/43291_sendaiframeworkfordrren.pdf (Accessed on 01/09/2025).

Villagra-Islas, P., Alves, S. (2016), "Open space and their attributes, uses and restorative qualities in an earthquake emergency scenario: The case of Concepción, Chile", *Urban Forestry & Urban Greening*, vol. 19, pp. 56-67. Available at: https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.06.017.

Wachtendorf, T., Kendra, J. (2007), "Improvisation, Creativity, and the Art of Emergency Management", *Understanding and Responding to Terrorism*. NATO science for peace and security series. E. Human and societal dynamics. IOS Press. pp.324-335. Available at: https://udspace.udel.edu/handle/19716/3054.

Un nuovo strumento per mappare il cambiamento climatico in architettura: metodo e prospettive

Giacomo Chiesa, https://orcid.org/0000-0003-3783-5143
Dipartimento di Architettura e Design, Politecnico di Torino, Italia
giacomo.chiesa@polito.it

Abstract. L'instabilità indotta dai cambiamenti climatici richiede di sviluppare modelli e strumenti per prevedere e prevenire il loro impatto sulle performance proprie dell'ambiente costruito. Il paper introduce un nuovo strumento per mappare le conseguenze del cambiamento climatico, sia a scala di singolo edificio, sia a scala territoriale. Tale strumento permette ai professionisti di studiare gli impatti delle scelte tecnologico-progettuali considerando un clima dinamico per incrementare la conoscenza, valutare i possibili rischi e supportare azioni di prevenzione e incremento della resilienza. Il contributo, derivato da una ricerca H2020 co-finanziata dalla EU, descrive la metodologia sviluppata, focalizzandosi sul trattamento dei dati climatici, e discute alcuni risultati.

Parole chiave: Cambiamento climatico; Rischio climatico; Progettazione bioclimatica; Simulazione e scenari; Valutazione impatti.

Introduzione e stato dell'arte

Il clima gioca un ruolo fondamentale nella progettazione sostenibile degli edifici, influenzando l'applicabilità tecnologica e la verifica delle performance attese (Wu *et al*., 2026; Khdair *et al*., 2026). Spesso, tuttavia, il clima è ancora inteso come elemento fisso di un luogo – «the conditions for a particular region» (Davis and Jokiniemi, 2008). Tale assunto è, nell'era dei cambiamenti climatici, superato in quanto tralascia la componente temporale della tipicità ed espone configurazioni spaziali e scelte tecnologiche alle diverse scale del progetto a potenziali rischi (Košir, 2019). Tra tali rischi si possono citare alcune cause del performance gap energetico, incertezze nei tempi di ritorno economici di un intervento e potenziali esposizioni di edifici a fenomeni perturbativi inaspettati (IEA-EBC, 2024). Con i cambiamenti climatici, la dinamicità del clima è divenuta fondamentale, per quanto normative, disponibilità di dati per progettisti, strumenti progettuali e consuetudini rendano ancora difficile analizzarne a fondo gli impatti e mitigarne i rischi in modo consapevole e predittivo (Machard *et al*., 2020). Diversi studi hanno dimostrato l'impatto della scelta di un file climatico obsoleto sui risultati progettuali e performativi attesi – per esempio, (Chiesa e Grosso, 2015; Murano *et al*., 2016; Lupato and Manzan, 2019) comparano le variazioni di performance mostrando divergenze anche superiori al 30%. Da un lato, i cambiamenti climatici rendono alcune attuali strategie bioclimatiche e tecnologiche potenzialmente inadatte ai climi locali futuri (es. Zhang *et al*., 2021; Machado *et al*., 2025), dall'altro lato, tali cambiamenti non trovano ancora una giusta considerazione e traduzione nelle banche dati, nelle normative e negli strumenti messi a disposizione dei professionisti (IEA-EBC, 2024). Si identificano i seguenti ambiti di innovazione in cui nuove ricerche sono necessarie: i) definire il clima come parametro medio variabile al fine di quantificare l'impatto del rischio dei cambiamenti climatici sui progetti per renderli adatti ai climi futuri; ii) sviluppare metodologie e strumenti per integrare la variabilità climatica nel progetto alle diverse scale.

La ricerca ha come obiettivo principale l'introduzione di possibili soluzioni ai due ambiti di innovazione sovra identificati. Sono perseguiti i seguenti obiettivi specifici:

- proporre una nuova metodologia capace di integrare le principali banche dati climatiche europee (Copernicus Data Store) (CDS, 2025) con la prassi e gli strumenti di analisi propri della progettazione tecnologico-ambientale, identificando specifiche famiglie di indicatori (KPI – Key Performance Indicators).
- tradurre tale metodologia in una piattaforma integrata per la simulazione climatica avanzata adattando l'innovativa

A new tool for mapping climate change in architecture: method and perspectives

Abstract. The instability induced by climate change requires the development of models and tools to predict and mitigate its impact on the performance of the built environment. This paper introduces a new tool for mapping the impact of climate change, both at the scale of individual buildings and at the territorial level. The tool enables professionals to study the effects of technological and design choices in the face of a dynamic climate, aiming to increase knowledge, assess potential risks, and support preventive actions to enhance resilience. The paper, derived from an H2020 research project co-funded by the EU, describes the developed methodology, focusing on climate data processing, and discusses some preliminary results.

Keywords: Climate change; Climate risk; Bioclimatic design; Simulation and scenarios; Impact assessment.

Introduction and state of the art

Climate plays a fundamental role in sustainable building design, influencing technological applicability and verifying expected performance (Wu *et al*., 2026; Khdair *et al*., 2026). However, climate is still often perceived as a fixed attribute of a place – «the conditions for a particular region» (Davis and Jokiniemi, 2008). This assumption is outdated in the era of climate change as it overlooks the temporal component of typicality, thus exposing spatial configurations and technological choices across different project scales to potential risks (Košir, 2019). Some causes of the energy performance gap, uncertainty in economic payback time for building renovation, and the exposure of buildings to unexpected perturbation phenomena can be found in them (IEA-EBC, 2024). With climate change, understanding climate as a dynamic phenomenon has become essential. Nevertheless, regulations, data availability for designers, design tools, and current practices still make it challenging to comprehensively analyse their impacts, and to intentionally mitigate risks in a predictive manner (Machard *et al*., 2020). Several studies have demonstrated the effect of using an obsolete climate file on design and performance results. For example, (Chiesa and Grosso, 2015; Murano *et al*., 2016; Lupato and Manzan, 2019) compare variations in performance, showing divergences exceeding 30%. Moreover, climate change renders specific current bioclimatic strategies and technologies potentially unsuitable for future local climates. These changes are still insufficiently addressed and translated into climate databases, standards, and professional tools. Two key innovation areas can be identified

ISSN online: 2239-0243 | © 2025 Author(s) | http://www.fupress.com/techne | DOI: 10.36253/techne-18609
Open access, peer-reviewed article published by Firenze University Press (https://www.fupress.com) and distributed, except where otherwise noted, under the terms of the CC BY 4.0 License for content and CC0 1.0 Universal for metadata

01 | Pipeline della metodologia sviluppata
The developed Methodological pipeline

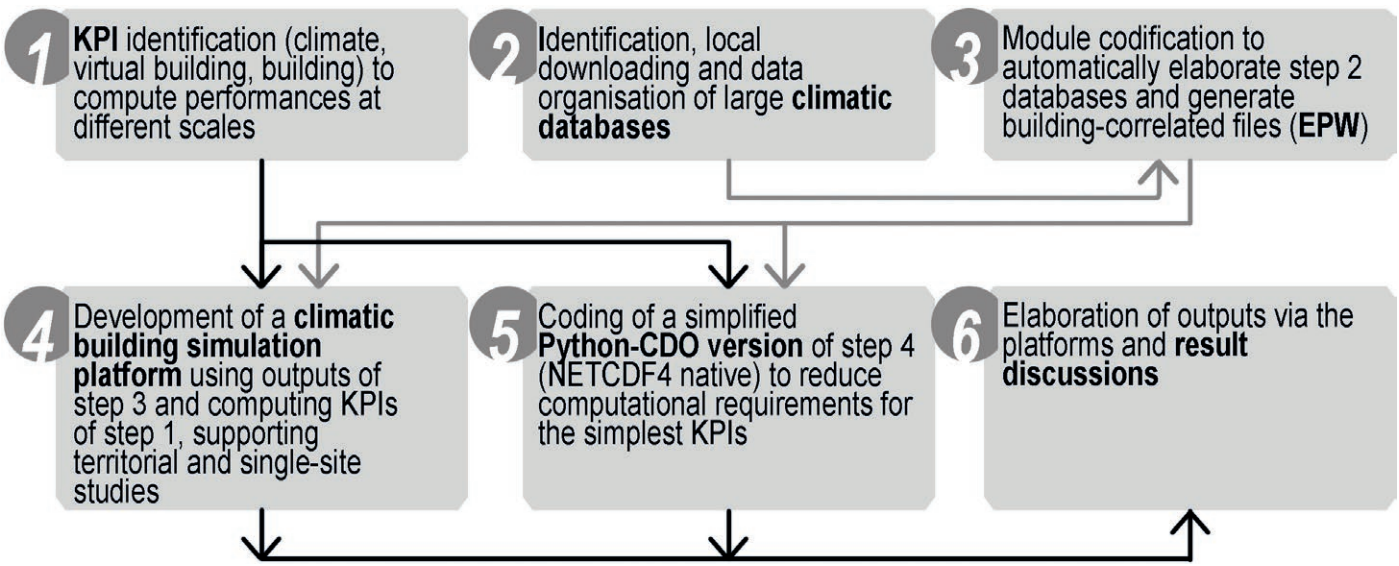
libreria PREDYCE (Chiesa *et al*., 2023) che permette la simulazione dinamica (energetica e IEQ) degli edifici tramite EnergyPlus. Lo strumento deve permettere di studiare e ottimizzare sia singoli edifici, sia sviluppare analisi territoriali;
– testare tale modulo e mostrarne potenziali ambiti di applicazione per valutare gli impatti e la resilienza ai cambiamenti climatici, mappando le variazioni delle performance a scala europea.

Tali obiettivi sono fortemente innovativi, permettendo di studiare i rischi e gli impatti del cambiamento non solo su singoli siti selezionati (Machado *et al*., 2025; Al-Assaad *et al*., 2025), ma a livello territoriale, includendo inoltre la possibilità di simulare dinamicamente a tale scala archetipi di edifici. Al momento non esistono altre piattaforme capaci di integrare sia la gestione/elaborazione di grandi database climatici per renderli utilizzabili in ambito architettonico, sia la possibilità di gestire flussi massivi di simulazioni, includendo variazioni di parametri progettuali e operativi, sia il calcolo di specifiche KPI edilizie per prevenire possibili rischi.

Metodologia e sviluppo del nuovo strumento

Questo paper introduce la nuova pipeline metodologica e la struttura della piattaforma di calcolo, focalizzandosi sulle banche dati climatiche e sulla loro elaborazione. La metodologia è descritta in Figura 1 e articolata in 6 step di seguito dettagliati.
La piattaforma di simulazione integrata include numerosi indicatori di performance (KPI) raggruppati in tre principali categorie di analisi: i. KPI climatiche (es. temperature medie, numero di notti tropicali); ii. KPI di meta-edificio (es. gradi giorno, zonizzazioni climatiche, diagrammi bioclimatici); e iii. KPI di edificio (es. modelli di comfort termico, fabbisogni energetici). La prima categoria si basa sull'elaborazione diretta dei dati climatici. La seconda categoria permette di analizzare KPI tipiche delle fasi meta-progettuali, includendo l'impatto virtuale degli edifici e calcolando il potenziale di numerose tecnologie bioclimatico-passive. La terza categoria si basa sulla simulazione dettagliata di specifici edifici, includendo sia la componente energetica sia la qualità ambientale.
Definiti i KPI, la ricerca si concentra sulle fonti di dati climatici, considerando i database europei ed includendo sia fonti di reanalisi (basate sull'integrazione di osservazioni meteorologiche e modelli) (Copernicus, 2025a), sia proiezioni climatiche basate su modelli numerici globali e regionali (Copernicus, 2025b). Si sono considerate tre principali fonti di dati: ERA5 e ERA5-land (re-analisi) e un vasto set di proiezioni EURO-CORDEX. I database ERA5 a disposizione includono un vasto numero di variabili includendo una stima delle incertezze (CDS, 2025). I dati sono disponibili a scala globale con un dettaglio territoriale basato su una griglia di circa 30 km e con un dettaglio temporale orario a partire dagli anni 40 del '900. ERA5-land si focalizza sull'evoluzione di variabili climatiche a livello della superficie terrestre. I dati, disponibili dagli anni 50 del '900, sono forniti con una risoluzione spaziale di circa 9 km di griglia (CDS, 2025). Per le proiezioni future si sono adottati i modelli EURO-CORDEX (CDS, 2025), basati sui quattro scenari di emissioni RCP (Representative Concentration Pathways) elaborati dall'IPCC nel quinto report (IPCC, 2019). I modelli utilizzati combinano modelli globali GCM (General Circula-

01 |



tion Models) e regionali RCM (Regional Climate Models). Lo studio del clima futuro necessita di considerare un insieme di proiezioni climatiche per ogni scenario RCP e non un solo modello, al fine di includere potenziali incertezze (Vautard *et al*., 2021). Attualmente, la piattaforma sviluppata incorpora più di 20 combinazioni GCM-RCM con un sufficiente numero di variabili per generare un file idoneo per il contesto edilizio. Le diverse combinazioni GCM-RCM sono anche fornite di un database storico con dati dal 1951 al 2005 per valutare gli scenari rispetto a dati osservati.

Selezionati i database, si è proceduto al download automatizzato dei file NETCDF4 sul server locale dell'unità di ricerca. Tali dati sono stati elaborati sviluppando nuove versioni del modulo EPW_compiler della piattaforma PREDYCE adatte ai diversi database selezionati. La Figura 2 illustra la specifica metodologia sviluppata. L'elaborazione dei dati originali mira alla generazione di file in formato EPW (EnergyPlus Weather), un riconosciuto standard di dati climatici utilizzato da alcuni dei più diffusi tool di simulazione degli edifici (Crawley and Barnaby, 2019), tra cui EnergyPlus. Tra le elaborazioni dati necessarie si ricordano lo splitting della radiazione solare globale orizzontale (GHI) nelle sue componenti e l'interpolazione dei dati futuri per raggiungere la risoluzione oraria adottando diverse strategie scientifiche ricorrenti in base alle specifiche variabili: interpolazione lineare (es. temperatura, umidità e pressione), dato costante nel range temporale (es. direzione e velocità del vento, precipitazioni e radiazione infrarossa), interpolazione polinomiale con mantenimento dei valori tri-orari originali ed eventuale adattamento al corretto intervallo alba-tramonto (Ruiz-Arias, 2022).

Completate le fasi di elaborazione delle variabili, i file meteorologici annuali sono stati post-elaborati generando tre tipologie di file EPW (o NETCDF4) per simulazioni proprie delle discipline progettuali: i. file TMY (Typical Meteorological Year) – formato standard basato sull'individuazione di mesi tipici in un intervallo di almeno 10 anni secondo la UNI EN ISO 15927-4:2005 –; ii. Av.MY (Average Meteorological Year) – basati sulla media delle variabili su base oraria in un intervallo di almeno 10 anni –; e iii. AMY (Actual Meteorological Year) – file basati sull'elaborazione dei dati di un singolo anno effettivo (es. 2025). Per le simulazioni e il calcolo dei KPI, si è sviluppato in Python un nuovo scenario di uso della piattaforma PREDYCE. Lo scenario di analisi climatica permette di supportare sia analisi di singolo sito sia analisi a scala territoriale, con una produzione massiva di file climatici. Al fine di ridurre i tempi computazionali per gli indicatori che non necessitano di simulazioni dinamiche di edificio, si è anche implementata una versione semplificata in ambiente Python-CDO capace di calcolare tali KPI direttamente su database in formato NETCDF4 (una singola mappa europea può superare i 260 000 punti di simulazione).

Definito il quadro metodologico, l'articolo riporta alcuni risultati di analisi territoriali a scala europea per discutere le potenzialità della piattaforma.

Primi risultati

Al fine di dimostrare l'impatto pratico progettuale dello strumento sviluppato, si riportano i risultati di tre analisi, una per categoria di KPI. I risultati si focalizzano sulle proiezioni future, riportando i dati relativi a 4 combinazioni di modelli GCM-RCM EURO-CORDEX per lo scenario RCP8.5. L'analisi riporta

where further research is needed: i) defining climate as a variable average parameter to quantify the risk of climate change on projects and make them suitable for future climates; ii) developing methodologies and tools to integrate climate variability into design processes across multiple scales, supporting the decisions of both designers and public administrations.

The primary objective of the research is to propose potential solutions to the two innovation areas identified above. The following specific objectives are pursued:

- Propose a new methodology capable of integrating major European climate databases (Copernicus Data Store) (CDS, 2025) with the practices and simulation tools of environmental and technological design, while identifying specific families of indicators (KPI – Key Performance Indicators).
- Translate this methodology into an integrated platform for advanced climate simulation, adapting the innovative dynamic simulation library (energy and IEQ, integrating the EnergyPlus engine) of PREDYCE (Chiesa *et al*., 2023) to the aforementioned climate databases. The tool must allow to study and optimise both individual buildings and territorial-scale analyses.
- Test this module and demonstrate potential application areas for assessing the impacts and resilience to climate change by mapping performance variations at the European scale.

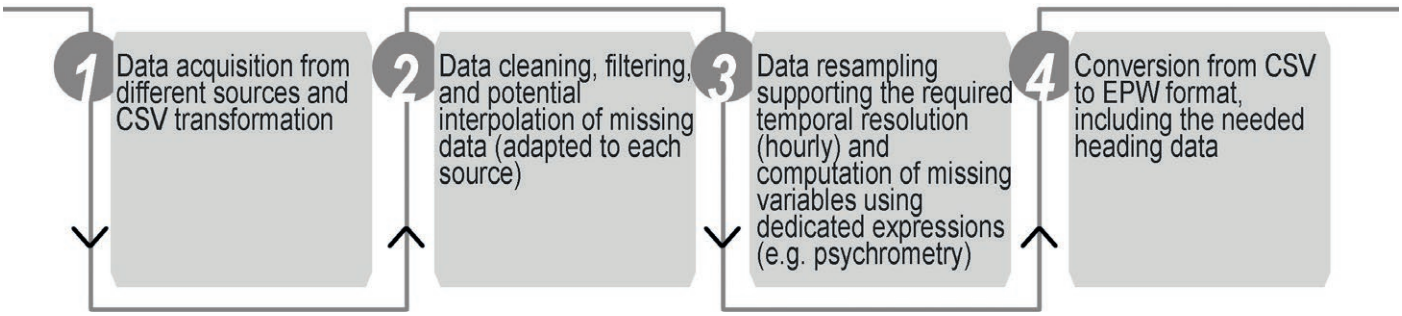
These objectives are highly innovative as they allow to study climate change risks and impacts not only on individual selected sites (Machado *et al*., 2025; Al-Assaad *et al*., 2025), but also at the territorial scale by including the possibility of simulating building archetypes dynamically. Currently, no other platforms are capable of both: i) integrating the management and processing of large climate databases to make them usable in the architectural field, and ii) handling massive flows of simulations, including variations of design and operational parameters, while calculating building-specific KPIs to prevent potential risks.

Methodology and development of the new tool

This paper introduces the new methodological pipeline and the computational platform structure with a focus on climate databases and their processing. The methodology is illustrated in Figure 1, and is organised into a six-step approach detailed below.

The integrated simulation platform includes numerous performance indicators (KPIs) grouped into three main categories: i) Climate KPIs, e.g., average temperatures and number of tropical nights; ii) Meta-building KPIs, e.g., degree days, climate zoning, and bioclimatic diagrams; iii) Building KPIs, e.g., thermal comfort models and energy demand. Climate KPIs are directly based on climate data processing. Meta-building KPIs support early design-phase analysis, including the virtual impact of buildings and the quantitative potential of passive bioclimatic technologies. Building KPIs are derived from detailed simulations of specific buildings, encompassing both energy and environmental quality aspects, thereby enabling a fine integration of technological systems with the local climate.

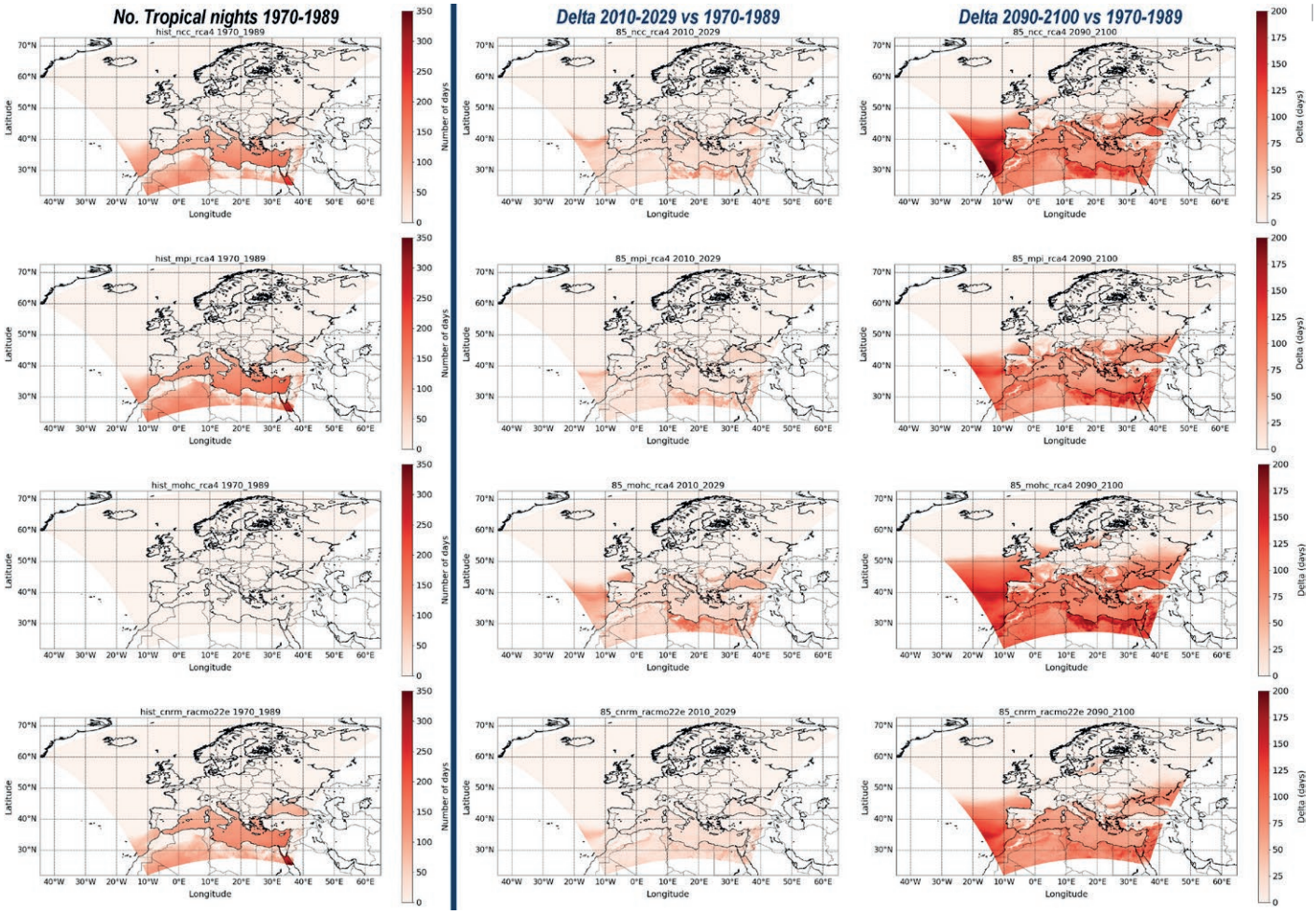
02 |



per ogni modello i valori assoluti delle KPI per l'Av.MY della serie storica (Av.MY 1970-89) e le differenze con il periodo attuale (2010-29) e con l'Av.MY del lontano futuro (2090-2100).
La prima analisi si focalizza sul KPI climatico "numero di notti tropicali", indicatore che conta il numero di giorni nell'anno in cui la temperatura minima giornaliera è superiore a 20°C (Karl, 1999). I risultati in Figura 3 mostrano un consistente e progressivo incremento di tale fenomeno nel sud Europa e nel bacino mediterraneo sud-orientale, con la riduzione conseguente del potenziale di raffrescamento ventilativo in tali territori, ma anche la comparsa di tale fenomeno di rischio nelle zone centro e nord europee. I risultati delle proiezioni sul periodo contemporaneo sono comparabili con quelli di recenti studi basati sulle osservazioni (es. Yavaşlı and Erlat, 2024).
La seconda analisi si focalizza sul KPI di meta-edificio "Zone climatiche", calcolato sull'intero territorio europeo adottando la metodologia italiana – DPR 412 del 26 agosto 1993 e successive modifiche – basata su sei classi di gradi-giorno (GG) di riscaldamento (UNI 10349-3:2016). La Figura 4 mostra come i cambiamenti climatici inducano un progressivo decremento delle classi, con una forte mitigazione dei climi invernali e una conseguente necessità di ridurre/modificare l'incisività dei requisiti minimi energetici degli edifici a scala locale. La variazione delle zone climatiche si basa sui dati dei differenziali di temperatura. I dati di temperatura nelle serie storiche dei modelli trovano validazione nei dati osservati, così come discusso nel paragrafo successivo.
Infine, si è analizzato un KPI di edificio che calcola la variazione percentuale tra l'impatto del fabbisogno energetico per il raffrescamento (Qc [kWh_{PE}]) e il fabbisogno energetico totale (Qtot [kWh_{PE}] = Qh + Qc) locale a scala europea permette ai progettisti di analizzare più nel dettaglio i due fenomeni precedenti. Il calcolo è stato condotto applicando ai database EURO-CORDEX derivate polinomiali (predittori basati sui GG) capaci di stimare i consumi totali e di raffrescamento di un edificio residenziale standard (derivato dal DOE medium residential bu-

Having defined the KPIs, the research focused on the European climatological data sources, including both reanalysis datasets (integrating meteorological observations with models) (Copernicus, 2025a), and climate projections based on global and regional numerical models (Copernicus, 2025b). Three primary sources were considered: ERA5, ERA5-Land (reanalysis), and a broad set of EURO-CORDEX projections.
ERA5 databases encompass a diverse range of numerical variables, along with uncertainty estimates (CDS, 2025). Data are provided globally, with a spatial resolution of ≈30 km and an hourly temporal resolution, starting from the 1940s. ERA5-Land focuses on the evolution of surface-level climate variables with a spatial resolution of ≈9 km, starting from the 1950s (CDS, 2025). For future climate projections, the study adopted EURO-CORDEX models (CDS, 2025), based on the four Representative Concentration Pathways (RCP) defined by the IPCC Fifth Assessment Report (IPCC, 2019). The used models combine Global Circulation Models (GCM) and Regional Climate Models (RCM). Studying future climates requires using multiple climate projections per RCP scenario, rather than a single case, to incorporate potential uncertainties (Vautard *et al.*, 2021). Over 20 GCM-RCM combinations were integrated in the platform, each with a sufficient number of variables to generate files suitable for the building context. Each combination also includes a historical database (1951–2005) to allow comparison of projections with observed data.
Once the databases were selected, automated downloading of NETCDF4 files was implemented on the research unit's local server. The data were processed by developing new versions of the 'EPW_compiler' module of PREDYCE, customised for each database. Figure 2 illustrates the methodology. The processing pipeline generates EPW files (EnergyPlus Weather), a recognised standard for climate data used by some of the most widespread building simulation tools (Crawley and Barnaby, 2019), including EnergyPlus. Key operations include splitting global horizontal solar radiation into its components, and interpolating future data for hourly resolution using established scientific strategies: i) linear interpolation (e.g., temperature, humidity, pressure), ii) constant value within time intervals (e.g., wind speed/direction, precipitation, infrared radiation), and iii) polynomial interpolation with preservation of original tri-hourly values, and adaptation to the correct sunrise-sunset interval (Ruiz-Arias, 2022).
After processing, annual weather files were post-processed to generate three types of EPW (or NETCDF4) climate files: i) TMY (Typical Meteorological Year) – based on the identification of typical months over at least 10 years (UNI EN ISO 15927-4:2005); ii) Av.MY (Average Meteorological Year) – hourly averages of variables over a minimum 10-year interval; and iii) AMY (Actual Meteorological Year) – based on data from a specific actual year (e.g., 2025).
To support simulation and computing KPIs, a new analysis scenario for PREDYCE was developed in Python. The climate analysis scenario supports both single-site analyses and territorial-scale analyses, which generate massive numbers of climate files. To reduce computational time for KPIs

03 | Numero di notti tropicali nel periodo storico e differenze in valori assoluti rispetto alle proiezioni future di 4 modelli EURO-CORDEX RCP8.5
Number of tropical nights in the historical period and absolute value differences with respect to future projections of 4 EURO-CORDEX models, RCP8.5



that do not require dynamic building simulations, PREDYCE was adapted to run directly on NETCDF4 databases (a single European map generation exceeds 260,000 simulation points).
Finally, the paper presents sample results focused on territorial-scale analyses at the European level to discuss the potentialities of the developed platform.

Preliminary results

Results from three analyses are presented – one for each KPI category – to demonstrate the practical design relevance of the developed tool. The results focus on future projection models, reporting data for four GCM-RCM EURO-CORDEX combinations under the RCP8.5 scenario. The following are reported for each model:

- absolute KPI values for the Av.MY historical period (1970–1989),
- differences with the current period (2010–2029), and
- differences with the Av.MY of the distant future (2090–2100).

The first analysis focuses on the climate KPI "*Number of Tropical Nights*", which counts the days in a year when the daily minimum temperature exceeds 20°C (Karl, 1999). The results in Figure 3 show a consistent and progressive increase in this phenomenon across Southern Europe and the south-eastern Mediterranean basin areas, reducing the potential for natural ventilative cooling in these regions, and indicating the emergence of this risk in Central and Northern Europe. The results obtained for the current period align with recent analyses based on observed data (e.g., Yavaşlı and Erlat, 2024).
The second analysis focuses on the meta-building KPI "*Climate Zones*" computed on the entire European territory, and adopting the Italian methodology – DPR 412 of 26 August 1993, and subsequent amendments – based on six classes of heating degree days (HDD) (UNI 10349-3:2016). Figure 4 illustrates how climate change leads to a progressive decrease in classification levels, resulting in a significant mitigation of winter climates and the subsequent need to either revise or adjust the minimum energy requirements for buildings at the local scale. Climate zoning is based on temperature differences. The temperature data in the EURO-CORDEX models were validated against historical observations, as discussed in the next section.
Finally, the building KPI "*Qc/Qtot Percentage*", which analyses the variation in the percentage ratio between cooling energy demand (Qc [kWhPE]) and total energy demand (Qtot [kWhPE] = Qh + Qc), is computed at the European scale, allowing designers to investigate the two previous results in greater detail. The calculation was done by applying polynomial derivatives (degree-day predictors) to EURO-CORDEX databases. These predictors estimate the total and cooling energy demands of a standard residential building (derived from the DOE medium residential building and adapted to EN 16798-1:2019 inputs), based on the results of 44,000 dynamic energy simulations performed by PREDYCE in EnergyPlus on ERA5 databases (European coverage), and two TMY-EPW series (1950-1973 and 1999-2022). Primary energy was calculated using COP and EER values of 5.0 and 5.6, respectively, and a conversion factor of 1.9 for electricity to primary energy, consistently with market values and UNI/TS 11300 standards. Figure 5 illustrates that the

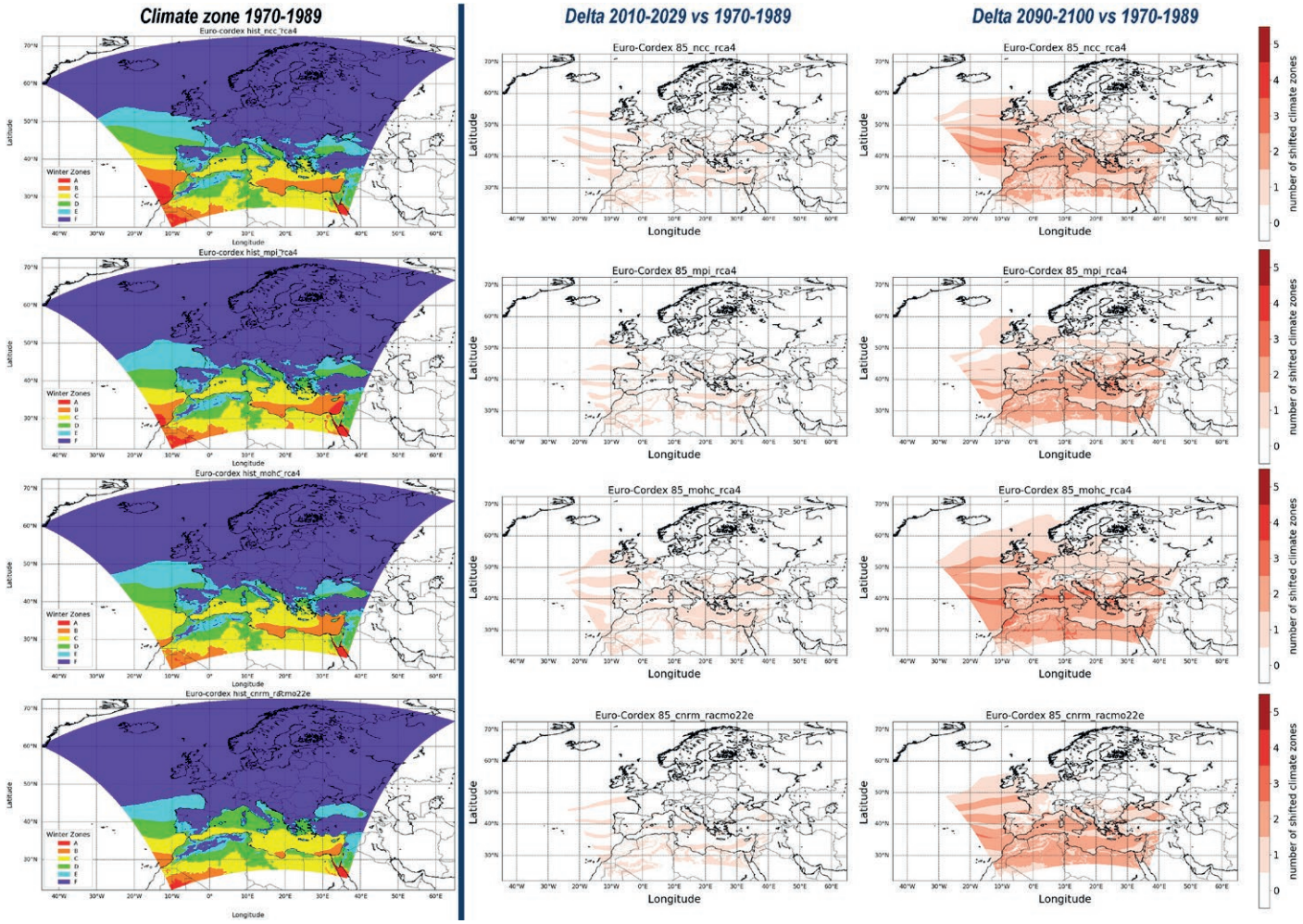
04 | Distribuzione delle zone climatiche nel periodo storico e differenze in valori assoluti rispetto alle proiezioni future di 4 modelli EURO-CORDEX RCP8.5
Climatic zone distribution in the historical period and differences with respect to future projections of 4 EURO-CORDEX models, RCP8.5

ilding e adattato agli input della EN 16798-1:2019) calcolate dai risultati di un pacchetto di 44 000 simulazioni energetico dinamiche condotte da PREDYCE in EnergyPlus sul database ERA 5 (intero territorio europeo) e su due serie di EPW-TMY (1950-73 e 1999-2022). L'energia primaria è stata derivata applicando un valore di COP ed EER pari a 5.0 e 5.6 e il fattore di conversione di energia elettrica in primaria di 1.9 in linea con valori di mercato e compatibili con le normative UNI/TS 11300. La figura 5 mostra come la variazione dell'impatto del raffrescamento sia progressivamente crescente su tutto il territorio europeo con la conseguente necessità di ripensare il comparto normativo attuale che basa i requisiti minimi principalmente sui fabbisogni di riscaldamento. Per esempio, la percentuale di Qc nel lontano futuro (media dei 4 modelli) cresce di +12.5% (st.dev. 0.1), +39.5% (0.07) e +38.7% (0.03) rispettivamente a Parigi, Roma e Atene. I dati di Atene trovano conferma nei risultati di precedenti studi (es. Asimakopoulos *et al.*, 2012). La crescita media nel periodo presente è invece di +0.3%, +9.1% e +10.5%.

Discussioni, prospettive e conclusioni

I risultati preliminari dimostrano come le variazioni indotte dai cambiamenti climatici impattino sensibilmente sulle KPI progettuali e sull'applicabilità delle tecnologie passive. La domanda di energia di riscaldamento mostra una costante riduzione sia nelle serie storiche, sia nei modelli previsionali futuri, mentre l'impatto della domanda di raffrescamento è in costante crescita e supererà a breve quella di riscaldamento al sud e centro Europa, dettagliando quanto anticipato in precedenti studi (es. Isaac and Vuuren, 2009). Nei prossimi 80 anni le condizioni climatiche dell'attuale nord Italia caratterizzeranno il nord della Francia e Germania, superando i 50°N di longitudine. Si prevede anche un in-

04 |



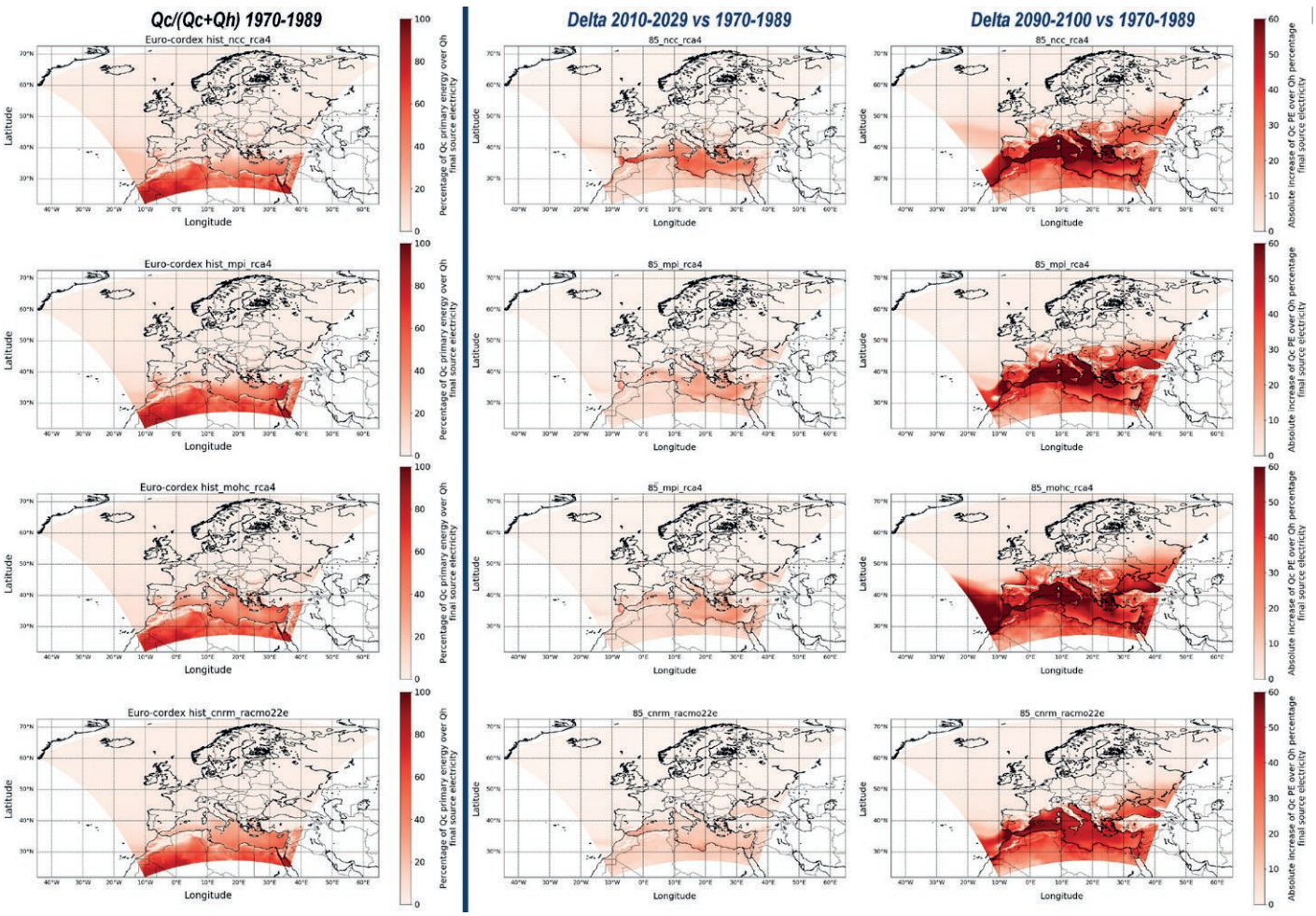
05 | Percentuale del fabbisogno di raffrescamento rispetto al fabbisogno totale (riscaldamento + raffrescamento) nel periodo storico e differenze in valori assoluti rispetto alle proiezioni future di 4 modelli EURO-CORDEX RCP8.5

Cooling energy need percentage compared to total energy needs (cooling + heating) in the historical period, and differences with respect to future projections of 4 EURO-CORDEX models, RCP8.5

cremento dell'applicabilità delle tecnologie di raffrescamento passivo al nord e centro Europa e una riduzione della loro potenzialità al sud.

Tali risultati sono basati su database climatici da modelli predittivi validati da numerose ricerche. Il lavoro di (Machard *et al*., 2020) ha dimostrato che nel periodo storico 1955-2000 gli errori ricadono nel range di incertezza dei modelli. Similmente, (Cannon, 2018) ha sottolineato come sia possibile comparare nei periodi storici i dati dei modelli Eurocordex con dati osservati, essendo i precedenti forzati nei margini dei modelli ERA. Come dimostrato dai paper citati, l'analisi territoriale delle variazioni percentuali rimane validata, tuttavia, è possibile correggere i modelli di proiezione tramite un approccio bias adattato a singole città (Machard *et al*., 2024) per quanto tale modalità non sia replicabile a scala di analisi territoriale. Si ricordano le evidenti incertezze derivate dalla modellazione futura, per quanto la comparazione di numerosi modelli alternativi possa migliorare la capacità di prevedere statisticamente gli andamenti futuri (Vautard *et al*., 2021). Relativamente ai modelli di re-analisi, gli stessi includono dati da osservazioni. La loro validità è anche dimostrata in numerosi lavori (es. Machado *et al*., 2005). La piattaforma di simulazione dinamica utilizzata è anch'essa stata validata su dati sperimentali in precedenti pubblicazioni, rimanendo in un range di errore inferiore al 5% su base oraria in linea con la guideline 14 dell'ASHRAE (Chiesa *et al*., 2025).

La piattaforma dimostra un'elevata potenzialità e flessibilità nel definire previsioni di rischio e nel calcolare il potenziale di prevenzione di specifiche scelte progettuali essendo compatibile con una vasta gamma di KPI sia climatiche, sia meta-progettuali, sia correlate a dettagliate scelte progettuali. La ricerca ha dirette implicazioni sia in ambito scientifico, facilitando studi e analisi dell'impatto dei cambiamenti climatici sull'ambiente costruito, sia in ambito professionale, aprendo nuovi strumenti per l'ottimizzazione e la valutazione in fase di progetto del com-



portamento di edifici in diversi scenari climatici. Inoltre, tale approccio permette di sviluppare una nuova visione normativa, includendo il clima come variabile e non come dato fisso, permettendo di sviluppare database climatici per i progettisti e generare materiali informativi. Tra gli attuali limiti della piattaforma si sottolineano la mancanza di un'interfaccia grafica e la complessità di mantenere aggiornate le banche dati e la gestione manuale di alcune operazioni di elaborazione dei risultati. Tra gli sviluppi futuri, si prevede di facilitare la gestione lato utente, semplificare la gestione delle analisi simulative parametriche e rendere automatica la comparazione di diversi modelli climatici. Ulteriori strumenti di simulazione sono in corso di sviluppo, integrando modelli surrogati e correlazioni multivariate per simulare velocemente complesse variazioni progettuali e tecnologiche sui pesanti database EURO-CORDEX e ERA5.

ATTRIBUZIONE, RICONOSCIMENTI, DIRITTI D'AUTORE

Si ringrazia A.JahaniRahaei e gli altri Assegnisti di Ricerca dell'unità locale per il loro contributo nello sviluppo di codici e nell'elaborazione dati.

La ricerca amplia i lavori del D8.5 ed è stata co-finanziata dall'Unione Europea, programma H2020 Research and Innovation, Grant Agreement n. 958345, coordinamento generale Aalborg University (Denmark), prof. M.Z.Pomianowski.

REFERENCES

Al-Assaad, D. et al (2025), "Resilient passive cooling strategies during heat waves: a quantitative assessment in different climates", *Building and Environment*, Vol. 274, 112698. Available at: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112698

Asimakopoulos, D.A. et al (2012), "Modelling the energy demand projection of the building sector in Greece in the 21st century", *Energy and Buildings*, Vol. 49, pp. 488-498. Available at: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.043

CDS (2025), Copernicus Data Store. Available at: https://cds.climate.copernicus.eu/ (Accessed on 04/09/2025)

Chiesa, G. and Grosso, M. (2015), "The Influence of Different Hourly Typical Meteorological Years on Dynamic Simulation of Buildings", *Energy Procedia*, Vol. 78, pp. 2560-2565. Available at: https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.280

Chiesa, G. *et al.* (2023), "Energy simulation platform supporting building design and management", *Techne*, Vol. 25, pp. 134-142. Available at: https://doi.org/10.36253/techne-13583

Chiesa, G. et al (2025), "A new approach to assess the building energy performance gap: Achieving accuracy through field measurements and input data analysis", *Journal of Building Engineering*, Vol. 102, 111941, Available at: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.111941

Copernicus (2025a), Climate Reanalysis. Available at: https://climate.copernicus.eu/climate-reanalysis (Accessed on 04/09/2025).

Copernicus (2025b), Climate Projections. Available at: https://climate.copernicus.eu/climate-projections (Accessed on 04/09/2025).

Crawley, D.B. and Barnaby, C.S. (2019), "Weather and climate in building performance simulation", in Hensen, J.L.M. and Lamberts, R. (Eds.), Building Performance Simulation for Design and Operation, 2nd ed., Routledge, New York, pp. 191–220

Davies, N. and Jokiniemi, E. (2008), Dictionary of architecture and building construction, Architectural Press, Oxford.

Karl, T.R. *et al.* (1999), "Clivar/GCOS/WMO Workshop on Indices and Indicators for Climate Extremes: Workshop Summary", Climatic Change, Vol. 42, pp. 3–7. Available at: https://doi.org/10.1023/A:1005491526870

cooling impact progressively increases across Europe, underscoring the need to reassess regulatory frameworks, as the latter bases the minimal energy requirements on heating needs. For example, the Qc percentage in the far future (average of the 4 GCM-RCM models) rises by 12.5% (standard deviation 0.1), 39.5% (0.07), and 38.7% (0.03), respectively, for Paris, Rome, and Athens. The Athens data align with previous studies (e.g., Asimakopoulos *et al.*, 2012), demonstrating the quality of the results. The average rises in the current period are 0.3%, 9.1%, and 10.5%, respectively.

Discussion, perspectives, and conclusions

The preliminary results demonstrate that climate change significantly affects KPIs and the applicability of passive technologies. Heating energy demand shows a steady decrease, both in historical series and future projection models. Cooling energy demand is constantly increasing, and is expected to surpass heating demand in Southern and Central Europe soon, detailing what was predicted in previous studies (e.g., Isaac and Vuuren, 2009). Within the next 80 years, climate conditions similar to those of today's Northern Italy will characterise Northern France and Germany, extending beyond the 50°N latitude. Additionally, the applicability of passive ventilative cooling technologies is expected to increase in Northern and Central Europe, while decreasing in Southern Europe.

Results are based on future climate data derived from models validated over their historical periods by numerous research studies. In their work, (Machard *et al.*, 2020) demonstrated that errors within the historical period of 1955-2000 fall within the range of the model's uncertainty. Similarly, Cannon (2018) emphasised that EURO-CORDEX historical data can be compared with observations, as the previous data were constrained within the ERA model boundaries. As demonstrated in the cited studies, territorial analyses of percentage variations remain validated, although it is possible to add a bias correction for specific single cities (Machard *et al.*, 2024). However, this approach is not replicable at the territorial level. It is essential to remember that future models inherently involve a level of uncertainty, although it is possible to improve future statistical trends by comparing numerous alternative models (Vautard *et al.*, 2021). Re-analysis models are intrinsically validated, incorporating observed data, and are consistent with measured local values as underlined by several papers (e.g., Machado *et al.*, 2005). Considering the adopted energy simulation platform, which has been validated against experimental data in previous publications, it allows for simulating building behaviours within an hourly error range of 5%, aligning with ASHRAE Guideline 14 (Chiesa *et al.*, 2025). The platform demonstrates high potential and flexibility in defining risk forecasts, and in calculating the preventive potential of specific design choices, while being compatible with a wide range of KPIs – including climatic, meta-design, and detailed project-level metrics.

The research has direct implications for scientific research, facilitating studies and analyses of climate change impacts on the built environment, and professional practice by offering new tools for optimising and evaluating building behaviour during the design

Khdair, A.I. *et al.* (2026), "Advancing natural ventilation in sustainable architecture: mechanisms, innovations, and climate-responsive design for energy-efficient buildings", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 226, 116314. Available at: https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116314

Košir, M. (2019), Climate adaptability of buildings, Springer, Cham.

IEA-EBC (2024), Annex 80: Resilient Cooling. Available at: https://annex80.iea-ebc.org/ (Accessed on 04/09/2025).

IPCC (2019), Representative Concentration Pathways (RCPs), Available at: https://sedac.ciesin.columbia.edu/ddc/ar5_scenario_process/RCPs.html (Accessed on 04/09/2025).

Isaac M. and Vuuren, D.P. (2009), "Modelling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change", *Energy Policy*, Vol. 37, pp. 507-521. Available at: https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.051

Lupato, G. and Manzan, M. (2019), "Italian TRYs: New weather data impact on building energy simulations", *Energy and Buildings*, Vol. 185, pp. 287-303. Available at: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.12.001

Machado, R.M.S. et al (2025), "The impact of climate data uncertainty on bioclimatic zoning for building design", *Building and Environment*, Vol. 269, 112423. Available at: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112423

Machard, A. et al (2020), "A Methodology for Asssembling Future Weather Files Including Heatwaves for Building Thermal Simulations from the European Coordinated Regional Downscaling Experiment (EURO-CORDEX) Climate Data", *Energies*, Vol. 13, 3424. Available at: https://doi.org/10.3390/en13133424

Machard, A. et al (2024), "Typical and extreme weather datasets for studying the resilience of buildings to climate change and heatwaves", *Scientific Data*, Vol. 11, 531. Available at: https://doi.org/10.1038/s41597-024-03319-8

Murano, G. et al (2016), "The new Italian Climatic Data and their Effect in the Calculation of the Energy Performance of Buildings", Energy Procedia, Vol. 101, pp. 153-160. Available at: https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.020

Ruiz-Arias, J.A. (2022), "Mean-preserving interpolation with splines for solar radiation modeling", Solar Energy, Vol. 248, pp. 121–127. Available at: https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.10.038

Vautard, R. et al (2021), "Evaluation of the Large EURO-CORDEX Regional Climate Model Ensemble", Journal of Geophysical Research: Atmospheres, Vol. 126, e2019JDo32344. Available at: https://doi.org/10.1029/2019JD032344

Wu, Z. et al (2026), "Learning sustainable wisdom from the past: a generative framework for extracting climate-responsive design strategies from vernacular architecture", *Energy & Buildings*, Vol. 350, 116669. Available at: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116669

Yavaşlı, D.D. and Erlat E. (2024), "Tropical nights in the Mediterranean: A spatiotemporal analysis of trends from 1950 to 2022", *International Journal of Climatology*, Vol. 44, pp.1472-1488. Available at: https://doi.org/10.1002/joc.8394

Zhang, C. et al (2021), "Resilient cooling strategies – A critical review and qualitative assessment", *Energy and Buildings*, Vol. 251, 111312. Available at: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111312

phase under various climate scenarios. Furthermore, this approach supports the development of a new regulatory vision where climate is treated as a variable and not as a fixed datum, while generating informative materials and climate databases for designers. Current limitations of the platform include the lack of a graphical user interface, the complexity of maintaining and upgrading the databases, and the manual management of some analyses comparing different climate models. Future developments include simplifying the user interface, managing parametric simulation analyses, and automating model comparison. Additional simulation tools are being developed by integrating surrogate models and multivariate correlations to quickly simulate complex design and technological variations on the extensive EURO-CORDEX and ERA5 databases.

ATTRIBUTION, ACKNOWLEDGEMENTS, COPYRIGHT RIGHTS
A special thank you to A.Jahanirahaei and the other research fellows of the local research unit for their contributions during coding development and data elaboration.
The research builds upon the work of D8.5 and has received funding from the European Union's H2020 Research and Innovation Programme, Grant Agreement No. 958345, general coordination by Aalborg University (Denmark), Prof. M.Z.Pomianowski.

Verso una metodologia per la Valutazione della vulnerabilità sistemica urbana

Cristina Visconti, https://orcid.org/0000-0003-3773-254X cristina.visconti@unina.it
Martina Bosone, https://orcid.org/0000-0001-8478-5906 martina.bosone@unina.it
Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II, Italia

Abstract. Le tradizionali valutazioni di vulnerabilità spesso si rivolgono a singoli pericoli, trascurando le interdipendenze sistemiche che caratterizzano le città come sistemi socio-ecologici-tecnologici (SETS). Il presente studio avanza il concetto di vulnerabilità sistemica proponendo un quadro multidimensionale che integra le dimensioni fisica, sociale, economica ed ecologica. La ricerca applica una revisione strutturata della letteratura per identificare i criteri e gli indicatori chiave che influenzano la vulnerabilità sistemica. Partendo da questi risultati, si delinea lo sviluppo di un Indice di Vulnerabilità Climatica (CVI), incentrato sullo stress provocato dalle ondate di calore come caso applicativo. I risultati riflettono tre dimensioni fondamentali che catturano la complessità della vulnerabilità sistemica e sottolineano la necessità di approcci integrati per supportare la pianificazione adattiva e le valutazioni spaziali basate su sistemi GIS, affrontando gap critici nella resilienza urbana.

Parole chiave: Vulnerabilità sistemica; Resilienza urbana; Sistemi socio-ecologici-tecnologici; Quadro di valutazione multicriteriale, Indicatori multidimensionali.

Multidimensionalità della vulnerabilità urbana e pensiero sistemico

Il rischio di catastrofi urbane incontra un interesse crescente sia nella ricerca, che nel contesto politico e della pratica delle discipline spaziali, sollevando domande critiche su come ridurre contestualmente le vulnerabilità e migliorare la resilienza attraverso l'applicazione di un pensiero sistemico (Cutter, 2021). Le città, in quanto sistemi complessi e dinamici, si trovano a dover fronteggiare le crescenti sfide poste dal cambiamento climatico, un fattore di pressione sempre più urgente che si somma a minacce già esistenti, quali i rischi geomorfologici e l'inquinamento.

Il pensiero sistemico permette di interpretare gli insediamenti urbani come sistemi interconnessi, articolati in sottosistemi fisici, sociali, economici, istituzionali ed ecologici. La natura e la distribuzione del rischio urbano sono il risultato delle interazioni dinamiche e dell'interdipendenza tra tali componenti. In questo quadro, la vulnerabilità è da tempo riconosciuta come una dimensione centrale del rischio, sebbene venga concettualizzata in modi differenti a seconda delle discipline di riferimento (Adger, 2006; Füssel, 2010; Blaikie *et al*., 2014). La vulnerabilità urbana, in particolare, si configura come una condizione multidimensionale che riflette la propensione degli elementi esposti a subire effetti negativi in molteplici ambiti: spaziali, fisici, tecnici, sociali, economici, ambientali, culturali e istituzionali (Gunaratne *et al*., 2023; Limongi and Galderisi, 2022). Essa scaturisce da complessi processi socio-ecologici e socio-tecnici, alla base di fattori di rischio che emergono dall'intreccio tra attori sociali, dinamiche economiche e condizioni ambientali (Sharifi, 2023; Schneiderbauer *et al*., 2017).

In contesti multirischio, la vulnerabilità sistemica è emersa come un concetto cruciale ma ancora poco approfondito sia nell'ambito dell'adattamento ai cambiamenti climatici (CCA) sia in quello della riduzione del rischio di disastri (DRR). Diversamente dagli approcci tradizionali, che tendono a considerare i pericoli in maniera isolata, la prospettiva della vulnerabilità sistemica mette in evidenza le interdipendenze tra i sottosistemi urbani e la loro suscettibilità a guasti a cascata, inquadrando le città come sistemi socio-ecologico-tecnologici (SETS). Tale approccio riconosce che le aree urbane sono esposte non solo a molteplici pericoli, ma anche alle loro interazioni con fragilità sociali, economiche, culturali e fisiche preesistenti (Gill and Malamud, 2014).

Towards a methodology for assessing urban systemic vulnerability

Abstract. Traditional vulnerability assessments often address single hazards, overlooking the systemic interdependencies that characterise cities as socio-ecological-technological systems (SETS). This study advances the concept of systemic vulnerability by proposing a multidimensional framework integrating physical, social, economic, and ecological dimensions. The research applies a structured literature review to identify key criteria and indicators influencing systemic vulnerability. Building on these findings, we outline the development of a Climate Vulnerability Index (CVI), focusing on urban heat stress as a case application. Results reveal three core dimensions that capture the complexity of systemic vulnerability and underscore the need for integrated approaches to support adaptive planning and GIS-based spatial assessments, addressing critical gaps in urban resilience.

Keywords: Systemic vulnerability; Urban resilience; Socio-ecological-technological systems; Multi-criteria evaluation framework; Multidimensional indicators.

Urban vulnerability multidimensionality and systemic thinking

Urban disaster risk has increasingly attracted attention in research, policy, and practice, raising critical questions on how to contextually reduce vulnerabilities and enhance resilience through systemic thinking (Cutter, 2021). Cities, as complex and dynamic systems, face mounting challenges from climate change—an urgent stressor that compounds existing threats such as geomorphological hazards, biological risks, and pollution.

Systemic thinking enables an understanding of urban settlements as interconnected systems comprising physical, social, economic, institutional, and ecological subsystems. These interdependent components and their dynamic interactions shape the nature and distribution of urban risk. In this context, vulnerability is recognised as an essential dimension of risk, although it takes different forms in various disciplines (Adger, 2006; Füssel, 2010; Blaikie *et al*., 2014). International literature converges in defining it as one of the three constituent components of risk, together with hazard and exposure, which contribute to the estimation of potential impacts in urban systems. This approach, formalised by the IPCC and widely accepted in scientific and operational circles, conceives risk as the result of the interaction between hazard, exposure and vulnerability (IPCC 2022; Estoque *et al*., 2023; Stolte *et al*., 2024).

Urban vulnerability is multidimensional, reflecting the propensity of

ISSN online: 2239-0243 | © 2025 Author(s) | http://www.fupress.com/techne | DOI: 10.36253/techne-18631
Open access, peer-reviewed article published by Firenze University Press (https://www.fupress.com) and distributed, except where otherwise noted, under the terms of the CC BY 4.0 License for content and CC0 1.0 Universal for metadata

I modelli convenzionali di vulnerabilità si riferiscono generalmente a singoli pericoli, mentre i quadri concettuali multirischio considerano anche gli effetti composti e a cascata che possono compromettere la resilienza (Cutter, 2016; Mohammadi *et al*., 2024). In condizioni multirischio, la vulnerabilità riflette il grado in cui le componenti urbane – abitazioni, infrastrutture, economia e comunità – risultano suscettibili di subire danni derivanti da pericoli interconnessi. La vulnerabilità urbana, in questo senso, è definita come la misura in cui città, popolazioni, infrastrutture ed economie sono esposte a fattori di stress quali ondate di calore, inondazioni o instabilità politica, aggravati dalla capacità limitata di gestire o assorbire gli impatti (Gencer *et al*., 2018; Revi *et al*., 2014; Romero-Lankao *et al*., 2014).

Le valutazioni della vulnerabilità assumono un ruolo determinante nell'identificare popolazioni e sistemi maggiormente a rischio, orientando l'allocazione di risorse e interventi – siano essi strategie di adattamento nell'ambito della CCA o misure di preparazione nell'ambito della DRR (Birkmann *et al*., 2015). Valutazioni accurate si rivelano pertanto essenziali per affrontare le cause strutturali della vulnerabilità e favorire sinergie tra CCA e DRR (Birkmann, 2006). Nonostante ciò, gli strumenti capaci di cogliere in modo sistemico la complessità della vulnerabilità urbana restano limitati, lasciando un vuoto significativo nella ricerca.

Questo studio affronta questa lacuna presentando i risultati intermedi del task 5.3.3 del Partenariato Esteso "Return, *Multi-risk Science for Resilient Communities under a Changing Climate*", focalizzato sulla vulnerabilità sistemica. In particolare, viene proposto un quadro multidimensionale per operazionalizzare la vulnerabilità sistemica in ambito urbano, a supporto di strategie di progettazione e pianificazione integrate, adattive e trasformative. Sulla base di una revisione della letteratura, viene sviluppato un approccio basato su indicatori, con l'obiettivo di identificare i criteri che influenzano in senso positivo o negativo la vulnerabilità sistemica. Il contributo illustra nel dettaglio le dimensioni e i criteri alla base del quadro concettuale e introduce lo sviluppo di un Indice di Vulnerabilità Climatica (CVI), applicato inizialmente alla valutazione della vulnerabilità urbana alle ondate di calore.

La struttura del lavoro è organizzata in più sezioni tra loro complementari. La sezione metodologica illustra la revisione della letteratura condotta secondo il metodo PRISMA, unitamente agli strumenti analitici impiegati per la valutazione della vulnerabilità sistemica. Successivamente, la sezione dei risultati identifica e sintetizza le dimensioni e i criteri chiave, che costituiscono la base per una discussione approfondita delle tre dimensioni centrali nello sviluppo dell'Indice di Vulnerabilità Climatica. Il contributo si conclude offrendo una prospettiva orientata al futuro sull'implementazione dell'indice e sulla sua integrazione nella modellazione basata su GIS all'interno di un caso studio selezionato.

Metodologia

Un'analisi preliminare dello stato dell'arte sulla vulnerabilità sistemica degli insediamenti urbani evidenzia come i quadri concettuali esistenti presentino notevoli differenze in termini di scala, dimensioni e strumenti, spaziando da indici qualitativi fino ad approcci basati su modellizzazione e simulazione. A partire da queste considerazioni, il presente studio rivede criticamente la letteratura scientifica sulla vulnerabilità sistemica, con un'attenzione specifica ai modelli e agli strumenti impiega-

exposed elements to suffer adverse effects across spatial, physical, technical, social, economic, environmental, cultural, and institutional domains (Gunaratne *et al*., 2023; Limongi and Galderisi, 2022). These vulnerabilities stem from complex socio-ecological and socio-technical processes—underlying risk drivers involving interactions among social actors, economic dynamics, and environmental conditions (Sharifi, 2023; Schneiderbauer *et al*., 2017).

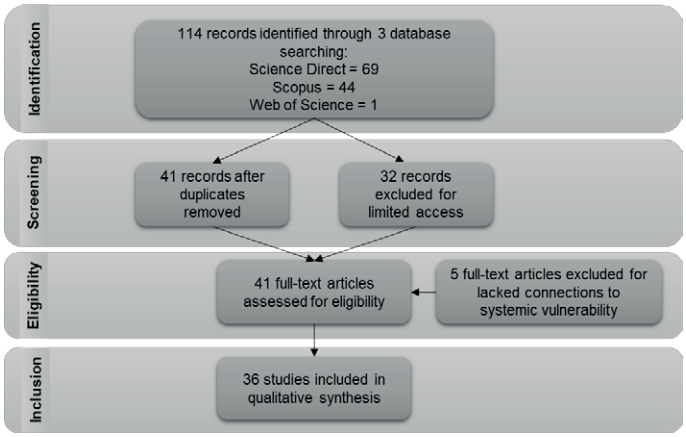
In multi-risk contexts, systemic vulnerability has emerged as a critical yet underexplored concept within both Climate Change Adaptation (CCA) and Disaster Risk Reduction (DRR). Unlike traditional approaches that isolate single hazards, systemic vulnerability emphasises interdependencies among urban subsystems and their susceptibility to cascading failures, framing cities as socio-ecological-technological systems (SETS). This perspective recognises that urban areas are exposed not only to multiple hazards but also to their interactions with previously existing social, economic, cultural, and physical fragilities (Gill and Malamud, 2014).

Conventional vulnerability models mostly refer to individual hazards, while multi-risk frameworks also include compound effects that can compromise resilience (Cutter, 2016; Mohammadi *et al*., 2024). Under such conditions, vulnerability expresses the degree of susceptibility of urban components – housing, infrastructure, economy and community – to damage resulting from interconnected hazards and the limitations of their capacity to manage, adapt to or absorb impacts (Gencer *et al*., 2018; Revi *et al*., 2014; Romero-Lankao *et al*., 2014).

Vulnerability assessments play a crucial role in identifying the most at-risk populations, systems and urban areas, guiding the allocation of resources and interventions—whether adaptive strategies in CCA or preparedness measures in DRR (Birkmann *et al*., 2015). Accurate assessments are essential for tackling root causes of vulnerability and fostering synergies between CCA and DRR (Birkmann, 2006). However, tools capable of capturing the systemic dimensions of urban vulnerability remain underdeveloped, leaving a significant research gap.

This study addresses the gap by presenting intermediate results from Task 5.3.3 of the extended partnership "Return, *Multi-risk Science for Resilient Communities under a Changing Climate*", focusing on systemic vulnerability. Attention to this issue arises within the context of a broader programme on urban multi-risk, since the concept of systemic vulnerability allows us to understand how the interdependencies between physical, social, economic, ecological and technological subsystems can amplify the combined impact of different hazards. The literature also highlights the need to develop approaches that apply the SETS framework to the study of vulnerability (Khormorova *et al*., 2025). A preliminary analysis shows that systemic vulnerability has been addressed mainly in Earth Sciences, Social Sciences, Engineering and Environmental Sciences, but it is still a relatively unexplored topic, as confirmed by the broader review of the concept of vulnerability in multi-risk contexts conducted by Limongi and Galderisi (2021). Although it is the least investigated approach to vulnerability, it has been applied to various natural

01| Diagramma di flusso PRISMA del processo di revisione della letteratura (Fonte: elaborazione degli autori)
PRISMA flow diagram of literature review process (Source: created by the authors)



ti per la sua valutazione. La revisione è stata condotta consultando Scopus, Web of Science e Science Direct e applicando il metodo PRISMA per Scoping Review (Tricco *et al.*, 2018). L'obiettivo è stato quello di individuare metodi e strumenti utilizzati nella valutazione della vulnerabilità sistemica, con particolare attenzione alle relative dimensioni e scale di applicazione, soprattutto nei contesti urbani e metropolitani (Fig. 1).
Le pubblicazioni relative al periodo 2010–2025 sono state esaminate mediante ricerche testuali che associavano il termine «vulnerabilità sistemica» ai concetti di tipo di rischio, valutazione, modellizzazione e simulazione. Sono state effettuate quattro ricerche, selezionando esclusivamente articoli in lingua inglese e sottoposti a revisione paritaria, appartenenti a categorie specifiche. Dopo l'eliminazione dei duplicati e la selezione basata sugli abstract, sono stati inclusi 36 contributi (Tab. 1). Tali lavori sono stati analizzati in base al settore di ricerca, al metodo di valutazione, al modello adottato, alle dimensioni della vulnerabilità considerate (fisica, sociale, ecologica) e alla scala di applicazione (territoriale, urbana, di quartiere, edilizia). La maggior parte degli studi appartiene all'ambito delle Scienze della Terra e Planetarie (21%), seguite dalle Scienze Sociali e dall'Ingegneria (14% ciascuna) e dalle Scienze Ambientali (13%).
La ricerca mette in evidenza le relazioni tra vulnerabilità sistemica, modellizzazione e simulazione dei rischi geofisici e climatici, con particolare attenzione agli ambienti urbani multihazard. Per il rischio sismico, sono ampiamente impiegati GIS e metodi multi-criterio. Nei contesti costieri prevalgono gli approcci basati sull'analisi storica dei rischi, mentre gli studi sul rischio vulcanico enfatizzano la percezione, la comunicazione e l'integrazione di modelli complessi.
Tra le metodologie più utilizzate si annoverano l'analisi spaziale basata su GIS, la *multi-criteria decision analysis* (MCDA), l'analisi delle reti delle interdipendenze sistemiche e le simulazioni basate su scenari. Le applicazioni specifiche riguardano frane, reti idriche e infrastrutture interdipendenti.
Elemento comune a tutti gli studi è l'attenzione ai fallimenti a cascata dei sistemi interconnessi (trasporti, acqua, energia). Sebbene alcuni lavori adottano prospettive olistiche, considerando fattori socio-economici e istituzionali, si riscontra una prevalenza di studi che si concentrano sulla perdita funzionale in settori specifici. Complessivamente, le metodologie variano in funzione del tipo di rischio, della scala spaziale e delle interconnessioni, evidenziando la necessità di approcci disegnati in maniera multi-fattoriale.
La letteratura conferma la complessità della vulnerabilità sistemica e la necessità di valutazioni multidisciplinari. Strumenti come GIS, MCDA, teoria delle reti e simulazioni forniscono framework utili, ma emerge la necessità di integrazione tra metodologie differenti.
Oltre all'analisi dei metodi di valutazione più comunemente utilizzati per il medesimo obiettivo di indagine della vulnerabilità sistemica, la letteratura esaminata ha evidenziato anche una prevalenza di criteri e indicatori impiegati a tale

hazards, including earthquakes, floods and volcanic eruptions, and is now considered fundamental to better understanding the overall vulnerability of urban systems (Galderisi and Limongi 2021).
Specifically, we propose a multidimensional framework to operationalise systemic vulnerability in urban areas, supporting integrated, adaptive, and transformative design and planning strategies. Drawing on a literature review, we develop an indicator-based approach, identifying criteria that influence systemic vulnerability either positively or negatively.
The paper focuses on formulating the Climate Vulnerability Index (CVI) through a multi-criteria assessment, and on identifying constituent indicators, taking heat waves as the reference risk. The CVI is developed based on the dimensions and criteria of the conceptual framework, and is designed to assess urban vulnerability to heat waves.
The structure of the paper unfolds as follows. The methodology section delineates the PRISMA-based literature review alongside the analytical tools employed for systemic vulnerability assessment. Subsequently, the results section identifies and synthesises the key dimensions and criteria, which provide the foundation for an in-depth discussion of three core dimensions essential to the development of the Climate Vulnerability Index (CVI). The paper concludes by offering a forward-looking perspective on the prospective implementation of the index, and on its integration into GIS-based modelling within the selected case study.

Methodology
A preliminary analysis of the state of the art on systemic vulnerability of urban settlements indicates that existing frameworks vary considerably in scale, dimensions and tools, ranging from qualitative indices to modelling and simulation approaches. "Qualitative indices" refer to indicators derived from expert judgements, participatory assessments or subjective perceptions of the population, which are not based on directly measurable numerical data. These indices integrate aspects such as risk perception, trust in institutions, the effectiveness of social networks or the perceived quality of urban services, elements that are difficult to quantify but essential to understand and assess systemic vulnerability. Building on this, the present study revisits the scientific literature on systemic vulnerability with a specific focus on models and tools for its assessment. The review was conducted across Scopus, Web of Science and Science Direct using PRISMA for Scoping Reviews (Tricco *et al.*, 2018). The objective was to identify methods and tools applied in systemic vulnerability assessment, with particular attention to their dimensions and scales of application, especially within urban and metropolitan contexts (Fig. 1).
The keywords used in the searches were selected to identify contributions that address the issue of vulnerability from a systemic perspective. Publications relating to the period 2010–2025 were examined using nine text combinations based on the use of Boolean operators in order to broaden the scope of the search and include studies relevant to socio-ecological-technological systems (SETS). The main combinations used were:

Tab. 01 | Matrice di sintesi dei contributi ammissibili per la revisione (Fonte: elaborazione degli autori)
Synthesis matrix of the eligible contributions for the review (Source: created by the authors)

Reference	Subject area	Evaluation Method	Models	Hazard	Dimension	Scale
Albano, R., et al. (2013). https://doi.org/10.1007/978-3-642-31319-6_92	Engineering	Parameter-based scoring system	GIS-based Model	Geophysical	Physical -structural	City
Scaini, C., et al. (2014). https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.04.005	Engineering	Damage Matrix	GIS-based Model	Geophysical	Physical -structural	Territorial
Walker, B.B., et al. (2014). https://doi.org/10.1007/s11069-014-1240-2	Geography	AHP method	GIS-based Model	Geophysical	Physical -structural Socio - institutional -economic	Territorial
Porter, H., et al. (2025). https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.105113	Earth Science	Fault Tree Analysis	GIS-based Model	Geophysical	Physical -structural	Territorial
de Vries, J., et al. (2022) . https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W4-2022-29-2022	Urban Studies	Indicator-based approach	Tridimensional Model	Geophysical	Physical -structural	City
Lara-Valencia, F., et al. (2022). https://doi.org/10.3389/frwa.2022.782922	Urban Studies	Land Suitability Analysis Hydrological modelling	GIS-based model	Climatic	Physical -structural	Territorial
Albulescu, A.C. (2023). https://doi.org/10.3390/rs15051453	Urban Studies	Network Analysis Weighted Overlay Analysis	GIS-based model	Geophysical	Physical -structural	Territorial
Weir, A.M., et al. (2024). https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104997	Earth Science	Hazard-Agnostic Analysis Hazard-Dependent Analysis	-	Geophysical	Physical -structural	Territorial
Pitilakis, K., et al. (2016). https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.206	Earth Science	Performance Indicators	-	Natural	Physical -structural	Territorial
Wang, F., et al. (2019). https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2019.05.002	Engineering	Network Entropy model	-	Multiple	Physical -structural	City
Galderisi, A. and Limongi, G. (2021). https://doi.org/10.3390/su13169055	Urban Risk Planning	Multi-Hazard Assessment	Risk-Informed Planning Model	Multi-risk	Social-Institutional-Economic	Territorial
Moradi, M., et al. (2017). https://doi.org/10.1007/s11069-017-2822-6	Seismic Risk Assessment	GIS & Multi-Criteria Analysis	Choquet Integral Model	Earthquake	Physical-Structural	City
Pascale, S., et al. (2010). https://doi.org/10.5194/nhess-10-1575-2010	Geology	Landslide Risk Model	Systemic Vulnerability Model	Landslide	Physical-Structural	District
Modaressi, H., et al. (2014). https://doi.org/10.1007/978-94-017-8835-9_5	Engineering	Performance Indicators	Systemic Vulnerability Model (SYNER-G)	Earthquake	Physical-Structural	Territorial
Molarius, R., et al. (2015). https://doi.org/10.3970/cmes.2015.109.131	Engineering / Resilience Studies	Scenario-based Impact Assessment	Comprehensive Impact Assessment Model	Extreme Winter Event (Climatic)	Multi-dimensional (Systemic)	National / Regional
Beltramino, S., et al. (2022). https://doi.org/10.6093/1970-9870/9069	Urban Studies	Multi-Disciplinary Assessment	Territorial Vulnerability Framework	Multi-risk	Social-Institutional-Economic	City
Golla, A.P.S., et al. (2022). https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103406	Engineering	Structural Vulnerability Analysis	Built Environment Response Model	Earthquake	Physical-Structural	Building
Albulescu, A.C., et al. (2022). https://doi.org/10.1080/19475705.2022.2065219	Seismic Risk Assessment	Systemic Vulnerability Analysis	Urban Seismic Risk Model	Earthquake	Physical-Structural	City
Pasi, R., et al. (2018). https://doi.org/10.1007/978-3-319-75774-2_6	Urban Resilience	Flood Risk Assessment	Spatial Planning Framework	Flood	Social-Institutional-Economic	Territorial
Hénaff, A., et al. (2018). https://doi.org/10.4000/cybergeo.29000	Coastal Risk	Historical Hazard Analysis	Coastal Erosion & Submersion Model	Coastal	Ecological	Territorial
Gomez-Zapata, J.C., et al. (2021). https://doi.org/10.3390/su13041714	Volcanic Risk	Community Perception & Risk Communication	Volcanic Hazard Model	Volcanic	Social-Institutional-Economic	Territorial
Barclay, J. et al. (2022). https://doi.org/10.1111/disa.12537	Disaster Studies	Historical Disaster Mapping	Volcanic Response Model	Volcanic	Social-Institutional-Economic	Territorial
Stenfors, E., et al. (2024). https://doi.org/10.1002/wat2.1692	Socio-Hydrological Systems	Climate Vulnerability Assessment	Drought Risk Model	Climate	Ecological	Territorial

Tab. 01 | Matrice di sintesi dei contributi ammissibili per la revisione (Fonte: elaborazione degli autori)
Synthesis matrix of the eligible contributions for the review (Source: created by the authors)

Reference	Subject area	Evaluation Method	Models	Hazard	Dimension	Scale
Bonadonna, C., et al. (2021). https://doi.org/10.1186/s13617-021-00108-5	Applied Volcanology	Volcanic Risk Integration	ADVISE Model	Volcanic	Physical-Structural	Territorial
Dominguez, L., et al. (2021). https://doi.org/10.3389/feart.2021.645945	Disaster Forensics	Post-Event Impact Assessment	Disaster Forensic Model	Volcanic	Physical-Structural	Territorial
Albulescu, A.C., et al. (2020). https://doi.org/10.2495/RISK200021	Seismic Vulnerability	Multi-Criteria Assessment	School Seismic Risk Model	Earthquake	Physical-Structural	Building
Hellequin, A.P. et al. (2013). https://doi.org/10.1051/nss/2014002	Social Sciences	Risk Perception Analysis	Coastal Vulnerability Model	Coastal	Social-Institutional-Economic	District
Hürlimann, M. et al. (2024). https://doi.org/10.1007/978-3-031-57357-6_37	Engineering	Multi-Hazard Scenario Analysis	PARATUS Project Model	Multi-risk	Social-Institutional-Economic	Territorial
Sdao, F. et al. (2011). https://doi.org/10.4408/IJEGE.2011-01.S-07	Geology	Landslide & Flood Combined Risk	Urban Hazard Model	Multi-risk	Physical-Structural	District
Shughrue, C. and Seto, K.C. (2018). https://doi.org/10.1007/s10584-018-2293-0	Industrial Risk	Network Analysis	Urban-Industrial Risk Propagation Model	Multi-risk	Economic	Global
Greco, M. and Martino, G. (2016). https://doi.org/10.1007/s11069-016-2293-1	Flood Risk Management	Preliminary Risk Mapping	Coastal Vulnerability Model	Flood	Ecological	Territorial

scopo. Questi risultano principalmente quantitativi, in quanto si basano su dati facilmente reperibili da fonti statistiche ufficiali o da studi e monitoraggi specifici a livello locale. Tuttavia, tali indicatori risultano insufficienti a rappresentare la complessità della vulnerabilità sistemica, che concerne anche – e soprattutto – la percezione delle comunità che vivono in contesti multi-rischio e le strategie di mitigazione, gestione e prevenzione implementate dalle istituzioni. Il quadro di sintesi proposto dal presente studio dovrà pertanto essere ulteriormente sviluppato e approfondito attraverso l'integrazione di tali aspetti.

Nella sezione seguente vengono illustrate le principali dimensioni e i criteri selezionati per la costruzione del framework finalizzato allo sviluppo di un indice di vulnerabilità climatica.
Alla luce dei risultati emersi dalla revisione della letteratura e dei tre domini fondamentali identificati, la costruzione di tale Indice di Vulnerabilità Climatica (CVI) è stata sviluppata adottando il metodo Mazziotta–Pareto (MPI), ampiamente riconosciuto per la sua capacità di sintetizzare insiemi eterogenei di indicatori in modo non compensativo. Tale approccio risulta particolarmente coerente con la natura sistemica della vulnerabilità urbana, poiché permette di integrare dimensioni tra loro

1. "systemic vulnerability" AND ("assessment" OR "evaluation");
2. "systemic vulnerability" AND ("assessment" OR "evaluation") AND "climate",
3. "systemic vulnerability" AND ("assessment" OR "evaluation") AND "geophysical";
4. "systemic vulnerability" AND "modelling";
5. "systemic vulnerability" AND "modelling" AND ("assessment" OR "evaluation");
6. "systemic vulnerability" AND "simulation" AND ("assessment" OR "evaluation");
7. "systemic vulnerability" AND "simulation";
8. "systemic vulnerability" AND "simulation" AND "geophysical";
9. "systemic vulnerability" AND "simulation" AND "climate".

Only English-language and peer-reviewed papers in specific categories were selected. After eliminating duplicates and screening abstracts, 36 contributions were selected (Tab. 1). They were analysed by research field, evaluation method, model, vulnerability dimensions (physical, social, ecological) and application scale (territorial, city, district, building). Most works belong to Earth and Planetary Sciences (21%), followed by Social Sciences, Engineering (14% each), and Environmental Science (13%).
The review highlights links between systemic vulnerability, modelling and simulation of geophysical and climatic risks, focusing on multi-hazard urban environments. GIS and multi-criteria methods are widely used to study seismic risk. Historical hazard approaches prevail in coastal contexts, while volcanic risk studies emphasise perception, communication and integrated models.
The most used methodologies include GIS-based spatial analysis, multi-criteria decision analysis, network analysis of systemic interdependencies, and scenario-based simulations. Specific applications concern landslides, water networks, and interdependent infrastructures.
Common to all is the emphasis on cascading failures of interconnected systems (transport, water, energy). While some studies adopt holistic perspectives including socio-economic and institutional factors, others focus on functional loss in specific sectors. Overall, methodologies vary according to risk type, spatial scale and interconnections, highlighting the need for specific approaches for different contexts.

Urban systemic vulnerability, being an inherently multidimensional phenomenon, requires methods capable of simultaneously addressing qualitative and quantitative variables, weighting them according to their relative relevance. The use of tools such as GIS, Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA), network theory and simulations allows heterogeneous indicators – social, environmental, economic and infrastructural – to be integrated within a single assessment framework. MCDA also makes the decision-making process transparent and the results replicable, supporting the definition of intervention priorities in multi-risk contexts.
The literature confirms the complexity of systemic vulnerability and the need for multidisciplinary assessments. Tools such as GIS, MCDA, network theory and simulations provide valu-

differenti – sociali, ambientali, economiche e spaziali – evitando che condizioni molto favorevoli in un ambito compensino criticità rilevanti in un altro, come spesso accade nei contesti di rischio multilivello.
Il metodo MPI prevede una normalizzazione preliminare degli indicatori, utile a rendere confrontabili variabili diverse per scala e natura, incluse quelle qualitative trasformate in scale ordinali. La procedura consente di mantenere l'informazione relativa alla variabilità interna di ciascun indicatore, preservandone il contributo specifico alla vulnerabilità complessiva. Successivamente, attraverso il calcolo dell'indice di sintesi non compensativo, il metodo applica un meccanismo penalizzante basato sulla deviazione standard degli indicatori, riducendo il valore dell'indice finale quando si rilevano condizioni di squilibrio significativo tra le dimensioni considerate. Tale caratteristica si rivela particolarmente adeguata nel contesto della vulnerabilità sistemica, dove l'asimmetria tra le componenti del sistema urbano costituisce un elemento strutturale del rischio.
L'adozione del metodo Mazziotta–Pareto consente inoltre di integrare in modo coerente indicatori sia quantitativi sia qualitativi, superando una delle principali criticità evidenziate dalla letteratura e dallo stesso revisore. La possibilità di includere informazioni di natura socio-istituzionale e percezioni legate all'esposizione e alla sensibilità rende l'indice maggiormente aderente alla complessità dei sistemi urbani e delle loro interdipendenze. Il risultato è un indicatore globale stabile, replicabile e facilmente spazializzabile in ambiente GIS, funzionale alle finalità del progetto e alle esigenze della pianificazione adattiva.

Risultati

Lo studio degli indici e degli indicatori di vulnerabilità ha ricevuto crescente attenzione negli ultimi anni, poiché rappresentano strumenti fondamentali per la valutazione della resilienza delle società di fronte a diversi rischi. Gli indicatori di vulnerabilità coprono molteplici dimensioni, comprendendo fattori demografici, economici, infrastrutturali e ambientali. Tra gli indicatori comunemente utilizzati figurano la densità di popolazione (Isidoro *et al*., 2013; Nath *et al*., 2015), la distribuzione per età – con particolare riferimento alle percentuali di anziani e bambini (Dong *et al*., 2020; Alam and Haque, 2018), i tassi di occupazione (Moghadas *et al*., 2020; Tran *et al*., 2020), i livelli di reddito (Spaliviero *et al*., 2018), la povertà energetica (D'Ambrosio and Di Martino, 2016), i livelli di alfabetizzazione (Vicente *et al*., 2014; Alam and Haque, 2021) e l'accesso ai servizi sanitari (Dong *et al*., 2021; Zhu *et al*., 2019). Questi indicatori, considerati nel loro insieme, offrono una panoramica della suscettibilità delle popolazioni a eventi avversi, inclusi disastri naturali, crisi economiche e impatti dei cambiamenti climatici. Diverse metodologie sono comunemente impiegate per la valutazione degli indici di vulnerabilità. Modelli statistici come l'Analisi delle Componenti Principali (PCA) e l'analisi fattoriale vengono ampiamente utilizzati per aggregare molteplici indicatori in indici compositi (Cutter and Finch, 2008), riducendo la dimensionalità pur preservando i fattori più significativi. I Sistemi Informativi Geografici (GIS) rivestono un ruolo fondamentale nelle valutazioni spaziali della vulnerabilità, permettendo la visualizzazione e la mappatura delle aree a rischio (Moghadas *et al*., 2019). Indici compositi, quali il Social Vulnerability Index (SoVI), integrano molteplici indicatori per fornire

able frameworks, but integration is required.
In addition to the analysis of the most commonly used assessment methods for the same goal of systemic vulnerability, the analysed literature also revealed a prevalence of criteria and indicators used for this purpose. These are predominantly quantitative as they refer to data that are readily available from official statistical sources or from specific studies and monitoring conducted at the local level. However, they are not sufficient to convey the complexity of systemic vulnerability, which lies in the fact that it also and above all concerns the perception of communities living in multi-disaster contexts and the mitigation, management and prevention strategies implemented by institutions. Therefore, this initial analysis and synthesis will have to be further developed and deepened through the integration of these aspects. The following section shows the main dimensions and criteria selected to construct the framework for the development of a climate vulnerability index.
Considering the results emerging from the literature review and the three fundamental domains identified, the Climate Vulnerability Index (CVI) was developed using the Mazziotta–Pareto (MPI) method, widely recognised for its ability to synthesise heterogeneous sets of indicators in a non-compensatory manner. This approach is particularly consistent with the systemic nature of urban vulnerability, as it allows for the integration of different dimensions – social, environmental, economic and spatial – preventing very favourable conditions in one area from compensating for significant critical issues in another, as often happens in multi-level risk contexts.
The MPI method involves preliminary normalisation of the indicators, which is useful for making variables that differ in scale and nature comparable, including qualitative variables transformed into ordinal scales. The procedure allows information on the internal variability of each indicator to be retained, preserving its specific contribution to overall vulnerability. Subsequently, through the calculation of the non-compensatory summary index, the method applies a penalising mechanism based on the standard deviation of the indicators, reducing the value of the final index when significant imbalances are detected between the dimensions considered. This feature is particularly appropriate in the context of systemic vulnerability, where asymmetry between components of the urban system is a structural element of risk.
The adoption of the Mazziotta–Pareto method also allows for the consistent integration of both quantitative and qualitative indicators, overcoming one of the main critical issues highlighted in the literature and by the reviewer himself. The possibility of including socio-institutional information and perceptions related to exposure and sensitivity makes the index more responsive to the complexity of urban systems and their interdependencies. The result is a stable, replicable global indicator that can be easily spatialised in a GIS environment that is functional to the project's objectives, and to the needs of adaptive planning.

Results

The study of vulnerability indices and indicators has gained significant at-

una valutazione complessiva della vulnerabilità su diverse scale geografiche (Ainuddin and Routray, 2012). Un altro approccio diffuso riguarda l'impiego di indici ponderati, nei quali i diversi indicatori ricevono pesi specifici basati sul giudizio di esperti o su dati empirici (Chen and Leandro, 2019), consentendo valutazioni su misura che riflettano le condizioni locali.

Metodi qualitativi, come i sondaggi Delphi e le consultazioni con stakeholder, integrano le tecniche quantitative mediante l'inclusione di opinioni esperte e prospettive comunitarie (Yoga Putra *et al*., 2019). Data la natura complessa e multifattoriale della vulnerabilità, si osserva un crescente ricorso ad approcci ibridi che integrano metodi quantitativi e qualitativi, rafforzando la solidità e l'applicabilità delle valutazioni e favorendo interventi politici e allocazioni di risorse più efficaci. Con l'evolversi del settore, i progressi nell'analisi dei big data e nell'apprendimento automatico sono destinati a migliorare la precisione e le capacità predittive degli indici di vulnerabilità, potenziandone il ruolo nella riduzione del rischio di disastri e nella pianificazione per uno sviluppo sostenibile.

La revisione evidenzia inoltre la natura specifica per tipologia di rischio degli indicatori di vulnerabilità, che variano significativamente tra ondate di calore, alluvioni, erosione costiera e terremoti. Gli indicatori relativi alla popolazione – età, genere, status socioeconomico, composizione familiare – dominano costantemente le valutazioni di esposizione e sensibilità, confermandone il ruolo cruciale nell'analisi della vulnerabilità.

Dalla letteratura sono emersi tre ambiti fondamentali per comprendere la vulnerabilità urbana e il modo in cui può essere misurata attraverso gli indicatori (Fig. 2):

1. Popolazione (dimensione sociale/demografica): Include caratteristiche statistiche e demografiche come la densità della popolazione, la distribuzione per età, i tassi di povertà e lo stato occupazionale.
2. Sistemi hard (dimensione fisica/ambiente costruito): Comprende la robustezza delle infrastrutture, la qualità dell'edilizia, i sistemi tecnologici (ad es. climatizzazione) e le infrastrutture verdi e blu.
3. Sistemi soft (istituzionali, economici e servizi): Riguarda la governance, i sistemi sanitari, l'istruzione, la risposta alle emergenze, la sicurezza e la stabilità economica.

Mentre molti studi danno priorità all'esposizione fisica e alla vulnerabilità sociale (in particolare l'età e la povertà), le interdipendenze sistemiche – come i guasti a cascata nelle reti energetiche, di trasporto e di servizio – sono meno frequentemente esplorate. Le interazioni tra rischi multipli o composti sono raramente integrate, in quanto la maggior parte degli indicatori rimane specifica per il rischio senza tenere conto degli effetti a cascata o sinergici.

Questa frammentazione nell'operatività evidenzia la necessità critica di quadri che considerino la vulnerabilità come un sistema socio-ecologico-tecnologico, riconoscendo l'interconnessione di più dimensioni piuttosto che di fattori isolati.

Sulla base di questi risultati, la revisione della letteratura informa il disegno dell'Indice di Vulnerabilità strutturato in modo da integrare indicatori di popolazione, sistemi hard e soft. Il rischio derivante dalle ondata di calore è stato scelto come caso di studio prelimare a causa della sua crescente ricorrenza nell'ambito dei rischi urbani dovuti ai cambiamenti climatici. Il CVI è destinato alla modellazione spaziale basata su GIS per consenti-

tention in recent years, as they serve as critical tools for assessing societal resilience to various hazards. Vulnerability indicators span multiple dimensions, including demographic, economic, infrastructural, and environmental factors. The literature review revealed that commonly used indicators include population density, age distribution – particularly proportions of elderly and children, employment rates, income levels, fuel poverty, literacy rates, and access to healthcare. These indicators collectively provide insight into the susceptibility of populations to adverse events, including natural disasters, economic crises, and climate change impacts. Several methodologies are commonly employed to evaluate vulnerability indices. Statistical models such as Principal Component Analysis (PCA) and factor analysis are widely used to aggregate multiple indicators into composite indices (Cutter and Finch, 2008). These methods reduce dimensionality while retaining the most significant contributing factors. Geographic Information Systems (GIS) play a fundamental role in spatial vulnerability assessments, enabling visualisation and mapping of risk-prone areas (Moghadas *et al*., 2019). Composite indices, such as the Social Vulnerability Index (SoVI), integrate multiple indicators to provide a comprehensive assessment of vulnerability at varying geographic scales (Ainuddin and Routray, 2012). Another prevalent approach involves the use of weighted indices, where different indicators are assigned specific weights based on expert judgment or empirical data (Chen and Leandro, 2019).

Qualitative methods, such as Delphi surveys and stakeholder consultations, complement quantitative techniques by incorporating expert opinions and community perspectives (Yoga Putra *et al*., 2019). Given the complex and multifactorial nature of vulnerability, there is a growing use of hybrid approaches that integrate quantitative indicators (census data, environmental indices derived from GIS, building characteristics), and qualitative indicators obtained through the Delphi method or through interviews with local stakeholders. This combination allows for the integration of objective measurements of exposure and vulnerability with local knowledge of social processes, improving the predictive capacity of systemic vulnerability models, strengthening the robustness and applicability of assessments, and promoting more effective policy interventions and resource allocations. As the field evolves, advances in big data analytics and machine learning are expected to refine the accuracy and predictive capabilities of vulnerability indices, thereby enhancing their role in disaster risk reduction and sustainable development planning.

The review further highlights the hazard-specific nature of vulnerability indicators, which vary markedly across heat waves, flooding, coastal erosion, and earthquakes. Population-related indicators – age, gender, poverty status, household composition – consistently dominate exposure and sensitivity assessments across hazards, confirming their critical role in vulnerability analysis.

Three core domains emerged from the literature as foundational in understanding urban vulnerability, and how it can be measured through indicators (Fig. 2):

1. Population (Social/Demographic): This includes statistical and de-

02 | Tre domini fondamentali della vulnerabilità urbana (Fonte: elaborazione degli autori)
Three core domains of urban vulnerability (Source: created by the authors)

Hazard	Type of data	Vulnerability Indicators	
Heat wave	Statistical Data	Population density	Social
Heat Wave	Demographic Characteristics	Age; Gender; Ethnicity; Disadvantaged population; Fuel poverty; Household poverty; Employment; Household size	Social
Flooding	Demographic Characteristics	Population density; People exposure; Age; Gender; Disadvantaged population; Fuel poverty; Special needs; Employment	Social
Coastal erosion	Demographic Characteristics	Population density; Poverty headcount ratio; Dependency ratio; Disability; Employment; Literacy rate	Social
Earthquake	Demographic Characteristics	Population >60 years; Children <15 years; Female population; Illiteracy rate; Family size; Population density	Social
Heat wave	Heat stress	Discomfort	Physical-Spatial
	Built-up areas	Access to green spaces	Physical-Spatial
	Technological systems	Air-conditioning	Physical-Spatial
	Green & Blue Infrastructure	Green coverage	Physical-Spatial
Flooding	Built-up areas	Sturdy housing type; Housing age; Homeownership	Physical-Spatial
Coastal erosion	Built-up areas	Household density; Proximity to shoreline; Poor housing	Physical-Spatial
Heat wave	Health	GDP per capita; Access to medical facilities; Access to safe water; Health assistance; Health conditions; Mortality; Services; Insurance	Socio-Economic-Cultural
	Education	Educational level	Socio-Economic-Cultural
	Law enforcement	National basic livelihood guarantees	Socio-Economic-Cultural
	Emergency	Emergency response	Socio-Economic-Cultural
	Economy/Finance	Financial independence; Gross Regional Domestic Product (GRDP)	Socio-Economic-Cultural
Flooding	Health	Social insurance; Health access; Medical capacity; Income; Medical spending; Built-environment conditions; Renter households	Socio-Economic-Cultural
	Education	Educational attainment equality	Socio-Economic-Cultural
	Recreational	Public recreational facilities	Socio-Economic-Cultural
	Ecosystem	Harmony with nature	Socio-Economic-Cultural
	Mobility	Public transportation service	Socio-Economic-Cultural
	Law enforcement	Learning mechanism	Socio-Economic-Cultural
	Emergency	Redundancy of emergency services; Civic/social advocacy organizations; Duration of evacuation; Previous flood experience	Socio-Economic-Cultural
	Economy/Finance	Economic tolerance; Local economic level	Socio-Economic-Cultural
Earthquake	Health	Household income; Economically dependent families	Socio-Economic-Cultural

re valutazioni di vulnerabilità localizzate e attuabili, supportando i pianificatori urbani e i responsabili politici in sforzi mirati per la costruzione della resilienza.

Discussione

La revisione della letteratura ha evidenziato una notevole varietà di indicatori e framework di vulnerabilità, mettendo però in luce una diffusa frammentazione nell'approccio alla valutazione della vulnerabilità sistemica. La maggior parte degli studi esistenti tende a isolare gli indicatori all'interno di confini disciplinari o settoriali ristretti, concentrandosi singolarmente sulle caratteristiche della popolazione, sulle infrastrutture fisiche o sui sistemi istituzionali ed economici. Questa prospettiva compartimentata limita la capacità di cogliere la natura complessa, dinamica e interconnessa della vulnerabilità urbana. La letteratura sottolinea tre domini fondamentali, comunemente indicati come popolazione (sociale/demografico), sistemi hard (fisico/infrastrutturale) e sistemi soft (istituzionale/economico/

mographic characteristics such as population density, age distribution, poverty rates, and employment status.
2. Hard Systems (Physical/Built Environment): This dimension covers infrastructure robustness, housing quality, technological systems (e.g., air conditioning), and green-blue infrastructure.
3. Soft Systems (Institutional, Economic, and Service-related): This encompasses governance, health systems, education, emergency response, law enforcement, and economic stability.

While many studies prioritise physical exposure and social vulnerability (notably age and poverty), systemic interdependencies—such as cascading failures in energy, transportation, and service networks—are less frequently explored. Multi-risk or compound hazard interactions are rarely integrated, as most indicators remain hazard-specific without accounting for cascading or synergistic effects.

This fragmentation in operationalisation highlights a critical need for frameworks that consider vulnerability a socio-ecological-technological system (SETS), recognising the interconnectedness of multiple dimensions rather than viewing them as isolated factors.

Building on these findings, the review informs the design of a Climate Vulnerability Index (CVI) structured to integrate population, as well as hard and soft system indicators. Heat stress was chosen as the initial case study due to its rising significance under climate change and urban heat island effects. The CVI is intended for GIS-based spatial modelling to enable localised, actionable vulnerability assessments, supporting urban planners and policymakers in targeted resilience-building efforts.

Discussion

The comprehensive literature review revealed a rich diversity of vulnerability indicators and frameworks, yet it also underscored a prevailing fragmentation in the approach to assessing systemic vulnerability. Most existing studies tend to isolate indicators within narrow disciplinary or sectoral boundaries—focusing on either population characteristics, physical infrastructure, or institutional and economic systems individually. This siloed perspective limits the ability to capture the complex, dynamic, and interconnected nature of vulnerability in urban environments, particularly in relation to climate-related hazards like heat stress. The literature emphasised three core domains often referred to as population (social/demographic), hard systems (physical/infrastructural), and soft systems (institutional/economic/service-related) (Ainuddin and Routray, 2012; Cutter and Finch, 2008). Each domain influences vulnerability but, importantly, their interactions create systemic vulnerabilities that single-factor analyses fail to capture.

Building on such insights, the proposed Climate Vulnerability Index (CVI) framework integrates three interconnected dimensions (socio-environmental, socio-economic and socio-spatial), associated with measurable criteria and indicators, forming the basis for a multi-criteria assessment of systemic vulnerability (Fig. 3).

This integration directly addresses the shortcomings identified in the literature by recognising that vulnerability

servizi) (Ainuddin and Routray, 2012; Cutter and Finch, 2008). Ciascun dominio influenza la vulnerabilità, ma è soprattutto l'interazione tra essi a generare vulnerabilità sistemiche che le analisi mono-fattoriali non riescono a catturare.

Sulla base di queste evidenze, l'indice proposto adotta un framework multidimensionale che integra criteri chiave in tre dimensioni interconnesse: socio-ambientale, socio-economica e socio-spaziale. Tale integrazione affronta direttamente le carenze identificate in letteratura, riconoscendo che la vulnerabilità emerge dall'interazione tra caratteristiche demografiche, elementi dell'ambiente costruito e condizioni socio-istituzionali ed economiche, dimensioni storicamente trattate separatamente. I fattori legati alla popolazione si confermano indicatori di vulnerabilità predominanti per diverse tipologie di rischio (Dong *et al*., 2020; Alam and Haque, 2018), influenzando direttamente esposizione e sensibilità e modulando l'accesso alle risorse adattive. I sistemi hard comprendono le infrastrutture fisiche e le condizioni ambientali che determinano la capacità di attenuare o amplificare gli impatti dei pericoli (Moghadas *et al*., 2019; Spaliviero *et al*., 2018). I sistemi soft modellano i meccanismi di supporto istituzionale che favoriscono il recupero e la resilienza (Chen and Leandro, 2019; Yoga Putra *et al*., 2019), ma risultano spesso sottorappresentati negli indici di vulnerabilità. Il framework del CVI integra tre dimensioni interconnesse (socio-ambientale, socio-economica e socio-spaziale) associandola a criteri e indicatori misurabili. Esso evidenzia come la vulnerabilità all'ondata di calore emerga dall'interazione tra fattori ambientali, socio-economici spaziali e demografici, fornendo la base per una valutazione multi-criterio della vulnerabilità sistemica (Fig. 3).

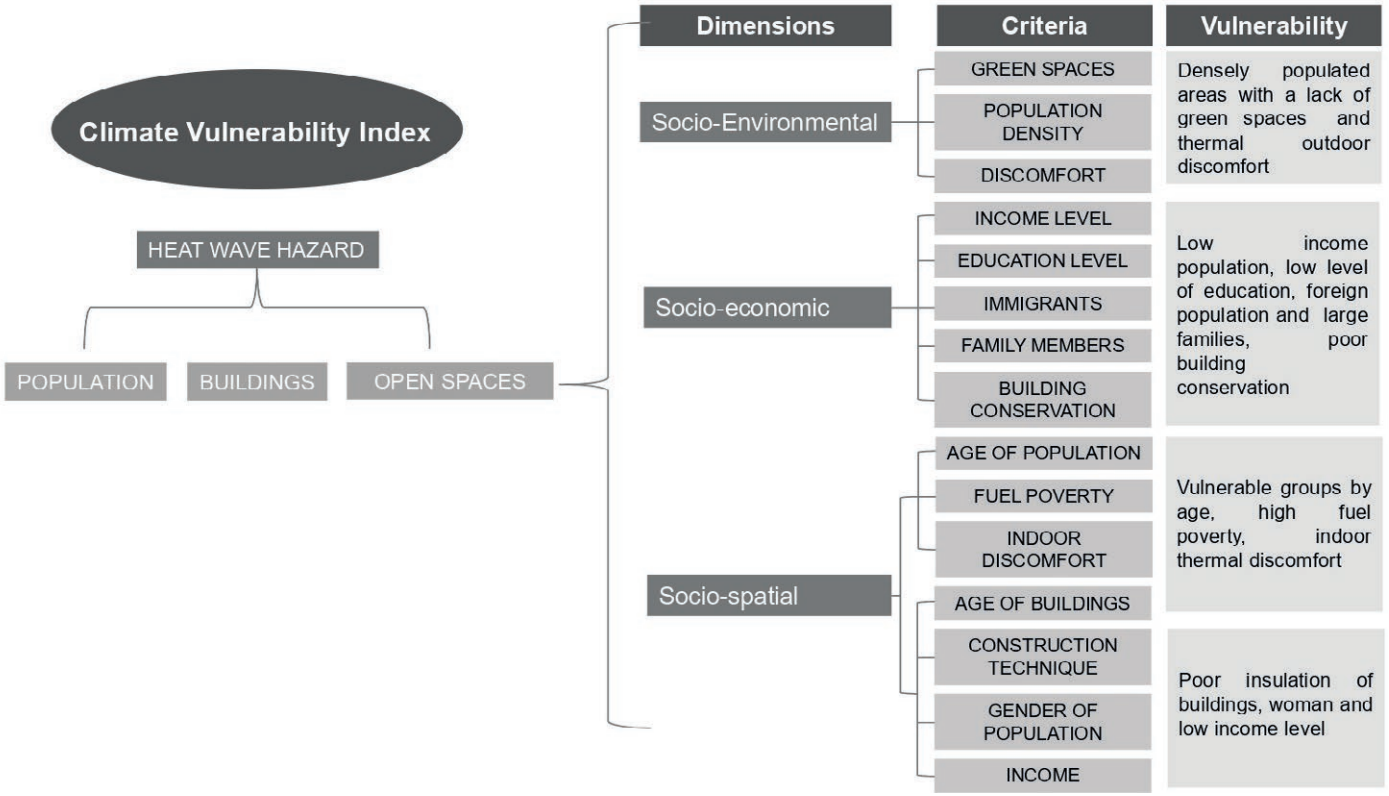
I criteri sono articolati come segue:

- Dimensione socio-ambientale: questa dimensione riflette i fattori dei sistemi hard che determinano l'esposizione attraverso l'ambiente fisico e i microclimi urbani. I criteri considerati includono spazi verdi, densità di popolazione e discomfort negli spazi aperti. Una vegetazione limitata riduce il raffrescamento evaporativo e l'ombreggiatura, mentre densità più elevate sono spesso associate a scarsa presenza di aree verdi e a superfici impermeabili estese, intensificando l'effetto isola di calore urbana. La carenza di spazi aperti ombreggiati amplifica il discomfort e riduce le opportunità di raffrescamento all'aperto. Queste interrelazioni evidenziano come la vulnerabilità non sia funzione esclusiva dell'esposizione, ma dipenda anche dalle disuguaglianze spaziali nell'accesso ai servizi ambientali.
- Dimensione socio-economica: questa dimensione coglie le caratteristiche dei sistemi soft che influenzano la capacità adattativa e la resilienza. I criteri includono reddito, istruzione, status migratorio, dimensione familiare e stato di conservazione degli edifici. Le famiglie a basso reddito spesso abitano in edifici con scarso isolamento termico e privi di climatizzazione, mentre livelli di istruzione limitati possono ridurre la consapevolezza dei rischi da calore e delle strategie di mitigazione. I migranti, in particolare coloro con reti sociali limitate, possono incontrare ulteriori ostacoli nell'accesso alle risorse. Le famiglie numerose affrontano stress dovuto al sovraffollamento, e la scarsa manutenzione degli edifici che aumenta ulteriormente il calore interno. Questi elementi dimostrano come la vulnerabilità

emerges from the interplay among demographic characteristics, built environment features, and socio-institutional and socio-economic conditions – dimensions that have historically been treated separately. Population factors consistently emerged as dominant vulnerability indicators across hazards (Dong *et al*., 2020; Alam and Haque, 2018), directly influencing exposure and sensitivity, and also mediating access to adaptive resources. Hard systems encompass physical infrastructure and environmental conditions that affect the capacity to either buffer or amplify hazard impacts (Moghadas *et al*., 2019; Spaliviero *et al*., 2018). Soft systems shape the institutional support mechanisms that enable recovery and resilience (Chen and Leandro, 2019; Yoga Putra *et al*., 2019) but have often been underrepresented in vulnerability indices.

The criteria are articulated as follows:

- Socio-environmental dimension: this dimension reflects both hard system factors that determine the vulnerability of the physical environment and the characterisation of urban microclimates, as well as distributional-spatial, demographic and accessibility aspects. The criteria considered include the presence of green spaces, population density and the level of discomfort in open spaces. Urban microclimate modelling shows that limited vegetation reduces evaporative cooling and shading, while high housing densities are often associated with a lack of green spaces and extensive impervious surfaces, intensifying the urban heat island effect. The lack of shaded and permeable open spaces increases discomfort and reduces opportunities for outdoor cooling. In addition, the assessment of environmental criteria considers spatial inequalities in access to ecosystem services necessary for comfort during heat waves, according to a distributional approach that assesses the availability and quality of open spaces in relation to housing density.
- Socio-economic dimension: this dimension captures soft system characteristics affecting adaptive capacity and resilience. Criteria include Income, Education, Immigrant Status, Family Size, and Building Conservation. Low-income households often occupy poorly insulated dwellings without access to air conditioning, while limited education can constrain awareness of heat risk and mitigation strategies. Immigrants, particularly those with restricted social networks, may face additional barriers to accessing resources. Large families experience compounded stress due to overcrowding, and inadequate building maintenance further elevates indoor heat retention. These elements demonstrate how social vulnerability interacts with infrastructural limitations, reducing the capacity to cope during heat events.
- Socio-spatial dimension: this dimension integrates the demographic distribution of the most vulnerable population groups and housing conditions, combining population characteristics with attributes of the built environment that influence vulnerability to heat waves. Criteria include Age, Gender, Fuel Poverty, Indoor Discomfort, Age of Buildings, Construction Technique, and Income. Elderly individuals and children are physi-



sociale interagisca con le limitazioni infrastrutturali, riducendo la capacità di affrontare eventi di calore intenso.

– Dimensione socio-spaziale: questa dimensione integra la vulnerabilità demografica e le condizioni abitative, combinando caratteristiche della popolazione con attributi dell'ambiente costruito che influenzano l'esposizione al calore. I criteri includono età, genere, povertà energetica, discomfort indoor, età degli edifici, tecnica costruttiva e reddito. Anziani e bambini risultano fisiologicamente più sensibili al calore estremo, mentre le famiglie in condizione di povertà energetica incontrano difficoltà nell'accesso ai sistemi di raffrescamento. Gli edifici più datati, spesso realizzati con materiali termicamente inefficienti, trattengono il calore non dissipandolo durante la notte e generando isole di calore interne persistenti. Le dinamiche di genere possono inoltre influenzare i modelli di esposizione, poi-

ologically more sensitive to extreme heat, while fuel-poor households struggle to afford cooling systems. Older buildings, often constructed with thermally inefficient materials, trap heat and fail to dissipate it at night, creating persistent indoor heat islands. Gender dynamics may influence exposure patterns, as some populations spend more time indoors. The combination of these factors illustrates how systemic vulnerability is determined by the interaction between the sensitivity of demographic groups, and the energy and technological inefficiency of buildings.

Conclusion

The multidimensional framework proposed in this study advances the operationalisation of systemic vulnerability by shifting from siloed approaches to a relational model that integrates socio-environmental, socio-economic, and socio-spatial dimensions. This structure captures real-world interdependencies – for example, the way in which high population density, low income and outdated housing interact to amplify risk – through criteria translated into measurable indicators, which constitute the proposed Climate Vulnerability Index (CVI).

By linking criteria to indicators, the CVI enables evidence-based, comprehensive, and comparable assessments of vulnerability, overcoming fragmented analyses and providing a robust tool for urban planning, climate adaptation, and risk reduction. Its systemic perspective highlights how vulnerability emerges from the interplay of environmental exposure, social inequalities, and spatial conditions, as illustrated in the case of heat stress.

This indicator-based approach not only supports quantification, monitoring, and spatialisation of vulnerability but also facilitates policy uptake by guiding resource allocation toward populations and areas where overlapping vulnerabilities intensify risk. Future work will validate the framework through a pilot case study in Naples, applying Census and environmental data in GIS-based mapping to spatialise vulnerability at neighbourhood scale. A subsequent phase of validation of the framework is planned, involving a panel of experts from the fields of urban planning, climatology, emergency management and social policy. This phase will include review of the criteria; weighting using the 'Simos Cards method'; definition of the most appropriate aggregation technique (weighted sum or normalisation with PCA).

This application will demonstrate the feasibility of embedding systemic vulnerability into local adaptation planning and climate resilience strategies.

ché alcune popolazioni trascorrono più tempo in ambienti chiusi. Questi fattori sovrapposti illustrano come la vulnerabilità sistemica sia influenzata da fragilità demografica e inefficienza energetica e tecnologica degli edifici.

Conclusioni

Il *framework* multidimensionale proposto in questo studio rappresenta un avanzamento nell'operazionalizzazione della vulnerabilità sistemica, spostandosi da approcci compartimentati a un modello relazionale che integra le dimensioni socio-ambientale, socio-economica e socio-spaziale. Questa struttura consente di cogliere le interdipendenze reali – ad esempio il modo in cui elevata densità abitativa, basso reddito e abitazioni datate interagiscono per amplificare il rischio – attraverso criteri tradotti in indicatori misurabili, che costituiscono l'indice proposto.

Collegando i criteri agli indicatori, il CVI consente valutazioni della vulnerabilità basate su evidenze, complete e comparabili, superando le analisi frammentarie e fornendo uno strumento solido per la pianificazione urbana, l'adattamento climatico e la riduzione del rischio. La sua prospettiva sistemica evidenzia come la vulnerabilità emerga dall'interazione tra esposizione ambientale, disuguaglianze sociali e condizioni spaziali, come illustrato nel caso dello stress da calore.

Questo approccio basato su indicatori non solo supporta la quantificazione, il monitoraggio e la mappatura spaziale della vulnerabilità, ma facilita anche l'adozione di politiche, guidando l'allocazione delle risorse verso popolazioni e aree in cui le vulnerabilità sovrapposte intensificano il rischio. Lo sviluppo futuro dello studio prevede la validazione del *framework* mediante un caso pilota relativo alla città di Napoli, integrando dati censuari e ambientali in mappature GIS con la finalità di spazializzare la vulnerabilità a scala urbana di quartiere. Tale applicazione contribuirà a testare una metodologia per il supporto alle decisioni che includa la vulnerabilità sistemica nella pianificazione locale dell'adattamento climatico e nelle strategie di resilienza urbana.

REFERENCES

Adger, W.N. (2006), "Vulnerability", *Global Environmental Change*, Vol. 16, No. 3, pp. 268-281. Available at: https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006

Birkmann, J. (2006), "Indicators and criteria for measuring vulnerability: theoretical bases and requirements", in Birkmann, J. (Ed.), *Measuring Vulnerability to Natural Hazards: Towards Disaster Resilient Societies*, United Nations University Press, Tokyo, pp. 55-77.

Birkmann, J., Cardona, O.D., Carreño, M.L., Barbat, A.H., Pelling, M., Schneiderbauer, S., Welle, T. and others (2013), "Framing vulnerability, risk and societal responses: the MOVE framework", *Natural Hazards*, Vol. 67, No. 2, pp. 193-211.

Birkmann, J., Cutter, S.L., Rothman, D.S., Welle, T., Garschagen, M., Van Ruijven, B., O'Neill, B. and Pulwarty, R. (2015), "Scenarios for vulnerability: opportunities and constraints in the context of climate change and disaster risk", *Climatic Change*, Vol. 133, pp. 53-68.

Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I. and Wisner, B. (2014), *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters*, Routledge, London.

Cutter, S.L. (2016), "Resilience to what? Resilience for whom?", *The Geographical Journal*, Vol. 182, No. 2, pp. 110-113.

Cutter, S.L. (2021), "The changing nature of hazard and disaster risk in the Anthropocene", *Annals of the American Association of Geographers*, Vol. 111, No. 3, pp. 819-827.

D'Ambrosio, V. and Di Martino, F. (2016), "The METROPOLIS research: experimental models and decision-making processes for the adaptive environmental design in climate change", *UPLanD – Journal of Urban Planning, Landscape & Environmental Design*, Vol. 1, No. 1, pp. 187-217. Available at: https://doi.org/10.6092/2531-9906/5038

Füssel, H.M. (2010), "How inequitable is the global distribution of responsibility, capability, and vulnerability to climate change: a comprehensive indicator-based assessment", *Global Environmental Change*, Vol. 20, No. 4, pp. 597-611.

Galderisi, A. and Limongi, G. (2021), "A comprehensive assessment of exposure and vulnerabilities in multi-hazard urban environments: a key tool for risk-informed planning strategies", *Sustainability*, Vol. 13, No. 16, 9055.

Gencer, E., Folorunsho, R., Linkin, M., Wang, X., Natenzon, C.E., Wajih, S., Mani, N., Esquivel, M., Ali Ibrahim, S., Tsuneki, H., Castro, R., Leone, M., Panjwani, D., Romero-Lankao, P. and Solecki, W. (2018), "Disasters and risk in cities", in Rosenzweig, C., Solecki, W., Romero-Lankao, P., Mehrotra, S., Dhakal, S. and Ali Ibrahim, S. (Eds), *Climate Change and Cities: Second Assessment Report of the Urban Climate Change Research Network*, Cambridge University Press, New York, pp. 61-98.

Gill, J.C. and Malamud, B.D. (2014), "Reviewing and visualizing the interactions of natural hazards", *Reviews of Geophysics*, Vol. 52, No. 4, pp. 680-722. Available at: https://doi.org/10.1002/2013RG000445

Gunaratne, M.S., Firdaus, R.R. and Sosai, A. (2023), "The importance of multidimensional vulnerability analysis in sustainable development", *Journal of Sustainability Science and Management*, Vol. 18, No. 9, pp. 38-57.

Limongi, G. and Galderisi, A. (2021), "Twenty years of European and international research on vulnerability: a multi-faceted concept for better dealing with evolving risk landscapes", *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 63, 102451.

Mohammadi, S., De Angeli, S., Boni, G., Pirlone, F. and Cattari, S. (2024), "Current approaches and critical issues in multi-risk recovery planning of urban areas exposed to natural hazards", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 24, No. 1, pp. 79-107.

Revi, A., Satterthwaite, D., Aragón-Durand, F., Corfee-Morlot, J., Kiunsi, R.B., Pelling, M. and Sverdlik, A. (2014), "Towards transformative adaptation in cities: the IPCC's Fifth Assessment", *Environment and Urbanization*, Vol. 26, No. 1, pp. 11-28.

Romero-Lankao, P. and Dodman, D. (2011), "Cities in transition: transforming urban centers from hotbeds of GHG emissions and vulnerability to seedbeds of sustainability and resilience", *Current Opinion in Environmental Sustainability*, Vol. 3, No. 3, pp. 113-120.

Romero-Lankao, P., Hughes, S., Qin, H., Hardoy, J., Rosas-Huerta, A., Borquez, R. and Lampis, A. (2014), "Scale, urban risk and adaptation capacity in neighborhoods of Latin American cities", *Habitat International*, Vol. 42, pp. 224-235.

Schneiderbauer, S., Ehrlich, D. and Birkmann, J. (2006), "Social levels and hazard (in) dependence in determining vulnerability", in Birkmann, J. (Ed.), *Measuring Vulnerability to Natural Hazards: Towards Disaster Resilient Societies*, United Nations University Press, Tokyo, pp. 78-102.

Sharifi, A. (2023), "The resilience of urban social-ecological-technological systems (SETS): a review", *Sustainable Cities and Society*, article 104910.

Tricco, A.C., Lillie, E., Zarin, W., O'Brien, K.K., Colquhoun, H., Levac, D., Moher, D., Peters, M.D.J., Horsley, T., Weeks, L., Hempel, S. and others (2018), "PRISMA extension for scoping reviews (PRISMA-ScR): checklist and explanation", *Annals of Internal Medicine*, Vol. 169, No. 7, pp. 467-473. Available at: https://doi.org/10.7326/M18-0850

Azioni distribuite di adattamento alluvionale: un modello decisionale partecipativo multi-scala

Just Accepted: November 28, 2025 **Published:** July 29, 2026

Francesca Vanelli[1,2], https://orcid.org/0000-0002-5918-2932 francesca.vanelli@polimi.it
Paul Minifie[2], https://orcid.org/0000-0002-2687-6479 paul.minifie@rmit.edu.au
Monica Lavagna[1], https://orcid.org/0000-0002-1001-4292 monica.lavagna@polimi.it
[1] Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito, Politecnico di Milano, Italia
[2] School of Architecture and Design, Royal Melbourne Institute of Technology, Australia

Abstract. Con l'aumento della frequenza e dell'intensità delle alluvioni, la gestione tradizionale del rischio spesso trascura il potenziale cumulativo di azioni a micro-scala e decentralizzate, limitando l'integrazione tra interventi pubblici e privati. Contribuendo a un approccio sistemico all'adattamento, questo lavoro presenta un Framework decisionale partecipativo che supporta azioni distribuite. Sviluppato tramite analisi bibliografica, interviste e focus group a Milano e a Melbourne, il Framework integra diversi passaggi partecipativi per valutare le azioni raggruppate in cinque Dimensioni multidisciplinari di management e governance. Complementare alle pratiche attuali, crea condizioni sociotecniche e istituzionali per un agire collettivo.

Parole chiave: Flood Risk Management; Built Environment; Decision-Making; Multi-criteria; Adaptation.

Introduzione

L'aumento dell'intensità e della frequenza degli eventi alluvionali, soprattutto in contesti urbani, ha incentivato l'adozione di strategie di gestione del rischio di alluvioni (*Flood Risk Management* – FRM) su scala di bacino idrografico. Tuttavia, le pratiche attuali di FRM restano prevalentemente settoriali, trascurando le interdipendenze e le sinergie tra interventi a differenti scale. Questo limita la capacità di riconoscere l'impatto cumulativo delle misure adottate, in particolare per quanto riguarda l'integrazione di azioni pubbliche e private (Kreibich *et al*., 2015; Rehan, 2018; Raikes *et al*., 2019). Nonostante l'adozione congiunta di strategie di difesa, prevenzione, mitigazione, recupero e preparazione, interventi ingegneristici pubblici di ampia scala sono spesso favoriti, anche se possono essere soggetti a fallimento, richiedere risorse significative e generare conflitti nella distribuzione di costi e benefici (Bignami, Rosso and Sanfilippo, 2019). Veerbeek *et al.* (2012), Barendrecht *et al*., (2020) tra gli altri, supportano approcci sistemici e decentralizzati per l'adattamento ai fenomeni alluvionali. In tale contesto, *Flood Risk Governance* si configura come un approccio complementare al FRM, riflettendo mutamenti più ampi nella governance sociale e recependo le tendenze emergenti verso la decentralizzazione. Tradizionalmente, le misure di FRM sono valutate in modo ingegneristico, sulla base della riduzione dei danni come indicatore dell'efficacia e dell'efficienza (Klijn *et al*., 2021). Al contempo, strumenti alternativi o complementari, quali l'analisi ponderata, possono contribuire all'individuazione di soluzioni più eque ed efficaci. Approcci innovativi richiedono quindi indicatori che riflettano le dimensioni ambientali, sociali ed economiche.

La presente ricerca diparte da tre lacune principali: i) l'assenza di un approccio sistemico all'adattamento ai rischi alluvionali, capace di valorizzare il contributo delle azioni a livello di strategie, scale, attori e rischi differenti; ii) i limiti metodologici nell'analisi multi-scalare; iii) la scarsa comprensione dell'interfaccia tra scala geografica, distribuzione spaziale e contributo pubblico-privato nei processi di adattamento.

Questo contributo introduce il Framework FLOODS.ACT (*Flood Decisions towards Systemic Adaptative aCTions*[1]), uno strumento concepito per supportare le decisioni strategiche e progettuali di FRM, all'intersezione tra principi di gestione e governance. Il Framework mira a orientare il progetto verso un

Distributed flood adaptation actions across scales: a participatory decision-making framework

Abstract. As flooding becomes more frequent and intense, traditional Flood Risk Management often overlooks the cumulative potential of smaller, decentralized actions and limits integration between public and private efforts. Contributing to a systemic approach to flood adaptation, this paper presents a participatory decision-making Framework, supporting distributed flood actions. Developed through literature review, interviews, and focus groups in Milan and Melbourne, the Framework combines different participatory steps to assess flood actions across five multidisciplinary Dimensions, based on management and governance principles. Complementing the current Flood Risk Management practices, the Framework builds socio-technical and institutional conditions for collective action.

Keywords: Flood Risk Management; Built Environment; Decision-Making; Multi-criteria; Adaptation.

Introduction

The increasing intensity and frequency of flooding, particularly within complex urban dynamics, have prompted the adoption of catchment-wide Flood Risk Management (FRM) strategies. Today, FRM remains largely siloed, often overlooking the complex interdependencies and synergies among interventions across scales. This limits the ability to recognise the cumulative impact of multiple actions, particularly the integration of public and private ones (Kreibich *et al*., 2015; Rehan, 2018; Raikes *et al*., 2019). Despite integrating multiple strategies – defence, prevention, mitigation, recovery and preparedness- FRM commonly relies heavily on government-led, large-scale engineering interventions; they are also prone to failure thresholds, require significant resources, and can provoke localised conflicts over the distribution of costs and benefits (Bignami, Rosso and Sanfilippo, 2019). Veerbeek *et al*., (2012) and Barendrecht *et al*., (2020), among others, support systemic and decentralised approaches to adaptation for improved urban flood resilience. In this context, Flood Risk Governance complements FRM by reflecting broader shifts in societal governance and incorporating increasing trends of decentralisation.

Traditionally, FRM measures are evaluated from an engineering perspective, using damage reduction to assess their effectiveness and efficiency (Klijn *et al*., 2021). At the same time, alternative or complementary tools, such as weighted analysis or spatial mapping, can contribute to the identification of the best and most equitable solution. Emerging approaches thus call for broader sets of indicators, encompassing environmental, social, and

ISSN online: 2239-0243 | © 2025 Author(s) | http://www.fupress.com/techne | DOI: 10.36253/techne-18569
Open access, peer-reviewed article published by Firenze University Press (https://www.fupress.com) and distributed, except where otherwise noted, under the terms of the CC BY 4.0 License for content and CC0 1.0 Universal for metadata

insieme distribuito e diversificato di azioni di adattamento. La struttura decisionale proposta consente di analizzare e valutare azioni di FRM esistenti o proposte a scala di (sub-)bacino, promuovendo scenari in cui l'adattamento pubblico e privato coesistano. È accompagnato da un Protocollo Valutativo (FLOODS.ACT *Value Protocol)*, uno strumento valutativo articolato in Dimensioni, Criteri, sotto-Criteri e Indicatori. I principali destinatari sono decisori pubblici, ma il Framework fornisce anche supporto a gruppi di *advocacy* comunitaria per una maggiore partecipazione. Il contributo si articola in revisione dei metodi valutativi esistenti, descrizione dello sviluppo e della validazione del Framework e *Value Protocol* proposti, e raccomandazioni conclusive.

Metodi valutativi esistenti Diversi metodi a supporto delle decisioni in materia di FRM sono stati documentati in letteratura (Alves *et al*., 2018). La valutazione economica delle alternative di FRM si basa prevalentemente sulla *Cost-Benefit Analysis* (CBA), che utilizza stime di danno e scenari probabilistici per calcolare valori attualizzati netti, rapporti costi-benefici o tassi di rendimento (Mechler, 2016). Tuttavia, la CBA presenta diversi limiti: tende a escludere benefici indiretti, esternalità, e non considera né la distribuzione spaziale di costi e benefici né la varietà di vulnerabilità ed esposizioni (Molinari *et al*., 2021). La *Multi-Criteria Analysis* (MCA) rappresenta il principale approccio alternativo o complementare per la valutazione del rischio e l'analisi di progetti, soprattutto quando vi siano obiettivi multipli e valori differenziati tra portatori di interesse (Meyer, Haase and Scheuer, 2007). Al contempo, la MCA comporta difficoltà nella validazione quantitativa e dipende spesso da giudizi di esperti (Gallina *et al*., 2020).

Sulla base dei metodi multicriterio, sono stati sviluppati strumenti quali LEED, BREEAM e il Protocollo ITACA, volti a valutare opzioni progettuali nel costruito, mediante criteri di sostenibilità prestazionale. Nel contesto australiano, il *Investment Framework for Environmental Resources* (Investment Framework for Environmental Resources, 2024) è impiegato per pianificare e prioritizzare investimenti pubblici nella gestione delle risorse naturali e ambientali, basandosi su una logica costi-benefici. Sebbene alcuni di questi protocolli siano stati adattati alla scala di quartiere o urbana, hanno limitata rappresentazione degli aspetti sociali. Tra questi, il Protocollo ITACA a scala urbana si basa su una definizione multidisciplinare di sostenibilità, su dati open-access e indicatori con calcolo semplificato e scalabili. Dunque rappresenta un riferimento significativo, in quanto include aspetti di governance, tra cui la qualità del processo di pianificazione, la partecipazione dei cittadini, la qualità urbana e architettonica (ITACA, 2016). La ponderazione dei criteri è calcolata empiricamente in funzione della scala, della durata e magnitudo dell'impatto.

Come suggeriscono Attaianese and Acierno (2017), questi protocolli dovrebbero essere considerati non solo strumenti di certificazione, ma anche dispositivi capaci di orientare il progetto verso una maggiore consapevolezza sociale, attraverso l'integrazione di metodi partecipativi e criteri eterogenei. Inoltre, tali strumenti presentano limiti, quali incoerenza nei punteggi e scarsa aderenza all'identità locale o alla fattibilità istituzionale. Il Framework introdotto nel prossimo paragrafo affronta tali criticità introducendo pesi definiti dagli stakeholder locali

economic dimensions. This research departs from three critical gaps: i) the lack of a systemic approach to flood adaptation that accounts for the contribution of actions across strategies, scales, actors and risks; ii) methodological limitations in multi-scalar evaluation; iii) the unclear understanding of the interface between geographical scale, spatial distribution, and public and private stakeholders' contribution in flood adaptation.

This contribution proposes the FLOODS.ACT Framework (Flood Decisions towards Systemic Adaptative aCTions[1]), which supports decisions around flood adaptation strategies and design actions across management and governance principles, and steer design towards distributed and diversified actions. The Framework provides a structural decision-making process for analysing and evaluating proposed and existing FRM actions on a (sub-) basin scale. Moreover, it encourages scenarios where public and private adaptation coexist, promoting active collaboration towards flood adaptation. It is complemented by the FLOODS.ACT Value Protocol, an evaluation tool articulated in Dimensions, Criteria, sub-Criteria and Indicators. The beneficiaries are decision-makers and policymakers, but it provides support for community-based advocacy groups seeking more community involvement. This paper briefly reviews existing FRM assessment methods, then details the development and structure of the proposed Framework and Protocol, concluding with recommendations.

Existing assessment methods

Several methods support the decisions for FRM actions, as reported in literature (Alves *et al*., 2018). Economic evaluation of flood risk management alternatives is most commonly conducted through Cost-Benefit Analysis (CBA), which relies on damage estimates and probabilistic scenarios to assess net present value, benefit-cost ratio, or rate of return (Mechler, 2016). However, CBA has several limitations: it often excludes indirect benefits and externalities, and does not account for the distribution of costs and benefits or the full range of vulnerabilities and exposures (Molinari *et al*., 2021). Multi-Criteria Analysis (MCA) is a common alternative or complementary approach for risk assessment and project appraisal, particularly when multiple objectives and stakeholder values must be considered (Meyer, Haase and Scheuer, 2007). However, MCA poses challenges in quantitative validation and can depend heavily on expert-driven judgments (Gallina *et al*., 2020).

Building on multi-criteria analysis methods, tools such as LEED, BREEAM, the ITACA Protocol and the Australian Investment Framework For Environmental Resources (Investment Framework for Environmental Resources, 2024) have been developed to evaluate design options in the built environment, primarily by applying performance-based criteria. As some protocols have opened to neighbourhood- and city-level assessment, they maintain the same structure, with a modest representation of social aspects. Among those, the ITACA Protocol at urban scale is based on a multidisciplinary definition of sustainability, open-access data and easy-to-calculate indicators, which are flexible in their application across scales. The latter is a relevant

e integrando criteri provenienti dall'ingegneria, dalle scienze sociali, dall'architettura e dalla pianificazione.

Metodologia

Il Framework FLOODS.ACT è stato costruito attraverso un processo articolato in più fasi. In primo luogo, è stata condotta una revisione della letteratura per i) mappare i processi decisionali in due casi studio, in Italia e Australia; ii) definire le Dimensioni e i Criteri rilevanti nel *Value Procotol*. Successivamente, tali risultati sono stati sottoposti a una validazione tramite interviste con esperti, il cui contributo è stato integrato nel Framework. Gli intervistati hanno suggerito modifiche quali l'aggiunta, l'eliminazione o l'aggregazione di alcuni Criteri, e hanno identificato stakeholders chiave. Questo processo iniziale è descritto in dettaglio in Vanelli, Lavagna and Minifie (2024). In seguito, per formalizzare il Protocollo e strutturarlo secondo un sistema operativo di ponderazione e valutazione, la gerarchia è stata ulteriormente rivista e adattata per rispondere ai requisiti metodologici. Ad esempio, la categoria *Governance Capacity* è stata suddivisa in *Governance Legitimacy* e *Feasibility*, al fine di ottenere una distribuzione più equilibrata dei Criteri all'interno di ciascuna Dimensione. Il Protocollo è stato quindi dettagliati mediante Indicatori specifici, rispetto ai quali è possibile valutare scenari progettuali alternativi. In terzo luogo, la versione preliminare del Framework e il Protocollo sono stati verificati su casi studio selezionati. Questa fase ha previsto l'organizzazione di Focus Groups con la partecipazione di esperti, membri della comunità, autorità locali e architetti. Il Framework preliminare e i dettagli relativi al Focus Group condotto in Australia sono descritti in Vanelli, Lavagna and Minifie (2025). Gli obiettivi del Focus Group erano: discutere e validare il Framework nel contesto locale; esplorare la sua applicazione nei processi decisionali esistenti; attribuire i pesi ai Criteri. A seguire, il Framework è stato rielaborato e il feedback integrato. Le modifiche hanno riguardato: la semplificazione e chiarificazione delle denominazioni dei Criteri; la verifica di eventuali ridondanze e sovrapposizioni, in particolare tra le Dimensioni di *Flood Risk Reduction* e C*o-benefit Provision*, e tra *Governance Feasibility* e *Governance Legitimacy*; l'articolazione di *Steps, Phases*, *Loops* come presentato a seguire.

Il Framework è stato testato attraverso due casi studio – il bacino del fiume Seveso, a Milano e aree limitrofe, in Italia e quello del Maribyrnong, a Melbourne, Australia – utilizzando scenari sviluppati a partire da workshop e interviste. Il caso del Seveso riguarda inondazioni ricorrenti in un'area altamente urbanizzata e inquinata, interessata da interventi pubblici su larga scala. Il caso del Maribyrnong è invece legato all'evento alluvionale dell'ottobre 2022, che ha colpito oltre 500 abitazioni nei sobborghi di Melbourne. I profili dei due casi sono introdotti nelle pubblicazioni sopracitate.

Il Framework

Il FLOODS.ACT Framework (Fig. 1) consente di confrontare alternative progettuali, tenendo conto del contributo alla riduzione del rischio alluvionale alla scala di bacino o sottobacino. Include misure esistenti e di progetto, strutturali, non strutturali, grigie, verdi, pubbliche o private, comprese strumenti normativi ed economici. La sua struttura è articolata in *Phases, Steps e Loops* (Tab. 1) sulla base di una combinazione di fonti teoriche, interviste e risultati dei Focus Groups. Inoltre, si pro-

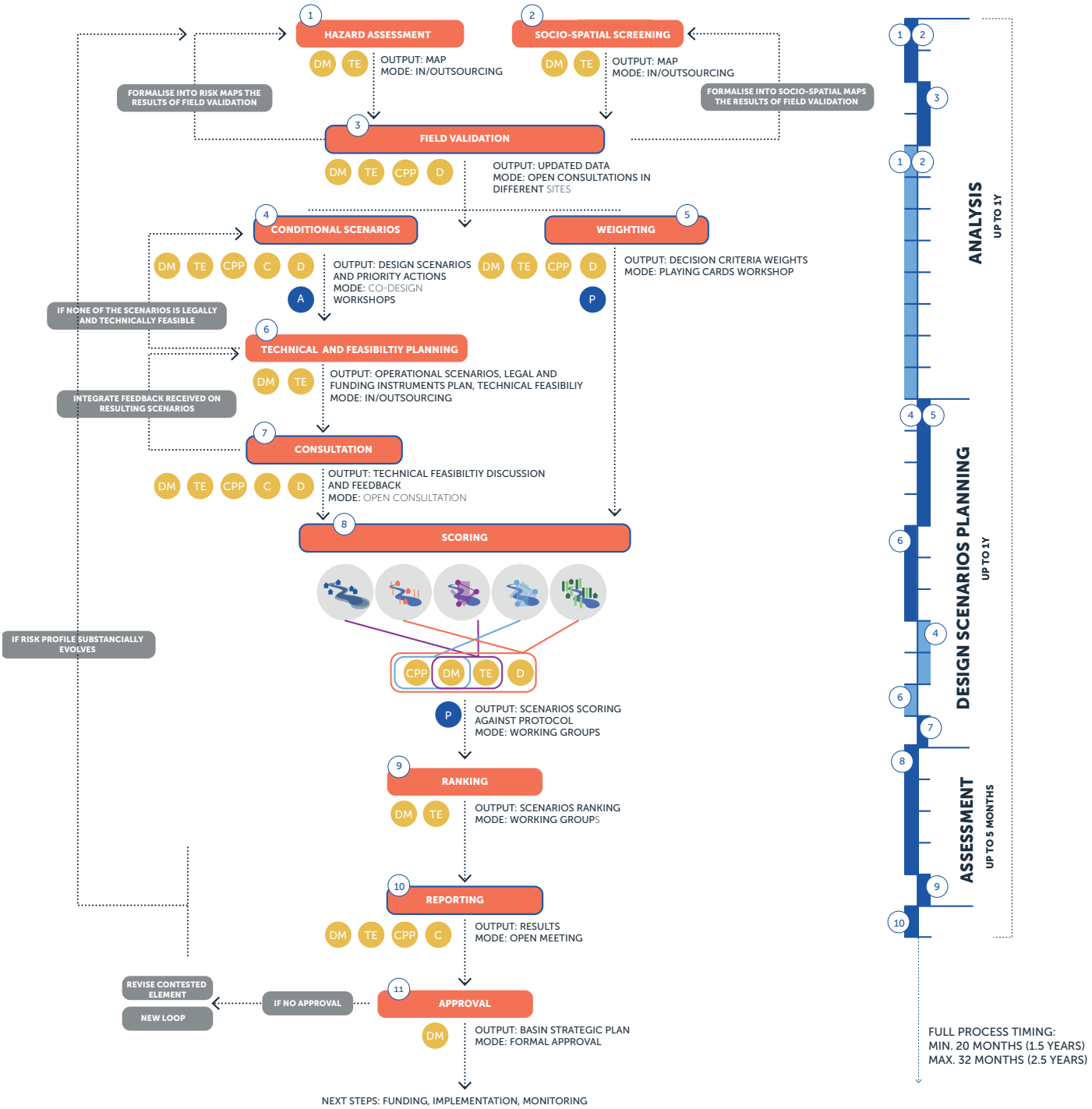
example for the proposed Framework as it includes aspects of governance, including quality of planning process, citizens' participation, urban and architectural quality (ITACA, 2016). Criteria weighting is calculated empirically in relation to the scale, impact duration and magnitude.

As Attaianese and Acierno (2017) suggest, these protocols should be seen not just as certifications, but as tools to guide socially conscious design by integrating participatory methods and diverse criteria. Yet, they face limits—such as inconsistent scoring and gaps in local identity or institutional feasibility. The Framework introduced below addresses these limitations by using stakeholder-defined weights and drawing on criteria from engineering, social sciences, architecture, and planning.

Methodology

The FLOODS.ACT Framework was built in multiple steps. Firstly, a literature review was conducted to i) map decision processes in two case studies, in Italy and Australia; ii) define relevant Dimensions and Criteria for the Value Protocol. Secondly, these results were then reviewed through experts' interviews and the feedback received was integrated. The interviewees suggested adding, removing or grouping some Criteria while identifying key stakeholders. This initial process is published in Vanelli, Lavagna and Minifie (2024). Afterwards, to formalize the Protocol with a workable weighting and scoring system, its final structure has been revised and adjusted to meet methodological requirements. For example, the category of Governance Capacity has been divided into Governance Legitimacy and Feasibility, to achieve a balanced distribution of Criteria under each Dimension. The Protocol is then detailed with Indicators, against which alternative design scenarios can be scored. Thirdly, the preliminary Framework and Protocol are then verified in the selected case studies. This step involved the setup of Focus Groups, with experts, community members, local authorities and architects. The preliminary Framework and the details of the Focus Group conducted in Australia are described in Vanelli, Lavagna and Minifie (2025). The Focus Group aimed to discuss and validate the Framework in the specific context; discuss the application in the current decision-making process; and weight the Criteria. Followingly, the Framework is re-elaborated, integrating feedback. Changes included improving the clarity of Criteria names, checking for double counting and repetitions especially between Dimension A (Flood Risk Reduction) and E (Co-Benefit Provision), and Dimension C (Governance Feasibility) and D (Governance Legitimacy); and lastly, articulating Steps, Phases and Loops, presented below.

The Framework was tested through two case studies—the Seveso River Basin in Milan and surrounding areas, in Italy and the Maribyrnong River Basin in Melbourne, Australia—using scenarios developed from workshops and stakeholder interviews. The Seveso case addresses recurrent flooding in a heavily urbanised, polluted area with large-scale public interventions. The Maribyrnong case stems from the October 2022 flood that affected over 500 properties in Melbourne's low-density suburbs. The case profiles are available in the publications cited above.


1 HAZARD ASSESSMENT
DM TE
OUTPUT: MAP
MODE: IN/OUTSOURCING
2 SOCIO-SPATIAL SCREENING
DM TE
OUTPUT: MAP
MODE: IN/OUTSOURCING
FORMALISE INTO RISK MAPS THE RESULTS OF FIELD VALIDATION
FORMALISE INTO SOCIO-SPATIAL MAPS THE RESULTS OF FIELD VALIDATION
3 FIELD VALIDATION
DM TE CPP D
OUTPUT: UPDATED DATA
MODE: OPEN CONSULTATIONS IN DIFFERENT SITES
4 CONDITIONAL SCENARIOS
DM TE CPP C D
OUTPUT: DESIGN SCENARIOS AND PRIORITY ACTIONS
MODE: CO-DESIGN WORKSHOPS
A
5 WEIGHTING
DM TE CPP D
OUTPUT: DECISION CRITERIA WEIGHTS
MODE: PLAYING CARDS WORKSHOP
P
IF NONE OF THE SCENARIOS IS LEGALLY AND TECHNICALLY FEASIBLE
6 TECHNICAL AND FEASIBILTIY PLANNING
DM TE
OUTPUT: OPERATIONAL SCENARIOS, LEGAL AND FUNDING INSTRUMENTS PLAN, TECHNICAL FEASIBILIY
MODE: IN/OUTSOURCING
INTEGRATE FEEDBACK RECEIVED ON RESULTING SCENARIOS
7 CONSULTATION
DM TE CPP C D
OUTPUT: TECHNICAL FEASIBILTIY DISCUSSION AND FEEDBACK
MODE: OPEN CONSULTATION
8 SCORING
IF RISK PROFILE SUBSTANCIALLY EVOLVES
CPP DM TE D
P
OUTPUT: SCENARIOS SCORING AGAINST PROTOCOL
MODE: WORKING GROUPS
9 RANKING
DM TE
OUTPUT: SCENARIOS RANKING
MODE: WORKING GROUPS
10 REPORTING
DM TE CPP C
OUTPUT: RESULTS
MODE: OPEN MEETING
REVISE CONTESTED ELEMENT
NEW LOOP
IF NO APPROVAL
11 APPROVAL
DM
OUTPUT: BASIN STRATEGIC PLAN
MODE: FORMAL APPROVAL
NEXT STEPS: FUNDING, IMPLEMENTATION, MONITORING
ANALYSIS
UP TO 1Y
DESIGN SCENARIOS PLANNING
UP TO 1Y
ASSESSMENT
UP TO 5 MONTHS
FULL PROCESS TIMING:
MIN. 20 MONTHS (1.5 YEARS)
MAX. 32 MONTHS (2.5 YEARS)
ROLES
DM DECISION-MAKER(S)
TE TECHNICAL EXPERTS
CPP COMMUNITY PARTNERSHIP PANEL
D DESIGNERS
C COMMUNITY
TOOLS
P VALUE PROTOCOL
A ATLAS OF FLOOD ADAPTATION DESIGN ACTIONS
ENGAGEMENT COMPONENT
DIMENSIONS
FLOOD RISK REDUCTION
SPATIAL AND DESIGN QUALITY
GOVERNANCE FEASIBILITY
GOVERNANCE LEGITIMACY
CO-BENEFIT PROVISION

Tab. 01 | I passaggi del Framework
The Steps

Tab. 01 |

Phase	Step	Name	Activity	Method	Agents
1	1	Hazard Assessment	Evaluating hazard in the basin	Risk assessment via in/outsourcing	Decision-maker(s), technical experts
1	2	Socio-Spatial Screening	Evaluating exposure and vulnerability in the basin	Socio-Spatial assessment via in/outsourcing	
1	3	Field Validation	Integrating community knowledge, historical data, and on-site observations to verify the risk modelling	Updated data via consultation with communities and fieldwork	Decision-maker(s), technical experts, CPP and designers
2	4	Conditional Scenarios	Codesigning alternative scenarios, including conditions for implementation and priorities	Design scenarios and prioritization of actions via participatory workshops	Decision-maker(s), technical experts, CPP, and designers; open to community consultation
2	5	Weighting	Negotiating the context-specific weights for the Criteria	Weights of Criteria via Playing Cards	Decision-maker(s), technical experts, CPP and designers
2	6	Technical and Feasibility Planning	Operationalising each scenario in terms of technical, legal, and economic feasibility	Feasibility study via in/outsourcing	Decision-maker(s), technical experts
2	7	Consultation	Presenting the results back to local stakeholders	Presenting viable scenarios via open meeting	Decision-maker(s), technical experts, CPP, and designers; open to community consultation
3	8	Scoring	Scoring the scenarios across the Dimensions of the Protocol	Scores of Dimensions for each scenario in Working Groups	Dimension A and C: Decision-maker(s), technical experts; Dimension B and E: Decision-maker(s), technical experts, CPP and designers Dimension D: Decision-maker(s), CPP
3	9	Ranking	Aggregating and weighting the scores for each scenario, obtaining a rank	Final rank by Working Group	Decision-maker(s), technical experts
3	10	Reporting	Compiling and communicating results	Result report	Decision-maker(s), technical experts, CPP; open to community consultation

pone l'istituzione di un *Community Partnership Panel* (CPP), ispirato al modello sperimentato a Melbourne, con l'obiettivo di formare e coinvolgere attivamente gli stakeholder nelle fasi di definizione e valutazione degli scenari.

Phases, Steps e Loops

Il Framework è strutturato in tre Fasi, a partire dalla Fase 1-Analisi, che include l'analisi del rischio (*Hazard Assessment*); l'analisi delle caratteristiche spaziali e sociali dell'area (*Socio-Spatial Screening*); e la validazione della modellazione del rischio (*Field Validation*). I primi due passaggi possono essere condotti internamente dalle autorità competenti o affidati a consulenti tecnici. Il terzo passaggio è stato introdotto in risposta ai suggerimenti del Focus Group sul caso Maribyrnong. La tempistica di questa fase può variare in base al contesto, ma si ipotizza una durata massima di un anno, in linea con i tempi richiesti per l'aggiornamento dei modelli di rischio nel caso australiano (Melbourne Water, 2026).

La Fase 2-Pianificazione degli Scenari Progettuali introduce un approccio più partecipativo, per ovviare alle pratiche top-down tradizionali, articolandosi in sviluppo degli scenari e delle loro condizioni (*Conditional Scenarios)*. Il Framework è supportato

The Framework

The Framework (Fig. 1) supports comparison between adaptation alternatives while accounting for contributions to flood risk reduction, across basin or sub-basin scales. It targets both existing and planned measures, structural, non-structural, grey, green, and those on public or private land, including financial or legal instruments. Its structure is organised into Phases, Steps, and Loops (Tab. 01), informed by literature, interviews, and Focus Group insights. Moreover, we propose the creation of a Community Partnership Panel (CPP), following the model being promoted in Melbourne, to train and engage stakeholders during the process of scenarios definition and ranking.

Phases, Steps, Loops

The Framework is structured into three distinct Phases, beginning with Phase 1-Analysis, which includes Hazard Assessment, Socio-Spatial Screening and Field Validation. The first two Steps can be conducted in-house by the competent authority or outsourced to technical consultants. Step 3 was introduced in response to feedback from the Maribyrnong Focus Group. The implementation of this Phase may vary in progress across different contexts; however, we assume a maximum duration of one year, consistent with the timeframe adopted for updating risk modelling in the Maribyrnong case study (Melbourne Water, 2026).

The Phase 2-Design Scenario Planning introduces a more participatory approach, in contrast to traditional top-down practices, and involves the Conditional Scenarios development. The Framework is supported by the Atlas for Flood Adaptation Desing Actions, a portfolio of actions to support the participatory Steps. The Atlas was tested in the Maribyrnong River Basin for the scenarios' co-design. Followingly, the Weighting Step regards the definition of context-specific weighting of Criteria for the evaluation of scenarios. Rather than relying on expert-defined weights, the Framework adopts the Playing Cards method, enabling the identification of weights that reflect local values and priorities. This Step may be completed early in the process, before the workshops begin, or run in parallel, without influencing the definition of scenarios. In Phase 2, we also include the Technical and Feasibility Planning, which translates scenarios into a strategic or masterplan-level design. Integrating the workshops' results, technical feasibility is downstream of the co-design, to not limit speculation and innovation. The Phase, which concludes with Consultation with local stakeholders for review and further input, is anticipated to take up to one year, accommodating multiple rounds of workshops, as aligned with the timeframes envisioned by the relevant authorities in the Maribyrnong case.

Lastly, Phase 3- Assessment focuses on evaluating the design scenarios through a participatory and transparent scoring process, which includes the Scoring of the scenarios against the Value Protocol. This results in the Ranking of scenarios based on total performance, with the top-ranking scenario representing the most balanced and preferred option across all Dimensions. Followingly, the Reporting, where the results of the assessment are formally compiled and communicated, mirrors the public consultation practices typically undertaken by authorities to present upcoming projects.

Tab. 02 | Il Protocollo Valutativo
The Value Protocol

dall'*Atlas for Flood Adaptation Design Actions*, un repertorio di azioni a supporto delle fasi partecipative, testato nel bacino del Maribyrnong per la co-creazione degli scenari. La Ponderazione dei criteri (*Weighting*), consente di definire pesi contestuali per la valutazione. Nel Framework, i pesi non sono predefiniti da esperti, ma stabiliti dagli stakeholder locali tramite il metodo Playing Cards, in modo da riflettere valori e priorità del contesto. Questo passaggio può essere svolto prima dei workshop o in parallelo, senza influenzare la definizione degli scenari. Segue l'analisi di fattibilità tecnica, normativa ed economica (*Technical and Feasibility Planning),* e si conclude con la presentazione degli scenari per ulteriore confronto. Integrando i risultati dei workshops, la fattibilità tecnica si inserisce a valle del co-design per non limitare le alternative. Anche in questa Fase, si prevede una durata di circa un anno, per consentire più cicli di confronto e allinearsi ai tempi delle autorità competenti, come nel Maribyrnong.
La Fase 3-Valutazione si concentra sull'analisi delle alternative progettuali, attraverso l'attribuzione di punteggi (*Scoring)* agli scenari applicando il protocollo valutativo, per ottenere la graduatoria (*Ranking)* che riflette la ponderazione e aggregazione dei punteggi per ciascuna Dimensione. Lo scenario con punteggio più alto rappresenta l'alternativa preferibile. A seguire, una consultazione (*Reporting)* propone i risultati della valutazione, secondo modalità analoghe alle consultazioni pubbliche. Gli scenari finali sono sottoposti ad approvazione formale (*Approval)*, al di fuori del perimetro del presente Framework, per proseguire poi alle fasi preparatorie e implementazione.
Poiché i processi decisionali non sono mai completamente lineari, ma richiedono aggiustamenti continui, il Framework introduce dei *Loops*. Ad esempio, lo Step 3 può comportare una rivisitazione della modellazione del rischio. Considerata la natura strutturata ma intensiva della Fase 2, che prevede un forte coinvolgimento, ci si attende che la Fase 3 benefici di un ampio consenso. Tuttavia, il Framework è pensato come adattivo: un evento significativo può innescare una revisione retrospettiva delle fasi precedenti, per garantirne l'adeguatezza e l'attualità.

Il Protocollo Valutativo Il *Value Protocol* è lo strumento sviluppato per valutare la performance degli scenari alternativi. Esso si articola in cinque Dimensioni, organizzate in Criteri e sotto-Criteri (Tab. 2). La Dimensione A: Riduzione del Rischio Alluvionale (*Flood Risk Reduction*) si riferisce alla valutazione tecnico-economica delle

| Tab. 02

A. Flood Risk Reduction	B. Spatial and Design Quality	C. Governance Feasibility	D. Governance Legitimacy	E. Co-Benefit Provision
A.1 Multi-Strategy	**B.1 Multi-Scale**	**C.1 Multi-Actor**	**D.1 Acceptability**	**E.1 Multi-Risk**
1. FRM Strategies Coexistence	1. Spatial Scales Coexistence	1. Public-Private Adaptation Coexistence	1.Stakeholder Acceptance	1. Multi-Hazard Risk Reduction
A.2 Costs	**B.2 Spatial Value**	**C.2 Governance Mechanisms**	**D.2 Social Justice**	**E.2 Environmental Co-Benefits**
1. Implementation Cost	1. User Value for Public Space	1. Existing Actor-Based Mechanisms (Actor Feasibility)	1. Recognitional Justice	1. Conservation Of Water Resources
2. Maintenance & Operation Cost	2. Experience Value for Public Space	2. Existing Rule-Based Mechanisms (Legal Feasibility)	2. Distributional Justice	2. Climate Change Mitigation
3. Transaction Cost	3. Future Value for Public Space	3. Existing Resource-Based Mechanisms (Economic Feasibility)	3. Restorative Justice	3. Soil Erosion Reduction
A.3 Risk Reduction Benefit	**B.3 Design Quality**	**C.3 Institutional Feasibility**	**D.3 Risk-Aligned Preparedness**	4. Water Quality Improvement
1. Expected Avoided Damage	1. Design Vision	1. Long-Term Vision	1. Alignment With Level of Worry	5. Groundwater Recharge
2. Expected Avoided Casualties	2. Housing Expectation	2. Institutional Complexity	**D.4 Participation**	6. Biodiversity Improvement
3. Retention Capacity	3. Landscape And Context Integration	3. Political Will	1. Participation Across Phases	**E.3 Economic Co-Benefits**
A.4 Technical Feasibility	4. Multifunctionality	4. Sovra-Municipal Scale	3. Participation Quality	1. Real Estate Variation
1. Technical Feasibility		**C.4 Planning Adaptability**		2. Reduced Insurance Premium
		1. No-Regretability		3. Increased Building Insurability
		2. Innovation		4. Reduced Interruption for Economic Activities
				E.4 Social Co-Benefits
				1. Minimise Population at Risk
				2. Reuse Of Abandoned Spaces
				3. Public Services Improvement

azioni, premiando quelle che combinano più strategie di FRM (Dieperink *et al*., 2016). La Dimensione B: Qualità spaziale e progettuale (*Spatial and Design Quality*) definisce il valore del progetto come parte integrante dell'adattamento, basandosi sull'esperienza olandese *Room for the River* (Busscher, van den Brink and Verweij, 2019), e valuta la multi-scalarità delle azioni progettuali. La Dimensione C: Fattibilità di Governance (*Governance Feasibility*) misura la possibilità di implementazione secondo i meccanismi e le strutture di governance esistenti, e valuta la coesistenza tra adattamenti pubblici e privati (Tompkins and Eakin, 2012; Alexander, Priest and Mees, 2016; Juhola *et al*., 2022). La Dimensione D: Legittimità di Governance (*Governance Legitimacy*) verifica la coerenza tra scenari e profilo di rischio locale, nonché la presenza di strumenti partecipativi e possibilità di ricorso (Barquet and Cumiskey, 2018). Infine, la Dimensione E: Co-Benefici (*Co-Benefit Provision*) valuta il contributo alla riduzione di rischi multipli e la generazione di benefici ambientali, economici e sociali (Alves *et al*., 2019). I Criteri sono articolati in sotto-Criteri e Indicatori, valutati su una scala -1, 0, 3, 5, ispirata al Protocollo ITACA e successivamente convertita su scala 1–100. Ogni Dimensione può ricevere un massimo di 20 punti. Un punteggio negativo indica maladattamento o mancato rispetto di standard minimi; 0 indica prestazione neutra o non applicabile; punteggi positivi riflettono performance migliorative. Per le azioni esistenti, alcuni indicatori (come costi o co-benefici) possono avere valore zero, se già assorbiti. Quando due Indicatori corrispondono allo stesso sotto-Criterio, essi sono ponderati equamente. Le soglie di riferimento derivano da standard esistenti, oppure da benchmark specifici testati durante la ricerca. Ad esempio, gli Indicatori di costo premiano gli scenari compatibili con i budget disponibili. Ogni Indicatore è descritto con richiesta, descrizione, livello di applicazione (per azione o per scenario), scala e istruzioni per l'assegnazione del punteggio (Tab. 3). Rispetto ai Co-Benefici, la loro valutazione è ampiamente trattata in letteratura (vedi European Commission. Directorate General for Research and Innovation, 2021). Per mantenere la fruibilità del Protocollo sono stati inclusi solo i Co-Benefici ritenuti più rilevanti da interviste e connessi a incentivi per iniziative private, con la possibilità di adattare gli indicatori in seguito, in funzione di uno specifico contesto. Un breve esempio applicativo è riportato nella Tabella 4.

Conclusioni

Il Framework proposto costruisce le basi sociotecniche e istituzionali per l'azione condivisa con diversi agenti locali, favorendo l'espressione di forme progettuali alternative e mettendo in discussione le pratiche di governance del rischio alluvionale. La costruzione del Framework ha previsto una fase iniziale di revisione di letteratura e report, seguita da interviste e validazioni con stakeholder. Questo processo ha contribuito a trasformarlo in uno strumento multidisciplinare e applicabile, in grado di integrare competenze tecniche, saperi locali e processi partecipativi. L'ipotesi di istituire un *Community Partnership Panel* rappresenta un'opportunità per generare una visione condivisa e una responsabilità collettiva. Il Framework FLOODS. ACT, sebbene più complesso e impegnativo rispetto ai processi convenzionali, mette a disposizione strumenti flessibili che possono essere utilizzati in modo modulare o integrati in pratiche già esistenti. I decisori possono adottarlo nella sua interezza o selezionare alcuni passaggi per migliorare la partecipazione. Il

The final scenarios are submitted for formal approval, outside the current scope of the Framework, towards implementation, securing funding streams, initiating project delivery, and establishing monitoring mechanisms.
This type of decision is not usually straightforward but could instead go back and forth between Steps and require constant adjustments and monitoring. Therefore, we introduce Loops to the Framework. For example, Step 3 could involve a revisit to the risk modelling and hazard profile, as well as a clarification of vulnerable groups or spatial target areas. Considering the structured yet time-intensive setup of Phase 2, where participation is embedded throughout the process, Phase 3 is expected to benefit from a higher level of consensus. Therefore, we do not anticipate iterative loops at this stage. Nonetheless, the Framework remains adaptive: any substantial change in the area's risk profile could trigger a review of earlier phases, to ensure continued relevance and responsiveness of the proposed actions.

The Value Protocol

The Value Protocol is the tool developed to assess and evaluate the performance of the alternative scenarios. The Protocol collects five Dimensions (Tab. 2). Dimension A, Flood Risk Reduction, reflects the traditional cost-benefit evaluation and the technical feasibility of actions while preferring actions across different FRM strategies (Dieperink *et al*., 2016). Dimension B formalizes Spatial and Design Quality as a key objective of flood adaptation, building on the Dutch experience of the Room for the River project (Busscher, van den Brink and Verweij, 2019), while also examining to what extent the combinations of design actions are multi-scalar. Dimension C, Governance Feasibility, refers to institutional feasibility, the possibility to be implemented through existing mechanisms and governance arrangements (Alexander, Priest and Mees, 2016; Juhola *et al*., 2022); it also checks the coexistence of public and private adaptation actions (Tompkins and Eakin, 2012). Under Dimension D, Governance Legitimacy, the Protocol verifies whether the scenarios are socially acceptable, properly fitting the community risk profile, while providing forms of appeal and participation (Barquet and Cumiskey, 2018). Lastly, Dimension E, Co-Benefit Provision, checks whether the scenario contributes to the reduction of multiple risks and the degree to which it provides environmental, economic and social benefits (Alves *et al*., 2019).

The Protocol's Dimensions are structured into Criteria, sub-Criteria, and Indicators, scored on a -1, 0, 3, 5 scale adapted from the ITACA Protocol and later converted to a 1–100 scale. Each Dimension can receive a maximum of 20 points. A negative score signals maladaptation or failure to meet minimum standards; 0 indicates non-applicable or neutral performance (still counted in the calculation); and positive scores reflect improvement or above-average outcomes. For existing actions, some Indicators (e.g., Costs, Co-benefits) may score zero if already absorbed. When two Indicators relate to one Sub-Criterion, they are equally weighted. Thresholds are drawn from existing standards, developed during the research, or benchmarked against context-specific data—for example, Costs Indicators reward scenarios where costs stay within or below avail-

Tab. 03 | Esempio di Indicatori
Example of Indicators

A	Flood Risk Reduction	
A.2	**Costs**	
A.2.1	**Implementation Costs**	
Demand	The scenario's Implementation Cost (IC) estimation is sustainable.	
Description	Capital investment to realise the scenario. If the budget is known, the decision-maker can compare scenarios against the available budget; if it is unknown, we take the qualitative analysis of Alves *et al.* (2018) to compare scenarios in terms of reduction of costs. The Threshold here proposed (elaborated from Regione Marche, 2023) can be modified upon adoption of the Protocol.	
Application	Action-based	
Scale		
Points	**Description**	**Threshold**
-1	Very High Cost	Implementation cost exceeds allocated budget.
1	High Cost	Implementation cost is <70% of allocated budget OR the scenario generally does not entail reduced costs compared to the other alternatives. (most expensive)
3	Medium Cost	Implementation cost is <50% of allocated budget OR the scenario to some extent entails reduced costs, compared to the other alternatives (average expensive)
5	Low Cost	Implementation cost is <30% of allocated budget OR The scenario fully entails reduced costs, compared to the other alternatives (least expensive).
0	Not Relevant	No current implementation costs OR No difference between alternatives.
How to Calculate	The cost of each action is assessed as sustainable relative to the allocated budget. Expert evaluations are used to calculate the cost, taking into account multiple funding sources, including any existing public or institutional streams relevant to the action. If a private or external contribution is guaranteed, a bonus of +1 is applied.	
C	**Governance Feasibility**	
C.3	**Institutional Feasibility**	
C.3.4	**Sovra-Municipal Scale**	
Demand	The scenario foresees the participation of multiple municipalities (or local government areas).	
Description	The scenario takes a Sovra-Municipal perspective to tackle flood risk and involves spatial actions on different municipalities. Elaborated from: Deliberazione XI/5135, Lombardy Plan Regional Law 20/2020 - Regional Contributions for the Construction of De-Waterproofing Projects presented by Municipalities - Definition of Selection Criteria for Inspection by ERSAF.	
Application	Scenario-based	
Scale		
Points	**Description**	**Threshold**
-1	Not Sovra-Municipal	The scenario is entirely focused on a single municipality and does not consider broader regional or metropolitan aspects.
1	Partially Sovra-Municipal	Some elements of the scenario extend beyond municipal boundaries, including 2 municipalities.
3	Moderately Sovra-Municipal	The scenario considers regional or metropolitan factors, extending on 3 to 4 municipalities.
5	Highly Sovra-Municipal	The scenario fully integrates sovra-municipal considerations, extending on 5 or more municipalities, addressing broader urban and regional contexts.

able budgets. Each Indicator is defined by the demand, a description, the application level (whether is action-based, or scenario-based), the scale, and lastly, instructions on how to assign the scores (Tab. 3). Regarding Co-Benefits, it is important to note that their calculation is extensively covered in the literature (e.g. European Commission and Directorate-General for Research and Innovation, 2021). To keep the Protocol viable, we included only those Co-Benefits identified as most relevant through interviews and literature, and triggering private initiatives. However, users can adapt these, as well as adjust indicator thresholds, to fit their specific context and scoring needs. A short application example is in Tab. 4.

Conclusions

The proposed Framework creates the socio-technical and institutional foundations that support actions by different local agents, reveal alternative forms of design and challenge current flood governance practice. The construction of the Framework was carried out through an initial phase of literature and report review, followed by a series of interviews and stakeholder-based validations. This process helped transform it into a multidisciplinary and applicable approach for decision-making, integrating technical expertise, community knowledge, and participatory processes. The idea of a (sub-)basin-level Community Partnership Panel could support the creation of a shared vision and sense of responsibility. The FLOODS.ACT Framework, while more complex and time-consuming than traditional processes, offers flexible tools that can be used independently or integrated into existing practices. Decision-makers may adopt the full Framework or apply selected Steps to enhance participation. The Protocol supports scenario evaluation across five Dimensions, and they can serve as a checklist to assess and strengthen aspects like feasibility, support, and participation. Further work should explore its sustainability and integration in specific FRM contexts.

ATTRIBUTION

Conceptualisation, methodology, analysis, visualisation, writing: F.V.; supervision and review: M.L., P.M.

ACKNOWLEDGMENTS

This research is conducted under the REDI Program, a project that has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under the Marie Skłodowska-Curie grant agreement no. 101034328. This paper reflects only the author's view, and the Research Executive Agency is not responsible for any use that may be made of the information it contains.

We thank the participants to all research activities for their generosity, the colleagues for their support and the MCRA - Maribyrnong Catchment Resilience Association Inc. for the interest in the project and the assistance in Australia. We acknowledge the Traditional Owners of the land where we hold our activities in Australia, the Wurundjeri Woi Wurrung and Bunurong peoples of the Kulin Nation and pay our respect to their Elders, past, present and emerging.

NOTES

[1] Technical literature mostly uses the word measure, which is solution oriented. Against the perspective that flood can be solved, we prefer action.

Tab. 04 | Estratto esemplificativo dall'applicazione completa del Protocollo Valutativo
Exemplificatory extract from full application of the Value Protocol

Tab. 04 |

Scenario 1 Maribyrnong – Public Adaptation Scenario
Reliance on the 1986 detention basin project, no alternative use. No other population growth projections are conducted. No participatory process but has public and institutional support. Indigenous considerations are overlooked. Feasibility is high, with costs covered by national transfers. 26 properties would require compensation.

Scenario 2 Maribyrnong – Hybrid Adaptation Scenario
The 1986 basin is designed as multifunctional park, with 50% expected damage avoidance. 26 properties would require compensation. The scenario includes community preparedness actions, the floodproofing of 30% of Township residential buildings and other private measures (racecourse Floodwall – which limits design quality). No nature-based solutions are planned. Community and Indigenous groups were involved in a participatory process. Feasibility is high for the basin, the Township's floodproofing plan is more complex ad requires subsidies. Only some preliminary agreements were signed with involved households.

This is only an exemplificatory extract of the scenarios. The calculations are presented with the aggregated results of the Dimensions. The Weights elicitation process is presented in previous publications cited above.

	Dimensions					Tot.
	A	B	C	D	E	
Weights	24.4%	9.1%	14.5%	17.3%	34.7%	**100%**
Scenario 1	12.69.	6.00	4.51	2.78	9.85	**35.8**
Weighted Score Scenario 1	14.50	1.58	2.21	1.09	11.40	**30.8**
Scenario 2	16.20	9.33	10.19	16.92	8.35	**61.0**
Weighted Score Scenario 2	19.29	6.00	7.18	13.04	18.94	**64.5**

The weights increase the distance between the scenarios, making the second the preferred by the stakeholders. The second scenario includes a larger variety of FRM strategies and a better distribution of public costs, considering partial private coverage of floodproofing measures. The first has moderate spatial vision and negligible improvement of public space, limited public engagement and long-term vision, disregarding justice criteria (Dimension D), which were highly weighted. Both bring limited environmental co-benefits, rather focusing on economic ones.

Protocollo supporta la valutazione degli scenari attraverso cinque Dimensioni, che possono anche servire da checklist per rafforzare aspetti come fattibilità, consenso e inclusività. L'evoluzione futura del Framework dovrebbe esplorarne l'integrazione strutturale e la sostenibilità nei contesti specifici di FRM.

ATTRIBUZIONE

Concettualizzazione, metodologia, analisi, visualizzazione e scrittura: F.V.; Supervisione e revisione: M.L., P.M.

RICONOSCIMENTI

Questa ricerca è stata condotta nell'ambito del Programma REDI, un progetto che ha ricevuto finanziamenti dall'Unione Europea attraverso il programma di ricerca e innovazione Horizon 2020, nell'ambito della borsa Marie Skłodowska-Curie, grant agreement n. 101034328. Il contenuto di questo articolo riflette esclusivamente il punto di vista dell'autore, e l'Agenzia Esecutiva per la Ricerca non è responsabile per l'uso che potrà essere fatto delle informazioni in esso contenute.

Ringraziamo i partecipanti a tutte le attività di ricerca per la loro generosità, i colleghi per il loro supporto e la MCRA - Maribyrnong Catchment Resilience Association Inc. per l'interesse dimostrato nel progetto e l'assistenza in Australia. Ringraziamo i Traditional Owners del territorio in cui svolgiamo le nostre attività in Australia, i popoli Wurundjeri Woi Wurrung e Bunurong della Kulin Nation e rendiamo omaggio ai loro Elders, passati, presenti ed emergenti.

NOTA

[1] Misura, termine tecnico diffuso, implica una logica risolutiva. Si adotta qui azione, per superare l'idea di un rischio alluvionale risolvibile.

REFERENCES

Alexander, M., Priest, S. and Mees, H. (2016), "A framework for evaluating flood risk governance", *Environmental Science & Policy*, 64, pp. 38–47. Available at: https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.06.004 (Accessed on 16/03/2026).

Alves, A., Gersonius, B., Kapelan, Z., Vojinovic, Z. and Sanchez, A. (2019), "Assessing the Co-Benefits of green-blue-grey infrastructure for sustainable urban flood risk management", *Journal of Environmental Management*, 239, pp. 244–254. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.036 (Accessed on 16/03/2026).

Alves, A., Gersonius, B., Sanchez, A., Vojinovic, Z. and Kapelan, Z. (2018), "Multi-criteria Approach for Selection of Green and Grey Infrastructure to Reduce Flood Risk and Increase Co-benefits", *Water Resources Management*, 32(7), pp. 2505–2522. Available at: https://doi.org/10.1007/s11269-018-1943-3 (Accessed on 16/03/2026).

Attaianese, E. and Acierno, A. (2017), "Environmental design for social inclusion: the role of environmental certification protocols", *TECHNE - Journal of Technology for Architecture and Environment*, pp. 76-87. Available at: https://doi.org/10.13128/TECHNE-20816 (Accessed on 16/03/2026).

Barendrecht, M.H., Sairam, N., Cumiskey, L., Metin, A.D., Holz, F., Priest, S.J. and Kreibich, H. (2020), "Needed: A systems approach to improve flood risk mitigation through private precautionary measures", *Water Security*, 11, p. 100080. Available at: https://doi.org/10.1016/j.wasec.2020.100080 (Accessed on 16/03/2026).

Barquet, K. and Cumiskey, L. (2018), "Using participatory Multi-Criteria Assessments for assessing disaster risk reduction measures", *Coastal Engineering*, 134, pp. 93–102. Available at: https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.08.006 (Accessed on 16/03/2026).

Bignami, D.F., Rosso, R. and Sanfilippo, U. (2019), *Flood Proofing in Urban Areas*. Cham: Springer International Publishing. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-05934-7 (Accessed on 16/03/2026).

Busscher, T., van den Brink, M. and Verweij, S. (2019), "Strategies for integrating water management and spatial planning: Organising for spatial quality in the Dutch 'Room for the River' program", *Journal of Flood Risk Management*, 12(1), p. e12448. Available at: https://doi.org/10.1111/jfr3.12448 (Accessed on 16/03/2026).

Dieperink, C., Hegger, D.L.T., Bakker, M.H.N., Kundzewicz, Z.W., Green, C. and Driessen, P.P.J. (2016), "Recurrent Governance Challenges in the Implementation and Alignment of Flood Risk Management Strategies: a Review", *Water Resources Management*, 30(13), pp. 4467–4481. Available at: https://doi.org/10.1007/s11269-016-1491-7 (Accessed on 16/03/2026).

European Commission and Directorate-General for Research and Innovation (2021), *Evaluating the impact of nature-based solutions – A handbook for practitioners*. Publications Office of the European Union. Available at: https://doi.org/10.2777/244577 (Accessed on 16/03/2026).

Gallina, V., Torresan, S., Zabeo, A., Critto, A., Glade, T. and Marcomini, A. (2020), "A Multi-Risk Methodology for the Assessment of Climate Change Impacts in Coastal Zones", *Sustainability*, 12(9), p. 3697. Available at: https://doi.org/10.3390/su12093697 (Accessed on 16/03/2026).

Investment Framework for Environmental Resources (2024), *Inffer | Investment Framework for Environmental Resources*. Available at: https://www.inffer.com.au/ (Accessed: 9 September 2024).

ITACA (2016), *Protocollo ITACA a Scala Urbana*. Available at: https://www.itaca.org/documenti/news/Protocollo%20ITACA%20Scala%20urbana_211216.pdf (Accessed on 16/03/2026).

Juhola, S., Heikkinen, M., Pietilä, T., Groundstroem, F. and Käyhkö, J. (2022), "Connecting climate justice and adaptation planning: An adaptation justice index", *Environmental Science & Policy*, 136, pp. 609–619. Available at: https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.07.024 (Accessed on 16/03/2026).

Klijn, F., Marchand, M., Meijer, K., van der Most, H. and Stuparu, D. (2021), "Tailored flood risk management: Accounting for socio-economic and cultural differences when designing strategies", *Water Security*, 12, p. 100084. Available at: https://doi.org/10.1016/j.wasec.2021.100084 (Accessed on 16/03/2026).

Kreibich, H., Bubeck, P., Van Vliet, M. and De Moel, H. (2015), "A review of damage-reducing measures to manage fluvial flood risks in a changing climate", *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 20(6), pp. 967–989. Available at: https://doi.org/10.1007/s11027-014-9629-5 (Accessed on 16/03/2026).

Mechler, R. (2016), "Reviewing estimates of the economic efficiency of disaster risk management: opportunities and limitations of using risk-based cost–benefit analysis", *Natural Hazards*, 81(3), pp. 2121–2147. Available at: https://doi.org/10.1007/s11069-016-2170-y (Accessed on 16/03/2026).

Melbourne Water (2026), *Maribyrnong River catchment flood mitigation study*, *Let's Talk | Melbourne Water*. Available at: https://letstalk.melbournewater.com.au/maribyrnong-river-flood-model/flood-mitigation-study (Accessed: 4 March 2026).

Meyer, V., Haase, D. and Scheuer, S. (2007), "GIS-based multicriteria analysis as decision support in flood risk management", UFZ-Diskussionspapiere, No. 6/2007. Available at: https://www.econstor.eu/handle/10419/45237 (Accessed on 16/03/2026).

Molinari, D., Dazzi, S., Gattai, E., Minucci, G., Pesaro, G., Radice, A. and Vacondio, R. (2021), "Cost–benefit analysis of flood mitigation measures: a case study employing high-performance hydraulic and damage modelling", *Natural Hazards*, 108(3), pp. 3061–3084. Available at: https://doi.org/10.1007/s11069-021-04814-6 (Accessed on 16/03/2026).

Raikes, J., Smith, T.F., Jacobson, C. and Baldwin, C. (2019), "Pre-disaster planning and preparedness for floods and droughts: A systematic review", *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 38, p. 101207. Available at: https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101207 (Accessed on 16/03/2026).

Regione Marche (2023), *Criteri di selezione del complemento regionale per lo sviluppo rurale del Piano Strategico Nazionale della PAC 2203-2027*. Available at: https://www.regione.marche.it/portals/0/Agricoltura/CSR%2023-27/Monitoraggio/Criteri%20di%20Selezione/Criteri%20di%20selezione%20CSR%20-%20Testo%20consolidato%20no%20rev%2012_2023.pdf (Accessed on 16/03/2026).

Rehan, B.M. (2018), "Accounting public and individual flood protection measures in damage assessment: A novel approach for quantitative assessment of vulnerability and flood risk associated with local engineering adaptation options", *Journal of Hydrology*, 563, pp. 863–873. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.06.061 (Accessed on 16/03/2026).

Tompkins, E.L. and Eakin, H. (2012), "Managing private and public adaptation to climate change", *Global Environmental Change*, 22(1), pp. 3–11. Available at: https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.09.010 (Accessed on 16/03/2026).

Vanelli, F., Lavagna, M. and Minifie, P. (2024), "Evaluation criteria for a systemic approach to flood risk management: stakeholders' perspectives", *TECHNE Journal of Technology for Architecture and Environment*, (28), pp. 191–200. Available at: https://doi.org/10.36253/techne-15836 (Accessed on 16/03/2026).

Vanelli, F., Lavagna, M. and Minifie, P. (2025), "A Framework for Systemic Flood Adaptation: Insights from a Focus Group in Australia", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Sustainable Built Environment Conference 2025*, Zurich: IOP Publishing, p. 012144. Available at: https://doi.org/10.1088/1755-1315/1554/1/012144 (Accessed on 16/03/2026).

Veerbeek, W., Ashley, R.M., Zevenbergen, C., Rijke, J. and Gersonius, B. (2012), "Building adaptive capacity for flood proofing in urban areas through synergistic interventions". *7th International Conference on water sensitive urban design*, Melbourne, Australia. Available at: https://resolver.tudelft.nl/uuid:e03dacb2-18cb-4945-b147-1dedaaf11103 (Accessed on 16/03/2026).

Un *framework* integrato multi-scalare per la valutazione dei rischi climatici per il patrimonio culturale

Alessandra Battisti, https://orcid.org/0000-0002-3288-9321 alessandra.battisti@uniroma1.it
Angelo Figliola, https://orcid.org/0000-0001-8862-6582 angelo.figliola@uniroma1.it
Adriano Ruggiero, https://orcid.org/0009-0006-3269-1223 adriano.ruggiero@uniroma1.it
Alberto Calenzo, https://orcid.org/0000-0002-7522-1882 alberto.calenzo@uniroma1.it
Dipartimento di Pianificazione, Design, Tecnologia dell'Architettura, Università degli Studi di Roma La Sapienza, Italia

Abstract. I molteplici rischi indotti dai cambiamenti climatici sul patrimonio culturale tangibile, distribuiti su diverse scale spaziali, richiedono un approccio valutativo integrato e multidisciplinare. In questo contesto, la ricerca condotta dal gruppo PNRR Sapienza ha sviluppato e applicato al caso studio di Tortona, Italia, una metodologia di mappatura multi-scalare, finalizzata alla valutazione del rischio derivante dagli effetti congiunti e interattivi dei fattori climatici. Il framework metodologico integra analisi GIS, monitoraggi climatici e simulazioni microclimatiche, consentendo di quantificare l'impatto dei cambiamenti climatici e di analizzare la vulnerabilità del patrimonio culturale in relazione a specifici fenomeni di degrado su scala territoriale, urbana e locale.

Parole chiave: Climate change impacts; Tangible outdoor cultural heritage; Hazard identification; Multi-scalar risk mapping.

Introduzione

L'ampia gamma di rischi indotti dal cambiamento climatico (CC) che interessano il patrimonio culturale tangibile *outdoor* richiede un approccio multidisciplinare e un riesame critico dei metodi di valutazione attualmente adottati. Gli effetti del CC si manifestano su più livelli: dalla scala territoriale, dove alterano assetti ambientali e paesaggistici; alla scala urbana, con ripercussioni sulla fruibilità e sul comfort degli spazi pubblici (Rezaie *et al*., 2025; Koutsanitis *et al*., 2025); fino alla scala del dettaglio architettonico, in cui compromettono l'integrità materica e strutturale dei manufatti storici (Huerto-Cardenas *et al*., 2021; Bonazza and Sardella, 2023). La comprensione di queste interazioni risulta imprescindibile per sviluppare strategie di adattamento efficaci, capaci di rispondere tanto ai processi di trasformazione macro-climatica quanto alle vulnerabilità localizzate. Alla scala urbana, i centri storici mostrano una particolare esposizione a rischi multipli come inondazioni, ondate di calore, siccità ed eventi sismici, la cui intensità è aggravata da morfologie edilizie dense e materiali ad alta inerzia termica che amplificano il fenomeno dell'isola di calore urbana (UHI) (Arrighi *et al*., 2023; Lazaridis and Latinopoulos, 2022). In assenza di misure correttive, tali configurazioni determinano accumulo di calore, incremento del fabbisogno energetico e accelerazione dei processi di degrado delle facciate. Sul piano microclimatico, studi recenti hanno evidenziato come i materiali storici risultino particolarmente vulnerabili all'erosione chimica, allo stress meccanico da cicli termo-igrometrici e alla colonizzazione biologica, processi amplificati dalle variazioni locali delle condizioni ambientali (Sabbioni *et al*., 2010). Queste dinamiche rendono evidente la necessità di integrare la scienza dei materiali con valutazioni ambientali ad alta risoluzione e con modelli climatici predittivi. La letteratura converge sulla rilevanza di quadri metodologici integrati, in grado di combinare dati multi-scalari e approcci multi-rischio, così da supportare i processi decisionali e la definizione di priorità di intervento (Battisti *et al*., 2024). Strumenti quali indici standardizzati di vulnerabilità climatica e modelli *simulation-based*, alimentati da dati di monitoraggio, si sono rivelati particolarmente efficaci nell'individuare criticità localizzate e nell'orientare strategie di resilienza *site-specific* (D'Ambrosio *et al*., 2023). In tale prospettiva si colloca il presente studio, che propone una metodologia di mappa-

An integrated multi-scalar framework for assessing climate change risks to cultural heritage

Abstract. The multiple risks induced by climate change on tangible cultural heritage, distributed across different spatial scales, require an integrated and multidisciplinary assessment approach. In this context, the research conducted by the Sapienza PNRR group developed and applied to the case study of Tortona, Italy, a multi-scalar mapping methodology aimed at assessing the risks arising from the combined and interactive effects of climatic factors. The methodological framework integrates GIS analyses, climate monitoring, and microclimatic simulations, enabling the quantification of climate change impacts, and the examination of cultural heritage vulnerability in relation to specific degradation phenomena at territorial, urban, and local scales.

Keywords: Climate change impacts; Tangible outdoor cultural heritage; Hazard identification; Multi-scalar risk mapping.

Introduction

The wide range of risks induced by climate change (CC) affecting outdoor tangible cultural heritage requires a multidisciplinary approach and a critical reassessment of currently adopted evaluation methods. The effects of CC manifest across multiple scales, precisely at the territorial scale, where they alter environmental and landscape configurations; at the urban scale, with repercussions on the usability and comfort of public spaces (Rezaie *et al*., 2025; Koutsanitis *et al*., 2025); and down to the architectural-detail scale, where they compromise the material and structural integrity of historic artefacts (Huerto-Cardenas *et al*., 2021; Bonazza and Sardella, 2023). Understanding these interactions is essential for developing effective adaptation strategies capable of addressing both macro-climatic transformation processes and localised vulnerabilities. At the urban scale, historic centres exhibit a particular exposure to multiple risks such as flooding, heatwaves, drought, and seismic events, whose intensity is exacerbated by dense building morphologies and high thermal-inertia materials that amplify the urban heat island (UHI) effect (Arrighi *et al*., 2023; Lazaridis and Latinopoulos, 2022). In the absence of corrective measures, such configurations lead to heat accumulation, increased energy demand, and accelerated façade deterioration. At the microclimatic level, recent studies have shown that historic materials are particularly vulnerable to chemical erosion, mechanical stress caused by thermo-hygrometric cycles, and biological colonisation – processes amplified by local variations in environmental conditions (Sabbioni *et al*., 2010). These dynamics underscore

ISSN online: 2239-0243 | © 2025 Author(s) | http://www.fupress.com/techne | DOI: 10.36253/techne-18618
Open access, peer-reviewed article published by Firenze University Press (https://www.fupress.com) and distributed, except where otherwise noted, under the terms of the CC BY 4.0 License for content and CC0 1.0 Universal for metadata

tura integrata applicata al caso di Tortona, Italia. Il *workflow* sviluppato combina analisi GIS, monitoraggi climatici e simulazioni microclimatiche per valutare pericolosità, esposizione e vulnerabilità su più livelli: dallo screening territoriale basato su telerilevamento, all'individuazione urbana di hotspot di surriscaldamento, fino alla scala architettonico-tecnologica. I risultati consentono di identificare gradienti di rischio e aree prioritarie, correlando morfologie storiche, pressioni antropiche e condizioni microclimatiche. Il *framework*, replicabile in altri contesti mediterranei, si configura come strumento operativo a supporto di strategie di adattamento e mitigazione, contribuendo alla conservazione resiliente del patrimonio culturale in linea con gli obiettivi del progetto PNRR.

Il progetto di ricerca PNRR

La ricerca condotta nell'ambito del PE05-CHANGES-SPOKE 07 Tutela e Conservazione del Patrimonio Culturale contro i Cambiamenti Climatici, i Rischi Naturali e Antropici, ha sviluppato soluzioni innovative per mitigare gli effetti del CC e dei rischi naturali e antropici sul patrimonio culturale italiano, attraverso un approccio integrato che prevede l'individuazione dei gap conoscitivi e la definizione di un paradigma condiviso, il coordinamento nell'acquisizione e integrazione dei dati, l'analisi dei modelli storici di resilienza, la valutazione multivariata dei rischi, lo sviluppo di strumenti data-driven per modellazione, simulazione e monitoraggio, e l'integrazione dei saperi a supporto del Metodo di Decisione Multicriterio (MCDM), finalizzata alla costruzione di un Sistema di Supporto alle Decisioni (DSS) per la riqualificazione del patrimonio e del paesaggio storico. In questo quadro, il contributo si focalizza sull'elaborazione e sull'applicazione del processo *data-driven* per la valutazione multi-rischio in uno dei tre casi studio analizzati.

Finalità e ambito della ricerca

Le attività di ricerca si sono concentrate sullo sviluppo di un quadro multidisciplinare a supporto del processo di valutazione del rischio relativo all'effetto multivariato del CC e all'interazione di diversi rischi sul patrimonio culturale tangibile perseguendo obiettivi tra loro complementari: sviluppare una metodologia di valutazione multi-scalare dei rischi primari e indotti dovuti al CC sul patrimonio culturale tangibile alla scala territoriale; quantificare i trend climatici su scala vasta integrando dati satellitari, dataset storici e file climatici di scenario, con analisi delle principali anomalie dei parametri ambientali; valutare i principali fattori di rischio alla scala urbana e dell'edificio mediante analisi microclimatiche *under canopy*, con particolare attenzione agli effetti dell'UHI e alla variabilità microclimatica; fornire infine un *framework* operativo per la valutazione delle principali componenti di rischio, esposizione e vulnerabilità, allo scopo di supportare un approccio sistematico alla stima dei rischi legati al CC e alla definizione di strategie di adattamento per il patrimonio culturale tangibile in ambiente *outdoor*.

Quadro metodologico: approccio multi-scalare alla valutazione dei rischi

Il *framework* metodologico (Fig. 1) è stato articolato in tre fasi principali. La prima fase ha previsto l'identificazione del sito pilota e la generazione dei file climatici secondo gli scenari

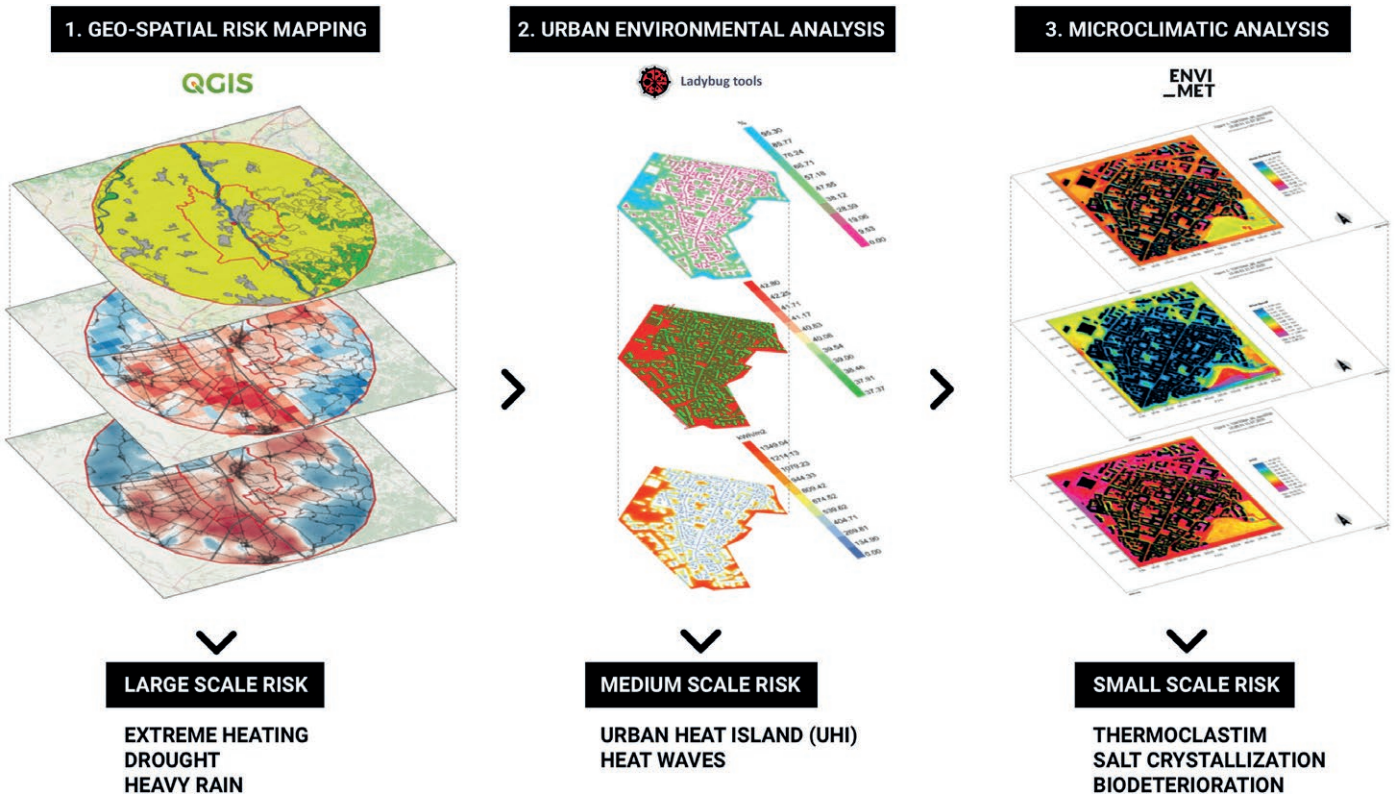
the need to integrate materials science with high-resolution environmental assessments and predictive climate modelling. The literature converges on the relevance of integrated methodological frameworks capable of combining multi-scalar data and multi-risk approaches to support both decision-making processes, and the definition of intervention priorities (Battisti *et al.*, 2024). Tools such as standardised climate vulnerability indices and simulation-based models, fuelled by monitoring data, have proven particularly effective in identifying localised criticalities and guiding site-specific resilience strategies (D'Ambrosio *et al.*, 2023). Within this perspective, the present study proposes an integrated mapping methodology applied to the case of Tortona, Italy. The developed workflow combines GIS analyses, climatic monitoring, and microclimate simulations to assess hazard, exposure, and vulnerability across multiple levels, from territorial screening based on remote sensing to the urban identification of overheating hotspots, down to the architectural and technological scale. The results enable the identification of risk gradients and priority areas, correlating historic morphologies, anthropogenic pressures, and microclimatic conditions. The framework – replicable in other Mediterranean contexts – serves as an operational tool supporting adaptation and mitigation strategies, contributing to the resilient conservation of cultural heritage in line with the objectives of the PNRR project.

The PNRR Research Project

The research carried out within PE05-CHANGES-SPOKE 07 Protection and Conservation of Cultural Heritage against Climate Change, Natural and Anthropogenic Risks has developed innovative solutions to mitigate the effects of CC and natural and anthropogenic hazards on Italian cultural heritage. This was achieved through an integrated approach encompassing the identification of knowledge gaps and the definition of a shared paradigm; the coordination of data acquisition and integration; the analysis of historical models of resilience; the multivariate assessment of risks; the development of data-driven tools for modelling, simulation, and monitoring; and the integration of interdisciplinary knowledge to support Multi-Criteria Decision-Making (MCDM), aimed at establishing a Decision Support System (DSS) for the regeneration of historic heritage and landscapes. Within said framework, this paper focuses on the development and application of the data-driven process for multi-risk assessment in one of the three case studies analysed.

Aim and Scope of the Research

The research activities focused on developing a multidisciplinary framework to support the risk assessment process related to the multivariate effects of CC, and the interaction of multiple hazards on tangible cultural heritage, pursuing complementary objectives. These include developing a multi-scalar methodology for assessing primary and induced risks due to CC on tangible cultural heritage at the territorial scale; quantifying large-scale climate trends by integrating satellite data, historical datasets, and scenario-based climate files, with an analysis of major anomalies in environmental parameters; evaluating the main risk factors at the urban and



RCP 4.5 e RCP 8.5 dell'IPCC, necessari per valutare l'impatto futuro dei cambiamenti climatici su variabili ambientali chiave come temperatura, umidità e precipitazioni. La seconda fase ha interessato la costruzione di una base conoscitiva iniziale tramite l'analisi di serie temporali di immagini satellitari e dati climatici (temperatura e precipitazioni) a bassa risoluzione spaziale (1 km × 1 km), per individuare i principali rischi e le condizioni di esposizione e vulnerabilità su scala vasta. I dati raccolti sono organizzati in un database spaziale multi-scalare e aggiornabile. Tali dati sono stati impiegati per monitorare le trasformazioni in atto e per simulare gli effetti a medio-lungo termine sull'ambiente costruito. La terza fase ha previsto un approfondimento a scala locale, mediante l'integrazione delle immagini satellitari con analisi microclimatiche ad alta risoluzione (da 3 m × 3 m fino a 1 m × 1 m), raccolti sia in spazi aperti sia su componenti tecnologiche specifiche, come le facciate edilizie.

building scales through under-canopy microclimatic analyses, with particular attention to the effects of the UHI and microclimatic variability; and finally, providing an operational framework for assessing the key components of risk, exposure, and vulnerability. The aim was to support a systematic approach to estimating CC-related risks, and to defining adaptation strategies for outdoor tangible cultural heritage.

Methodological Framework: A Multi-Scalar Approach to Risk Assessment

The methodological framework (Fig. 1) was structured into three main phases. The first phase involved identifying the pilot site, and generating climate files according to the IPCC RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios required to assess the future impact of climate change on key environmental variables such as temperature, humidity, and precipitation. The second phase focused on building an initial knowledge base by analysing time series of satellite imagery and climatic data (temperature and precipitation) at low spatial resolution (1 km × 1 km) to identify the primary risks, as well as the conditions of exposure and vulnerability at a broad scale. The collected data were organised into an updatable multi-scalar spatial database. These data were used to monitor ongoing transformations, and to simulate medium to long-term effects on the built environment. The third phase involved a detailed local-scale analysis by integrating satellite imagery with high-resolution microclimatic analyses (from 3 m × 3 m down to 1 m × 1 m), collected both in open spaces and on specific technological components, such as building façades. In this study, each step of the workflow – from territorial screening to microclimatic simulations – is designed to respond to the specificities of outdoor tangible cultural heritage. Indicators, scales, and tools are selected based on expected degradation mechanisms, conservation constraints, and operational limitations typical of historic contexts, thus translating climate analysis into conservation priorities and intervention criteria compatible with heritage preservation.

Case Study: Tortona

One of the three case studies in which the aforementioned methodology was tested is the Tortona site, in Piedmont. The choice of this context has a dual significance. It is a rural landscape of historical and cultural relevance, part of the UNESCO-recognised Piedmontese wine-growing system; it is also a historic centre with an architectural heritage that plays a significant role in local cultural identity. Both domains exhibit differentiated and multi-scalar vulnerabilities linked to the effects of CC and to anthropogenic pressures. From this perspective, Tortona constitutes a paradigmatic case for testing procedures that can be replicated in analogous Mediterranean contexts, aimed at multi-risk diagnosis, intervention prioritisation, and the definition of site-specific adaptation strategies.

Climate Modelling of Future Scenarios

The scenario-based analysis considered the temporal horizons 2030, 2050, and 2080, following the IPCC RCP 4.5 and RCP 8.5 trajectories. A coherent annual set of climate indicators was developed for each scenario, including mean, minimum, and maximum tem-

Nel presente studio, ogni passaggio del workflow, dallo screening territoriale alle simulazioni microclimatiche, è impostato per rispondere alle specificità del patrimonio culturale tangibile outdoor. Indicatori, scale e strumenti sono selezionati in funzione dei meccanismi di degrado attesi, dei vincoli di tutela e delle limitazioni operative tipiche dei contesti storici, così da tradurre l'analisi climatica in priorità conservative e criteri di intervento compatibili con la conservazione.

Caso studio: Tortona

Uno dei tre casi studio su cui è stata sperimentata la metodologia sopra descritta è stato il sito di Tortona in Piemonte. La scelta di questo contesto ha una duplice valenza, quella di essere un paesaggio rurale di rilevanza storico-culturale, parte del sistema vitivinicolo piemontese riconosciuto dall'UNESCO, e al contempo essere un centro storico con un patrimonio architettonico significativo per l'identità culturale locale. Entrambi gli ambiti presentavano vulnerabilità differenziate e multiscalari, riconducibili agli effetti del CC e alle pressioni antropiche. In tale prospettiva, Tortona ha rappresentato un caso paradigmatico per sperimentare procedure replicabili in contesti mediterranei analoghi, orientate alla diagnosi multi-rischio, alla prioritizzazione degli interventi e alla definizione di strategie di adattamento *site-specific*.

Modellazione climatica degli scenari futuri

L'analisi per scenari ha preso in considerazione gli orizzonti temporali 2030, 2050 e 2080, seguendo le traiettorie IPCC RCP 4.5 e RCP 8.5. Per ciascun scenario è stato elaborato un set annuale coerente di indicatori climatici che comprende: temperatura media, minima e massima, gradi giorno per raffrescamento e riscaldamento, velocità e direzione prevalente del vento, metriche relative al comfort termico indoor e outdoor. Il comfort outdoor è stato dedotto a partire dagli indicatori climatici, mentre quello indoor stimato tramite l'analisi psicrometrica, al fine di valutare la percentuale di condizioni ricadenti all'interno delle zone di comfort. L'integrazione di questi strati informativi ha consentito una valutazione strutturata delle componenti di rischio lungo le diverse scale e costituito la base operativa per confrontare nel tempo priorità e strategie di adattamento.

Analisi del rischio alla scala territoriale

Alla scala territoriale, l'analisi, articolata lungo due direttrici coordinate, è finalizzata a individuare gli hazard climatici che minacciano la conservazione dei beni tangibili diffusi, contribuendo a definire un quadro di priorità per la tutela preventiva. L'obiettivo generale della ricerca è stato quello di indagare e valutare il rischio come funzione di tre componenti fondamentali: pericolosità (IPCC, 2012), esposizione (Burton *et al*., 1993) e vulnerabilità (Adger, 2006) (Tab. 1), integrando analisi GIS con workflow di telerilevamento e dataset satellitari. La Tabella 2 accompagna e sintetizza il percorso metodologico, organizzando per ciascun obiettivo le fonti dati utilizzate (con specifica copertura temporale), la risoluzione spaziale e gli output attesi, garantendo trasparenza e replicabilità del workflow. In primo luogo sono stati delineati gli asset esposti e costruiti gli indici di vulnerabilità, operazione che ha richiesto una mappatura sistematica del patrimonio edilizio e dei beni culturali, landmark architettonici, edifici pubblici, monumenti ed edifici religiosi, insieme alla caratterizzazione delle componenti antropiche e

perature; heating and cooling degree days; wind speed and prevailing direction; and metrics related to indoor and outdoor thermal comfort. Outdoor comfort was inferred from climatic indicators, while indoor comfort was estimated through psychrometric analysis to assess the percentage of conditions falling within comfort zones. The integration of these information layers enabled a structured evaluation of risk components across different scales, providing the operational basis for comparing priorities and adaptation strategies over time.

Risk Analysis at the Territorial Scale

At the territorial scale, the analysis – structured along two coordinated directions – aims to identify climatic hazards threatening the conservation of dispersed tangible assets, thereby contributing to the definition of priority frameworks for preventive protection. The overarching goal of the research was to investigate and assess risk as a function of three fundamental components, precisely hazard (IPCC, 2012), exposure (Burton *et al*., 1993), and vulnerability (Adger, 2006) (Tab. 1), by integrating GIS analyses with remote sensing workflows and satellite datasets. Table 2 accompanies and synthesises the methodological process, organising for each objective the data sources employed (with specific temporal coverage), spatial resolution, and expected outputs, thus ensuring transparency and replicability of the workflow. First, exposed assets were delineated and vulnerability indices were constructed – a process requiring systematic mapping of the building stock and cultural heritage, including architectural landmarks, public buildings, monuments, and religious structures, together with the characterisation of the anthropogenic and natural components of the territory, namely artificial surfaces, agricultural areas, forest and semi-natural cover, wetlands, and water bodies. Supporting this process, the Vegetation Health Index (VHI) was used to assess vegetation status (0–100%), Imperviousness Density (IMD) to quantify soil sealing (0–100%), a Digital Terrain Model (DTM) for altitude, and the European Settlement Map (ESM) for a dichotomous representation of anthropogenic settlements. Second, hazard probability and intensity were estimated through a coherent set of climatic indicators derived from homogeneous historical time series. Overheating risk was assessed using the heat wave index calculated from 2 m air temperature (NASA MERRA-2, 2001–2021). Drought conditions were estimated through precipitation-based indices (MERRA-2, 2001–2021), and the propensity for heavy rainfall was quantified using the extreme precipitation indicator (also MERRA-2). Additionally, Land Surface Temperature (LST) and the Normalised Difference Vegetation Index (NDVI) were derived to map surface thermal patterns and green cover. Urban thermal anomalies were calculated as the differential between urban LST and the mean LST of peri-urban green areas (Fig. 2).

Risk Analysis at the Urban Scale

At the urban scale, microclimatic indicators are interpreted in relation to the usability and conservation of the historic centre, where traditional morphologies and materials amplify climatic impacts. In the latter phase, a three-dimensional urban-scale model was developed to conduct environ-

Tab. 01 | Componenti di rischio: *Hazard, Vulnerability, Exposure* alla scala territoriale
Risk components: Hazard, Vulnerability, Exposure at the territorial scale

Tab. 02 | Descrizione dei dataset impiegati per la simulazione alla scala vasta
Description of datasets used for large-scale simulation

Tab. 01 |

DATA	SOURCE	CRS – COORDINATE REFERENCE SYSTEM	TYPE	REFERENCE YEAR	SPATIAL RESOLUTION
Functional Urban Area (FUA)	Geoportal of the Piemonte Region	WGS 84/ UTM zone 32N EPSG:32632	Polygonal vector data	2018	N/A
Municipalities	Geoportal of the Piemonte Region	WGS 84/ UTM zone 32N EPSG:32632	Polygonal vector data	2018	N/A
Monuments Italian Ministry of Culture	Sistema informativo integrato MIC	WGS 84/ UTM zone 32N EPSG:32632	Polygonal vector data	2020	1 km spatial resolution
Digital Elevation Model (DEM)	Geoportal of the Piemonte Region		Raster	1997 -> 2004 -> 2008	10m x 10m
Sentinel 3 - OTCI	Copernicus		Raster	2018 - 2023	1kmx1km
Cadaster	Geoportal of the Piemonte Region		Polygonal vector data	2023	
Vineyards data	Regional agricultural information system		text-based with comma-separated data	2008 - 2022	
Water bodies	**Copernicus**		**Raster**		**1kmx1km**
Sentinel-3 satellite images	Copernicus	NOT ASSIGNED	Raster data	2019, 2020 (to be implemented)	1 km spatial resolution
Corine Land Cover (CLC)	Geoportal of the Piemonte Region	WGS 84/ UTM zone 32N EPSG:32632	Polygonal vector data	2018	N/A
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	Copernicus	NOT ASSIGNED	Raster data	2019,2020	1 km spatial resolution
Built Tortona	Geoportal of the Piemonte Region	WGS 84/ UTM zone 32N EPSG:32632	Polygonal vector data	2018	N/A
Road graph Tortona	Geoportal of the Piemonte Region	WGS 84/ UTM zone 32N EPSG:32632	Polygonal vector data	2018	N/A
Corine Land Cover (CLC)	Copernicus database	NOT ASSIGNED	Polygonal vector data	1990	1 km spatial resolution
Corine Land Cover (CLC)	Copernicus database	NOT ASSIGNED	Polygonal vector data	2000	1 km spatial resolution
Corine Land Cover (CLC)	Copernicus database	NOT ASSIGNED	Polygonal vector data	2006	1 km spatial resolution
Corine Land Cover (CLC)	Copernicus database	NOT ASSIGNED	Polygonal vector data	2012	1 km spatial resolution
Corine Land Cover (CLC)	Copernicus database	NOT ASSIGNED	Polygonal vector data	2018	1 km spatial resolution

Tab. 02 |

DATA	SOURCE	CRS – COORDINATE REFERENCE SYSTEM	TYPE	REFERENCE YEAR	SPATIAL RESOLUTION
Solar radiation – Sunlight Hours – Sky view factor	Ladybug Suite	N/A	Raster data, numeric values	2005	3 x 3 meters grid
UTCI – Universal Thermal Climate Index (Simplified)	Ladybug Suite	N/A	Raster data, numeric values	2005,2030,2090	3 x 3 meters grid
UTCI – Universal Thermal Climate Index – Surface Temperature	Envi-met	N/A	Raster data, numeric values	2005, 2030, 2090	3 x 3 meters grid

mental analyses based on the previously generated climate files. The 3D model was created in Rhinoceros 7.0 through a GIS-to-BIM process supported by the Gizmo plug-in for Grasshopper (GH), employing the Ladybug Tools suite to run simulations (Tab. 3). The analyses focused on the spatial distribution of dry-bulb air temperature, relative humidity, natural ventilation (in terms of direction, speed, and frequency), solar irradiation (kWh/m²/year), and summer shading (21 June–21 September), with the aim of identifying conditions of maximum thermal stress. The Sky View Factor was also calculated, and a simplified estimation of the Universal Thermal Climate Index (UTCI) was implemented to select the most critical urban area (Fig. 3). The UTCI analysis was conducted on the hottest day of the period (21 July), between 10:00 am and 6:00 pm, using surface temperature values derived from satellite-based LST and albedo coefficients as a proxy for actual materials. This process enabled the rapid identification of a critical 600 × 600 m area to be subjected to detailed microclimatic modelling.

Risk Analysis at the Architectural–Technological Scale

At the detailed scale, simulations are aimed at correlating thermo-hygro-

naturali del territorio ovvero superfici artificiali, aree agricole, coperture forestali e ambienti seminaturali, zone umide e corpi idrici. A supporto di questo processo sono stati utilizzati il *Vegetation Health Index* (VHI) per lo stato della vegetazione (0–100%), l'*Imperviousness Density* (IMD) per quantificare la sigillatura del suolo (0–100%), un *Digital Terrain Model* (DTM) per l'altimetria, e la *European Settlement Map* (ESM) per una rappresentazione dicotomica degli insediamenti antropici. In secondo luogo sono state stimate probabilità e intensità della pericolosità tramite un set coerente di indicatori climatici derivati da serie storiche omogenee. Il rischio da surriscaldamento è stato valutato mediante l'indice di ondata di calore (*heat waves*) calcolato attraverso la temperatura dell'aria a 2 metri dal suolo (NASA MERRA-2, 2001–2021); la siccità è stata stimata attraverso gli indici basati sulle precipitazioni (MERRA-2, 2001–2021); e la propensione a piogge intense è stata quantificata tramite l'indicatore di precipitazioni estreme (ancora MERRA-2). Sono stati derivati, inoltre, la *Land Surface Temperature* (LST) e il *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) per mappare i pattern termici superficiali e la copertura verde. Le anomalie termiche urbane sono state calcolate come differenziale tra la LST urbana e la LST media delle aree verdi periurbane (Fig. 2).

Analisi del rischio alla scala urbana

Alla scala urbana, gli indicatori microclimatici sono letti in relazione alla fruibilità e alla conservazione del centro storico, dove morfologie e materiali tradizionali amplificano gli impatti climatici. In questa seconda fase è stato sviluppato un modello tridimensionale alla scala urbana, finalizzato alla conduzione di analisi ambientali basate sui file climatici elaborati in precedenza. Il modello 3D è stato generato in Rhinoceros 7.0 tramite un processo GIS-to-BIM supportato dal plug-in Gizmo per Grasshopper (GH), sfruttando la suite Ladybug Tools per l'esecuzione delle simulazioni (Tab. 3). Le analisi hanno riguardato la distribuzione spaziale di temperatura dell'aria a bulbo secco, umidità relativa, ventilazione naturale (in termini di direzione, velocità e frequenza), irradiazione solare (kWh/m²/anno) e ombreggiamento nel periodo estivo (21 giugno – 21 settembre), al fine di individuare condizioni di massimo stress termico. È stato inoltre calcolato lo *Sky View Factor* e implementata una stima semplificata dell'*Universal Thermal Climate Index* (UTCI) per selezionare l'area urbana più critica (Fig. 3). L'analisi UTCI è stata condotta sul giorno più caldo del periodo (21 luglio), nell'intervallo 10:00–18:00, utilizzando valori di temperatura superficiale da LST satellitare e coefficienti di albedo, in sostituzione dei materiali reali. Questo processo ha permesso una rapida identificazione di un'area critica di 600 × 600 m da sottoporre a modellazione microclimatica dettagliata.

Analisi del rischio alla scala architettonico-tecnologica

Alla scala di dettaglio, le simulazioni sono orientate a mettere in relazione le condizioni termo-igrometriche con i processi di degrado delle superfici storiche e con le possibili soglie critiche conservative. A riguardo, per l'area critica individuata nella fase precedente, sono state condotte simulazioni microclimatiche mediante il software ENVI-met. Nello specifico è stato sviluppato un modello tridimensionale geolocalizzato dell'area (44.898395 N, 8.868070 E, alt. 122 m s.l.m.) basato su voxel di 3 × 3 × 3 m. I materiali che caratterizzano l'area in esame sono stati assegnati tramite il Database Manager del software,

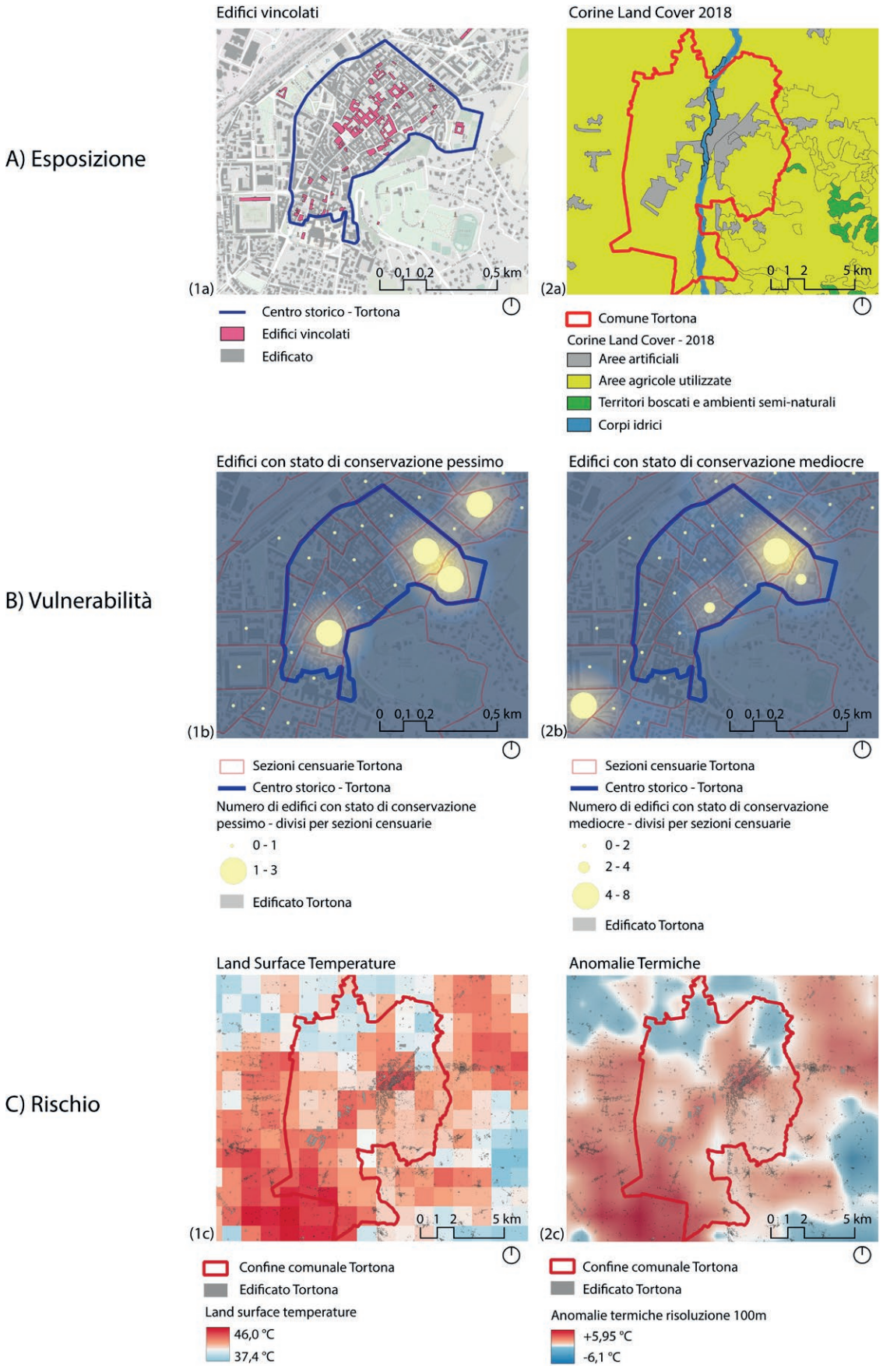
metric conditions with degradation processes affecting historic surfaces, and with potential conservation-critical thresholds. In this regard, for the critical area identified in the previous phase, microclimatic simulations were carried out using the ENVI-met software. Specifically, a georeferenced three-dimensional model of the area (44.898395 N, 8.868070 E, elev. 122 m a.s.l.) was developed based on 3 × 3 × 3 m voxels. The materials characterising the study area were assigned through the software's Database Manager, assuming uninsulated brick masonry for buildings, clay tile roofs, asphalt road surfaces, basalt and concrete pavements, vegetated soils classified as "simple green + sandy loam," and tree species including pine (Pinus pinea), privet (Ligustrum vulgare), and oleander (Nerium oleander). The simulations, conducted over a 24-hour period using EPW climatic data for the years 2005 and 2030, enabled the assessment of the following environmental indicators, precisely air temperature (°C); relative humidity (%); mean radiant temperature (MRT, °C); wind speed and direction (m/s); and Universal Thermal Climate Index (UTCI, °C). These parameters, which are essential for analysing the UHI effect, allowed to investigate the relationship between historic urban configurations and local microclimate. The analysis was further refined on an emblematic element of the historic centre, the Civic Tower, through point-based surveys conducted on its four façades (south, east, north, west), including measurements of surface temperature (°C) at different heights (2 m, 6–9 m, 14–16 m, 19–21 m) and moisture content (g/kg) in proximity to the masonry system.

Results and discussion

The multi-scalar methodology developed throughout the research not only identified primary risks and described them scientifically through valid and reliable climatic indicators, but also made it possible to clarify correlations between the different scales of analysis. Specifically, climate projections based on the IPCC RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios indicate a progressive intensification of primary climatic risks, with heatwaves and drought emerging as dominant large-scale hazards, acting as background pressures that affect the conservation of outdoor tangible cultural heritage and historic landscapes. The increase in mean annual temperature – from 15.3 °C in the current reference period to over 20 °C in the RCP 8.5 scenario by 2090 – systematically raises the probability of exceeding the daily thresholds used to define heatwaves, with expected repercussions on both the usability of outdoor spaces and the thermo-hygrometric balance of exposed material surfaces. Cooling Degree Days, which nearly triple under the RCP 8.5 scenario, confirm a marked trend toward summer thermal stress, and provide an indirect indicator of the increasing duration and intensity of such events. This results in a significant expansion of outdoor discomfort conditions with the percentage of hours in heat stress rising from the current 11% to 33% in the RCP 8.5 scenario by 2090, thereby reducing opportunities for outdoor use and prolonging the exposure of historic architectures to sustained thermal loads. With regard to drought, projections show less pronounced variations in annual precipitation totals, with divergent scenarios indicating a modest increase under RCP 4.5, and

02 | a) Sky View Factor (SVF); b) UTCI, Universal Thermal Comfort Index, semplificato, Angelo Figliola
a) Sky View Factor (SVF); b) Simplified Universal Thermal Climate Index (UTCI), Angelo Figliola

02 |



Tab. 03 | Descrizione delle simulazione e dei relativi dataset utilizzati alla scala urbana
Description of simulations and related datasets used for urban-scale analysis

03 | a) Vulnerabilità: mappatura gis di edifici vincolati e utilizzo di suolo; b) Esposizione: heat-maps dello stato di conservazione degli edifice; c) Rischi: Land Surface Temperature e Urban Thermal Anomalies, Adriano Ruggiero
a) Vulnerability: GIS mapping of listed buildings and land use; b) Exposure: heat maps of building conservation status; c) Risks: Land Surface Temperature and Urban Thermal Anomalies, Adriano Ruggiero

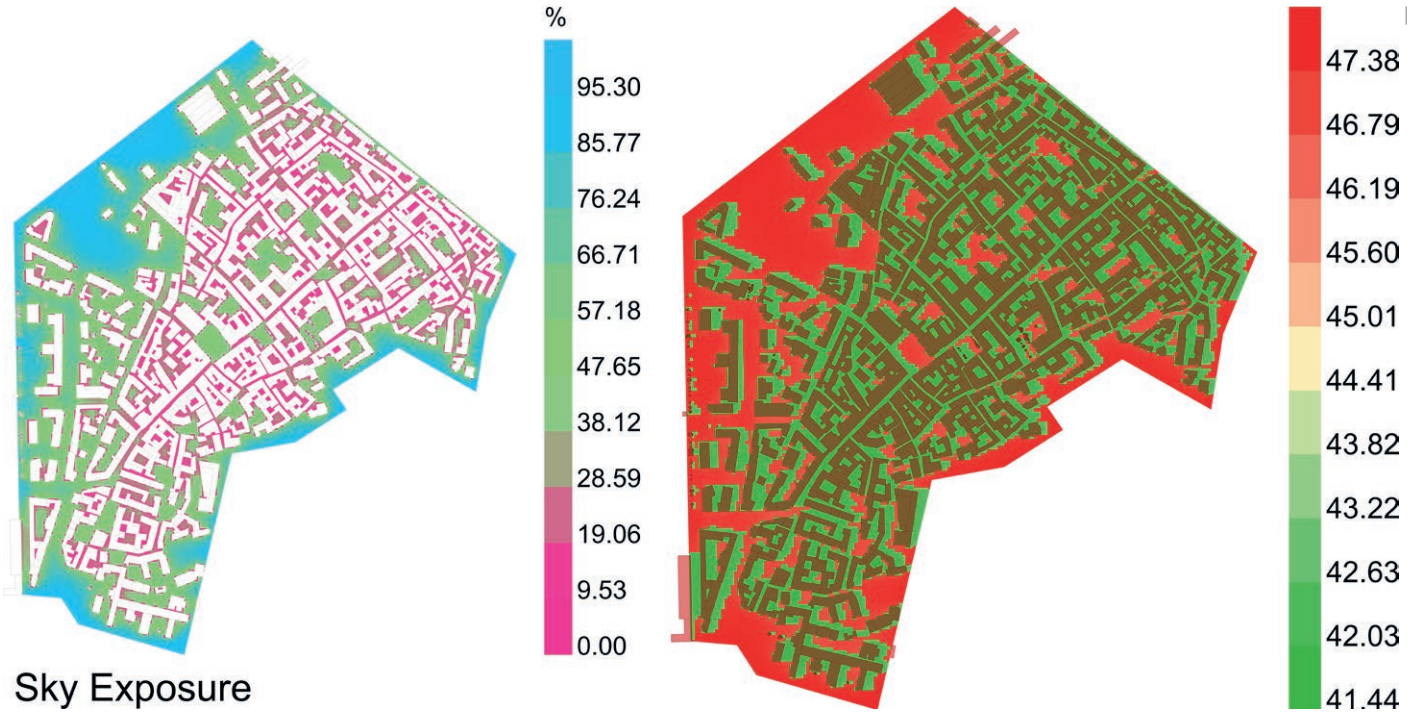
| Tab. 03

Scenari	Avg Temp (°C)	Min Temp (°C)	Max Temp (°C)	Cooling Degree Days	Heating Degree Days	Avg Wind Speed (m/s)	Avg Wind Direction (°)	Heat Stress (%)	Neutral (%)	Cold Stress (%)	Indoor Comfort (%)
EPW 2005	15.33	-3.8	35.0	129	2080	1.4	178	11	61	28	38
RCP 4.5 - 2030s	16.3	-3.0	36.7	194	1915	1.4	178	17	55	28	25.5
RCP 4.5 - 2050s	17.0	-2.2	37.7	251	1779	1.4	178	20	55	25	22
RCP 4.5 - 2090s	18.0	1.3	38.6	337	1567	1.4	178	24	55	21	17
RCP 8.5 - 2030s	16.2	-2.7	36.9	197	1870	1.4	178	17	56	27	26
RCP 8.5 - 2050s	17.6	-1.6	38.0	274	1643	1.4	178	22	55	23	19
RCP 8.5 - 2090s	21.0	0.4	42.1	649	1207	1.4	178	33	52	15	5

considerando muratura in mattoni non isolata per gli edifici, coperture in coppi/tegole, superfici stradali in asfalto, pavimentazioni in basalto e calcestruzzo, suoli vegetali di tipo "*simple green + sandy loam*" e specie arboree pino, *pinus pinea*, ligustro, *ligustrum vulgare,* oleandro, *nerium oleander.* Le simulazioni, condotte per 24 ore sui dati climatici EPW relativi agli anni 2005 e 2030, hanno permesso di valutare i seguenti indicatori ambientali: Temperatura dell'aria (°C); Umidità relativa (%); Temperatura media radiante (MRT, °C); Velocità e direzione del vento (m/s); Universal Thermal Climate Index (UTCI, °C). Questi parametri, essenziali per l'analisi dell'effetto UHI, hanno permesso di indagare la relazione tra configurazioni urbane storiche e microclima locale. L'analisi è stata infine approfondita su un elemento simbolico del centro storico, la Torre Civica, mediante rilievi puntuali sulle quattro facciate (sud, est, nord, ovest), con misurazioni di temperatura superficiale (°C) a diverse altezze (2 m, 6–9 m, 14–16 m, 19–21 m) e contenuto di umidità (g/kg) in prossimità del sistema murario.

Discussione dei risultati

La metodologia multi-scalare messa a punto nel corso della ricerca, oltre a identificare i rischi primari e a descriverli scientificamente attraverso indicatori climatici validi e attendibili, ha permesso di evidenziare con maggiore chiarezza le correlazioni tra le diverse scale di analisi. Nello specifico, le proiezioni climatiche secondo gli scenari RCP 4.5 e RCP 8.5 dell'IPCC indicano



| 03

una progressiva intensificazione dei rischi climatici primari, con ondate di calore e siccità che emergono come rischi dominanti alla scala vasta agendo come pressioni di fondo che incidono sulla conservazione del patrimonio culturale tangibile outdoor e dei paesaggi storici. L'aumento delle temperature medie annue, da 15,3 °C nel periodo di riferimento attuale a oltre 20 °C nello scenario RCP 8.5 al 2090, incrementa sistematicamente la probabilità di superamento delle soglie giornaliere utilizzate per la definizione delle ondate di calore con ricadute attese sia sulla fruibilità degli spazi sia sui bilanci termo-igrometrici delle superfici materiche esposte. I *Cooling Degree Days*, che quasi triplicano nello scenario RCP 8.5, confermano una tendenza marcata allo stress termico estivo e forniscono un indicatore indiretto della crescente durata e intensità degli episodi. Ciò si traduce in un'espansione significativa delle condizioni di *discomfort outdoor*, con la percentuale di ore in *heat stress* che passa dall'11% attuale al 33% nello scenario RCP 8.5 al 2090 riducendo le possibilità di fruizione degli spazi e prolungando l'esposizione delle architetture storiche a carichi termici prolungati. Riguardo alla siccità, le proiezioni mostrano variazioni meno evidenti nei totali annui di precipitazione, con scenari divergenti che identificano un modesto incremento in RCP 4.5 e una riduzione sensibile in RCP 8.5 al 2090. Tuttavia, il rischio emerge chiaramente dalla distribuzione temporale delle piogge nelle serie storiche, con sequenze di giorni asciutti più persistenti: i 33 consecutivi osservati nel 2021–22 anticipano l'aumento dell'indice Consecutive Dry Days (CDD), definito come il numero massimo di giorni secchi con precipitazioni inferiori a 1 mm. Gli scenari futuri indicano un'ulteriore estensione dei periodi secchi, associata a eventi piovosi più intensi e concentrati, configurando una pressione combinata su suolo, vegetazione e superfici esposte. Tali osservazioni trovano riscontro a scala urbana, dove i dati satellitari Sentinel-3 mostrano anomalie termiche fino a +5,93 °C tra il centro storico di Tortona e le aree rurali circostanti. La morfologia compatta, l'impermeabilizzazione e la riduzione progressiva delle superfici verdi (–2% tra 1990 e 2018) amplificano gli effetti delle *heat waves* connessi al fenomeno dell'isola di calore urbana. La correlazione tra LST e NDVI mette in luce chiaramente come la perdita di superficie verde riduca la capacità di raffrescamento, aumentando la vulnerabilità alle condizioni di siccità e aggravando lo stress termico all'aperto. A ciò si aggiunge la fragilità del patrimonio edilizio, con un'elevata concentrazione di edifici in pessimo stato di conservazione, che limita la capacità di mitigare tali fenomeni e ne accentua l'esposizione. Alla scala urbana di dettaglio, le simulazioni microclimatiche evidenziano come l'incremento delle temperature agisca simultaneamente sullo stress termo-igrometrico degli abitanti e sui processi di degrado materico degli edifici (Fig. 4). Lo scenario 2030 RCP 4.5, con T_max pari a 36,7 °C rispetto ai 34,3 °C del 2005, mostra un'estensione delle aree classificate in *very strong heat stress* secondo l'UTCI, con picchi localizzati nelle corti e nei canyon urbani caratterizzati da rapporti H/W sfavorevoli e scarsa ventilazione. In un contesto vincolato, tali proiezioni richiedono strategie compatibili con la tutela del costruito storico e una riorganizzazione climatico-adattiva degli spazi aperti.

Dai dati relativi alla Torre Civica si evince infatti che le superfici murarie, soprattutto esposte a sud e ovest, potranno superare frequentemente i 50 °C, raggiungendo valori compresi tra 54 °C e 56 °C, con differenze significative rispetto allo scenario attuale. Ciò favorirà condizioni microclimatiche più secche e cicli termici più

a marked reduction under RCP 8.5 by 2090. However, risk becomes evident when examining the temporal distribution of rainfall in historical series, which reveal increasingly persistent dry sequences. Indeed, the 33 consecutive dry days observed in 2021–22 anticipate the rise of the Consecutive Dry Days (CDD) index, defined as the maximum number of days with precipitation below 1 mm. Future scenarios indicate a further extension of dry periods associated with more intense and concentrated rainfall events, generating combined pressure on soil, vegetation, and exposed surfaces. These observations are corroborated at the urban scale, where Sentinel-3 satellite data show thermal anomalies of up to +5.93 °C between Tortona's historic centre and surrounding rural areas. Compact morphology, soil sealing, and the progressive reduction of green surfaces (–2% between 1990 and 2018) amplify the effects of heatwaves associated with the urban heat island phenomenon. The correlation between LST and NDVI clearly highlights how the loss of green cover reduces cooling capacity, increasing vulnerability to drought conditions and intensifying outdoor thermal stress. Compounding this is the fragility of the building stock, with a high concentration of structures in poor condition, which limits adaptive capacity and heightens exposure.

At the detailed urban scale, microclimatic simulations show that rising temperatures simultaneously exacerbate thermo-hygrometric stress for inhabitants and material degradation processes in buildings (Fig. 4). The 2030 RCP 4.5 scenario, with a T_max of 36.7 °C compared to 34.3 °C in 2005, reveals an expansion of areas classified as very strong heat stress according to UTCI, with peaks located in courtyards and urban canyons characterised by unfavourable H/W ratios and poor ventilation. In a protected historic context, such projections call for strategies compatible with heritage conservation, and for a climate-adaptive reorganisation of open spaces. Data from the Civic Tower further indicate that masonry surfaces – particularly those facing south and west – may frequently exceed 50 °C, reaching values between 54 °C and 56 °C, with significant differences compared to the current scenario. These conditions will foster drier microclimates and more pronounced thermal cycles, intensifying degradation phenomena such as thermoclastism, salt crystallisation, and hygrothermal shock. Consequently, the vulnerability of historic centres must be interpreted as a systemic phenomenon and addressed through an integrated, holistic, and multi-scalar approach to define an effective medium to long-term adaptation and conservation strategies.

Conclusions and Future Outlook

The research conducted within PE05-CHANGES-SPOKE 07 has demonstrated that a multi-scalar approach not only enables the description of CC impacts, but also supports an understanding of risk interactions across different territorial scales, transforming complex data into readable and comparable matrices. Moreover, the use of accessible datasets and established software ensures replicability of the methodology in different contexts by adapting input parameters to local climatic, morphological, and building conditions. To make the

04 | Confronto tra le simulazioni condotte sulla porzione urbana 600x600 metri oggetto di studio negli anni 2005-2030 in merito ad UTCI e Mean Radiant Temp calcolati nel giorno critico individuato (21 luglio alle ore 15:00), Alberto Calenzo

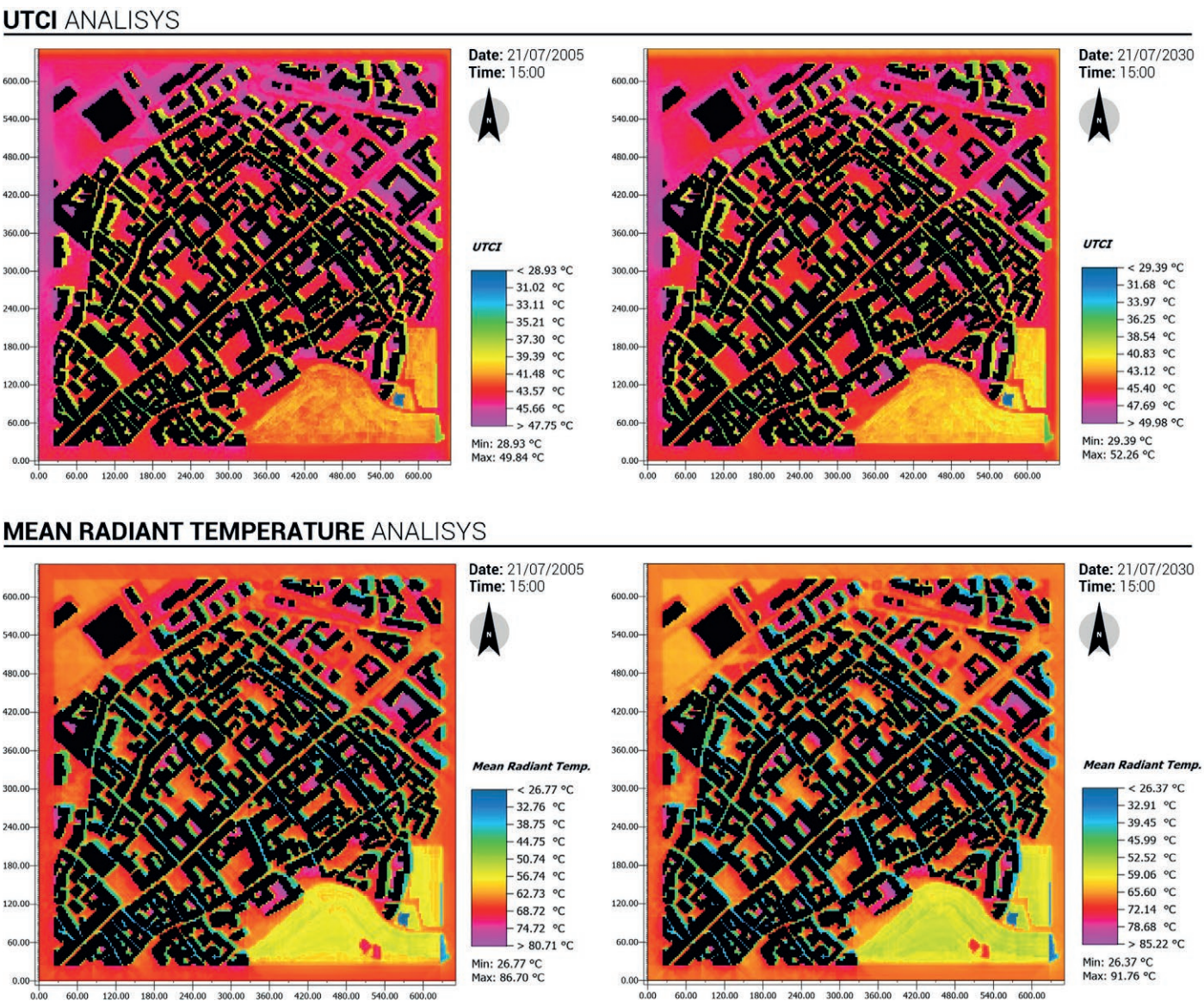
Comparison between simulations conducted on the 600 × 600 m urban portion under study for the years 2005–2030, with reference to UTCI and Mean Radiant Temperature calculated on the identified critical day (21 July at 3:00 pm), Alberto Calenzo

marcati, intensificando fenomeni di degrado quali termoclastismo, cristallizzazione salina e *shock* igrotermici. Ne consegue che la vulnerabilità dei centri storici deve essere interpretata come un fenomeno sistemico e affrontata mediante un approccio integrato, olistico e multi-scalare, così da definire strategie di adattamento e conservazione efficaci a medio-lungo termine.

Conclusioni e sviluppi futuri

La ricerca, condotta all'interno del PE05-CHANGES-SPOKE 07, ha dimostrato come un approccio multi-scalare consenta non solo di descrivere gli impatti dei CC, ma anche di comprendere l'interazione dei rischi alle diverse scale territoriali trasformando dati complessi in matrici leggibili e confrontabili. Inoltre, l'uso di dataset accessibili e di software consolidati, garantisce la replicabilità della metodologia in contesti differenti, adattando i parametri di input alle condizioni climatiche, morfologiche ed edilizie locali. Al fine di rendere il framework multi-scalare operativo nei processi di intervento sul patrimonio culturale, la metodologia è pensata per essere applicata nelle varie fasi attuative del processo progettuale. Nella fase preliminare, lo screening a scala vasta e urbana individua hazard dominanti, esposizione e hotspot di vulnera-

| 04



Tab. 04 | Scenari climatici futuri 2030, 2050 e 2090 (RCP 4.5 e RCP 8.5): analisi comparativa dei dati
Future climate scenarios 2030, 2050, and 2090 (RCP 4.5 and RCP 8.5): comparative data analysis

Tab. 04 |

Hazard	Index	Vulnerability	Exposure
Natural risk – Extreme heating	Period of 3-6 consecutive days (short-lived heat wave) or at least 7 consecutive days (long-lasting heat wave) with average daily temperature at least one standard deviation higher (calculated over the period 1991- 2020) compared to the "normal" average daily temperature. Tx90p Extremely warm days. Percentage of days in a year when the daily maximum temperature is greater than the 90th percentile. A threshold based on the 90th percentile selects only 10% of the warmest days over a 30-year-long reference period. Su30 Strong summer days. Seasonal count when TX (daily maximum) > 35 C. HWI Heat waves index. Seasonal count of days TX >5C above the monthly average for 5+ days. Tx99p Hot days Seasonal N days above average 99th percentile of TX (on basis of 1986–2005) TR Tropical nights Seasonal count of days when TN (daily minimum temperature) > 20 _C.	Anthropogenic and natural features Vegetation Healt Index (VHI)* Vegetation health indicator. Raster image % 0–100 Imperviousness Density (IMD). Level of sealed soil. Raster image % 0–100 Digital Terrain Model (DTM)** Digital map of land elevation distribution Raster image Altimetry expressed in cm 100 - +200 European Settlement Map (ESM). Map of human settlements Raster image. Dichotomous spatial information [0,1]	Number of buildings and monuments that have recognized artistic or historical significance Cultural landscape
Natural risk – Drought	CDD Maximum number of consecutive dry days. The maximum length of a dry spell in a year, that is, the maximum number in a year of consecutive dry days with a daily precipitation smaller than 1 mm/ day. CDD5 5 days of consecutive dry days. Seasonal number of events of >5 consecutive dry days with a daily precipitation smaller than 1 mm/day.	Anthropogenic and natural features Vegetation Healt Index (VHI)* Vegetation health indicator. Raster image % 0–100 Imperviousness Density (IMD). Level of sealed soil. Raster image % 0–100 Digital Terrain Model (DTM)** Digital map of land elevation distribution Raster image Altimetry expressed in cm 100 - +200 European Settlement Map (ESM). Map of human settlements Raster image. Dichotomous spatial information [0,1]	Number of buildings and monuments that have recognized artistic or historical significance Cultural landscape
Anthropic risk-Air Pollution	Air Quality Index (AQI)	Anthropogenic and natural features	Number of buildings and monuments that have recognized artistic or historical significance Cultural landscape

multi-scalar framework operational within intervention processes on cultural heritage, the methodology is conceived to be applied throughout the various implementation phases of the design process. In the preliminary phase, large-scale and urban screening identifies dominant hazards, exposure, and vulnerability hotspots, guiding the selection of priority areas. These outcomes support the definition of adaptation/conservation goals and priorities. In the feasibility and subsequently detailed executive design phases, urban and detailed simulations based on RCP scenarios serve to compare alternatives and calibrate spatial, material, and construction solutions in relation to the most fragile components. In the post-intervention phase, monitoring updates indicators and verifies effectiveness, closing the adaptive and replicable cycle of the database. A key element for future research development concerns the advancement of decision-making support. The research team is currently integrating the produced risk matrices and maps into an MCDA approach in which selected indicators become criteria for establishing priorities, identifying specific intervention areas, comparing different mitigation strategies, and evaluating adaptation scenarios, thereby strengthening transparency and effectiveness in decision processes. In conclusion, the research does not merely provide a descriptive overview of climatic risks, but proposes an innovative operational method that integrates multiple scales, produces comparable matrices, guarantees replicability, and offers tools directly applicable in decision-making processes, thus providing a robust knowledge base for site-specific strategies. However, the current experiment presents limitations, particularly related to the fragmentation and limited availability of high-resolution climatic data for different contexts, as well as the lack of systematic diagnostic analyses on materials and degradation conditions of exposed surfaces. Future methodological developments are oriented toward integration with in situ experimental data, which will allow the refinement of predictive models with greater adherence to local microclimatic specificities. Extending the framework to different territorial contexts will allow to verify its accuracy and replicability, while simultaneously strengthening its capacity to support conservation and climate adaptation strategies grounded in scientific evidence.

bilità, orientando la selezione delle aree prioritarie. Questi esiti alimentano la definizione degli obiettivi e delle priorità di adattamento/conservazione. Nel progetto di fattibilità e poi definitivo-esecutivo, le simulazioni urbane e di dettaglio su scenari RCP servono a confrontare alternative e calibrare soluzioni spaziali, materiche e costruttive sulle componenti più fragili. Nel post-intervento, il monitoraggio aggiorna gli indicatori e verifica l'efficacia, chiudendo il ciclo adattivo e replicabile del database. Un elemento centrale per lo sviluppo futuro della ricerca sarà la messa a punto del supporto ai processi decisionali. Al momento il gruppo di ricerca sta integrando le matrici e le mappe di rischio prodotte con un approccio MCDA in cui gli indicatori selezionati diventano criteri per stabilire priorità, identificando specifiche aree di intervento, confrontare diverse strategie di mitigazione e valutare scenari di adattamento rafforzando la trasparenza e l'efficacia dei processi decisionali. In conclusione, la ricerca non si limita a restituire un quadro descrittivo dei rischi climatici, ma propone un metodo operativo innovativo che prevede di integrare scale diverse, produrre matrici comparabili, garantire replicabilità e fornire strumenti direttamente utilizzabili nei processi decisionali, offrendo una base conoscitiva solida per strategie *site-specific*. La sperimentazione messa in atto presenta ancora dei limiti, legati in particolare alla frammentarietà e alla ridotta disponibilità di dati climatici ad alta risoluzione per i diversi contesti, nonché alla mancanza di analisi diagnostiche sistematiche sui materiali e sulle condizioni di degrado delle superfici esposte. I futuri sviluppi metodologici della ricerca sono orientati verso l'integrazione con dati sperimentali in situ che permetteranno il perfezionamento di modelli previsionali con una maggiore aderenza alle specificità microclimatiche locali. L'estensione del framework a differenti contesti territoriali consentirà di verificarne correttezza e replicabilità, rafforzando al contempo la capacità di supportare strategie di conservazione e adattamento climatico basate su evidenze scientifiche.

ATTRIBUTION, ACKNOWLEDGEMENTS, AND COPYRIGHT

The research was funded within PE05-CHANGES-SPOKE 07 Protection and Conservation of Cultural Heritage against Climate Change, Natural and Anthropogenic Risks, CUP B53C22003780006.

Author Contributions: A.B. – conceptualisation, methodology, review and editing, supervision; A.F. – conceptualisation, methodology, investigation, analysis, writing—original draft preparation; A.R. – GIS analysis; A.C. – microclimatic analyses.

The authors thank Eva Vergara for her support in the microclimatic simulation processes.

ATTRIBUZIONE, RICONOSCIMENTI, DIRITTI D'AUTORE

La ricerca è stata finanziata nell'ambito del PE05-CHANGES-SPOKE 07 Tutela e Conservazione del Patrimonio Culturale contro i Cambiamenti Climatici, i Rischi Naturali e Antropici, CUP B53C22003780006. A.B concettualizzazione, metodologia, review e editing, supervisione; A.F concettualizzazione, metodologia, ricerca, analisi, writing – original draft preparation; A.R. analisi in ambiente GIS; A.C. analisi microclimatiche. Gli autori ringraziano Eva Vergara per il supporto nei processi di simulazione microclimatica.

REFERENCES

Adger, W.N. (2006), "Vulnerability", *Global Environmental Change*, Vol. 16, n. 3, pp. 268–281. Available at: https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006 (Accessed on 11/03/2026).

Arrighi, C., Tanganelli, M., Cristofaro, M.T., Cardinali, V., Marra, A., Castelli, F. and De Stefano, M. (2023), "Multi-risk assessment in a historical city", *Natural Hazards*, Vol. 119, pp.1041–1072. Available at: https://doi.org/10.1007/s11069-021-05125-6 (Accessed on 11/03/2026).

Battisti, A., Figliola, A. and Santarelli, M.L. (2024), "A framework for a hazard taxonomy to support risk assessment of tangible outdoor heritage", *Heritage*, Vol. 7, n. 6, pp.2984–3012. Available at: https://doi.org/10.3390/heritage7060140 (Accessed on 11/03/2026).

Bonazza, A. and Sardella, A. (2023), "Climate change and cultural heritage: Methods and approaches for damage and risk assessment addressed to a practical application", *Heritage*, Vol. 6, n. 4, pp.3578–3589. Available at: https://doi.org/10.3390/heritage6040190 (Accessed on 11/03/2026).

Burton, I., Kates, R.W. and White, G.F. (1993), *The environment as Hazard*, 2nd ed, New York, Guilford Press.

D'Ambrosio, V., Di Martino, F. and Tersigni, E. (2023), "Towards climate resilience of the built environment: A GIS-based framework for the assessment of climate-proof design solutions for buildings", *Buildings*, Vol. 13, n. 7, pp.1658. Available at: https://doi.org/10.3390/buildings13071658 (Accessed on 11/03/2026).

Huerto-Cardenas, H.E., Aste, N., Del Pero, C., Della Torre, S. and Leonforte, F. (2021), "Effects of climate change on the future of heritage buildings: Case study and applied methodology", *Climate*, Vol. 9, n. 8, pp.132. Available at: https://doi.org/10.3390/cli9080132 (Accessed on 11/03/2026).

IPCC (2012), *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation*, Cambridge, Cambridge University Press.

Koutsanitis, S., Sinou, M., Kanetaki, Z., Tousi, E. and Varelidis, G. (2025), "Thermal performance investigation in historical urban neighborhoods using ENVI-met simulation software", *Land*, Vol. 14, n. 2, pp.284. Available at: https://doi.org/10.3390/land14020284 (Accessed on 11/03/2026).

Lazaridis, V. and Latinopoulos, D. (2022), "Estimating urban vulnerability to flood and heat hazards: A case study in the municipality of Thessaloniki, Greece", *European Spatial Research and Policy*, Vol. 29, n. 2, pp.309–340. Available at: https://doi.org/10.18778/1231-1952.29.2.16 (Accessed on 11/03/2026).

Rezaie, P., Lopez-Cabeza, V.P., Sola-Caraballo, J. and Galan-Marin, C. (2025), "Cooling heritage scenarios: Transforming historic squares for thermal comfort", *Buildings*, Vol. 15, n. 4, pp.564. Available at: https://doi.org/10.3390/buildings15040564 (Accessed on 11/03/2026).

Sabbioni, C., Brimblecombe, P. and Cassar, M. (2010), *The Atlas of Climate Change Impact on European Cultural Heritage: Scientific Analysis and Management Strategies*, London, Anthem Press.

Strumenti innovativi per la resilienza urbana e la salute pubblica nelle aree interne

Just Accepted: November 28, 2025 **Published:** July 29, 2026

Paola Gallo, https://orcid.org/0000-0003-4015-5317 paola.gallo@unifi.it
Alessandra Donato, https://orcid.org/0000-0002-4563-5339 alessandra.donato@unifi.it
Elisa Caruso, https://orcid.org/0000-0002-7949-7640 elisa.caruso@unifi.it
Valeria Lingua, https://orcid.org/0009-0005-4240-370X valeria.lingua@unifi.it
Dipartimento di Architettura, Università degli studi di Firenze, Italia

Abstract. Il contributo si inserisce nel quadro del programma di ricerca dello Spoke 10 "Population Health" del progetto PNRR THE – Tuscany Health Ecosystem, con l'obiettivo di sviluppare modelli progettuali integrati per la mitigazione degli stress ambientali che impattano negativamente sulla salute umana, con attenzione ai territori fragili e alla popolazione vulnerabile. In linea con le strategie europee (Green Deal, Agenda 2030), il progetto adotta una visione intersettoriale dei determinanti ambientali della salute e integra approcci partecipativi per accrescere la percezione del rischio e il coinvolgimento attivo delle comunità nei processi di analisi e prevenzione, promuovendo consapevolezza e resilienza socio-ambientale.

Parole chiave: Salute ambientale; Città resilienti; Health-oriented design; Prossimità sanitaria; Comfort microclimatico.

Introduzione

Il riconoscimento dell'ambiente costruito come determinante della salute pubblica – in grado di mitigare o, al contrario, amplificare fattori di rischio associati a inquinamento atmosferico, isole di calore urbane, vulnerabilità sociale e disconnessione territoriale (Barton and Grant, 2006) – ha favorito l'affermazione di approcci integrati orientati alla promozione di ambienti urbani sani, inclusivi e resilienti (WHO, 2016; Frumkin *et al*., 2022). In questa prospettiva, la transizione ecologica e sanitaria delle città si sviluppa attraverso il paradigma della urban health, che integra giustizia ambientale, equità nei servizi e mitigazione degli impatti climatici. Di conseguenza, gli spazi pubblici aperti e naturali assumono un ruolo strategico nei processi di adattamento urbano e rigenerazione territoriale (UN-Habitat, 2025). La salute urbana si configura così come asse trasversale delle nuove agende territoriali, orientate ad affrontare in modo sistemico le sfide poste dal cambiamento climatico, dall'invecchiamento demografico e dalle disuguaglianze sanitarie (WHO, 2022).

In coerenza con il FESR 2021–2027 (OP5) e la Strategia Nazionale Aree Interne SNAI, la ricerca mira a promuovere uno sviluppo urbano e territoriale integrato e inclusivo, orientato alla rigenerazione di spazi pubblici climaticamente adattivi, sicuri e accessibili, valorizzando al contempo il coinvolgimento attivo delle comunità locali.

Il lavoro si inserisce nello Spoke 10 "Population Health" del progetto PNRR THE – Tuscany Health Ecosystem, che affronta in chiave interdisciplinare i legami tra salute, qualità ambientale e trasformazione urbana, con l'obiettivo di stimolare la rigenerazione delle micro-aree urbane interne caratterizzate da elevata vulnerabilità. In questo ambito, il gruppo di ricerca dell'Università di Firenze ha istituito l'Health Community HUB (HCH), centro di coordinamento di una rete di Health Community Lab (HCL), dispositivi di co-creazione ispirati ai Living Lab. Ancorati al paradigma della quadrupla elica (Carayannis *et al*., 2012), gli Health Community Lab (HCL) costituiscono dispositivi di innovazione territoriale, attivati attraverso processi partecipativi e collaborativi. In tale quadro, l'HCL "Riorganizzazione dei servizi sociosanitari nelle aree interne" configura un laboratorio sperimentale per l'applicazione di una metodologia integrata finalizzata alla progettazione di quartieri sani e resilienti alla crisi climatica.

Innovative tools for urban resilience and public health in inner areas

Abstract. This paper fits within the framework of the Spoke 10 "Population Health" research programme of the NRRP "THE" – Tuscany Health Ecosystem project. The aim is to develop integrated design models to mitigate environmental stresses that negatively impact human health, with a focus on fragile territories and vulnerable populations. In line with European strategies (Green Deal, Agenda 2030), the project takes a cross-sectoral view of the environmental determinants of health by integrating participatory approaches to increase risk perception and the active involvement of communities in analysis and prevention processes by promoting socio-environmental awareness and resilience.

Keywords: Environmental health; Resilient cities; Health-oriented design; Health proximity; Microclimatic comfort.

Introduction

Recognition of the built environment as a determinant of public health – capable of either mitigating or, conversely, amplifying risk factors associated with air pollution, urban heat islands, social vulnerability and territorial disconnection (Barton and Grant, 2006) – has fostered the emergence of integrated approaches geared towards promoting healthy, inclusive and resilient urban environments (WHO, 2016; Frumkin *et al*., 2022). In this perspective, the ecological and health transition of cities is developed through the urban health paradigm, which integrates environmental justice, equity in services, and the mitigation of climate impacts. As a result, open and natural public spaces take on a strategic role in urban adaptation and territorial regeneration processes (UN-Habitat, 2025). Urban health thereby becomes a transversal axis of the new territorial agendas, geared towards systemically tackling the challenges posed by climate change, demographic ageing and health inequalities (WHO, 2022).

In line with the ERDF 2021-2027 (OP5) and the National Strategy for Inner Areas SNAI, the research aims to promote integrated and inclusive urban and territorial development geared towards the regeneration of climate-adaptive, safe and accessible public spaces, while enhancing the active involvement of local communities.

The work is part of Spoke 10 "Population Health" of the NRRP "THE" (Tuscany Health Ecosystem) project which, with an interdisciplinary approach, addresses the links between health, environmental quality and urban transformation. Its aim is to stimulate the regeneration of highly vulnerable inner urban micro-areas.

ISSN online: 2239-0243 | © 2025 Author(s) | http://www.fupress.com/techne | DOI: 10.36253/techne-18616
Open access, peer-reviewed article published by Firenze University Press (https://www.fupress.com) and distributed, except where otherwise noted, under the terms of the CC BY 4.0 License for content and CC0 1.0 Universal for metadata

La ricerca adotta come quadro teorico-operativo l'Healthy Neighbourhoods Hub (HNH) (Macchi *et al*., 2024), che orienta l'indagine urbanistica secondo un approccio place-based, incentrato su prossimità, accessibilità e resilienza. In tale prospettiva, particolare attenzione è rivolta alle Case di Comunità, intese non solo come presìdi sanitari decentrati, ma come nodi territoriali capaci di attivare processi rigenerativi nei contesti più fragili attraverso strategie tecnologico-progettuali mirate: dall'integrazione dei servizi di prossimità al miglioramento del comfort microclimatico, dal potenziamento delle infrastrutture verdi alla valorizzazione della biodiversità urbana, fino alla promozione della partecipazione attiva delle comunità locali.
In linea con questa visione, la ricerca mira a definire una metodologia operativa fondata su un set integrato di strumenti qualitativi e quantitativi (mappature, GIS, rilievi microclimatici, questionari percettivi, simulazioni digitali) per la progettazione di spazi urbani rigenerativi, climaticamente adattivi e socialmente inclusivi, promuovendo un coinvolgimento attivo e consapevole della cittadinanza.
In un quadro di riferimento più ampio, la ricerca si confronta con esperienze europee che hanno affrontato il tema della salute urbana e della partecipazione come leve strategiche per la resilienza. In ambito europeo, il programma URBACT Health&Greenspace (URBACT, 2023) ha mostrato come la qualità e l'accessibilità del verde urbano influenzino il benessere fisico e mentale, promuovendo processi di co-progettazione e partecipazione civica. L'iniziativa WHO Healthy Cities, attiva dal 1987 in oltre cento città europee, ha consolidato il principio della governance integrata della salute, basata sulla collaborazione tra politiche urbanistiche, sociali e sanitarie per ridurre le disuguaglianze (WHO, 2019). I progetti Horizon 2020 – ICARUS (Linares *et al*., 2020) e Urban GreenUP (Alavarez *et al*., 2021) hanno infine rafforzato la prospettiva della co-produzione di conoscenza, integrando monitoraggi scientifici, modelli predittivi e partecipazione dei cittadini per migliorare la qualità dell'aria, il comfort microclimatico e la salute pubblica. Rispetto a tali esperienze, il modello sperimentale proposto nello Spoke 10 del progetto PNRR THE – Tuscany Health Ecosystem introduce un elemento di originalità nella connessione diretta tra public engagement e prossimità sanitaria, ponendo le strutture sanitarie come nodi territoriali di una rete di "spazi di cura diffusa". In questa prospettiva, la metodologia Health Community Lab (HCL) non si limita a coinvolgere la cittadinanza in attività di consultazione, ma costruisce processi di co-progettazione continuativa capaci di integrare diagnosi ambientale, progettazione urbana e promozione della salute, rafforzando la percezione condivisa del rischio e la resilienza collettiva.

Il ruolo delle città come strumento di cura

Oggi le città si trovano a fronteggiare rischi antropici e ambientali sempre più complessi: il cambiamento climatico intensifica ondate di calore e precipitazioni estreme, aggravando dissesto idrogeologico e vulnerabilità infrastrutturali; l'inquinamento atmosferico e del suolo incide sulla salute pubblica; la perdita di biodiversità compromette le funzioni regolative degli ecosistemi, riducendo la resilienza urbana (IPCC, 2022; WHO, 2022).
Numerose evidenze scientifiche mostrano come tali fenomeni agiscano in modo sinergico e cumulativo, generando impatti crescenti sulla salute delle popolazioni e sull'equilibrio socio-economico. Negli ultimi decenni, eventi estremi un tempo ec-

In this context, the University of Florence research group set up the Health Community HUB (HCH), the coordination centre of a network of Health Community Labs (HCL), and co-creation devices inspired by Living Labs. Anchored in the quadruple helix paradigm (Carayannis *et al*., 2012), Health Community Labs (HCL) are tantamount to territorial innovation devices, activated through participatory and collaborative processes. Within this framework, the "Reorganisation of socio-health services in inner areas" HCL amounts to an experimental laboratory for the application of an integrated methodology for designing healthy and climate-resilient neighbourhoods.
As its theoretical-operational framework, the research adopts the Healthy Neighbourhoods Hub (HNH) (Macchi *et al*., 2024), which takes a place-based approach to the urban planning investigation, focusing on proximity, accessibility and resilience. In this perspective, particular attention is paid to Community Homes, understood not only as decentralised health facilities, but also as territorial hubs capable of activating regenerative processes in the most fragile contexts through targeted technological and design strategies, spanning the integration of proximity services, the improvement of microclimatic comfort, the strengthening of green infrastructures, the enhancement of urban biodiversity, and the promotion of active participation by local communities.
In line with this vision, the research seeks to define an operational methodology based on an integrated set of qualitative and quantitative tools (mapping, GIS, microclimatic surveys, perception questionnaires, digital simulations) to design regenerative, climatically adaptive and socially inclusive urban spaces, promoting the active and informed involvement of citizens.
In a broader reference framework, the research addresses European experiences that have tackled urban health and participation as strategic levers for resilience. In the European context, the URBACT Health&Greenspace programme (URBACT, 2023) has shown how the quality and accessibility of urban green space influences physical and mental wellbeing, promoting co-design and civic participation processes. The WHO Healthy Cities initiative, active since 1987 in over one hundred European cities, has consolidated the principle of integrated health governance, based on collaboration between urban, social and health policies to reduce inequalities (WHO, 2019). Finally, the Horizon 2020 – ICARUS (Linares *et al*., 2020) and Urban GreenUP (Alavarez *et al*., 2021) projects reinforced the perspective of knowledge co-production, integrating scientific monitoring, predictive modelling, and citizen participation to improve air quality, microclimate comfort and public health. With respect to these experiences, the experimental model proposed in Spoke 10 of the NRRP "THE" (Tuscany Health Ecosystem) project introduces an element of originality in the direct connection between public engagement and health proximity by establishing healthcare facilities as territorial hubs of a network of "widespread care spaces". In this perspective, the Health Community Lab (HCL) methodology does not merely involve citizens in consultation activities, but devises ongoing co-design processes capable of

cezionali – definiti *hazards* – si verificano con sempre maggiore frequenza (Losasso *et al*., 2015). Tra questi, le ondate di calore (*heat waves*) rappresentano una delle minacce più rilevanti per la salute pubblica. Esse sono comunemente definite come periodi prolungati – generalmente di almeno 3-5 giorni – in cui le temperature massime superano in modo significativo le medie stagionali di riferimento (spesso oltre i +5 °C rispetto alla climatologia trentennale), talvolta in combinazione con elevata umidità relativa (IPCC, 2022; WMO, 2015).

A questo fenomeno si intreccia l'Urban Heat Island (UHI), fenomeno causato dalla combinazione di fattori quali morfologie urbane compatte, ampie superfici impermeabili a bassa riflettanza, accumulo di calore antropico e scarsa ventilazione naturale. L'UHI intensifica le condizioni di disagio termico, soprattutto durante le notti estive, aggravando la vulnerabilità di anziani e di soggetti fragili. Stretta è la connessione con la perdita di naturalità, dovuta alla riduzione della copertura vegetale e alla frammentazione ecologica. La letteratura internazionale (Gill *et al*., 2007; Bowler *et al*., 2010) conferma come il deficit di infrastrutture verdi sia correlato all'intensità e alla persistenza delle UHI e alla riduzione del comfort outdoor. L'impermeabilizzazione dei suoli riduce drasticamente i servizi ecosistemici di regolazione climatica – ombreggiamento, evapotraspirazione e drenaggio – amplificando i rischi microclimatici.

La qualità microclimatica degli spazi pubblici influenza direttamente l'accessibilità reale ai servizi: in assenza di condizioni di comfort termico e di sicurezza, la fruizione quotidiana degli ambienti esterni può risultare limitata, compromettendo l'uso effettivo dei servizi sanitari e di prossimità, soprattutto per le popolazioni più vulnerabili. Proprio per rispondere a queste criticità, l'*health-oriented design* propone un approccio progettuale che considera la città come "strumento di cura": uno spazio che mitiga le esposizioni ambientali, sostiene comportamenti salutari e riduce le disuguaglianze, basandosi su evidenze scientifiche e processi partecipativi.

Il contesto italiano offre un terreno significativo per sperimentare tali pratiche. La Missione 6 del PNRR promuove la prossimità sanitaria attraverso l'istituzione delle Case della Comunità e delle Centrali Operative Territoriali (COT), concepite come nodi di una rete diffusa di "spazi di salute" quotidiani, accessibili a piedi o in bicicletta. Tuttavia, la loro efficacia dipende anche dalla qualità degli ambienti esterni: senza ombreggiamento, continuità ecologica e condizioni di inclusività, l'accessibilità rischia di rimanere puramente formale, compromettendo gli obiettivi di equità sociale.

Il tema diventa ancora più urgente nelle aree interne, caratterizzate da rarefazione di servizi, mobilità selettiva, patrimonio edilizio poco adattabile e deficit di infrastrutture verdi. In questi contesti fragili, intervenire con un approccio di *urban health* significa adottare metodologie scalabili e a basso costo, capaci di supportare diagnosi e progettazione adattativa, rafforzando resilienza climatica, prossimità sanitaria e benessere collettivo.

Per affrontare queste sfide è fondamentale sviluppare strumenti e metodologie in grado di diagnosticare le condizioni urbane e guidare interventi mirati, combinando analisi scientifiche e partecipazione comunitaria. In questo contesto, la ricerca esplora come le città delle aree interne possano diventare "strumenti di cura": spazi che riducono i rischi e promuovono salute e benessere attraverso scelte progettuali consapevoli e processi di co-produzione con le comunità locali.

integrating environmental diagnosis, urban design and health promotion, strengthening shared risk perception and collective resilience.

The role of cities as instruments of care

Today, cities face increasingly complex anthropogenic and environmental risks. Indeed, climate change intensifies heat waves and extreme rainfall, exacerbating hydrogeological instability and infrastructural vulnerabilities. Air and soil pollution affect public health, and biodiversity loss impairs the regulatory functions of ecosystems, thus reducing urban resilience (IPCC, 2022; WHO, 2022).

There is much scientific evidence showing how these phenomena act in a synergistic and cumulative way, increasing the impact on both the health of populations and the socio-economic balance. What were once exceptional extreme events – termed hazards – have occurred increasingly often in recent decades (Losasso *et al*., 2015). Among them, heat waves are one of the most significant threats to public health. They are commonly defined as prolonged periods – usually of at least 3-5 days – in which maximum temperatures significantly exceed the reference seasonal averages (often more than +5 °C above the 30-year climatology), sometimes combined with high relative humidity (IPCC, 2022; WMO, 2015).

Intertwined with this phenomenon is the Urban Heat Island (UHI) caused by a combination of factors such as compact urban morphologies, large impermeable surfaces with low reflectance, anthropogenic heat accumulation, and poor natural ventilation. The UHI intensifies thermal discomfort conditions, especially on summer nights, worsening the vulnerability of elderly and frail individuals. This is closely connected to the loss of naturalness due to reduced vegetation cover and ecological fragmentation. International literature (Gill *et al*., 2007; Bowler *et al*., 2010) confirms how the deficit of green infrastructures is correlated with the intensity and persistence of UHIs and reduced outdoor comfort. Soil sealing drastically reduces the ecosystem services of climate regulation – shading, evapotranspiration and drainage – amplifying microclimate risks.

The microclimatic quality of public spaces directly influences the actual accessibility of services. In the absence of thermal comfort and safety conditions, the daily use of outdoor environments may be limited, impairing the effective use of health and proximity services, especially for the most vulnerable populations. In order to respond to these critical issues, health-oriented design proposes an approach that considers the city an "instrument of care", a space that mitigates environmental exposure, supports healthy behaviour, and reduces inequalities, based on scientific evidence and participatory processes.

The Italian context offers significant terrain for experimenting with such practices. Mission 6 of the NRRP promotes health proximity by establishing Community Houses and Territorial Operations Centres (COTs), conceived as the hubs of a widespread network of everyday "health spaces" accessible either on foot or by bicycle. However, their effectiveness also depends on the quality of the outdoor environments. Indeed, without shade, ecological continuity and inclusive

Impostazione metodologica e strumenti di ricerca

Lo studio si è articolato attraverso un processo integrato e multiscalare, finalizzato a investigare e trasformare i contesti urbani secondo criteri di qualità ambientale orientata alla salute, inclusività sociale e adattamento climatico. L'approccio alla conoscenza del rischio si configura come un'attività sistemica e multifasica, fondamentale per identificare, quantificare, valutare, misurare e monitorare i rischi di natura antropica, naturale e ambientale. L'impostazione metodologica prevede quattro fasi operative, concepite per integrare l'analisi urbanistica, tecnologica e ambientale con la dimensione socio-partecipativa e co-progettuale.

- *Raccolta e analisi dei dati conoscitivi.* Questa fase preliminare è finalizzata alla costruzione di un quadro diagnostico articolato su due livelli: territoriale e urbano. L'analisi si concentra da un lato sulla verifica del grado di integrazione dei temi della salute e del benessere nei principali strumenti di pianificazione territoriale e urbanistica; dall'altro, sulla valutazione delle condizioni di comfort ambientale negli spazi pubblici aperti, attraverso l'elaborazione di indicatori quantitativi e misurazioni relative al microclima urbano.
- *Elaborazione cartografica.* Sulla base dei dati raccolti, vengono prodotti diversi set di elaborazioni cartografiche tematiche, che restituiscono in forma visuale i principali risultati dell'indagine. Le mappe includono: (1) la rappresentazione delle dinamiche di prossimità e accessibilità a servizi essenziali e spazi di salute; (2) le carte tematiche derivate dalle analisi sul campo, strutturate attorno ai sette ambiti del modello HNH; (3) le mappe di comfort microclimatico *outdoor*, realizzate tramite rilievi strumentali e simulazioni ambientali.
- *Coinvolgimento attivo degli attori.* Elemento qualificante dell'approccio è la dimensione partecipativa, che si articola in due momenti chiave: nella fase iniziale, mediante la somministrazione di questionari percettivi rivolti alla popolazione, utili per raccogliere dati soggettivi sul rapporto tra spazio urbano e benessere; nella fase successiva, attraverso laboratori di *co-design* e *visioning* con *stakeholder* istituzionali e cittadinanza, finalizzati alla costruzione condivisa di visioni strategiche e scenari di intervento.
- *Definizione di indirizzi strategici.* La fase conclusiva del processo consiste nella formulazione di linee guida metaprogettuali orientate alla rigenerazione degli spazi pubblici di prossimità e al miglioramento del microclima urbano. Le linee guida derivano dall'integrazione tra evidenze analitiche, percezioni emerse dall'indagine partecipativa e prefigurazioni progettuali sviluppate nei laboratori.

La sperimentazione è stata applicata a due casi studio – Bibbiena (AR) e Borgo San Lorenzo (FI) – selezionati per le loro condizioni di vulnerabilità ambientale e sociale, rappresentative delle criticità e delle potenzialità delle aree interne toscane. In entrambi i contesti, la metodologia ha consentito di integrare dati climatici, ambientali, urbanistici e percettivi in un quadro diagnostico unitario, utile a orientare strategie di adattamento e rigenerazione urbana e a testare la trasferibilità del modello HCL in differenti condizioni territoriali. Il confronto tra i due casi studio ha evidenziato la flessibilità dell'approccio: a Bibbiena l'attenzione si è concentrata sulla mitigazione delle isole di calore e sulla riqualificazione ecologica degli spazi pubblici,

conditions, there is a risk of accessibility remaining purely formal, undermining social equity objectives.

The issue becomes even more urgent in inner areas, which present scarce services, selective mobility, a poorly adaptable building stock, and a lack of green infrastructure. In these fragile contexts, intervening with an urban health approach means adopting scalable, low-cost methodologies capable of supporting diagnosis and adaptive design, and of strengthening climate resilience, health proximity and collective well-being.

To address these challenges, it is essential to develop tools and methodologies capable of diagnosing urban conditions and guiding targeted interventions, combining scientific analysis and community participation. In this context, the research explores how cities in inner areas can become "instruments of care", spaces that reduce risks and promote health and well-being through informed design choices and processes of co-production with local communities.

Methodological approach and research tools.

The study was undertaken following an integrated, multi-scalar process aimed at investigating and transforming urban contexts according to the criteria of health-oriented environmental quality, social inclusiveness, and climate adaptation. The approach to risk knowledge is a systemic and multiphasic activity that is essential for identifying, quantifying, assessing, measuring and monitoring anthropogenic, natural and environmental risks. The methodological approach includes four operational phases, designed to integrate urban, technological and environmental analysis with the socio-participative and co-design dimension.

- *Collection and analysis of cognitive data.* This preliminary phase aims to construct an articulated diagnostic framework on two levels, precisely territorial and urban. The analysis focuses on verifying the degree of integration of health and wellbeing issues in the main territorial and urban planning tools, as well as on the assessment of environmental comfort conditions in open public spaces through the elaboration of quantitative indicators and measurements related to the urban microclimate.
- *Cartographic processing.* Various sets of thematic mapping processes are produced on the basis of the collected data. They show the main results of the survey in visual form. The maps include: (1) a representation of the dynamics of proximity and accessibility to essential services and health spaces; (2) thematic maps derived from field analyses, structured around the seven spheres of the HNH model; (3) outdoor microclimatic comfort maps, created through instrumental surveys and environmental simulations.
- *Active involvement of actors.* The qualifying element of the approach is the participatory aspect, which is broken down into two key steps. The initial phase, involving administering perception questionnaires addressed to the population, is useful for collecting subjective data on the relationship between urban space and wellbeing. The subsequent phase, involving co-design and visioning workshops with insti-

01 | Sopralluogo esplorativo su My maps secondo il modello HNH
Exploratory inspection on My maps according to the HNH model

mentre a Borgo San Lorenzo sul rafforzamento della mobilità dolce e sull'accessibilità ai servizi sociosanitari di prossimità. Il presente contributo si approfondisce il caso di Borgo San Lorenzo, rinviando la lettura comparata dei due contesti a future pubblicazioni.

Il caso studio di Borgo San Lorenzo

Borgo San Lorenzo, principale centro della Val di Sieve, con caratteristiche tipiche delle aree interne appenniniche, si distingue per alcune peculiarità territoriali e socio-insediative che hanno reso il processo di indagine e co-progettazione particolarmente significativo, offrendo spunti operativi di interesse trasferibile anche ad altri contesti fragili.

La prima fase della ricerca ha delineato un quadro conoscitivo multiscalare per valutare il grado di integrazione della salute negli strumenti di pianificazione territoriale a livello regionale, metropolitano, intercomunale e comunale[1].

L'analisi congiunta dei dati qualitativi e quantitativi degli strumenti pianificatori ha permesso la realizzazione di mappe tematiche che rappresentano rispettivamente la struttura ecologica e il sistema insediativo a livello metropolitano e comunale. Le mappe dei caratteri ambientali evidenziano boschi, corridoi ecologici, biodiversità e infrastrutture per la mobilità dolce, mentre quelle dei caratteri urbani aggregano dati su servizi, infrastrutture e spazi collettivi, restituendo una rete policentrica di prossimità socio-sanitaria, educativa e ricreativa.

A seguito del sopralluogo sono state elaborate sette mappe tematiche, ciascuna riferita a un ambito del modello HNH, per rappresentare l'area entro 15 minuti a piedi dalla Casa della Comunità, nodo centrale della rete dei servizi. Le mappe, basate su dati secondari, rilievi e laboratori partecipativi, offrono una lettura georeferenziata di risorse, criticità e potenzialità del quartiere, supportando la rigenerazione urbana orientata alla salute attraverso una visione integrata utile al co-design e alla pianificazione intersettoriale (Fig. 1). Nel laboratorio di co-creazione, dedicato al tema della mobilità e degli spazi pubblici, i partecipanti hanno lavorato con un approccio collaborativo e di co-progettazione, utilizzando la carta tecnica regionale in scala 1:2000 dell'area. L'analisi condivisa ha evidenziato una buona presenza di spazi pubblici e nodi urbani di qualità a Borgo San Lorenzo, sebbene discontinui e non integrati. La criticità principale riguarda la mobilità: congestione viaria, insicurezza ciclabile, barriere architettoniche e scarsa accessibilità alla futura Casa della Comunità. Le strategie proposte mirano a migliorare accessibilità e inclusione attraverso interventi su sosta, mobilità dolce, trasporto pubblico e servizi sociosanitari di prossimità (Fig. 2).

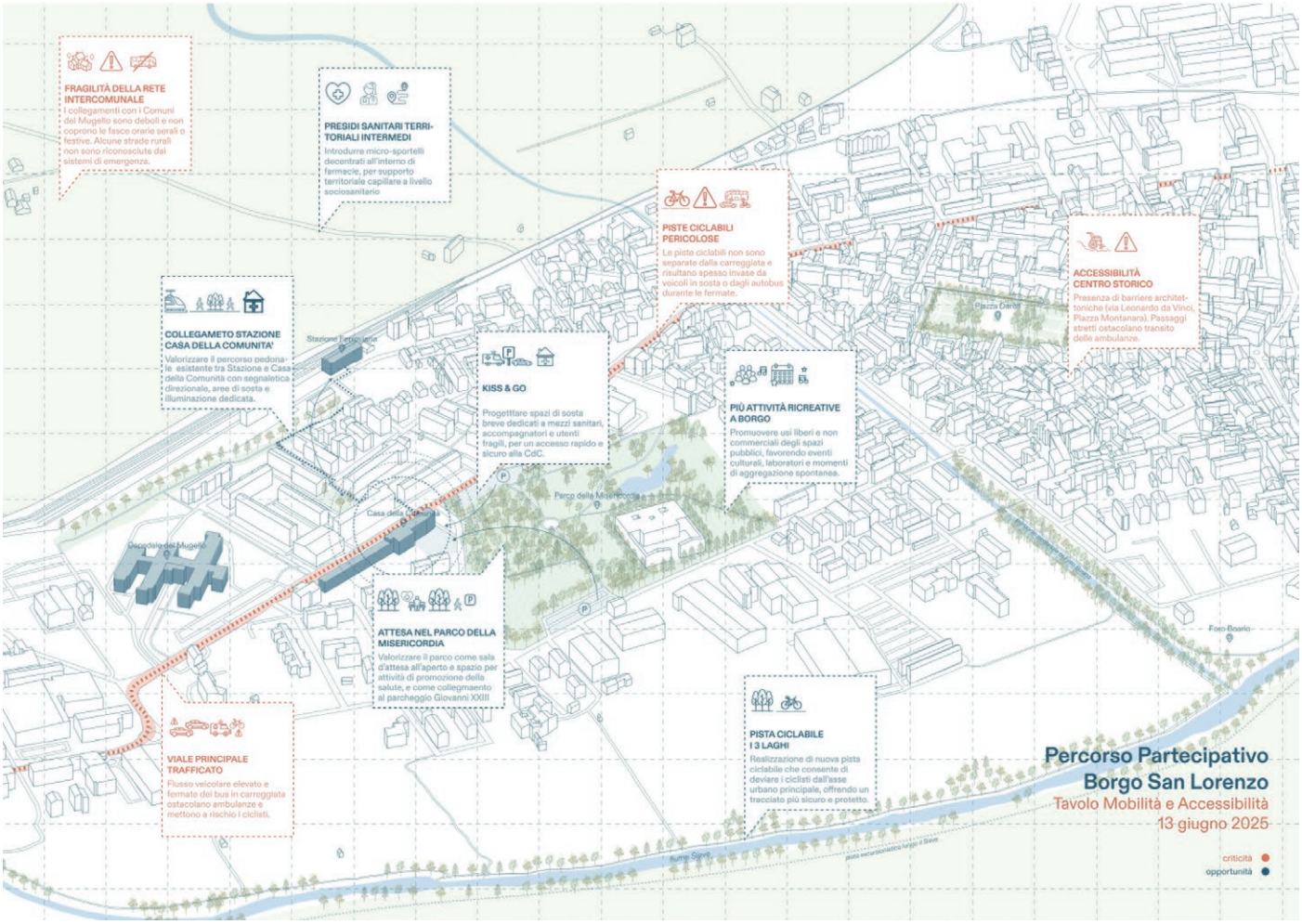
Al fine di documentare lo stato degli spazi urbani pubblici in merito alle criticità microclimatiche e ambientali, con particolare attenzione ai percorsi pedonali di accesso ai servizi sa-



| 01

02 | Sintesi dei risultati del tavolo 1 - restituzione grafica
Summary of Table 1 results - graphic rendering

02 |



tutional stakeholders and citizenry, aims at the shared construction of strategic visions and intervention scenarios.
– *Defining strategic guidelines.* The final phase of the process consists of formulating meta-design guidelines for the regeneration of local public spaces, and of improving the urban microclimate. The guidelines derive from the integration of analytical evidence, perceptions emerging from the participatory survey, and design prefigurations developed during the workshops.

The experimentation was applied to two case studies – Bibbiena (AR) and Borgo San Lorenzo (FI) – selected for their environmental and social vulnerability conditions. They are representative of the critical issues and potential of Tuscany's inner areas. In both contexts, the methodology enabled the integration of climatic, environmental, urban planning and perceptual data into a unified diagnostic framework, which was useful for guiding adaptation and urban regeneration strategies, and for testing the transferability of the HCL model in different territorial conditions. A comparison between the two case studies highlighted the flexibility of the approach. In Bibbiena, focus was on heat island mitigation, and on the ecological redevelopment of public spaces, while in Borgo San Lorenzo it was on strengthening soft mobility and accessibility to socio-health proximity services. This contribution examines the case of Borgo San Lorenzo, postponing a comparative reading of the two contexts to future publications.

The case study of Borgo San Lorenzo

Borgo San Lorenzo, the main centre of the Sieve Valley, with the typical characteristics of inner Apennine areas, presents certain distinct territorial and socio-settlement features that made the survey and co-designing process particularly significant, offering operational insights of interest that can also be transferred to other fragile contexts. The first phase of the research outlined a multi-scalar cognitive framework to assess the degree of health integration in territorial planning instruments at regional, metropolitan, inter-municipal and municipal level[1].

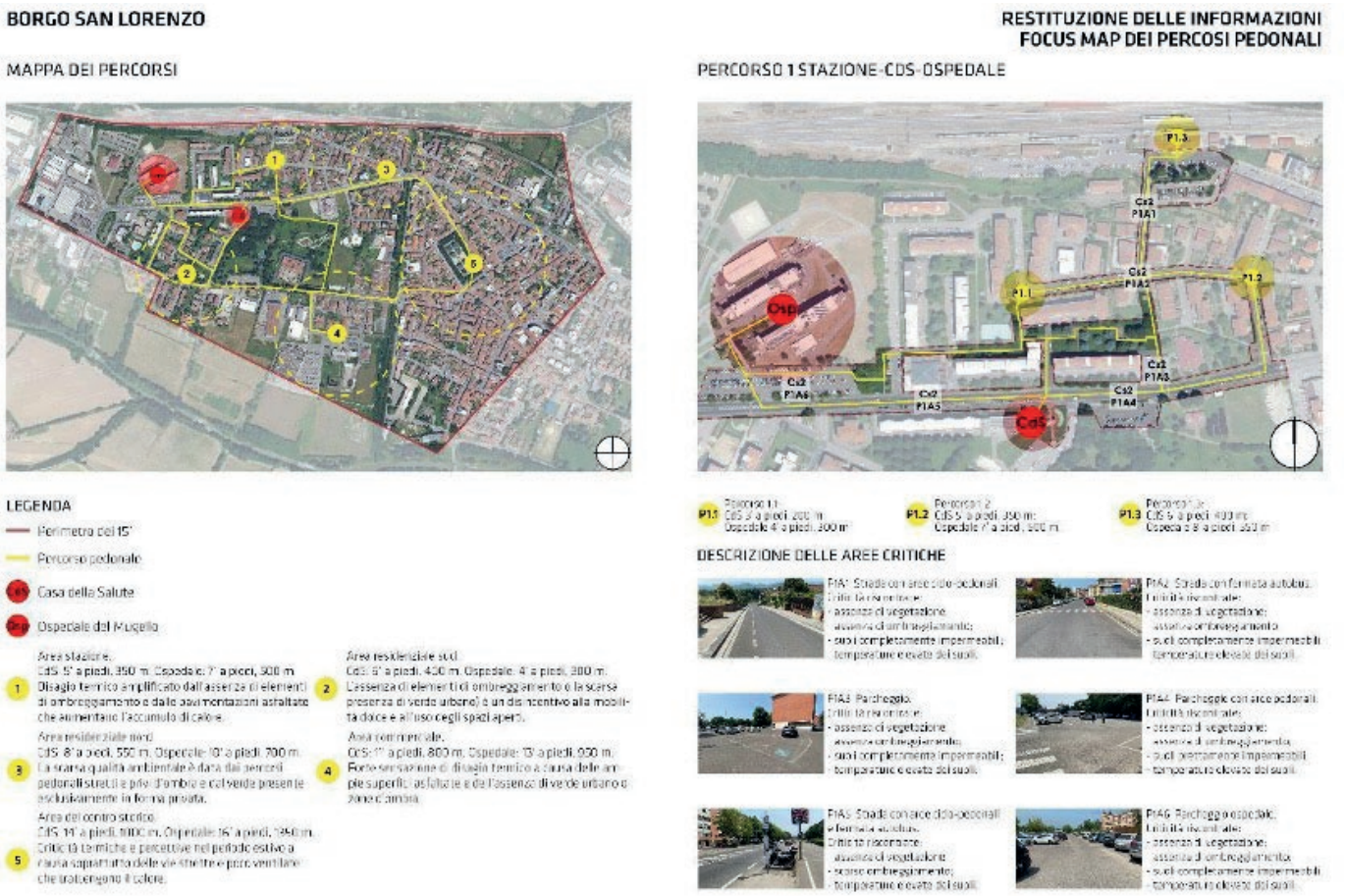
The joint analysis of the qualitative and quantitative data from planning instruments made it possible to produce thematic maps representing, respectively, the ecological structure and the settlement system at metropolitan and municipal level. The environmental maps highlight forests, ecological corridors, biodiversity and soft mobility infrastructures, while the urban ones aggregate data on services, infrastructures and collective spaces, rendering a polycentric network of socio-health, educational and recreational proximity.

Following the survey, seven thematic maps, each referring to an area of the HNH model, were drawn up to represent the area within a 15-minute walk of the Community House, the central hub of the service network. The maps, based on secondary data, surveys and participatory workshops, offer a georeferenced reading of the neighbourhood's resources, critical issues and potential, supporting health-oriented urban regeneration through an integrated vision that is useful for co-design and intersectoral planning (Fig.

nitari territoriali (Casa della Salute e Ospedale del Mugello), è stata adottata una strategia operativa basata sull'integrazione di osservazioni qualitative, rilievi quantitativi e simulazioni predittive. L'approccio ha permesso di evidenziare i fattori determinanti del discomfort microclimatico e di delineare linee di adattamento finalizzate al miglioramento del comfort outdoor e alla resilienza climatica degli spazi pubblici.

1. Osservazioni qualitative e indagine percettiva
La prima fase ha previsto sopralluoghi in differenti condizioni stagionali e orarie, con particolare attenzione alle ore di massimo irraggiamento solare, per osservare direttamente le caratteristiche morfologiche e d'uso degli spazi urbani - ombreggiamento naturale e artificiale, continuità e densità del verde, materiali e colori delle superfici, presenza di acqua e ostacoli alla ventilazione -. Le osservazioni sono state integrate da documentazione fotografica e da una mappatura dei percorsi pedonali principali, elaborata con strumenti digitali e GIS. Parallelamente è stata condotta un'indagine esplorativa tramite questionari rivolti ai cittadini, finalizzata a rilevare la percezione del comfort outdoor e del rischio termico lungo i principali percorsi di accesso ai servizi. Questo passaggio ha consentito di: (a) localizzare i "punti caldi" percepiti dalla popolazione; (b) confrontare le percezioni soggettive con le misure fisiche; (c) selezionare micro-aree prioritarie da approfondire nelle fasi successive. Le risposte hanno evidenziato condizioni diffuse di disagio termico, in particolare nei tratti non dotati di vegetazione o ombreggiamento.

2. Rilievi microclimatici e indicatori eco-sistemici
Le micro-aree identificate come critiche sono state oggetto di approfondimenti tramite *focus maps*, strumenti cartografici tematici che hanno permesso di analizzare due aspetti principali: l'isola di calore urbana e la perdita di naturalità (Fig. 3).
Per la valutazione dell'UHI, è stato adottato l'indicatore della temperatura superficiale. I rilievi strumentali, effettuati trami-



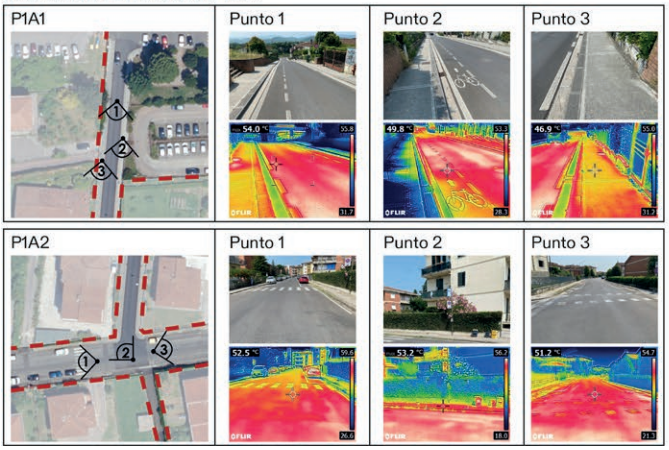
te termografia a infrarossi (IR), sono stati condotti in giornate serene, selezionando punti esposti a elevata radiazione solare e privi di ventilazione. Questa scelta ha permesso l'individuazione delle cosiddette "isole radiative" su cui approfondire lo studio del microclima urbano (Fig. 4).
Parallelamente, la perdita di naturalità è stata valutata attraverso due indicatori eco-sistemici: il *Runoff Index*, calcolato in funzione dei coefficienti di deflusso delle diverse coperture (impermeabili, semi-permeabili, permeabili), e la *Riduzione dell'Impatto Edilizio (RIE)*, che integra permeabilità e presenza vegetale per esprimere la capacità di un ambito urbano di mitigare il carico idrologico e termico.

3. Simulazioni predittive del microclima urbano
Infine, nei medesimi "punti critici", sono state condotte simulazioni microclimatiche tramite il software ENVI-met, in grado di analizzare le interazioni tra configurazioni urbane, materiali e superfici urbane, coperture vegetali e parametri meteorologici locali. Le simulazioni hanno prodotto mappe degli indici di comfort (Mean Radiant Temperature – MRT; Predicted Mean Vote – PMV; Physiological Equivalent Temperature – PET), permettendo di evidenziare la distribuzione spaziale delle condizioni di stress termico. Tali output hanno fornito un quadro diagnostico accurato delle aree più vulnerabili, restituendo un supporto conoscitivo essenziale per l'elaborazione di strategie progettuali mirate alla mitigazione e all'adattamento climatico (Fig. 5).
L'ultima fase del lavoro ha previsto la restituzione geospaziale dei risultati mediante un atlante digitale su piattaforma web-GIS (Fig. 6), integrando foto e termografie georeferenziate, layer di copertura del suolo e mappe ENVI-met. Tale strumento rende accessibili i risultati a più attori - amministrazioni, operatori sanitari e comunità – permettendo una lettura multilivello delle criticità urbane (tratto, nodo, micro-area) e supportando la definizione di priorità di intervento. Da queste evidenze, è attualmente in corso la definizione di indirizzi metaprogettuali

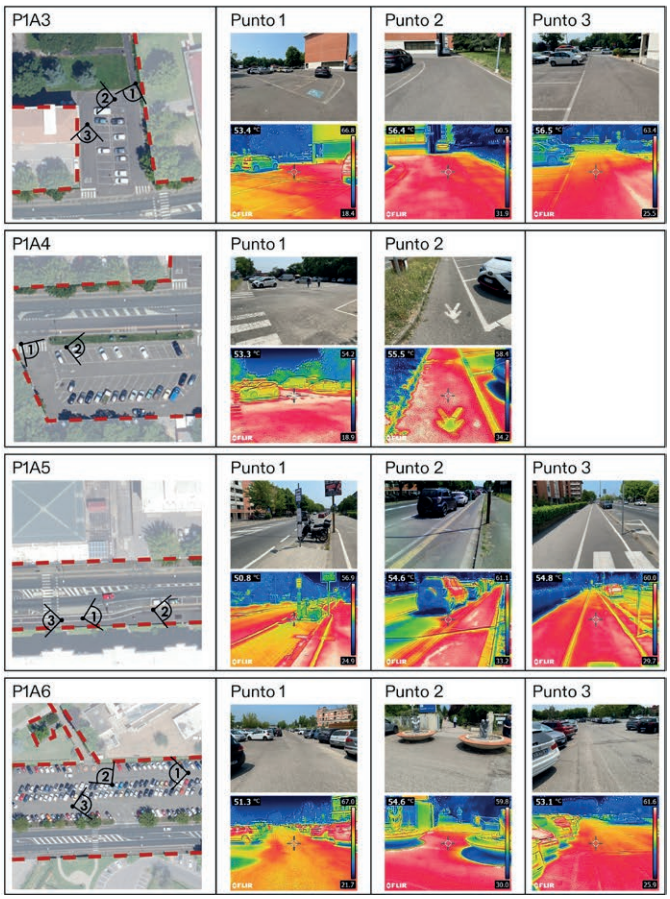
04 | **BORGO SAN LORENZO**
PERCORSO 1 STAZIONE-CDS-OSPEDALE



INDAGINE TERMOGRAFICA

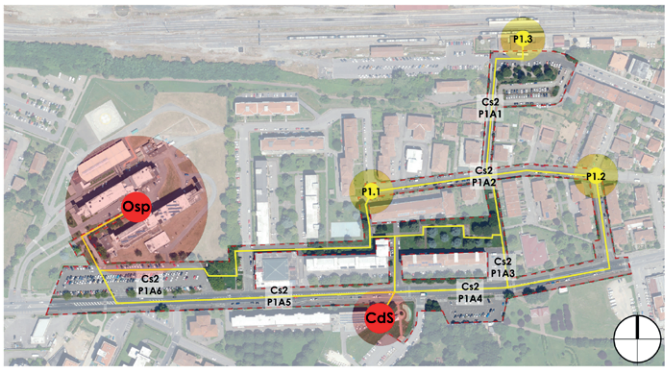


RILEVAZIONE STRUMENTALE DEI PARAMETRI PER VALUTARE IL MICROCLIMA URBANO



BORGO SAN LORENZO

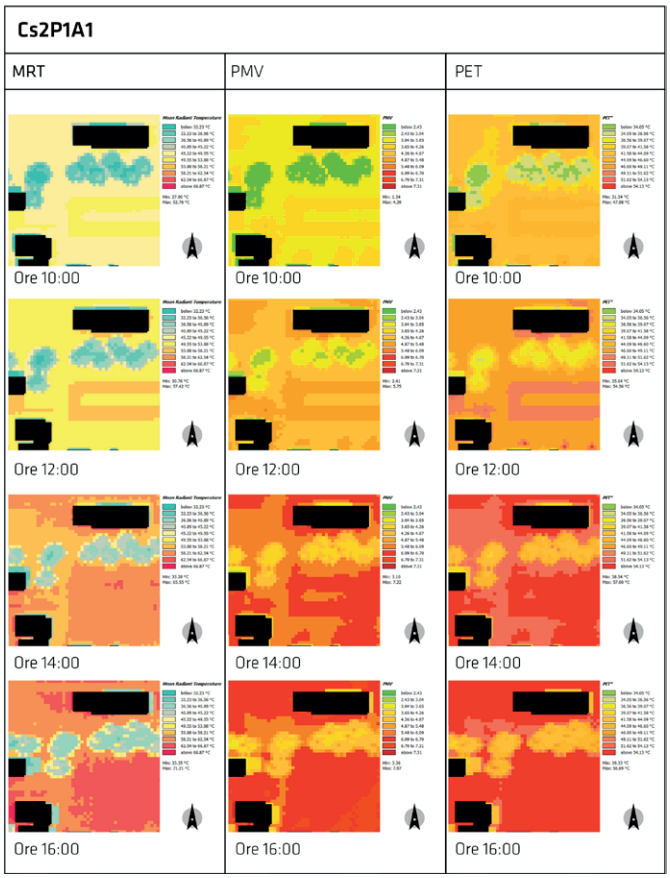
PERCORSO 1



Planimetria del percorso



Modello ENVI-met del percorso



1). In the co-creation workshop on the topic of mobility and public spaces, the participants worked with a collaborative and co-design approach, using the regional technical map (scale: 1:2000) of the area. The shared analysis showed a good number of quality public spaces and urban intersections in Borgo San Lorenzo, although discontinuous and not integrated. The main critical issue is mobility, particularly concerning road congestion, unsafe cycling, architectural barriers, and poor accessibility to the future Community House. The proposed strategies aim to improve accessibility and inclusion through projects for parking, soft mobility, public transport and socio-health proximity services (Fig. 2).

An operational strategy based on the integration of qualitative observations, quantitative surveys and predictive simulations was adopted to document the state of public urban spaces as regards critical microclimatic and environmental issues, with particular attention to pedestrian access routes to territorial health services (*Casa della Salute* and Mugello Hospital). This approach highlighted the determinants of microclimatic discomfort, and outlined adaptation solutions to improve the outdoor comfort and climatic resilience of public spaces.

1. Qualitative observations and perceptual investigation

The first phase involved inspections in a variety of seasonal conditions and at different times, with particular attention to the hours of maximum sunlight in order to directly observe the morphological and usage characteristics of urban spaces – natural and artificial shading, continuity and density of greenery, surface materials and colours, the presence of water and obstacles to ventilation. The observations were supplemented by photographic documentation and a mapping of the main pedestrian routes, processed with digital and GIS tools. In parallel, an exploratory survey was conducted through questionnaires addressed to citizens in order to understand the perception of outdoor comfort and thermal risk along the main access routes to services. This step made it possible to: (a) locate the "hot spots" perceived by the population; (b) compare subjective perceptions with physical measurements; (c) select priority micro-areas to be investigated in subsequent stages. The responses revealed widespread conditions of thermal discomfort, particularly in sections without vegetation or shade.

2. Microclimatic surveys and eco-system indicators

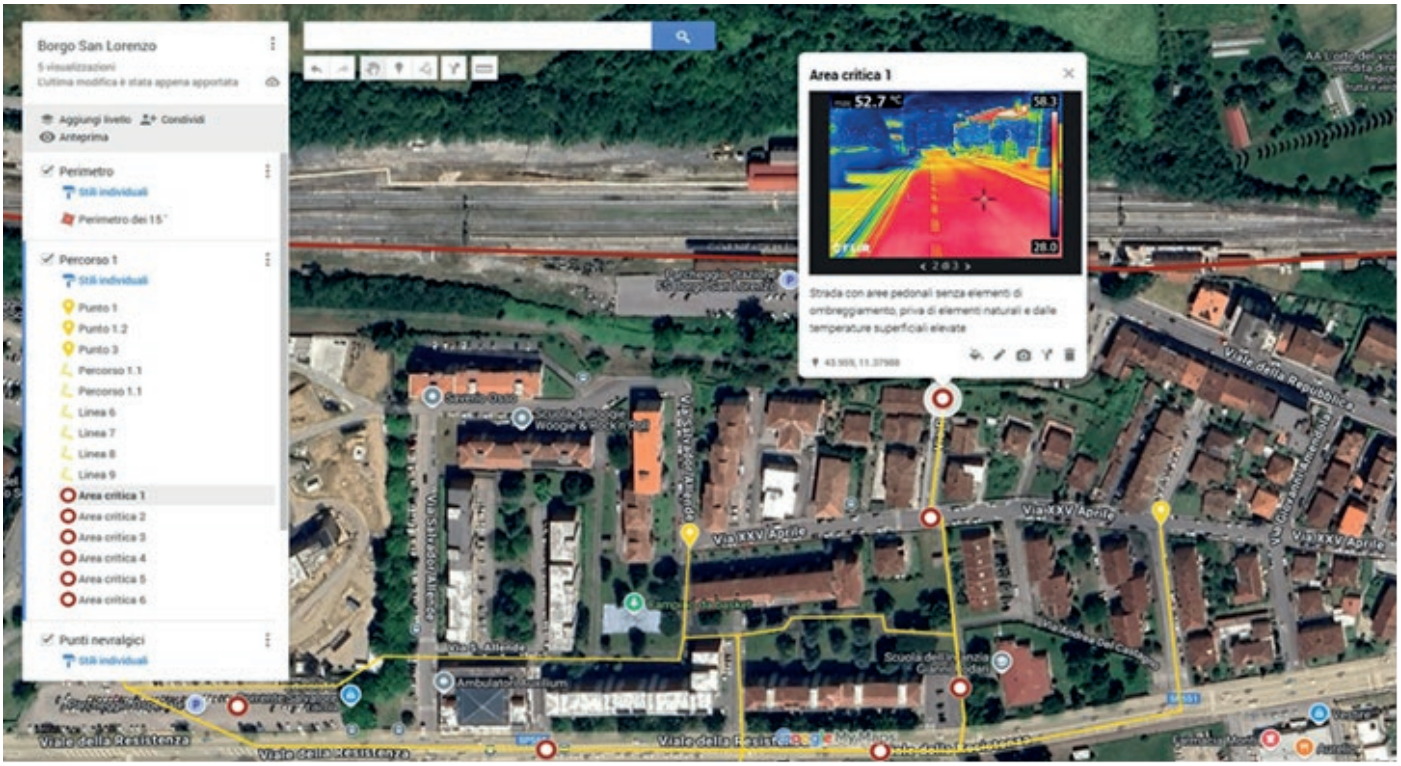
The micro-areas identified as critical were the subject of in-depth studies using focus maps, thematic mapping tools that were able to analyse two main aspects, precisely, the urban heat island and the loss of naturalness (Fig. 3).

The surface temperature indicator was adopted to assess the UHI. The instrumental surveys, carried out using infrared (IR) thermography, were conducted on clear days, selecting locations exposed to high solar radiation and without ventilation. This choice identified so-called "radiative islands" on which to further study the urban microclimate (Fig. 4).

In parallel, the loss of naturalness was assessed through two eco-systemic indicators, namely the Runoff Index, calculated as a function of the runoff

06 | Restituzione geospaziale dei risultati su My Maps
Geospatial rendering of the results on My Maps

06 |



per l'adattamento climatico e il miglioramento del comfort urbano: incremento dell'ombreggiamento, rinverdimento diffuso e *nature-based solutions*, aumento dell'albedo delle superfici, de-impermeabilizzazione e *SUDS*, interventi per la ventilazione naturale e integrazione dell'arredo urbano lungo i percorsi di accesso ai servizi sanitari. In questo modo, l'analisi integrata è stata tradotta in una piattaforma operativa a supporto di strategie place-based per città più resilienti e orientate alla salute.

Conclusioni e sviluppi futuri

La sperimentazione condotta sui casi studio, attraverso gli HCL, ha dimostrato l'efficacia di dispositivi collaborativi basati sul paradigma della quadrupla elica, capaci di attivare processi di innovazione sociale e trasferimento tecnologico.
L'approccio adottato si configura così come uno strumento innovativo per tradurre la complessità dei dati in strategie territo-

coefficients of the different coverings (impermeable, semi-permeable, permeable), and the Reduction of Building Impact (RIE), which integrates permeability and the presence of vegetation to express the capacity of an urban area to mitigate the hydrological and thermal load.

3. Predictive simulations of the urban microclimate
Finally, at the same "critical points", microclimate simulations were conducted using the ENVI-met software capable of analysing interactions between urban configurations, urban materials and surfaces, vegetation cover and local meteorological parameters. The simulations produced maps of the comfort indices (Mean Radiant Temperature - MRT; Predicted Mean Vote - PMV; Physiological Equivalent Temperature - PET), highlighting the spatial distribution of the thermal stress conditions. These outputs provided an accurate diagnostic picture of the most vulnerable areas, providing essential knowledge support for the development of design strategies for climate mitigation and adaptation (Fig. 5).
The last phase of the work involved the geospatial rendering of results by means of a digital atlas on a web-GIS platform (Fig. 6), integrating geo-referenced photos and thermographs, land coverage layers and ENVI-met maps. This tool makes the results accessible to multiple actors – administrations, health professionals and communities – allowing a multi-level reading of critical urban issues (section, intersection, micro-area), and supporting the definition of intervention priorities. On the basis of this evidence, meta-design guidelines for climate adaptation and the improvement of urban comfort are currently being defined, including increased shading, widespread creation of green areas and nature-based solutions, increased albedo of surfaces, de-impermeabilisation and *SUDS*, natural ventilation interventions and the placement of street furniture along access routes to health services. The integrated analysis was thus translated into an operational platform to support place-based strategies for more resilient and health-oriented cities.

Conclusions and future developments
The experiment conducted on the case studies, through the HCLs, demonstrated the effectiveness of collaborative devices based on the quadruple helix paradigm, capable of activating social innovation and technology transfer processes.
The approach adopted is, therefore, an innovative tool for translating the complexity of data into concrete spatial strategies for mitigation and adaptation, with an integrated and place-based vision. In particular, the combination of microclimatic surveys, predictive simulations and perceptual investigations makes it possible to translate technical evidence into data that is useful for collaborative design and the definition of operational guidelines. This interdisciplinary approach, based on the Health Community Lab (HCL) model, overcomes the traditional dichotomy between quantitative analysis and co-design processes, configuring a replicable and scalable method even in resource-limited contexts. The web-GIS platform is also an innovative rendering and dissemination device, capable of making

riali concrete di mitigazione e adattamento, con una visione integrata e *place-based*. In particolare, la combinazione tra rilievi microclimatici, simulazioni predittive e indagini percettive consente di tradurre le evidenze tecniche in dati utili alla progettazione collaborativa e alla definizione di linee guida operative. Tale impostazione interdisciplinare, basata sul modello dell'Health Community Lab (HCL), supera la tradizionale dicotomia tra analisi quantitativa e processi di co-design, configurando un metodo replicabile e scalabile anche in contesti con risorse limitate. La piattaforma web-GIS, inoltre, rappresenta un dispositivo innovativo di restituzione e disseminazione, in grado di rendere accessibili i risultati della ricerca a un pubblico ampio e diversificato di attori locali.

La ricerca ha tuttavia evidenziato limiti rilevanti, quali la complessità della *governance* intersettoriale e la difficoltà di scalare il modello in contesti con differenti capacità amministrative e strutture urbane. Tali aspetti suggeriscono la necessità di ulteriori approfondimenti per adattare la metodologia e garantirne la replicabilità.

Tra gli sviluppi futuri si prospettano l'estensione del modello a nuovi contesti urbani, la definizione di linee guida operative per la gestione degli HCL e lo sviluppo di strumenti predittivi basati su indicatori dinamici, utili a supportare politiche pubbliche preventive e adattative. Questi strumenti potranno facilitare interventi di medio-lungo termine per la mitigazione dei rischi climatici e l'adattamento degli insediamenti, superando risposte emergenziali e promuovendo una pianificazione urbana inclusiva e sostenibile.

ATTRIBUZIONE E RICONOSCIMENTI

Il presente lavoro è stato finanziato nell'ambito del progetto THE – Tuscany Health Ecosystem della Regione Toscana attraverso il Programma Regionale FESR 2021-2027 (Fondo Europeo di Sviluppo Regionale). Gli autori desiderano inoltre ringraziare tutti i collaboratori dell'Università degli Studi di Firenze coinvolti nel progetto, che hanno lavorato in sinergia all'interno del programma di ricerca integrato. Il paper è stato curato da tutti gli autori. In particolare: i contenuti del paragrafo "Introduzione" sono da attribuire a Elisa Caruso; il paragrafo "Il ruolo delle città come strumento di cura" è da attribuire a Paola Gallo; i paragrafi "Impostazione metodologica e strumenti di ricerca" e "Il caso studio di Borgo San Lorenzo" sono da attribuire a Elisa Caruso e Alessandra Donato; infine, il paragrafo "Conclusioni" è da attribuire a Valeria Lingua.

NOTE

[1] Nel Mugello, il Piano di Indirizzo Territoriale (PIT) promuove la riqualificazione di fondovalle e aree urbane e la tutela delle aree montane, mentre il Piano Territoriale Metropolitano (PTM) rafforza l'accessibilità ai servizi, la valorizzazione paesaggistica e il contrasto allo spopolamento. Il Piano Strutturale Intercomunale (PSIC) integra qualità della vita, riuso edilizio, mobilità sostenibile e resilienza, individuando Borgo San Lorenzo come nodo strategico.

REFERENCES

Barton, H. and Grant, M. (2006), "A health map for the local human habitat", *The Journal of the Royal Society for the Promotion of Health*, Vol. 126, n. 6, pp. 252–253. Available at: https://doi.org/10.1177/1466424006070466 (Accessed on 04/09/2025).

research results accessible to a broad and diverse audience of local actors.

However, the research revealed significant limitations, such as the complexity of intersectoral governance and the difficulty of scaling up the model in contexts with different administrative entities and urban structures. These aspects suggest that further work is needed to adapt the methodology and ensure it can be replicated.

Future developments include extending the model to new urban contexts, defining operational guidelines for managing HCLs, and developing predictive tools based on dynamic indicators useful to support preventive and adaptive public policies. These tools will facilitate medium to long-term interventions for climate risk mitigation and settlement adaptation, overcoming emergency responses and promoting inclusive and sustainable urban planning.

ATTRIBUTION AND ACKNOWLEDGEMENTS

This work was funded as part of the "THE" – Tuscany Health Ecosystem project of the Region of Tuscany through the ERDF Regional Programme 2021-2027 (European Regional Development Fund). The authors would also like to thank all the collaborators of the University of Florence involved in the project, who worked in synergy within the integrated research programme. The paper was edited by all the authors. Specifically, the paragraphs are to be attributed as follows: "Introduction" to Elisa Caruso; "The role of cities as instruments of care" to Paola Gallo; "Methodological approach and research tools" and "The case study of Borgo San Lorenzo" to Elisa Caruso and Alessandra Donato; "Conclusions" to Valeria Lingua.

NOTES

[1] In Mugello, the Territorial Development Plan (PIT) promotes the redevelopment of valley floors and urban areas, and the protection of mountain areas, while the Metropolitan Territorial Plan (PTM) strengthens the accessibility of services, landscape enhancement, and the fight against depopulation. The Inter-Municipal Structural Plan (PSIC) integrates quality of life, building reuse, sustainable mobility, and resilience, identifying Borgo San Lorenzo as a strategic hub.

Carayannis, E. G., Barth, T. D. and Campbell, D. F. J. (2012), "The Quintuple Helix innovation model: Global warming as a challenge and driver for innovation", *Journal of Innovation and Entrepreneurship*, Vol. 1, n. 2, pp. 1–12. Available at: https://doi.org/10.1186/2192-5372-1-2 (Accessed on 04/09/2025).

Frumkin, H., Jackson, R. J. and Dannenberg, A. L. (2022), *Making Healthy Places: Designing and Building for Well-being, Equity, and Sustainability*, 2nd ed., Island Press, Washington, DC. Available https://doi.org/10.5070/BP325112307 (Accessed on 04/09/2025)

Gill, S. E., Handley, J. F., Ennos, A. R. and Pauleit, S. (2007), "Adapting cities for climate change: The role of the green infrastructure", *Built Environment*, Vol. 33, n. 1, pp. 115–133. Available at: https://doi.org/10.2148/benv.33.1.115 (Accessed on 04/09/2025)

Grindell, C., Padilla, J. J. and Almirall, E. (2022), "Living Labs as a Service: A conceptual framework for open innovation", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 344, 130930. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130930 (Accessed on 04/09/2025).

IPCC (2022), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK. Available at: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/

Leminen, S., Westerlund, M. and Nyström, A. G. (2012), "Living Labs as open-innovation networks", *Technology Innovation Management Review*, Vol. 2, n. 9, pp. 6–11. Available at: https://doi.org/10.22215/timreview/602 (Accessed on 04/09/2025).

Losasso, M., Lucarelli, M. T., Rigillo, M. and Valente, R. (2020), *Adattarsi al clima che cambia: innovare la conoscenza per il progetto ambientale*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna.

Macchi, A., Busciantella-Ricci, D., Caruso, E., e Setola, N. (2024). "Healthy Neighbourhoods Hub (HNH) framework: a practical guide for fostering healthy and inclusive living in Florence's urban environment", *Sustainability*, 16, 4423. Available at: https://doi.org/10.3390/su16114423 (Accessed on 04/09/2025).

UN-Habitat (2025, in press), *Public Space for Health and Well-being: Global Guidelines for Healthy Cities*, United Nations Human Settlements Programme, Nairobi. Available at: https://unhabitat.org/healthier-cities-and-communities-through-public-spaces (Accessed on 04/09/2025)

World Health Organization (WHO) (2022), *Urban planning for health: a review of tools and applications for local governments*, WHO, Geneva. Available at: https://www.who.int/europe/publications (Accessed on 04/09/2025)

World Health Organization (WHO) (2016), *Urban green spaces and health: A review of evidence*, WHO Regional Office for Europe, Copenhagen. Available at: https://www.who.int/europe/publications (Accessed on 04/09/2025)

Resilienza al rischio nei centri storici: un approccio *user-centred*

Enrico Quagliarini[1], https://orcid.org/0000-0002-1091-8929 e.quagliarini@staff.univpm.it
Mariella De Fino[2], https://orcid.org/000-0002-2675-704X mariella.defino@poliba.it
Elena Cantatore[2], https://orcid.org/0000-0003-2294-6561 elena.cantatore@poliba.it
Fabio Fatiguso[2], https://orcid.org/0000-0003-4584-3776 fabio.fatiguso@poliba.it
Gabriele Bernardini[1], https://orcid.org/0000-0002-7381-4537 g.bernardini@staff.univpm.it
[1] Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura, Università Politecnica delle Marche, Italia
[2] Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, del Territorio, Edile e di Chimica, Politecnico di Bari, Italia

Abstract. I centri storici sono caratterizzati da condizioni di valore del patrimonio, dinamiche d'uso, vulnerabilità fisica e possibili bassi livelli di resilienza, tali da rendere questi ambienti costruiti urbani fragili a rischi naturali e antropici, sia singoli che combinati. Incrementare la sicurezza (multi-) rischio in questi contesti richiede un approccio dinamico e centrato sugli utenti, tramite strumenti di simulazione avanzata e comunicazione immersiva e virtuale, accrescendo consapevolezza e capacità di risposta degli stakeholders. La presente ricerca sviluppa modelli e strumenti ingegneristici per valutare il rischio, da singolo a multiplo, e proporre interventi di mitigazione efficaci. Le potenzialità di metodi e strumenti sono mostrate grazie ad esempi dai progetti BE S2ECURe e ReACT.

Parole chiave: Ambiente costruito urbano; centri storici; vulnerabilità degli edifici; utenti; tecnologie digitali; multi-rischio.

Introduzione

Per incrementare la resilienza al rischio degli Ambienti Costruiti Urbani (UBE – *Urban Built Environment*) occorre progettare e implementare strategie capaci di garantire la sicurezza per tutte le tipologie di utenti di edifici, spazi aperti urbani (strade, piazze) e infrastrutture, in scenari di rischio singolo e multiplo (Sharifi, 2019; Curt, 2021). Questo tipo di azioni necessita di una valutazione olistica dei fattori di rischio, includendo non solo la sinergia tra pericolosità (di diversa natura e severità) e vulnerabilità fisica (es. delle strutture), ma anche di queste con il numero (esposizione) e la tipologia (vulnerabilità individuale per abilità motorie/sensoriali, età, genere, familiarità con rischi e UBE) degli utenti esposti, delle relative variazioni spazio-temporali legate all'uso degli UBE e dei loro comportamenti in emergenza (Polese *et al.*, 2024; Duan e Fei, 2025). Le interazioni tra questi fattori sono particolarmente critiche nei contesti dei centri storici, spesso caratterizzati da configurazioni morfologiche costruttive compatte, complesse e stratificate, elevato valore del patrimonio, e carenza di soluzioni di mitigazione efficaci (Julià and Ferreira, 2021).

Inoltre, gli UBE storici sono particolarmente influenzate da una forte attrattività per gli utenti, con le dinamiche d'uso che dipendono principalmente da funzioni attrattive aperte al pubblico, inclusi pendolari e turisti con limitata conoscenza di spazi e rischi, e generano significative variazioni orarie, giornaliere, settimanali e stagionali del rischio (Duan e Fei, 2025). Inoltre, la rapidità di insorgenza dei disastri e la coincidenza spazio-temporale di più rischi, combinabili a condizioni di potenziale sovraffollamento, assumono ulteriore rilevanza (Curt, 2021; Julià and Ferreira, 2021). I disastri a insorgenza rapida (SUOD – *Sudden Onset Disasters*), come sisma, atti terroristici, incendi e alluvioni, possono chiedere l'attivazione di procedure di emergenza, mentre quelli ad insorgenza lenta (SLOD – *Slow Onset Disasters*), legati ad esempio a cambiamento climatico, isola di calore urbana (UHI) e inquinamento atmosferico, si sviluppano gradualmente pur con possibili condizioni di picco (es. ondate di calore). SUOD e SLOD possono presentare severità diverse, con effetti non critici fino al collasso, aggravati negli UBE per usi eccezionali o vulnerabilità elevate. Ad esempio, scenari

Risk resilience in historic urban environments: a user-centred approach

Abstract. Historic Urban Built Environments are stressed by several risks, which can be either single or combined, with effects exacerbated by heritage features, user dynamics, and poor resilience level. Herein, (multi-)risk reduction and mitigation imply following a user-centred, dynamic approach, exploiting simulation tools and virtual reality risk communications towards stakeholders to additionally increase awareness and preparedness. This research aims at developing predictive models and tools for assessing and mitigating single to multiple risks in these scenarios, considering the interactions of users with hazards, physical vulnerability factors, and deployable strategies. Examples from BE S²ECURe and ReACT projects, adopting this approach, are shown to demonstrate its capabilities.

Keywords: Built Environment; building vulnerability; user exposure; digital technologies; multi-hazard.

Introduction

Enhancing risk resilience of Urban Built Environments (UBEs) means designing and implementing strategies able to ensure safety for all users across buildings, open spaces, and infrastructures, considering both single and multi-risk scenarios (Sharifi, 2019; Curt, 2021). This requires integrating assessment methods on hazards (of different type and severity) not only with those on physical vulnerability, but also with analysis on exposed users' number, vulnerabilities (i.e., motion/sensory abilities, age, gender, familiarity with risks and UBEs), spatiotemporal variations depending on UBEs use, and behaviours in single and multi-risk situations (Polese *et al.*, 2024; Duan and Fei, 2025). Interactions among these factors influence risk levels, especially in complex UBEs like historic ones, which are often hazard-prone and characterised by compact layouts, composite morphological and constructive structure, high heritage value, and user attractiveness (Julià and Ferreira, 2021).

In historic UBEs, usage dynamics mainly depend on attractive functions open to the public, including commuters and tourists with limited preparedness, thus leading to relevant hourly, daily, weekly and seasonal variations in user types and densities (Duan and Fei, 2025). Moreover, the rapidity of disaster onset, and the spatiotemporal coincidence of several risks, including (over)crowding, also assume a strong relevance in risk assessment and management (Curt, 2021; Julià and Ferreira, 2021). SUODs (SUdden Onset Disasters) like earthquakes, terrorist acts, fires and floods demand an immediate response, as well as emergency procedures. Conversely, SLODs

ISSN online: 2239-0243 | © 2025 Author(s) | http://www.fupress.com/techne | DOI: 10.36253/techne-18619
Open access, peer-reviewed article published by Firenze University Press (https://www.fupress.com) and distributed, except where otherwise noted, under the terms of the CC BY 4.0 License for content and CC0 1.0 Universal for metadata

di grande evento in caso di SUOD (es. sisma) possono generare condizioni sempre più rischiose, in particolare per utenti non familiari all'UBE (es. visitatori), al crescere degli impatti. Se combinato con un picco SLOD (es. ondata di calore), il rischio si intensifica per via della maggiore concentrazione di persone in aree vulnerabili (es. spazi interni, prossimità delle facciate di giorno). Approcci dinamici, centrati sull'utente e che considerano diverse severità del disastro possono quindi supportare gli stakeholders nella valutazione e gestione degli impatti da rischio singolo e multiplo, anche attraverso modelli tipologici basati su condizioni ricorrenti di rischio e UBE, riducendo la complessità nell'analisi del sistema specialmente per figure a limitata esperienza (An and Ochiai, 2025).

Per affrontare questi aspetti e superare i limiti dei metodi attuali, questa ricerca propone un flusso operativo per valutare e ridurre il (multi-)rischio negli UBE storici, promuovendo l'uso di: (1) strumenti predittivi e *user-centred* per determinare l'impatto di numero, tipo e comportamento degli utenti sul livello di rischio; (2) modelli tipologici rappresentativi di scenari reali, derivati da dati su contesti reali; (3) soluzioni di comunicazione e coinvolgimento degli stakeholder in Realtà Virtuale (VR). Il lavoro mostra esempi significativi tratti dalle attività di ricerca dei progetti BE S²ECURE ("*Built Environment Safer in Slow and Emergency Conditions through behavioUral assessed/designed Resilient solutions*", finanziato da MIUR nell'ambito PRIN 2017) e ReACT ("*Resilient urban and metropolitAn built environments through inClusive mulTi-risk behavioural-based models and simulations*", finanziato da PNRR), nei quali strumenti e metodi sono stati definiti e applicati.

Il workflow: dall'analisi user-centred alla mitigazione del (multi-) rischio

L'approccio si fonda su tre pilastri e cinque principi operativi, organizzati nel workflow illustrato in Figura 1.

La raccolta e organizzazione di dati relativi ai fattori di rischio, secondo un approccio multilivello e multiscala (Sharifi, 2019; Polese *et al*., 2024) consente, in primis, la definizione di scenari di (multi-)rischio, includendo le dinamiche d'uso degli UBE. I dati da casi studio reali sono elaborati per individuare condizioni ricorrenti e critiche, tramite (1) linee narrative, le *storylines*, e (2) scenari "*what-if*".

Tali scenari sono valutati con strumenti di simulazione per stimare gli effetti del (multi-)rischio in condizioni attuali, ovvero prima dell'applicazione di specifiche strategie di incremento della resilienza (*pre-retrofit*), considerando severità di SUOD/SLOD, loro combinazioni e risposta degli utenti (Bernardini, Sparvoli *et al*., 2025). Il confronto tra scenari *pre-retrofit* e legati ad alternative di intervento (*post-retrofit*), e la selezione delle relative strategie strutturali (azioni fisiche sull'UBE) e non strutturali (preparazione, management, pianificazione) per fattibilità e impatto, avviene tramite (1) indicatori singoli di tipo KPI (Key Performance Indicators) e (2) metriche di combinazione dei KPI, entrambe basate sugli output di simulazione.

L'ultima fase prevede la comunicazione e il coinvolgimento degli stakeholder, attraverso strumenti digitali e soluzioni XR (*eXtended Reality*), per supportare la comprensione e la gestione del rischio da parte di decisori (es. amministratori locali e tecnici, per la consultazione strutturata di scenari) e cittadini (es.: training al rischio).

(SLow Onset Disasters), such as risks correlated with climate change, UHI (Urban Heat Island), and air pollution slowly rise over time, but could appear with short-time peak situations (e.g., heatwaves). SUODs and SLODs can have different severity levels, ranging from non-critical to (near-)collapse scenarios, which can be exacerbated in coupled events or compound conditions, especially in UBEs characterised by exceptional use or vulnerability. For instance, a SUOD (e.g., earthquake) occurring during a mass gathering can cause overcrowding and more critical response than in normal use scenarios, especially for unaware users (e.g., visitors). If combined with SLOD peak conditions (e.g., heatwave), risks intensify due to more dense crowding in vulnerable areas (e.g., indoors, near façades). Hence, dynamic and user-centred approaches could support decision-makers in assessing and managing single and multi-risk impacts, especially using rapid models of typical (recurring) UBEs and risk conditions, which reduce complexities for low-trained stakeholders (An and Ochiai, 2025).

To include these key points and overcome limitations of current methods, this research aims to provide an operational workflow for single to multi-risk assessment and reduction in historic UBEs. The approach fosters the use of: (1) user-centred and predictive tools to analyse behavioural impacts in disaster-affected UBEs; (2) streamlined typological models, from on-field studies of real-world cases; (3) Virtual Reality communication solutions to increase stakeholder engagement. This paper also provides some related, relevant examples from the research developed under the BE S²ECURE ("(make) Built Environment Safer in Slow and Emergency Conditions through behavioUral assessed/designed Resilient solutions" funded by MIUR under PRIN 2017), and the ReACT ("(planning) Resilient urban and metropolitAn built environments through inClusive mulTi-risk behavioural-based models and simulations" funded by PNRR) projects, in which the workflow has been defined and applied.

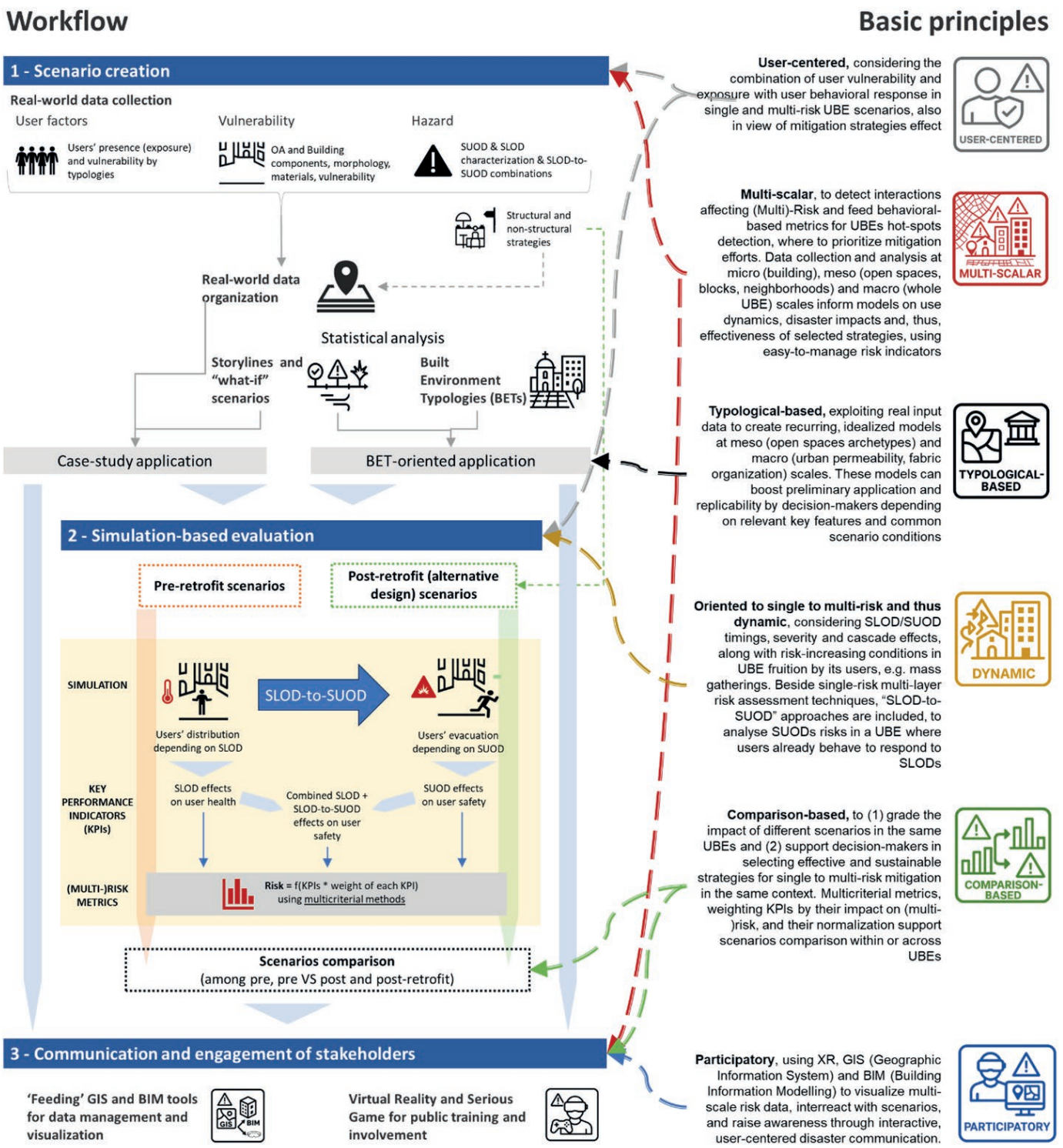
The workflow: from user-centred (multi-)risk assessment to mitigation

The approach relies on three main pillars and five basic principles, as organised in the workflow of Figure 1.

The scenario creation relies on collection and organisation of data from relevant risk factors, pursuing a multi-layer and multi-scalar approach (Sharifi, 2019; Polese *et al*., 2024), and including user dynamics in the UBEs. Data from single real-world case studies can be elaborated using statistical methods to define critical and recurring situations in terms of typological (1) storylines and "what-if" scenarios, and (2) UBE conditions.

Scenarios are then assessed using simulation-based evaluation tools to evaluate basic single and multi-risk levels in current (pre-retrofit) conditions, which can estimate (multi-)risk effects depending on severity and user response (e.g., casualties, evacuation timing and path, possibility to be rescued) (Gabriele Bernardini, Sparvoli, *et al*., 2025). Hence, simulations provide insights for comparison of alternative scenarios in pre-retrofit and post-retrofit situations, using (1) easy-to-use KPIs (Key Performance Indicators) representing effects of (multi-)risk factors on UBEs and users, and (2) KPIs

01 | Workflow (sinistra) e criteri base (destra; le frecce mostrano i principali step correlati)
Operational workflow (left) and basic principles (right, including arrows on main application stages)



Creazione di scenari La definizione degli scenari si basa sulla raccolta multiscala di dati e sulla loro organizzazione in banche strutturate, tramite strumenti come GIS (*Geographic Information System*) e BIM (*Building Information Modelling*). L'analisi di casi studio consente di individuare relazioni causa-effetto ricorrenti (es. linee narrative) e modelli tipologici orientati al rischio per gli UBE.

Raccolta ed elaborazione dati da casi reali
La raccolta dati avviene su più scale.
Alla macroscala, strumenti GIS permettono raccolta ed analisi rapida di parametri come quelli di morfologia urbana, caratteristiche geometriche, costruttive e funzionali degli edifici, pericolosità (es. aree alluvionali, zonazione sismica, clima urbano). I dati censuari integrano informazioni su esposizione (numero di residenti) degli utenti e vulnerabilità per età.
Alla meso e microscala, strumenti SCAN-TO-BIM (fotogrammetria ravvicinata, laser scanning, fotografia sferica) e rilievi remoti (Google Maps, Street View, ricerche web) forniscono dettagli sugli edifici (es. materiali, stato di conservazione/danno) e sulle funzioni ospitate, inclusi quelli sugli orari di apertura (per edifici pubblici, con variazioni giornaliere/stagionali). Quest'ultimo tipo di dato permette di stimare presenza e vulnerabilità degli utenti in condizioni ordinarie eccezionali (es. grandi eventi), anche associando densità di occupazione forniti dalle normative (antincendio, terrorismo) (Bernardini, Cantatore, *et al*., 2025).
Inoltre, l'organizzazione di questi dati alla mesoscala consente di analizzare rapidamente le condizioni degli spazi aperti (strade, piazze), dove gli utenti si muovono in caso di emergenza. Ad esempio, Figura 2 mostra l'andamento dei relativi scenari orari giornalieri per una piazza, dimostrandone la correlazione con l'uso dell'UBE analizzato.

Storylines e scenari "what-if"
La classificazione degli scenari in gruppi di condizioni simili consente di associarli a *storylines* (o *timelines*) di riferimento per l'emergenza (de Bruijn *et al*., 2016). Le storylines aggregano dati relativi a caratterizzazione dell'UBE, fattori di rischio e strategie di mitigazione, strutturandoli in scenari di rischio singolo e multiplo, dalle situazioni non critiche fino a quelle di (quasi) collasso. Questo approccio mira a costruire narrazioni condivise su come SUOD, SLOD e loro combinazioni possano interagire ed evolvere nello spazio dell'UBE e nel tempo, secondo relazioni causa-effetto tra fattori. Attraverso alberi degli eventi, le linee narrative generano scenari "*what-if*", utili basi per decisioni informate e simulazione. Figura 3 mostra un esempio di *storylines* per rischio alluvione, in cui le condizioni dell'UBE (es. livelli di presenza di utenti) si articolano nei diversi livelli di allerta della Protezione Civile (verde, giallo, rosso). Sono inclusi anche gli effetti degli *early warnings*, in dipendenza dalla corretta ricezione da parte della popolazione, e le modalità con cui gli utenti li seguono, dalla fase di allerta all'evacuazione.

Tipologie di ambiente costruito (BET) come archetipi di scenari di (multi-)rischio
Oltre a *storylines* e scenari "*what-if*" tipologici, studi precedenti hanno dimostrato la possibilità di derivare Tipologie di Ambiente Costruito (BET - *Built Environment Typologies*), ovvero,

aggregation into (multi-)risk metrics. KPIs and metrics can guide decision-makers to select effective structural (physical interventions on UBEs) and non-structural (preparedness, management, planning) strategies, depending on their feasibility and impact.
The last phase involves communication and engagement of stakeholders, using results from previous stages to effectively inform both decision-makers (e.g., supplying local administrations and their technicians with structured visualisations of scenarios) and end-users (e.g., risk training for citizens, and their involvement). Different modelling tools, including eXtended Reality (XR), can increase process reliability.

Scenario creation
Scenario creation mainly exploits multiscale data collection and the organisation into structured databases, e.g., using GIS (Geographic Information System) and BIM (Building Information Modelling). Analysis data from several case-studies support the definition of recurring cause-effect relationships (e.g., storylines) and typological risk-oriented models of UBEs.

Collection and organisation of real-world data
Multi-scale data collection can first use GIS application at the macroscale, enabling rapid analysis of parameters on urban morphology; geometrical, constructive, vulnerability features of buildings; indoor and outdoor intended uses; general hazard features, and main risk sources (e.g., flood-prone areas, seismic zonation, urban climate, sensitive building targets). Adding census databases allows to trace basic user exposure (residents' number) and age-based vulnerability. Down to microscale, data can be integrated by SCAN-TO-BIM tools from direct Close Range Photogrammetry, Terrestrial Laser Scanning, and spherical photography. Localised remote surveys (e.g., using Google Maps, Street View, updated photographic source, Web search) can be used especially in case of unavailable GIS databases, and always add specialised data, such as insights into building features (e.g., materials, conservation/damage state), and opening times affecting UBE use (for public functions, from hourly to seasonal variations). The microscale level can widely contribute to spatiotemporal assessment of user factors by simply considering safety regulations (i.e., fire, terrorism) to detect occupancy loads in ordinary and exceptional (mass gatherings) conditions (Gabriele Bernardini, Cantatore, *et al*., 2025). In this sense, Figure 2 shows a related example of typical daily time scenarios on user exposure, which depend on these UBE use conditions, demonstrating the relevance of user factors among collected inputs. Then, the mesoscale data organisation provides rapid spatiotemporal insights focusing on open spaces (streets, urban squares) where users move, live and behave in emergencies.

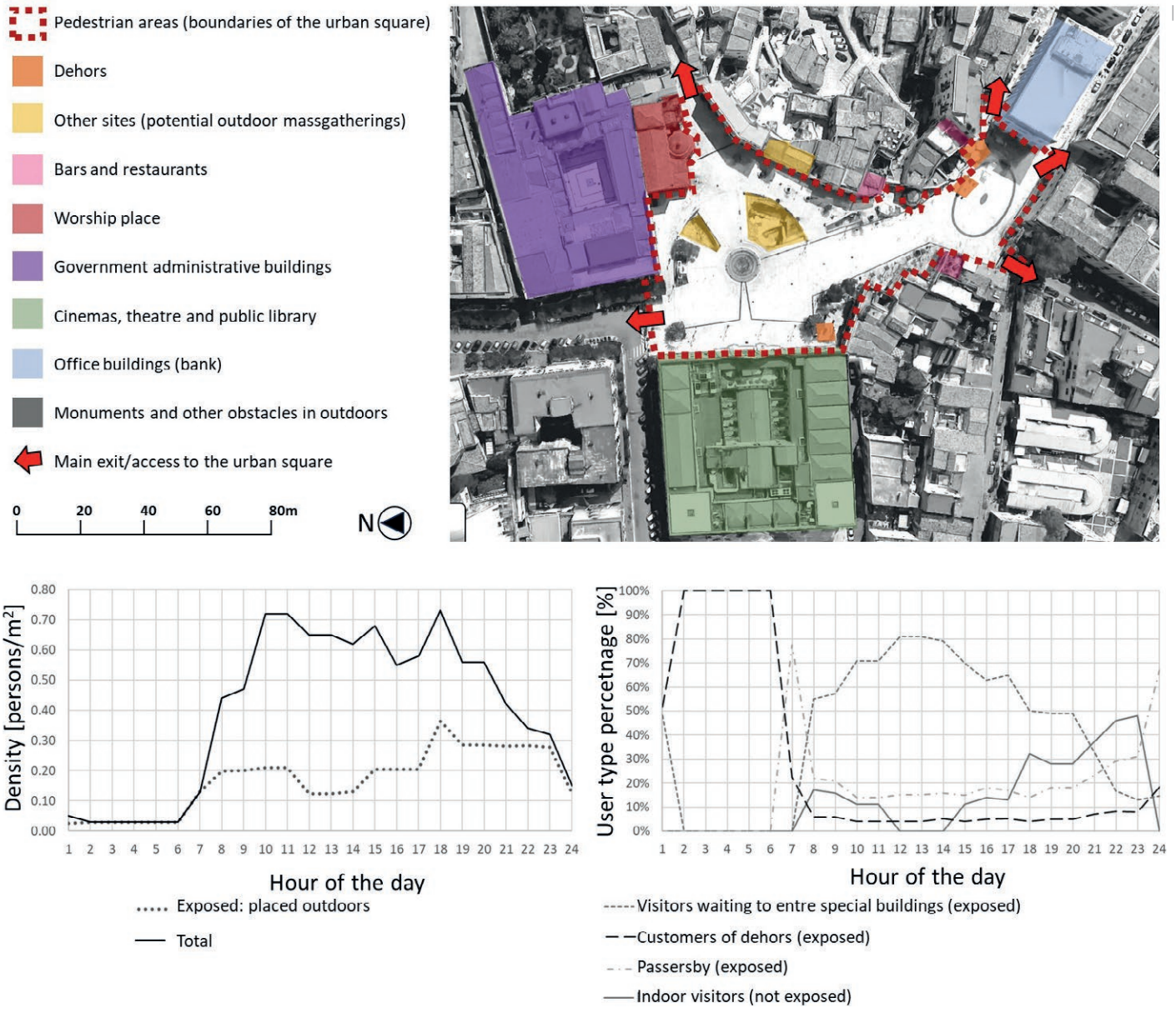
Storylines and "what-if" scenarios
Gathering scenarios into groups of similar conditions allows to associate them with reference emergency storylines, or timelines (de Bruijn *et al*., 2016). Each storyline aggregates input data on characterisation of UBE, risk factors, and mitigation strategies, and is structured into probable and relevant single and multi-risk scenarios, from no emergency to (near-)collapse ones. This organisation pursues the

02 | Analisi dinamica di esposizione e vulnerabilità degli utenti nell'UBE: esempio da caso studio (Matera, Piazza V. Veneto), con identificazione di edifici e loro funzioni (alto, Base map from Immagini © 2024 Google), e variazione di densità e tipologia di utenti esposti ad attacchi terroristici in outdoor (basso)

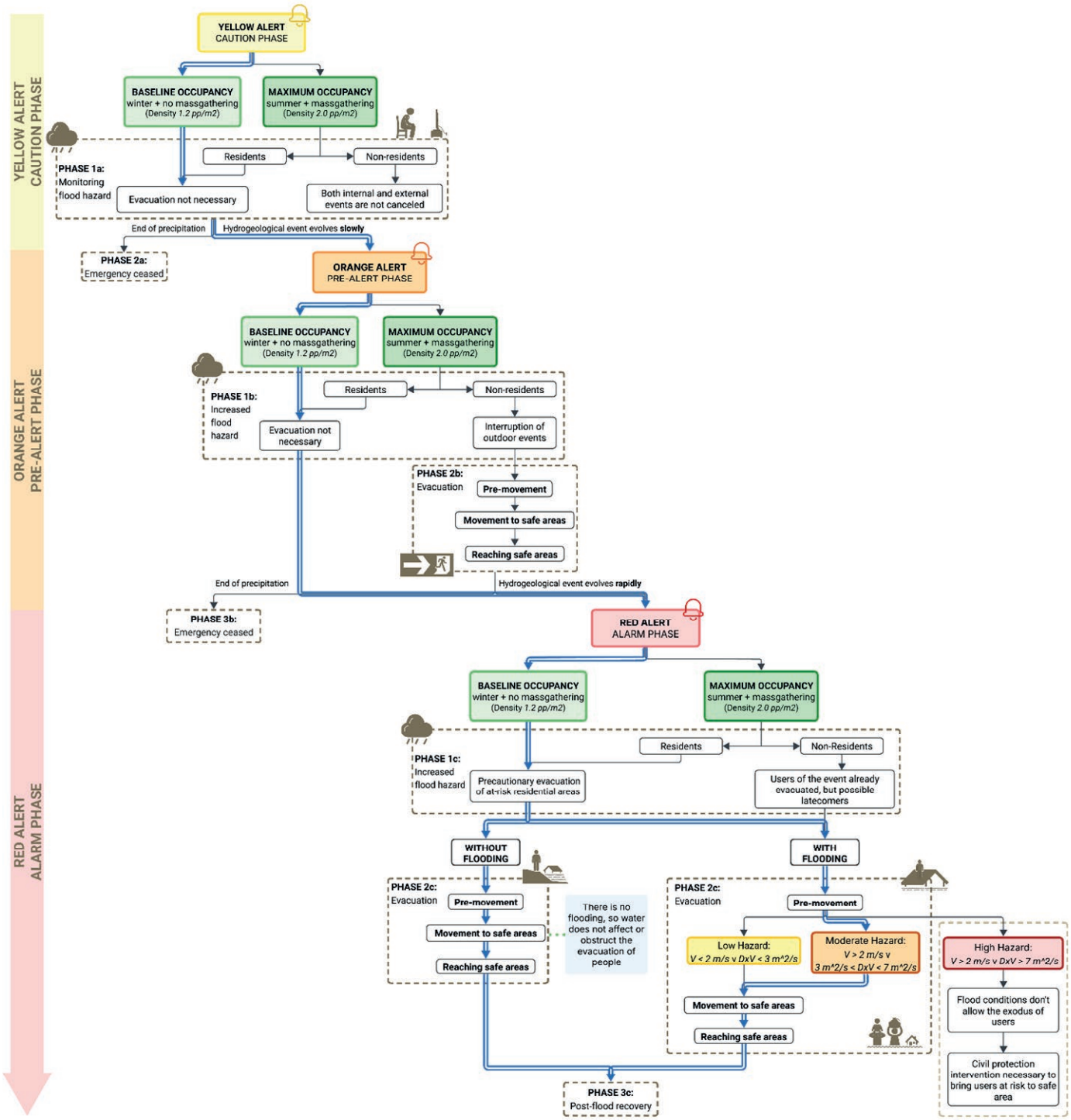
Dynamic user exposure and vulnerability assessment in UBE: an example from a case-study scenario (Matera, Piazza V. Veneto), identifying buildings and their function (top, Base map from Immagini © 2024 Google), and the variation of user density and typology of users exposed to terrorist acts in outdoor settings (bottom)

attraverso analisi statistiche di condizioni ricorrenti di contesti reali (Bernardini, Sparvoli, *et al*., 2025). Le BET rappresentano archetipi di UBE: i loro parametri descrittori possono essere associati a UBE reali, permettendo valutazioni rapide, e senza necessità di rielaborazioni complete. Le BET possono quindi supportare i decision-makers nella fase preliminare di analisi, offrendo una lettura sintetica basata su caratteristiche comuni, che può essere successivamente affinata attraverso analisi specifiche e contestualizzate.

Per definire le BET, si analizzano parametri morfologici (es. geometria, edifici specializzati, permeabilità, quota altimetrica) da casi reali, per costruire rappresentazioni spaziali tipiche e ricorrenti. Le BET vengono poi arricchite con dati su vulnerabilità fisica e fattori legati agli utenti, approfondandone il dettaglio costruttivo, funzionale e *user-centred* in base a quantità e qualità di input per ogni descrittore. Il processo di clustering consente di raggruppare UBE reali in BET, organizzando i descrittori in indicatori attivi (di classificazione) e supplementari (per l'ar-



03 | Esempio di storyline in contest di rischio alluvione, rispetto a tre livelli di allerta e condizioni di occupazione. La linea blu traccia il percorso selezionato, base di scenario "what-if"
Example of storyline in the context of flood risk according to three alert levels and occupancy conditions. The blue line traces the selected path and, thus, the basis for the "what-if" scenarios



creation of common narratives on how SUODs, SLODs, SLODs-to-SUODs can interact and evolve over UBE space and time depending on cause-and-effect relationships between factors. Using event trees, storylines contribute to "what-if" scenarios, depending on the path followed by such interactions, offering valuable insights for informed decision making and bases for simulations. Figure 3 shows an example of flood risk storyline in which UBE conditions (expressed occupancy conditions) have different branches in terms of alert levels (green, yellow, red) assigned by the Italian Civil Protection Service. It also includes the effects of early warnings addressed (or not) to the population, and the way they are followed by users, from the alert phase to the evacuation process activation.

Built Environment Typologies as archetypes of (multi-)risk scenarios

Besides typological scenarios/storylines, previous studies demonstrated the ability to move from single real-world applications to Built Environment Typologies (BETs) (Gabriele Bernardini, Sparvoli, *et al.*, 2025).

BETs are archetypes of UBEs, built from statistical analysis of recurring real-world conditions. Hence, they trace basic conditions of different UBEs, which can be associated to

ricchimento dei modelli), selezionati, per gestire la complessità urbana e far convergere i modelli alla scala necessaria, tramite analisi preliminari di frequenza. Ogni parametro è rappresentato da un valore mediano, medio o modale, indicativo delle sue condizioni. A ciascuna BET può anche essere associata una propensione teorica a SUOD e SLOD.
Figura 4 mostra due esempi significativi di BET storiche riferite a una piazza urbana (Bernardini, Sparvoli, *et al*., 2025) e a un quartiere (De Fino, Bernardini *et al*., 2025), entrambe ottenute combinando dati GIS alla scala mesoscopica (morfologia degli spazi aperti) e microscopica (vulnerabilità, geometria e uso degli edifici).

Valutazione del (multi-)rischio tramite simulazione

La simulazione può essere impiegata per analizzare condizioni di (multi-)rischio rispetto a *storylines* e scenari "*what-if*" selezionati, con l'obiettivo di fornire ai decision-makers metriche rapide sulla performance di sicurezza dell'UBE, nel suo insieme e nelle sue componenti (identificando aree prioritarie di intervento). I relativi modelli e strumenti devono quindi tracciare gli impatti comportamentali insieme ai parametri legati a pericolosità, vulnerabilità fisica e strategie di gestione e mitigazione (se presenti), secondo un approccio olistico.

Strumenti di simulazione
La presente ricerca adotta modelli ad agenti (ABM – *Agent-Based Models*) per la simulazione (Duan e Fei, 2025). Gli ABM associano regole a ciascun agente (elemento dell'UBE, utente, strategia), con interazioni reciproche in funzione della gravità del rischio definita nella *storyline*. Figura 5 mostra un ABM per il rischio terroristico, evidenziando tali interazioni e dipendenze (Bernardini, Cantatore *et al*., 2025).
Gli ABM permettono la mappatura spaziale integrata del rischio, in particolare se abbinati ad automi cellulari che suddividono l'UBE in celle (Bernardini, Sparvoli *et al*., 2025). In questo contesto, gli SLOD (es. UHI, inquinamento dell'aria) sono analizzati con simulazioni climatiche alla mesoscala, generando mappe di temperatura outdoor e qualità dell'aria su griglie da 1 a 5 m. La stessa griglia è usata per gli SUOD. Ad esempio, per il sisma, matrici di danno, basate su indicatori di vulnerabilità strutturale, permettono di stimare la profondità delle macerie. Per l'attentato terroristico, l'esposizione spaziale è valutata rispetto a posizione del target di attacco, accessibilità, affollamento e misure di prevenzione. L'ABM simula il comportamento degli utenti, localizzandoli secondo la risposta iniziale agli SLOD, per avviare la simulazione SUOD (esodo). Gli output includono quindi, per gli SLOD, gli effetti sulla salute, e, per gli SUOD, tempi di esodo SUOD, vittime e dinamiche di movimento della folla.

Metriche di (multi-)rischio per la valutazione di scenari pre e post-retrofit
Gli output delle simulazioni sono organizzati in KPI, che descrivono i singoli componenti del rischio e il loro impatto su scala microscopica (cella) e mesoscopica (spazio aperto). I KPI sono poi combinati tramite metodi di decisione multicriteriale, ponderando ciascun indicatore in base alla rilevanza attesa. L'integrazione con gli indicatori derivati dalla fase di creazione dello scenario consente di correlare parametri statici e dinami-

them, enabling rapid assessment by using replicable descriptors without full reanalysis. BETs support decision-makers with rapid preliminary assessments based on common features, and can be further refined through tailored analysis.
First, morphological parameters (e.g., geometry, specialised areas/buildings, permeability, elevation) are analysed to create spatial representations of typical UBEs. BETs are then enriched by physical vulnerability and user factors, increasing the level of detail to constructive, functional and behavioural dimensions depending on the quality of available inputs. A clustering process is then used to group real UBEs into BETs using active (used in clustering) and supplementary (used to enrich models) indicators selected through frequency analysis to manage the complexity of UBEs by converging data and models at the needed scale. Each parameter is associated with a median/mean/modal value indicating its conditions. Rapid association with theoretical proneness to SLODs and SUODs is provided.
Figure 4 shows two relevant examples of historical BETs focused on a single urban square (Gabriele Bernardini, Sparvoli, *et al*., 2025), and on an urban neighbourhood (De Fino, Bernardini, *et al*., 2025), using GIS input data to combine mesoscale (i.e., morphology of open spaces) with microscale (vulnerability, geometry and use of buildings) variables.

Simulation-based evaluation
Simulators and risk-sensitive models can be used to investigate (multi-)risk conditions in selected storylines and "what-if" scenarios with the main goal of supplying decision-makers with quick metrics focused on the UBE performance both as a whole, and by its composing parts (to define UBE hot-spots). Indeed, they should trace behavioural-based impacts along with parameters related to hazard, physical environment, and management issues, pursuing a holistic approach.

Simulation tools
This work adopts ABM (Agent-Based Models) for simulation purposes (Duan and Fei, 2025), since they associate rules for each agent (i.e., UBE element, user, strategy), with mutual interactions, also depending on storyline-based hazard severity. Figure 5 traces a graphical representation of an ABM developed for terrorism risk, using arrows to trace dependencies among agents (Gabriele Bernardini, Cantatore, *et al*., 2025).
ABM first enables integrated spatial risk mapping, especially using cellular automata criteria, which divide the UBE into composing cells (Gabriele Bernardini, Sparvoli, *et al*., 2025). For instance, UHI and air pollution (SLODs) are modelled using mesoscale climate simulations, generating fine temperature and air quality maps on grids having a side length of 1m to 5m. The same grid is used for SUODs. Earthquakes are assessed through damage matrices based on structural vulnerability indicators, estimating debris depth, while terrorist risk relies on spatial exposure related to target position, accessibility, crowding, and prevention measures. Then, ABM simulates user behaviour and overlaps grids to locate users depending on a previously existing SLOD response to start an SUOD simulation. As an output, ABM predicts SLOD effects

04 | Esempio di BET per piazza soggette a SUOD e SLOD, e quartiere (contest fluviale) soggetto ad alluvione
Examples of BETs of Urban squares prone to SUODs and SLODs, and riverine (case-study) neighbourhoods prone to floods

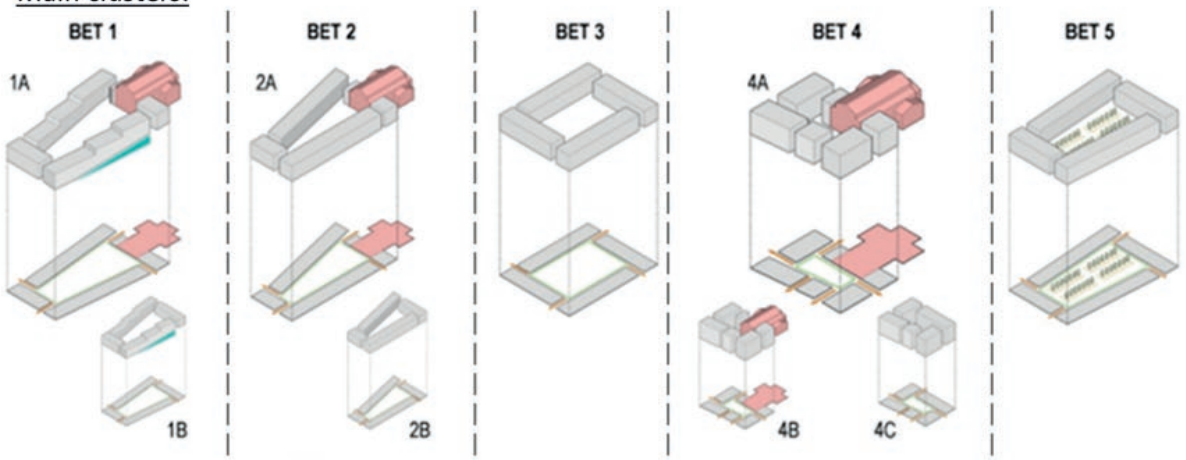
04 | **BETs of HISTORIC URBAN SQUARES**

Database: more than 1100 Italian Urban squares in main historic cities (also in view of tourist flow)

Parameters:

- P1 - Morphological configuration
- P2 - Height
- P4 - Permeability
- P5 - Special buildings
- P8 - Slope
- P9 - Green

Main clusters:



THEORETICAL PRONENESS TO RISKS (+)

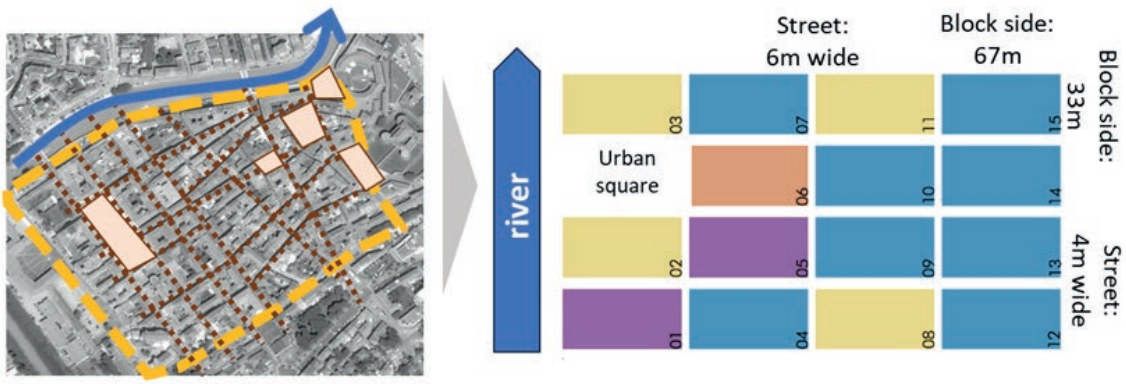
	BET 1A	BET 1B	BET 2A	BET 2B	BET 3	BET 4A	BET 4B	BET 4C	BET 5
SLOD									
Heat island	+	+	+	+	+	+	+	+	–
Air pollution	+	+	+	+	+	–	–	–	–
SUOD									
Earthquake	–	–	+	+	–	+	+	+	–
Terrorist act	+	–	+	–	–	+	+	–	–

BETs of RIVERINE HISTORIC URBAN NEIGHBOHOOD

Database: more than 280 buildings and 60 blocks in the historic city of Senigallia (AN)

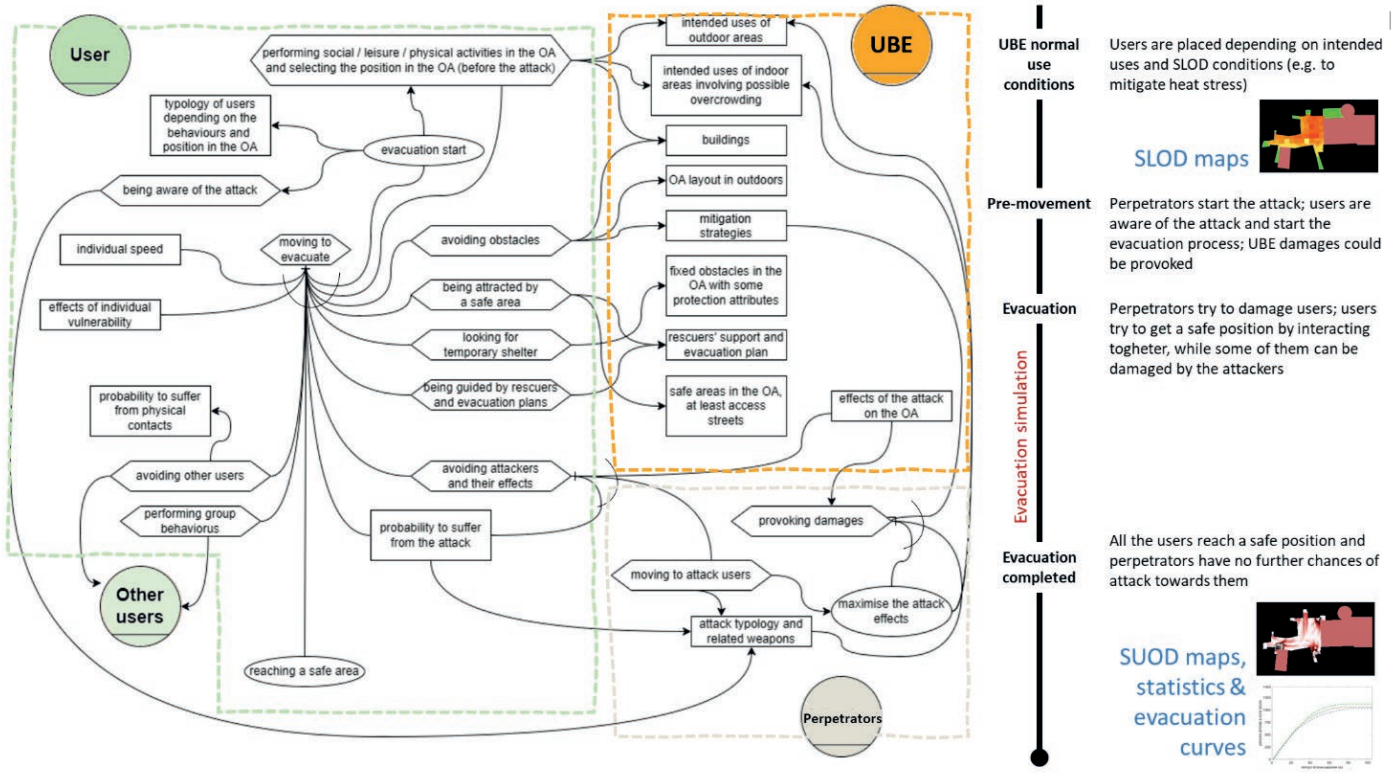
Parameters:

Block sides (geometry) and **street** width
Building vulnerability, materials, opening, conservation state, heritage value
Building intended use (ground and upper floors)
Sheltering area at the upper floors



Main clusters:

- Commercial use ground floor, with no basement and no flood shelterings
- Office/commercial use ground floor, with medium openings and limited flood shelterings
- Institutional multi-storey use (whole block), with flood shelterings
- Commercial use ground floor, with large openings and no flood shelterings



ci, arricchendo l'interpretazione di ciascun scenario di (multi-) rischio.

Le metriche includono KPI su SLOD (es. tasso di sudorazione per UHI, incidenza sulla salute per inquinamento), SUOD (es. rapporto tra macerie e superficie di movimento, 'resistore' degli accessi stradali, coefficiente di conservazione della velocità di esodo, livello di attrito con gli ostacoli, disponibilità di luoghi sicuri temporanei sicuri, rapporti di esposizione, livello di protezione degli ostacoli) e utenti (es. percentili di tempo e flusso di esodo, numero di contatti fisici/cadute, numero di utenti evacuati, numero di vittime). I KPI e le metriche sono normalizzati su scala 0–1 per confronti standardizzati, anche alla multiscala. Tali strumenti consentono anche la valutazione *post-retrofit* per valutare come strategie fisiche e gestionali implementate nell'UBE possano mitigare il (multi-)rischio rispetto ai livelli *pre-retrofit*, e quindi considerando lo stesso contesto e gli stessi utenti.

on user health, and SUOD evacuation times, casualties, and dynamic insights into crowd movement.

(Multi-)Risk metrics for quick evaluation of current and alternative scenarios

Simulation outputs are organised into KPIs, describing single risk factors and effects from micro (single map cell) to meso (open space) scale. Then, KPIs are combined using multicriterial decision making methods, which weight each KPI depending on expected risk relevance. Adding indicators from scenario creation tasks allows to match static and behavioural, dynamic parameters, thus enriching the interpretation of each (multi-)risk scenario. Metrics then incorporate one or more KPIs on SLOD (e.g., sweat rate for UHI, health affection rate for air pollution), SUOD (e.g., balance index of debris, road resistor coefficient, pedestrian speed conservation, obstacle friction rate, temporary secure open spaces, exposure index, obstacle protection rate) and users (e.g., normalised evacuation time percentile, crowd effects as number of physical contacts/falls, mean flow rate at the exit, number of evacuees for SUOD from surrounding buildings, number of deaths/casualties). KPIs and metrics are defined to range from 0 (minimum) to 1 (maximum) risk, for multi-scale and standardised comparison purposes. The modelling of post-retrofit alternatives in simulation predictive tools then assess how physical measures and emergency management can mitigate single to multi-risk in the same context, for the same users, but into possible modified scenarios/storylines. Such mesoscale assessment relies on each open space in the UBE network, depending on local interactions. The metrics are also arranged to point out macroscale hot-spots, and to provide multi-risk classification of whole/parts of UBE. Figure 6 traces a comparison between pre-retrofit and post-retrofit scenarios for UHI and terrorist acts, focused on a BET representing an urban square (Fig. 4) (Gabriele Bernardini, Sparvoli, *et al.*, 2025), which is ready to be further investigated through a case study-based analysis.

Communication and engagement of stakeholders

Results from previous assessment tasks converge towards (multi-)risk communication as a management strategy in preparedness and emergency response of different stakeholders, employing advanced digital tools for information modelling and immersive visualisation, and moving towards two directions.

The first, primarily targeted at expert users (technicians, decision/policy-makers), relies on a GIS-BIM-VR workflow from macroscale analysis of real UBEs to mesoscale modelling of BETs (i.e., squares, streets, buildings). The second, primarily targeted at non-expert users (citizens, associations), focuses on VR technologies in a SG (Serious Game) framework for abstract contexts, to train users on how to properly behave before, during and after emergency scenarios in a pervasive and engaging manner.

In both cases, the use of BETs allows several key objectives, including flexibility and replicability across multiple real contexts sharing similarities with the BETs; decoupling of VR experiences from concrete cases, which might otherwise generate over-sensitisation and alarmism among recipients; smooth functionality of digital solu-

Questa valutazione può essere efficacemente condotta alla mesoscala, comprendendo l'interazione locale in ogni spazio aperto dell'UBE. Le metriche risultanti permettono di individuare punti critici di rischio, e quindi prioritari per l'intervento all'interno della struttura dell'UBE, come pure di classificare il rischio complessivo o parziale dell'UBE, alla macroscala. Figura 6 mostra un esempio di confronto tra scenari *pre* e *post-retrofit* per combinazione di UHI e atti terroristici, riferiti a una BET rappresentativa di piazza urbana (Fig. 4), utile a supportare ulteriori analisi su casi studio (Bernardini, Sparvoli *et al*., 2025).

Comunicazione e coinvolgimento degli stakeholders

I risultati dei precedenti step di creazione di scenari e di valutazione del (multi-)rischio convergono nelle azioni di comunicazione e coinvolgimento dei diversi stakeholders, intese come strategie gestionali nelle fasi di preparazione e risposta all'emergenza, attraverso l'impiego di strumenti digitali avanzati per la modellazione informativa e la visualizzazione immersiva. Tale approccio si articola lungo due principali direttrici operative.
La prima, rivolta a utenti esperti (tecnici, decisori, amministratori), si basa su un flusso GIS–BIM–VR che va dall'analisi su macroscala di UBE reali alla modellazione su mesoscala di BET.
La seconda, indirizzata a utenti non esperti (cittadini, associazioni), si concentra su tecnologie VR in ambienti SG (*Serious Game*) per contesti astratti, finalizzati alla formazione comportamentale prima, durante e dopo scenari di emergenza, in modo pervasivo e coinvolgente.
In entrambi i casi, l'uso delle BET consente di perseguire obiettivi di: flessibilità e replicabilità in contesti reali analoghi; disaccoppiamento delle esperienze VR dai casi concreti, evitando sovra-sensibilizzazione e allarmismo; fluidità operativa delle soluzioni digitali, riducendo il carico computazionale derivante dalla modellazione di scenari complessi.

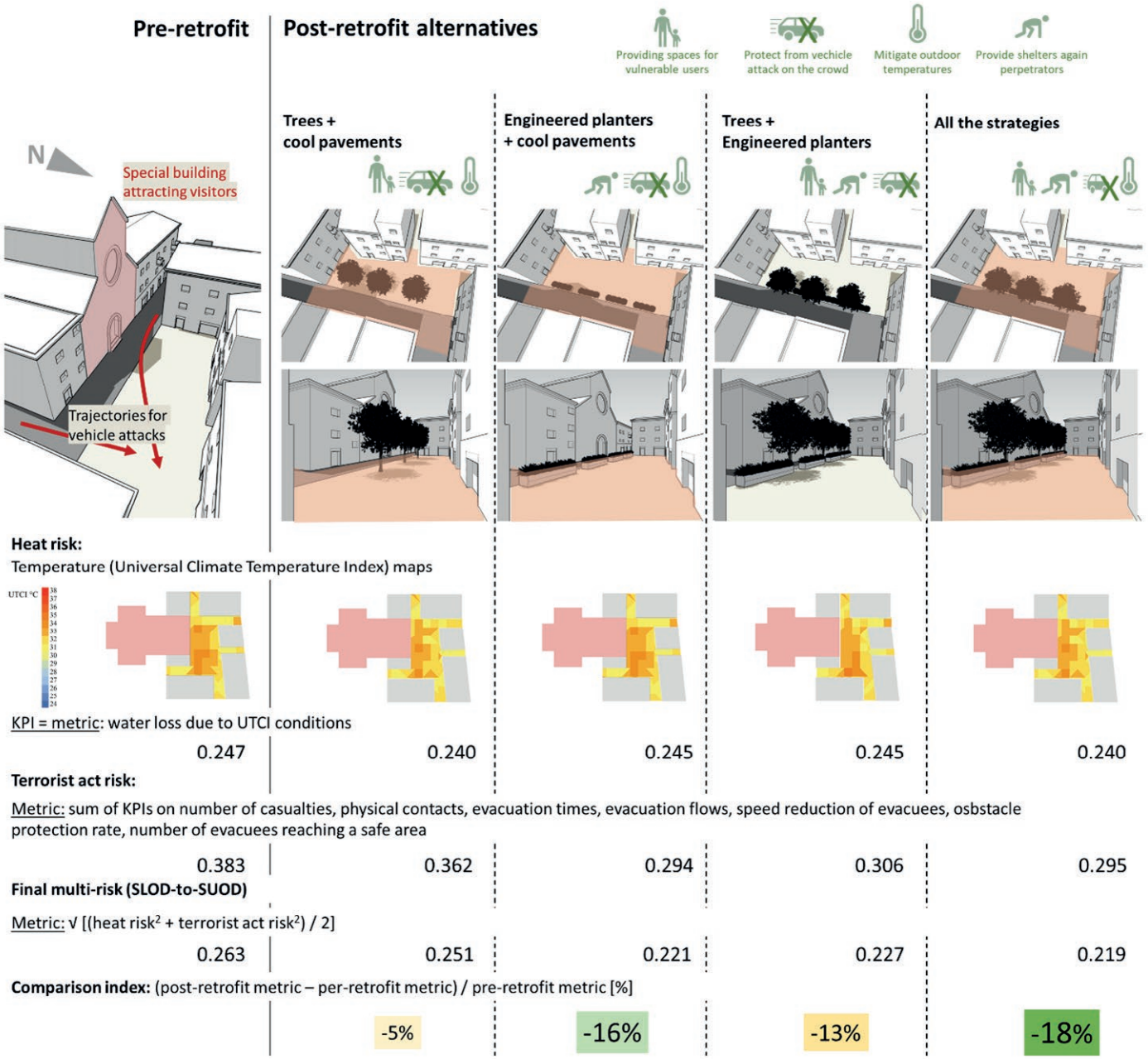
Integrare strumenti GIS e BIM per gestire e visualizzare i dati
Come evidenziato nella raccolta ed elaborazione dei dati in casi reali, la gestione e visualizzazione multiscala inizia con una fase preliminare in ambiente GIS, utile ad armonizzare dati statici (es. vulnerabilità di sistemi e sottosistemi edilizi) e dinamici (es. occupazione indoor e outdoor). Ad esempio, nel caso del rischio alluvione (De Fino, Bernardini *et al*., 2025), gli scenari di pericolo (profondità e velocità dell'acqua) sono stati correlati con caratteristiche morfo-tipologiche e materico-costruttive che determinano la suscettibilità degli edifici all'ingresso dell'acqua (es. aperture, dislivelli ai piani terra/interrati, permeabilità di infissi e finiture opache, sistema strutturale, stato di conservazione). Questi dati sono stati integrati con le condizioni di occupazione alle funzioni (residenze, edifici pubblici, spazi esterni, aree di aggregazione), che influenzano numero, tipologia e distribuzione spazio-temporale degli utenti potenzialmente coinvolti nell'evacuazione verso piani superiori e/o area di raccolta.
Questa fase risponde a tre funzioni principali: costruire una banca dati strutturata secondo ontologie standardizzate, anche per elaborazioni specialistiche; localizzare le aree più critiche dell'UBE tramite la combinazione di fattori e metriche sopra citati; supportare l'analisi cluster delle tipologie UBE più ricorrenti per la modellazione microscopica. In particolare, la modellazione BIM ha integrato i risultati dell'analisi cluster e descritto le tipologie di edifici e spazi aperti, discretizzandoli

tions, reducing computational loads stemming from complex scenario modelling.

'Feeding' GIS and BIM tools for data management and visualisation
As pointed out in data collection and management in real cases, multiscalar management and visualisation can first exploit an initial GIS-based phase to centralise and harmonise both (multi-)risk static (e.g., vulnerability of building systems and subsystems) and dynamic (e.g., indoor and outdoor occupancy) data of the UBE. For instance, in flood risk (De Fino, Bernardini, *et al*., 2025), hazard scenarios (water depth and speed) were cross-related with morpho-typological and material-constructive features determining building susceptibility to water ingress (e.g., openings, level differences at ground floors, basements, permeability of windows and opaque finishes, structural system, conservation state). These data were further integrated with occupancy conditions depending on hosted uses (residences, public buildings and outdoor spaces, mass gathering areas), which influence spatiotemporal number, type, and distribution of users potentially involved in flood evacuation (moving towards upper floors and/or assembly points).
This phase fulfils three main functions, precisely establishing a database structured according to standardised ontologies, also in view of case-oriented expert elaborations; locating riskiest areas within the UBE through the combination of the aforementioned factors and of simulation-based metrics too; supporting cluster analysis on most recurrent building typologies for microscale modelling. In particular, BIM-based modelling integrated cluster analysis results and described building and open space types, discretised to the minimum analysis unit of risk factors (e.g., the technological element "window frame" for vertical transparent closure permeability). Each element is enriched with standardised descriptors (e.g., "frame material type") and linked to computational rules for assigning weights and generating specific KPIs. Furthermore, this approach supported the automation of workflows for querying data and visualising parameters and indicators in VR environments through colour maps pre-associated with risk ranges (Fig. 7).

Virtual Reality and Serious Game for public training and involvement
Virtual training of users on behaviours to be adopted before, during, and after emergencies, also in spatial and/or temporal combination, relies on the SG and fulfils an educational function through entertainment, ensuring relevant effectiveness and long-term retention (Baraldo and Di Giuseppantonio Di Franco, 2024). To this end, it employs interactive dynamics of scenario visualisation, action demonstration, and behavioural response simulation
VR-SG solutions were developed to provide engaging experiences under controlled and safe conditions, integrating recommendations issued by institutional risk protection and management bodies with additional information from the phenomenological and behavioural analyses previously described. For example, in multi-risk scenarios about UHI and earthquakes (De Fino, Cassano, *et al*., 2025), the immersive VR environment was designed for VR headsets as a set of training/game modules, addressing: (1) use

06 | Comparazione di indicatori SLOD, SUOD e SLOD-to-SUOD tra scenari *pre* and *post-retrofit* nella piazza delle BET4 (vedi Figura 4)
Comparison through SLOD, SUOD and SLOD-to-SUOD indicators between pre-retrofit and post-retrofit conditions in an urban square BET4



of protective elements for UHI (e.g., shaded areas, greenery, water bodies); (2) evacuation from sources of danger during earthquakes (e.g., electrical devices, debris, breakable objects). This narrative was supported by maps and animations resulting from rigorous analytical simulations of UTCI distribution in open spaces and falling debris, as well as agent-based evacuation models (Fig. 8).

All developed solutions underwent careful evaluation of user effectiveness and usability, also in comparison with more traditional tools, through testing protocols and feedback collection. Beyond training for ex-ante scenarios, they are also regarded as promising for ex-post communication of mitigation solutions, in view of participatory stakeholder consultation (Simonofski, Johannessen and Stendal, 2024).

Final remarks

Considering how users respond and behave in disaster scenarios, single and multi-risk scenarios have to be faced in historic UBE to ensure effective solutions. This research, built on the experience of projects BE S2ECURE and ReACT, innovatively addresses risk assessment holistically by integrating dynamic factors (related to user behaviour and spatiotemporal variability of UBE occupancy) into the otherwise static evaluations of the physical vulnerability to hazards. This user-centred perspective is also applied in the development of digital solutions for visualisation, management, and communication of scenarios and strategies, targeting both expert and non-expert stakeholders. Moreover, the proposed typological approach not only ensures broad replicability of the results, but also detaches evaluations and recommendations from real-world cases, thus avoiding potential over-sensitisation of local populations. Future works can then apply the approach to several contexts and provide relevant insights for decision-makers and managing authorities through digital solutions for visualising risk factors, impacts, and mitigation strategies, as well as for the general public (citizens and historic

all'unità minima di analisi dei fattori di rischio (es. l'elemento tecnologico "infisso" per la permeabilità delle chiusure trasparenti verticali). Ogni elemento è stato arricchito con descrittori standardizzati (es. "tipologia di materiale del telaio") e collegato a regole computazionali per l'attribuzione di pesi e la generazione di KPI specifici. Inoltre, tale approccio ha supportato l'automazione dei flussi operativi per l'interrogazione dei dati e la visualizzazione di parametri e indicatori in ambienti VR, tramite mappe cromatiche pre-associate a intervalli di rischio (Fig. 7).

Realtà Virtuale e Serious Game per il training e il coinvolgimento degli utenti

La formazione in VR degli utenti sui comportamenti da adottare prima, durante e dopo un'emergenza, anche in combinazione spaziale e/o temporale, si basa sull'approccio SG, che assolve una funzione educativa attraverso l'intrattenimento, garantendo efficacia e memorizzazione nel lungo periodo (Baraldo e Di Giuseppantonio Di Franco, 2024). A tal fine, vengono impiegate dinamiche interattive di visualizzazione degli scenari, dimostrazione delle azioni e simulazione comportamentale.

Le soluzioni VR–SG sono state sviluppate per offrire esperienze coinvolgenti in condizioni controllate e sicure, integrando le raccomandazioni degli enti istituzionali preposti alla protezione e gestione del rischio con informazioni aggiuntive derivate dalle analisi fenomenologiche e comportamentali precedentemente descritte. Ad esempio, in scenari di multi-rischio legati a UHI e sisma (De Fino, Cassano *et al*., 2025), l'ambiente immersivo è stato progettato per visori VR come insieme di moduli formativi/ludici, dedicati a: (1) uso di elementi protettivi per UHI (es. zone d'ombra, vegetazione, specchi d'acqua); (2) evacuazione da fonti di pericolo durante il sisma (es. dispositivi elettrici, macerie, oggetti fragili). La narrazione è supportata da mappe e animazioni ottenute da simulazioni analitiche sulla distribuzione di temperatura outdoor, caduta dei detriti, e ABM per l'esodo.

Tutte le soluzioni sono state validate per efficacia e usabilità, anche rispetto a strumenti tradizionali, tramite protocolli di test e raccolta di feedback. Oltre alla formazione ex-ante, tali strumenti sono promettenti anche per la comunicazione ex-post delle soluzioni di mitigazione, in ottica di consultazione partecipata (Simonofski, Johannessen e Stendal, 2024).

Conclusioni

Gli scenari di rischio singolo e multiplo negli UBE storici devono essere affrontati considerando le modalità con cui gli utenti reagiscono e si comportano in situazioni di emergenza, per rendere le soluzioni il più efficaci possibile. Questa ricerca, sviluppata nei progetti BE S2ECURE e ReACT, propone un approccio innovativo alla valutazione del rischio, integrando fattori dinamici e comportamenti degli utenti nelle tradizionali analisi statiche su vulnerabilità fisica e pericolosità. Questa prospettiva centrata sull'utente è applicata anche allo sviluppo di soluzioni digitali per la visualizzazione, gestione e comunicazione di scenari e strategie, rivolte sia a stakeholder esperti che non esperti. Inoltre, l'approccio tipologico proposto garantisce ampia replicabilità dei risultati e consente di svincolare valutazioni e raccomandazioni dai casi reali, evitando fenomeni di sovra-sensibilizzazione delle popolazioni locali. Le future applicazioni potranno estendere il metodo a diversi contesti, offrendo strumenti digitali e integrati per autorità competenti e popolazione, attraverso percorsi formativi in VR e comunicazione partecipativa.

UBE visitors) through VR training and participatory communication in emergency situations.

ATTRIBUTION, ACKNOWLEDGMENTS, COPYRIGHT

This work has been supported by the projects:

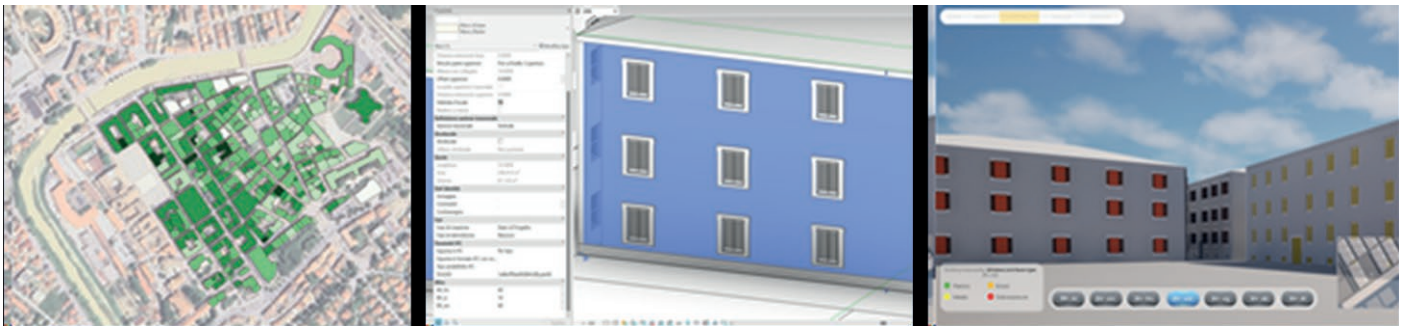
- BE S²ECURE ("Built Environment Safer in Slow and Emergency Conditions through behavioUral assessed/designed Resilient solutions" - Grant number: 2017LR75XK, funded by MIUR within PRIN 2017) - coordinator: prof. E. Quagliarini; Research units: Università Politecnica delle Marche, Politecnico di Bari, Roma La Sapienza, Università di Perugia, Politecnico di Milano;
- ReACT ("Resilient urban and metropolitAn built environments through inClusive mulTi-risk behavioural-based models and simulations", funded by PNRR), ReACT ("(planning) Resilient urban and metropolitAn built environments through inClusive mulTi-risk behavioural-based models and simulations", project code PE0000005, CUP E63C22002000002 – funded under the National Recovery and Resilience Plan (NRRP), Mission 4 Component 2 Investment 1.3 ('Partenariati estesi alle università, ai centri di ricerca, alle aziende per il finanziamento di progetti di ricerca di base') funded by the European Union – NextGenerationEU, Italian Ministry of University, according to the Call for tended "Decreto Direttoriale No. 341 of 15/3/2022", Project "Multi-Risk sciEnce for resilienT commUnities undeR a changiNg climate (RETURN)", code PE0000005 – CUP, Concession Decree (Decreto Direttoriale) No. 1552 of 11/10/2022, within the "BANDO a CASCATA" of Spoke 5 TS1 "Insediamenti Urbani e Metropolitani", with relation to the ReACT Concession Decree (Decreto Rettorale di concessione del finanziamento) DR/2025/107 of 13/01/2025 from Università Federico II di Napoli as Spoke - coordinator: prof. E. Quagliarini; Research units: Università Politecnica delle Marche, Politecnico di Bari.

07 | Esempio di prodotti del flusso GIS-BIM-VR. Mappatura indice normalizzato di vulnerabilità edilizia (QGIS®), attribuzione parametrica dei descrittori e dei pesi di vulnerabilità edilizia (Autodesk Revit®) e relativa visualizzazione in scala cromatica. (Epic Unreal®)

Example of GIS-BIM-VR workflow outcomes. From left: Normalised building vulnerability index mapping (QGIS®), parametric attribution of descriptors and vulnerability weights (Autodesk Revit®), and corresponding chromatic scale visualisation (Epic Unreal®)

08 | esempio di costruzione di soluzione VR-SG per rischio da ondate di calore e sisma. Da sinistra: modello da grafica computerizzata (MAXON Cinema4D®), integrazione VR di mappe tematiche UTCI integrate (ENVI-met®) e ambiente simulativo (Unreal Engine®)

Example of VR-SG solution development for UHI and earthquake risk. From left: computer graphics model (MAXON Cinema4D®), VR integration of UTCI maps (ENVI-met®), simulation environment (Unreal Engine®)



| 07



| 08

REFERENCES

An, Q. and Ochiai, C. (2025), "Urban morphology and disaster risk reduction: A systematic literature review", *Progress in Disaster Science*, 27, p. 100455. Available at: https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2025.100455.

Baraldo, M. and Di Giuseppantonio Di Franco, P. (2024), "Place-centred emerging technologies for disaster management: A scoping review", *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 112, p. 104782. Available at: https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104782.

Bernardini, G., Sparvoli, G., *et al.* (2025), "Evaluating strategies for single to multi-risk mitigation in urban public open spaces: A behavioural simulation-based approach applied to Italian typological historical urban squares", *Cities*, 166, p. 106267. Available at: https://doi.org/10.1016/j.cities.2025.106267.

Bernardini, G., Cantatore, E., *et al.* (2025), *Terrorist Risk in Urban Outdoor Built Environment*. 1st edn. Singapore: Springer Nature Singapore (SpringerBriefs in Architectural Design and Technology). Available at: https://doi.org/10.1007/978-981-97-6965-0.

de Bruijn, K.M. *et al.* (2016), "The storyline approach: a new way to analyse and improve flood event management", *Natural Hazards*, Vol. 81(1), pp. 99-121. Available at: https://doi.org/10.1007/s11069-015-2074-2.

Curt, C. (2021), "Multirisk: What trends in recent works? – A bibliometric analysis", *Science of The Total Environment*, 763, p. 142951. Available at: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142951.

Duan, X. and Fei, W. (2025), "Assessment of the Impact of Temporal and Spatial Factors on the Emergency Evacuation Capacity of External Spaces in High-Density Urban Communities during Earthquake Disasters", *International Journal of Disaster Risk Reduction*, pp. 105760. Available at: https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2025.105760.

De Fino, M., Bernardini, G., *et al.* (2025), "Flood Risk Management in Historic Centres: A Scalable Typological Framework Integrating GIS, Bim and Vr'", *SSRN Electronic Journal* [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.2139/ssrn.5375831.

De Fino, M., Cassano, F., *et al.* (2025), "On the user-based assessments of virtual reality for public safety training in urban open spaces depending on immersion levels", *Safety Science*, 185, pp. 106803. Available at: https://doi.org/10.1016/j.ssci.2025.106803.

Julià, P.B. and Ferreira, T.M. (2021) "From single- to multi-hazard vulnerability and risk in Historic Urban Areas: a literature review", *Natural Hazards*, Vol. 108(1), pp. 93-128. Available at: https://doi.org/10.1007/s11069-021-04734-5.

Polese, M. *et al.* (2024), "Multi-risk assessment in transboundary areas: A framework for harmonized evaluation considering seismic and flood risks", *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 101, pp. 104275. Available at: https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104275.

Sharifi, A. (2019), "Urban form resilience: A meso-scale analysis", *Cities*, 93, pp. 238–252. Available at: https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.05.010.

Simonofski, A., Johannessen, M.R. and Stendal, K. (2024), "Extended reality for citizen participation: A conceptual framework, systematic review and research agenda", *Sustainable Cities and Society*, Vol. 113, pp. 105692. Available at: https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105692.

Spazi pubblici provvisori: prossimità, inclusività e adattabilità per una socialità post-sisma

Ludovica Gregori, https://orcid.org/0000-0002-1080-8930
Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Firenze, Italia
ludovica.gregori@unifi.it

Abstract. Con approccio sociale e interdisciplinare, lo studio identifica il ruolo centrale dello spazio pubblico nel supportare i processi di ricostruzione sociale post-sisma nel contesto internazionale attraverso un confronto critico su modelli procedurali e progettuali in Italia e Turchia. La metodologia *mixed methods* applicata valorizza gli aspetti qualitativi integrando analisi normativa, osservazione empirica, interviste. La ricerca identifica prossimità, inclusività e adattabilità come requisiti per la qualità dello spazio pubblico provvisorio, tradotti in schede integrabili alle vigenti procedure italiane, con possibili applicazioni in altri contesti a rischio.

Parole chiave: Post-emergenza; Benessere; Spazio pubblico; Criteri progettuali; Temporaneità.

Abitare provvisorio e significato permanente

Gli insediamenti temporanei post-sisma non sono solo dispositivi logistici, ma ambienti in cui la dimensione relazionale è decisiva per l'adattamento individuale e collettivo (Fenoglio, 2016): questa fase lascia tracce permanenti sull'ambiente e sui suoi abitanti (Van der Kolk, 2014; Camiz, 2018), segnando il futuro della ricostruzione.
Esperienze internazionali virtuose, come quelle di Shigeru Ban (2009) o Norman Foster e Holcim (2023), e progetti come quello di Rikuzentakata (Sugawaradaisuke, 2011), mostrano che la dignità dello spazio comune può essere garantita anche in condizioni di estrema precarietà attraverso leggerezza, modularità e riconoscibilità (Perrucci and Baroud, 2020). Il modello giapponese Kumamoto Type D (2016) evidenzia l'importanza della pianificazione di spazi comuni per favorire socialità e supporto emotivo, essenziali per la resilienza comunitaria (Mela, 2017). Le linee guida internazionali (Sphere, 2018; UN-Habitat, 2015) sottolineano l'integrazione della dimensione sociale negli insediamenti emergenziali, ma la realtà nazionale offre ampi margini di miglioramento in questo senso.
Assumendo una prospettiva sociale (Chiesi and Costa, 2016), gli spazi pubblici sono interpretati in modo innovativo come componenti attivi del processo di recupero dall'esperienza traumatica, favorendo interazioni positive tra abitanti e attori di tale contesto transitorio verso una nuova realtà.

Contesto della ricerca
La vulnerabilità tra gli abitanti in post-emergenza è condivisa anche in contesti geograficamente diversi, creando una base comune di confronto (Mazumdar, Itoh, and Iwasa, 2021). Lo scenario nazionale riguarda le aree a rischio sismico del Centro Italia colpite nel 2016-2017, con 228 insediamenti temporanei in quattro regioni[1], mentre il caso estero analizzato empiricamente si trova nella Turchia orientale post sisma 2023[2].
Lo studio evidenzia differenze per aspetti geografici, culturali, religiosi e politici ma ritrova elementi comuni nelle percezioni e comportamenti umani (Hall, 1966, Ferroni and Gallese, 2022; Robinson, Pallasmaa and Zambelli, 2021). Per un quadro procedurale internazionale più ampio e aggiornato, un confronto con esperti giapponesi ha permesso di approfondire requisiti per layout spaziosi, distanze di sicurezza e riutilizzo delle strutture modulari (Capanna and Spita, 2020).

Approccio metodologico

La letteratura di riferimento sullo spazio pubblico (Gehl, 1971; Ciaravella and Chiesi, 2012; Lauria, 2017; Romano, 2019) e sull'abitare temporaneo (Bologna, 2020; Sapienza Università di Roma, 2024) evidenzia la natura talvolta ineffabile del tema e

Provisional public spaces: proximity, inclusiveness, and adaptability for post-earthquake sociality

Abstract. Using a social and interdisciplinary approach, the study identifies the central role of public space in supporting post-earthquake social reconstruction processes in the international context through a critical comparison of procedural and design models in Italy and Türkiye. The applied mixed methods methodology enhances qualitative aspects by integrating normative analysis, empirical observation, and interviews. The research identifies proximity, inclusiveness, and adaptability as requirements for the quality of temporary public space, translated into documents that can be integrated with current Italian procedures, with possible applications in other at-risk contexts.

Keywords: Post-emergency; Wellbeing; Public space; Design criteria; Temporariness.

Provisional living and permanent meaning

Post-earthquake temporary settlements are not only logistical devices, but environments in which the relational dimension is decisive for individual and collective adaptation (Gordon, 2004; Fenoglio, 2016). This phase leaves permanent traces on both the environment and its inhabitants (Van der Kolk, 2014; Camiz, 2018), marking the future of reconstruction.
Virtuous international experiences, such as those of Shigeru Ban (2009) and Norman Foster and Holcim (2023), as well as projects like Rikuzentakata (Sugawaradaisuke, 2011), demonstrate that the dignity of common space can be ensured even in conditions of extreme precariousness through lightness, modularity, and recognisability (Perrucci and Baroud, 2020). The Japanese Kumamoto Type D model (2016) emphasises the importance of planning common spaces to promote sociability and emotional support, which are essential for community resilience (Mela, 2017). International guidelines (Sphere, 2018; UN-Habitat, 2015) recommend integrating the social dimension into emergency settlements, but the national reality offers considerable room for improvement in this regard.
Taking a social perspective (Chiesi and Costa, 2016), public spaces are innovatively interpreted as active components of the recovery process from traumatic experience, fostering positive interactions between inhabitants and actors in this transitory context towards a new reality.

Research Context
The vulnerability of post-emergency residents is also present in diverse

ISSN online: 2239-0243 | © 2025 Author(s) | http://www.fupress.com/techne | DOI: 10.36253/techne-18626
Open access, peer-reviewed article published by Firenze University Press (https://www.fupress.com) and distributed, except where otherwise noted, under the terms of the CC BY 4.0 License for content and CC0 1.0 Universal for metadata

la pluralità di definizioni possibili. Considerando lo spazio pubblico come componente attivo dei processi di recupero post-traumatico (Petrucci and Baroud, 2020; Ramazani *et al*., 2022), la ricerca adotta una concezione nolliana estesa, includendo sia gli spazi aperti sia gli spazi collettivi interni.

Prima di procedere all'analisi, è stato delineato il quadro epistemologico: l'approccio ermeneutico–fenomenologico adottato supporta la comprensione di come lo spazio pubblico provvisorio sia vissuto e percepito e l'interpretazione delle relazioni tra configurazioni spaziali e implicazioni sociali (Gkoumas *et al*., 2025). Attraverso metodi misti per la raccolta di informazioni qualitative e quantitative (Morgan, 2007; Biesta, 2010), si integrano quadro teorico, osservazione empirica e confronto critico.

L'interpretazione dei dati avviene attraverso strumenti ermeneutici con contributi da psicologia ambientale e neuroscienze (Romice *et al*., 2016; Gallese *et al*., 2015), che dimostrano come ambienti leggibili e sensibili alle molteplici possibilità di azione implicate nello spazio costruito (Gibson, 1979) riducano l'attivazione fisiologica dello stress (Canepa *et al*., 2019) e supportino orientamento e senso di sicurezza (Jacobs, 1961).

Quattro fasi d'indagine principali sono replicate nei casi di studio in Italia e Turchia, secondo un processo iterativo in cui analisi, interpretazione e verifica si influenzano reciprocamente, generando un sistema progressivo di raffinamento delle ipotesi progettuali:

1. analisi documentale del quadro normativo precettivo e dispositivo, con un approfondimento in particolare per l'Italia sugli strumenti adottati nel post-sisma 2016; questa fase si conclude con la raccolta di requisiti fisici e prestazionali previsti per gli insediamenti temporanei, strumenti e ruoli della gestione dell'emergenza;
2. osservazione non partecipante sul campo delle pratiche d'uso, attenzionando sia forme di appropriazione spontanea e che configurazioni spaziali formali; raccolta di dati quantitativi e descrittivi con supporto fotografico e documentale;
3. interviste semi-strutturate rivolte a esperti e stakeholkders[3] coinvolti, selezionati tramite campionamento ragionato, che hanno approfondito percezioni, criticità operative e valutazioni degli interventi realizzati e delle proposte intermedie e finali della ricerca;
4. confronto critico attraverso la triangolazione tra fonti normative, osservazioni empiriche e testimonianze raccolte, con l'individuazione di pratiche virtuose nei due contesti e elementi di trasferibilità delle procedure.

Ogni caso empirico viene descritto con le informazioni raccolte relative a: (a) contesto fisico e socio-spaziale; (b) metodi di raccolta dati applicati; (c) risultati dell'osservazione; (d) criticità rilevate; (e) elementi trasferibili. Queste sono analizzate mediante categorizzazione tematica e confronto incrociato, così da individuare pattern ricorrenti, divergenze significative e condizioni che rendono efficace lo spazio pubblico temporaneo nei processi di recupero post-traumatico.

Così l'osservazione dei casi aggiunge alla raccolta di buone pratiche dati quantitativi e qualitativi utili al dimensionamento, alla caratterizzazione morfologica e alla definizione dei nuovi criteri progettuali (Fig. 1). La validazione di questi si ritiene raggiunta attraverso la verifica delle esigenze operative e all'allineamento con procedure e strumenti in uso presso l'ex

geographical contexts, leading to a comparable basis for comparison (Mazumdar, Itoh, and Iwasa, 2021). The national scenario concerns the seismic risk areas of Central Italy affected in 2016-2017, with 228 temporary settlements in four regions[1]. They were also studied thanks to a research period at the Department of Civil Protection (DPC), while the foreign case analysed empirically is in eastern Türkiye[2], post-earthquake 2023.

The study highlights differences in geographical, cultural, religious and political aspects but finds common elements in human perceptions and behaviours (Hall, 1966, Ferroni and Gallese, 2022; Robinson, Pallasmaa and Zambelli, 2021). For a broader and more up-to-date international procedural framework, a comparison with Japanese experts allowed us to delve deeper into requirements for spacious layouts, safety distances, and reuse of modular structures (Capanna and Spita, 2020).

Methodological Approach

The reference literature on public space (Gehl, 1971; Ciaravella and Chiesi, 2012; Lauria, 2017; Romano, 2019) and on temporary living (Bologna, 2020; Sapienza University of Rome, 2024) highlights the occasionally ineffable nature of the topic, and the many possible definitions. Considering public space as an active component of post-traumatic recovery processes (Petrucci and Baroud, 2020; Ramazani *et al*., 2022), the research adopts an extended nollian conception, including both open spaces and internal collective spaces.

Before proceeding with the analysis, the epistemological framework was outlined. The hermeneutic-phenomenological approach adopted supports the understanding of how provisional public space is experienced and perceived, and the interpretation of relationships between spatial configurations and social implications (Gkoumas *et al*., 2025). Theoretical framework, empirical observation and critical comparison are integrated by adopting mixed methods for collecting qualitative and quantitative information (Morgan, 2007; Biesta, 2010).

Four main phases of investigation are replicated in case studies in Italy and Türkiye, according to an iterative process in which analysis, interpretation and validation influence each other, generating progressive refinement of design hypotheses:

1. documentary review of the preceptive and implementation regulatory framework, with a comprehensive analysis, particularly for Italy, of the tools used in the post-earthquake period 2016. This phase concludes with the collection of physical and performance requirements for temporary settlements, tools, and emergency management roles;
2. non-participant field observation of use practices, focusing on both forms of spontaneous appropriation and formal spatial configurations; collection of quantitative and descriptive data with photographic and documentary support;
3. semi-structured interviews with experts and stakeholders[3] involved, selected through reasoned sampling, which explored their perceptions, operational critical issues, and evaluations of the interventions implemented so far, as well as the intermediate and final research proposals;

01 | Fasi operative del progetto di ricerca
Operational phases of the research project

02 | Vista dell'Area SAE Cortine Est, Camerino, 2023
View of SAE Cortine East, Camerino, 2023

03 | Vista aerea dell'area Bayrampaşa, İbrahim Yilmazcan, Pazarcık, 2023
Aerial view of Bayrampaşa area, İbrahim Yilmazcan, Pazarcık, 2023


| 01


| 02


| 03

Ufficio III "Pianificazione interventi infrastrutturali di emergenza" del DPC[4].

Casi studio

Sono stati selezionati i casi studio di Camerino SAE Cortine (Fig. 2) e di Pazarcik Bayrampaşa (Fig. 3) in Turchia sulla base di criteri sia operativi sia analitici. I primi riguardano la loro rilevanza nel quadro mediterraneo e la possibilità di ottenere i permessi necessari per condurre osservazioni dirette; i secondi includono la comparabilità in termini di scala, numero di unità emergenziali e morfologia delle aree. Le differenze nei modelli di governance e nella gestione degli spazi pubblici hanno inoltre offerto un terreno fertile per riflettere sulla trasferibilità delle strategie proposte.

Italia

In Italia, la localizzazione e le caratteristiche degli insediamenti semi-permanenti sono indicate dal DPC con strumenti non precettivi: le linee guida per la redazione dei Piani di Protezione Civile a vari livelli territoriali, definite dalla Direttiva PCM 30/04/2021 e il Manuale Operativo per la predisposizione di un piano comunale o intercomunale di Protezione Civile (2007). Indicazioni più dettagliate si trovano nell'Accordo Quadro (A.Q.) concernente la realizzazione di insediamenti con Soluzioni Abitative di Emergenza (SAE), stipulato per conto del DPC nel 2023 con cui l'ente appaltante nazionale ne definisce gare per un periodo determinato (4 anni). Gli allegati tecnici si rifanno alle Classi di Requisiti UNI 8289-1: 1981: assicurando criteri procedurali consolidati, ma affrontando solo marginal-

4. critical comparison through triangulation between normative sources, empirical observations, and collected evidence, with the identification of virtuous practices and elements of transferability of procedures in the two contexts.

Each empirical case is described with the collected information relating to: (a) physical and socio-spatial context; (b) applied data collection methods; (c) observation results; (d) detected critical issues; (e) transferable elements. These are analysed through thematic categorisation and cross-comparison to identify recurring patterns, significant divergences, and conditions that make temporary public space effective in post-traumatic recovery processes.

Thus, case observation adds quantitative and qualitative data to the collection of good practices that are useful for sizing, morphological characterisation, and the definition of new design criteria (Fig.1). They are validated by verifying operational needs, and the alignment with procedures and tools in use at the former Office III "Emergency Infrastructure Intervention Planning" of the DPC[4].

Case Studies

The cases of Camerino SAE Cortine (Fig. 2) and Pazarcik Bayrampaşa (Fig. 3) were selected based on both operational and analytical criteria. The former concerns their relevance within the Mediterranean framework, and the possibility of obtaining the necessary permits to conduct direct observations. The latter, instead, includes comparability in terms of scale, number of emergency units, and morphology of the areas. Differences in governance models and management of public spaces have also provided fertile ground for reflection on the transferability of the proposed strategies.

Italy

In Italy, the location and characteristics of semi-permanent settlements are indicated by the DPC with non-prescriptive tools, precisely the guidelines for drafting Civil Protection Plans at various territorial levels, defined by the DPCM 30/04/2021, and the Operational Manual for the preparation of a municipal or inter-municipal Civil Protection plan (2007). More detailed information can be found in the Framework Agreement (F.A.) concerning the construction of settlements with Emergency Housing Solutions (SAE), signed on behalf of the DPC in 2023, with which the national contracting entity defines tenders for a specific period (4 years). The technical annexes are based on UNI Requirements Classes 8289-1: 1981. Ensuring consolidated procedural criteria, but only marginally addressing the quality

04 | Via commerciale pedonale del Sottocorte Village, Camerino, 2023
Pedestrian commercial street of Sottocorte Village, Camerino, 2023

05 | Area esterna dell'edificio "Uno spazio per crescere" nell'area SAE Cortine, Camerino, 2023
Outdoor area of "Uno spazio per crescere" common building, SAE Cortine, Camerino, 2023



| 04


| 05

mente la qualità degli spazi pubblici, l'A.Q. diventa lo strumento più idoneo da integrare.
Il focus italiano riguarda la regione più colpita nel 2016, le Marche, dove le osservazioni sul campo dei i villaggi SAE di Camerino hanno evidenziato come l'orientamento dei moduli abitativi e la sporadica presenza di spazi comuni di libero accesso limitino le possibilità di incontro quotidiano e come la marginalità dei servizi collettivi riduca la percezione di prossimità. Camerino è un caso rappresentativo del Centro Italia per dimensioni e complessità abitativa mentre si contraddistingue per la presenza di uno dei rari progetti di spazio pubblico provvisorio: il Sottocorte Village (Coccia, D'Annuntiis, 2019), un'area pedonale all'aperto con locali commerciali (Fig. 4), non lontano dal centro storico, dall'università e raggiungibile in auto dal principale insediamento temporaneo SAE Cortine (Fig. 5).

Turchia
La città di Pazarcik riflette una dimensione media della realtà abitativa turca della zona colpita dall'ultimo terremoto, a cui gli enti locali e Turkish Disaster and Emergency Management Authority (AFAD) hanno risposto con la realizzazione di quattro 'container city'. Queste sono state costruite da appaltatori differenti con alcune variazioni di layout ma numerose caratteristiche condivise che riflettono obblighi normativi più stringenti di quelli italiani.
Subito dopo il sisma, la Union of Chambers of Turkish Engineers and Architects (UCTEA) ha pubblicato la Temporary Settlement Areas Guide per indicare ai progettisti di garantire accessibilità, sicurezza e sistemi infrastrutturali, nonché la scelta di posizione e dimensioni dell'area per assicurarsi di «non causare ulteriori traumi» (2023, p. 1). Inoltre, la guida richiede che gli insediamenti, così come i percorsi, siano strutturati gerarchicamente, dall'unità singola al cluster al quartiere.

of public spaces, the F.A. becomes the most suitable tool to be integrated.
Italian focus is on the region most affected in 2016, The Marches, where field observations of the SAE villages of Camerino highlighted how the orientation of housing units, and the sporadic presence of open-access common spaces, limit the possibility of daily encounters, and how the marginalisation of collective services reduces the perception of proximity. Camerino is a representative case of Central Italy in terms of size and housing complexity, while it stands out for the presence of one of the rare temporary public space projects, namely the Sottocorte Village (Coccia, D'Annuntiis, 2019). This open-air pedestrian area with commercial premises (Fig. 4) is situated not far from the historic city centre and the university. It can be reached by car from the main temporary settlement SAE Cortine (Fig. 5).

Türkiye
The city of Pazarcik reflects an average size of the Turkish housing framework of the area hit by the latest earthquake, to which local authorities and the Turkish Disaster and Emergency Management Authority (AFAD) responded with the construction of four 'container cities'. These were built by different contractors with some layout variations but numerous shared features, which reflect more stringent regulatory obligations than the Italian ones.
Immediately after the earthquake, the Union of Chambers of Turkish Engineers and Architects (UCTEA) published the Temporary Settlement Areas Guide to advise designers to ensure accessibility, safety and infrastructure systems, as well as the choice of location and size of the area to ensure they «do not cause further trauma» (2023, p. 1). Furthermore, the guide requires settlements, as well as pathways, to be hierarchically structured, from single unit to cluster and neighbourhood.
The Bayrampaşa container city in Pazarcik offers a dissonant example from the one in The Marches region as it features high density, rigorous modularity, and centralised management of services (Figs. 6, 7). Semi-structured interviews with public and AFAD representatives collect direct testimonies of the management process from the central to the local government level.

Critical comparison
The analysis of the two governance models highlights how, despite different approaches, both present difficulties in facilitating daily interaction and a sense of belonging. In clarifying how perceptions of temporariness and liveability can mirror national procedures (Calandra & Castellani, 2016), the differences noticed reveal that Turkish containers are designed for a duration of use of three years, while in the last Italian seismic events, SAE structures were designed for five years, though most of them are still inhabited.
The main common risk is territory abandonment, a process that in Central Italy, unlike Turkey, is accelerated by depopulation. Indeed, 220 SAEs have been installed in the Municipality of Camerino, 117 of which are in the Cortine area, corresponding to the same number of households, while the Bayrampaşa area alone houses 200 containers for approximately 290 families.
In the Container City of Pazarcık, the problem of high density is overcome

06 | Container sportello per il supporto psicologico e servizi per le famiglie, Pazarcık, 2023
Psychological support desk and family service containers, Pazarcık, 2023



La container city Bayrampaşa di Pazarcik offre un esempio dissonante da quello marchigiano: alta densità, modularità rigorosa e gestione centralizzata dei servizi (Figg. 6, 7). Le interviste semi strutturate tramite interprete a rappresentanti pubblici e di AFAD raccolgono testimonianze dirette del processo gestionale dal livello governativo centrale a quello locale.

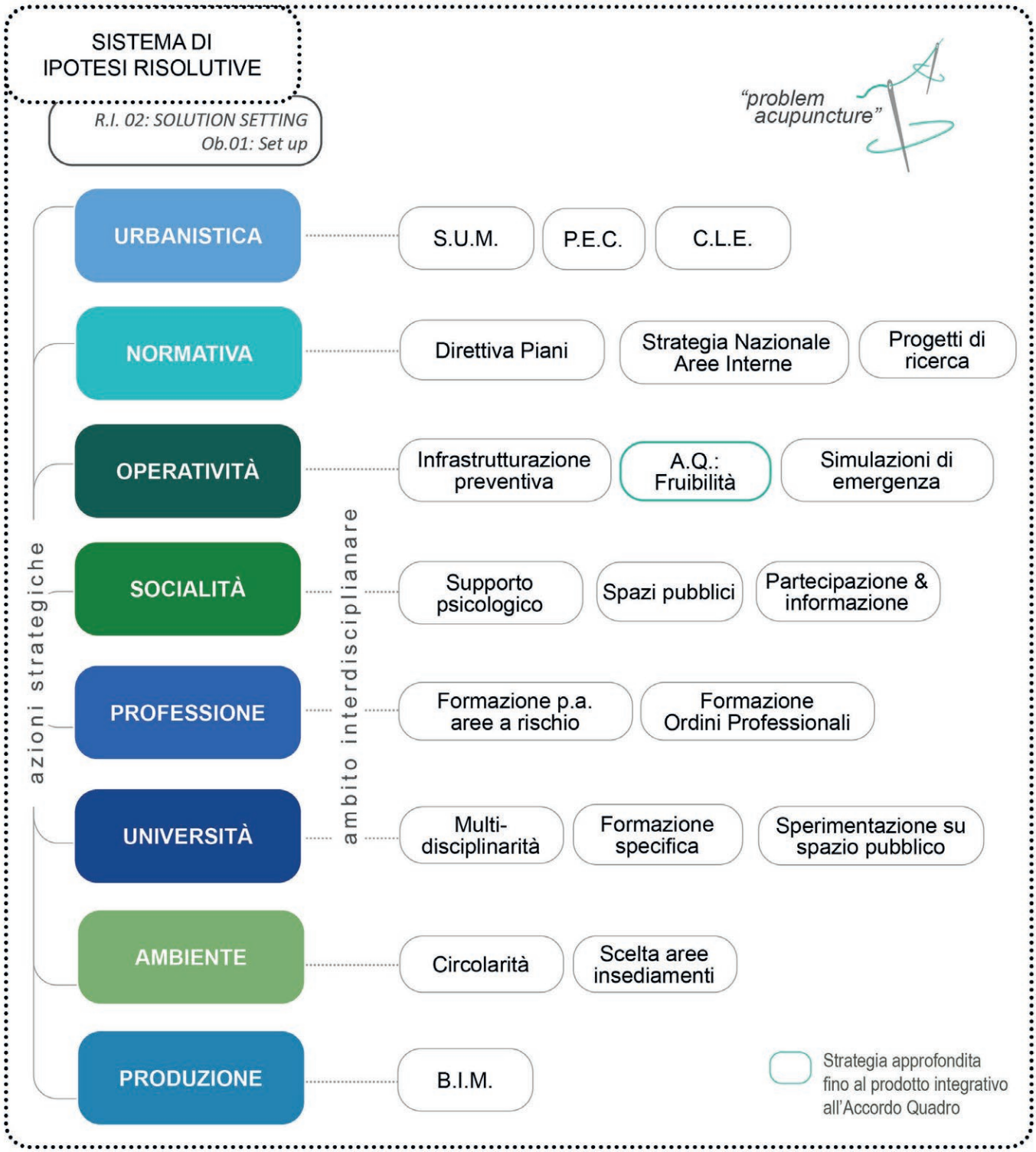
Confronto critico

L'analisi dei due modelli di governance evidenzia come, nonostante approcci diversi, entrambi presentino difficoltà nel facilitare l'interazione quotidiana e il senso di appartenenza. Nel chiarire come le percezioni di temporaneità e vivibilità possano essere specchio delle procedure nazionali (Calandra and Castellani, 2016), tra le differenze, i container turchi sono pensati per una durata di utilizzo di tre anni, mentre negli ultimi eventi sismici italiani le strutture SAE lo erano per cinque anni, anche se buona parte è tuttora abitata.
Il principale rischio comune è l'abbandono del territorio, un processo che in Italia Centrale, diversamente dalla Turchia, è accelerato dallo spopolamento: nel Comune di Camerino sono state installate 220 SAE, di cui 117 nell'area Cortine, corrispondenti ad altrettanti nuclei familiari; l'area Bayrampaşa da sola ospita 200 container per circa 290 famiglie.
Nella Container City di Pazarcık, si ovvia al problema della densità elevata mettendo a comune molte funzioni, anche quelle igieniche, risultando in livelli di privacy compromessi; la rigidità del layout a griglia, in quasi totale assenza di vegetazione e ombra, impedisce la creazione di micro-luoghi di relazione se non presso locali commerciali (formali e informali) e altre funzioni condivise.
Nei villaggi SAE, la dispersione e la distanza dai servizi riducono la prossimità funzionale, dissestando la geografia sociale degli abitanti, mentre gli spazi pubblici, spesso marginali, non favoriscono incontri informali. Lo studio demografico e sociale turco evidenzia come fattori di rilievo la maggiore concentrazione abitativa e l'approccio gestionale politico-amministrativo più centralizzato rispetto all'Italia. In entrambi i casi, gli spazi collettivi risultano neutri e poco attrattivi rispetto al contesto di vita precedente dei rispettivi abitanti: a generare stress non è solo l'evento in sé, ma anche la percezione della situazione precedente rispetto a quella nuova (Fenoglio, ibid.).
Tra gli elementi di indirizzo ritenuti più interessanti poiché assenti nel quadro italiano, c'è l'obbligatorietà di determinate strutture per la comunità, come indicato già nel 2015 da AFAD nella Establishment, Administration, and Operation of Temporary Shelter Centers Directive: centro medico, area giochi, asilo nido, sportello per il supporto psicologico, cen-

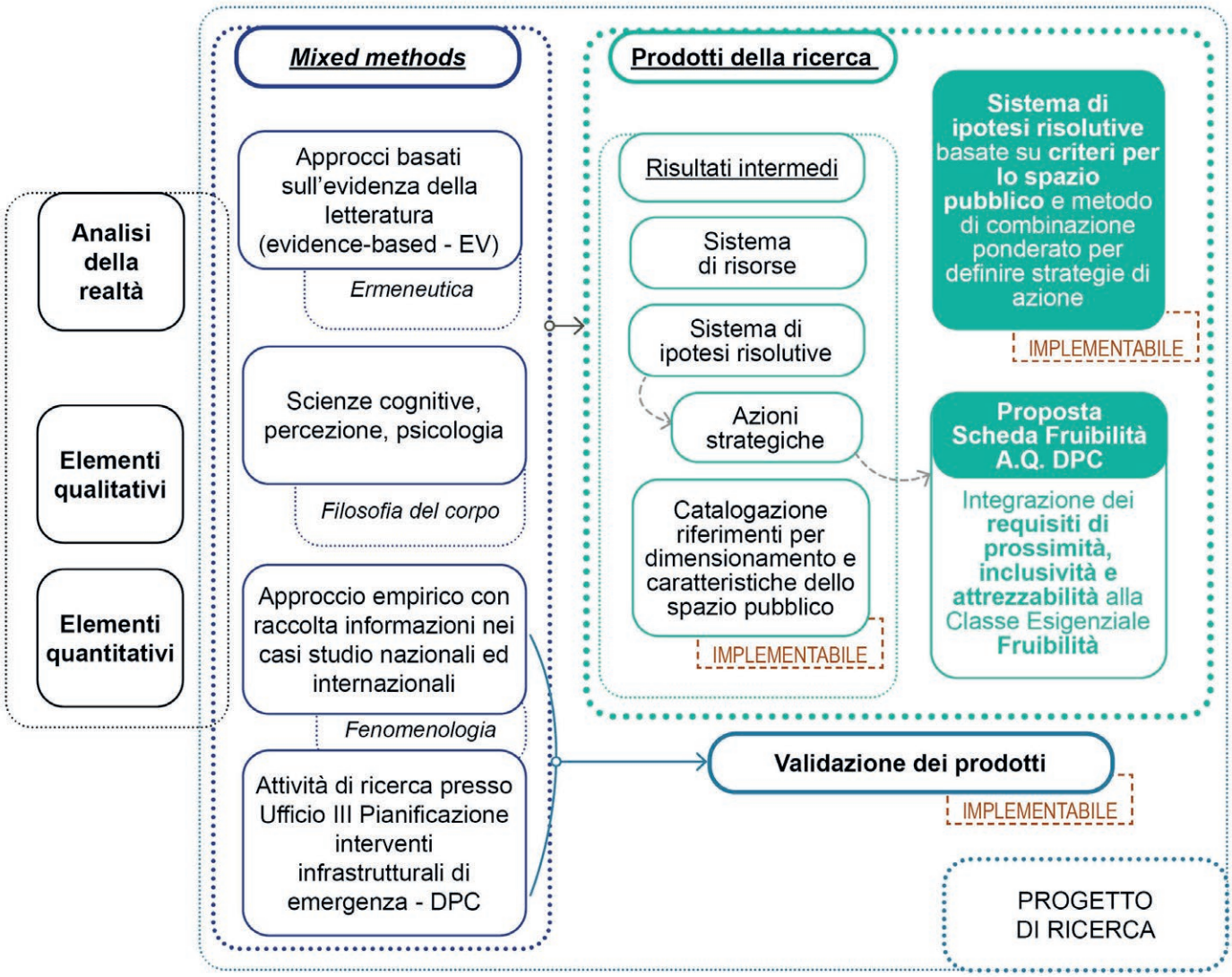
by sharing many functions, including hygiene facilities, resulting in compromised levels of privacy. The rigid grid layout with the almost total absence of vegetation and shade prevents the creation of micro-places for social interaction, with the exception of commercial premises (formal and informal) and other shared functions.
In SAE villages, dispersion and distance from services reduce functional proximity, disrupting the social geography of the inhabitants, while the often marginal public spaces do not favour informal encounters. The Turkish demographic and social study highlights the greater concentration of housing, and the more centralised political-administrative management approach as significant factors compared to Italy. In both cases, collective spaces are neutral and unattractive, compared to the previous lifestyle of their respective inhabitants. It is not only the event itself that generates stress, but also the perception of the previous situation, compared to the new one (Fenoglio, ibid.).
One of the most interesting guiding elements considered absent in the Italian context is the mandatory nature of certain community facilities, as indicated in 2015 by AFAD in the Establishment, Administration, and Operation of Temporary Shelter Centres Directive, including medical centre, play area, nursery, psychological support desk, community centre for women, health services, and prayer spaces (mosque and mixed).
Finally, the Temporary Settlement Areas Guide, referring to Turkish zoning plans, which resembles the Italian General Master Plan, notes that these tools may often be lacking in cities, as in many Italian centres where there is no Municipal Emergency Plan prescribed by the Prime Minister's Decree.

Intermediate outputs and results
Issues and related strategic actions regarding public space in temporary settlements have been organised into two systems, categorising them according to eight areas of intervention. The actions are accompanied by operational, procedural, or design examples, bibliographic references, or field experiments, which can be selected according to four criteria based on their purpose, precisely cost-effectiveness, speed, need for intervention, and social impact, which can be combined using a weighted matrix to identify the optimal strategy.
The strategic resource system (Fig. 8) and its selection method, which draws on multi-criteria analyses (David and Oppo, 2016), constitute the first product intended for DPC and other project stakeholders. The main targets of the study are national government departments for emergency management, and regional and municipal bodies located in seismic risk areas.
Among the eight areas of application, the operational one was explored to fully develop the solution hypothesis considered fundamental. It was translated into the main product of the research, comprising new technical sheets of proximity[5] requirements, inclusiveness and adaptability for the Functional Class of Usability of the F.A. of the DPC (ed. 4°, 2027), based on UNI standards 10838:1999, 8290-2:1983 and 8289-1:1981, in support of a correct performance approach.
The definition of the dimensions and characteristics of public spaces proposed in the revision of the F.A. is

07 | Strada minore tra gli ingressi dei container, Pazarcık, 2023
Secondary street between container entrances, Pazarcık, 2023



08 |



based on multidisciplinary scientific references and/or empirical observations. This thematic collection of sources in relation to each proposed requirement constitutes an intermediate result that can be implemented for applications in other projects.

Design criteria: proximity, inclusivity, adaptability

The three design criteria, derived from theoretical and empirical analysis, form the basis for the design proposal. The inclusiveness specifications emphasise security, flexibility of public space, and recognisability, ensuring equal opportunities for interaction for all. Adaptability concerns the distance between buildings, the size of pedestrian paths, the placement of parking lots, the supply and storage of equipment and furnishings, as well as the comfort of the outdoor environment.

The performance envisaged for proximity concerns the orientation of housing modules and the essential services required, as well as providing for a main public space, suggesting its location, and the presence of a device inspired by the concept of 'zero volume architecture' (Aymonino and Mosco 2006). A lightweight structure that is instantly recognised by residents is required, designed to be easily implemented by designers and quickly implemented. Its simplicity does not signify a design reduction, but rather an effective synthesis in contexts where time and resources are limited.

Design criteria contribute to well-being by being based on travel and social interaction, as well as on perceptual, and experiential distances, indicating measurable and assessable requirements, and their performance specifications. Supporting fragile infrastructure networks and communities (Bologna, ibid.), these criteria are intended to be integrated into procurement procedures. Indeed, they could prevent damage to social relations in other contexts as well, or provide insights for urban responses sensitive to rapid change, to foster social vibrancy despite instabilities. The validation of the chosen criteria included a comparison with DPC, municipal and regional bodies, and construction companies involved.

Conclusions

The impossibility of identifying unambiguous solutions remains a central point. No isolated element can solve a problem that intertwines normative, psychological, community, technical, and logistical dimensions. Hence, the choice of a holistic and multi-scalar approach, capable of connecting a system of resources, solution hypotheses, and operational strategies that transcend and relate architectural design to the level of government procedures. The post-emergency phase, even if it may be protracted over time, offers a sufficiently defined time frame to apply, verify, and modify design strategies in a rapid and targeted manner. Unlike established urban areas, usually characterised by longer stratification processes (Lauria, Vessella and Romagnoli, 2020), temporary settlements allow for direct and accelerated observation of spatial and social outcomes, allowing for replicability and transferability to other emergency contexts. Furthermore, Italy's inland areas at seismic risk feature small and medium-sized residential areas; therefore, the effectiveness of solutions must be monitored on a small and easily accessible sample, provided a minimum

tro comunitario per donne, servizi sanitari, spazi di preghiera (moschea e misto).
Infine, la Temporary Settlement Areas Guide, riferendosi ai piani di zonizzazione turchi, analoghi al Piano Regolatore Generale italiano, segnala che tali strumenti possono spesso mancare nelle città, come accade in molti centri italiani dove non è presente un Piano di Emergenza Comunale prescritto invece dal DPC.

Prodotti e risultati intermedi

Problematiche e relative azioni strategiche riguardanti lo spazio pubblico negli insediamenti temporanei sono state organizzate in due sistemi, categorizzandoli secondo otto ambiti di intervento. Le azioni sono accompagnate da esempi operativi, procedurali o progettuali, riferimenti bibliografici o sperimentazioni sul campo, selezionabili secondo quattro criteri in base alla finalità: economicità, rapidità, necessità d'intervento e impatto sociale, combinabili mediante una matrice ponderata per identificare la strategia ottimale.
Il sistema di risorse strategiche (Fig. 8) e il relativo metodo di selezione, che si rifà alle analisi multi-criteriali (David and Oppo, 2016), costituisce il primo prodotto destinato al DPC e ad altri stakeholder progettuali, essendo i principali destinatari dello studio i dipartimenti governativi nazionali per la gestione delle emergenze e gli enti regionali e comunali situati in aree a rischio sismico.
Tra le otto aree di applicazione, quella operativa è stata esplorata per sviluppare a tutto tondo l'ipotesi risolutiva ritenuta fondamentale, traducendosi nel prodotto principale della ricerca: nuove schede tecniche dei requisiti di prossimità[5], inclusività e adattabilità per la Classe Funzionale di Fruibilità dell'A.Q. del D.P.C. (ed. 4°, 2027), basate sugli standard UNI 10838:1999, 8290-2:1983 e 8289-1:1981, a supporto di un corretto approccio prestazionale.

Criteri progettuali: prossimità, inclusività, adattabilità
I tre criteri progettuali, derivati dall'analisi teorica ed empirica, costituiscono la base per la proposta progettuale. Le specifiche sull'inclusività enfatizzano sicurezza, flessibilità dello spazio pubblico e riconoscibilità, garantendo pari opportunità di interazione a tutti. L'adattabilità riguarda le distanze tra gli edifici, la dimensione dei percorsi pedonali, la collocazione di parcheggi, la fornitura e lo stoccaggio di attrezzature e arredi, nonché il comfort dell'ambiente esterno.
Le prestazioni previste per la prossimità riguardano l'orientamento dei moduli abitativi e i servizi essenziali necessari, oltre a prevedere uno spazio pubblico principale, suggerendone il posizionamento e la presenza di un dispositivo ispirato al concetto di 'architettura a volume zero' (Aymonino and Mosco 2006). Si richiede una struttura leggera e immediatamente comprensibile dagli abitanti, pensata per essere facilmente implementata dai progettisti e rapidamente realizzabile, la cui semplicità non rappresenta una riduzione progettuale, bensì una sintesi efficace in contesti in cui tempo e risorse sono limitati.
I criteri progettuali concorrono al benessere essendo basati su distanze di percorrenza, interazione sociale, percettive ed esperienziali indicando requisiti misurabili e valutabili e di loro specifiche di prestazione. A supporto di reti infrastrutturali e comunità fragili (Bologna, ibid.), sono criteri finalizzati ad essere integrati nelle procedure di appalto e potrebbero prevenire

threshold is met to ensure their significance. These conditions make the developed strategies not only testable, but potentially transferable to other national and international emergency contexts.
The paper has some structural limitations, which underscore the complexity of the topic, but it also opens up significant future prospects. The heterogeneity of the collected materials, the different density of the case studies, and the lack of an ongoing monitoring system made it difficult to make a perfectly homogeneous comparison between the analysed contexts. A further development concerns the application of the eight analytical domains of the propositional phase to evaluate these and further case studies more systematically, and thus build a broader repertoire of replicable solutions.
The lack of the possibility of empirically validating the proposed strategies is a methodological constraint that can potentially be overcome through field exercises and virtual simulations already envisaged in the DPC F.A. Despite these limitations, the integration of the three developed criteria of proximity, inclusiveness, and adaptability demonstrates how public spaces can become true devices of social resilience, capable of mitigating the effects of trauma, supporting the continuity of community relationships, and fostering a sense of belonging even in the most uncertain emergency contexts.
International experience highlights that, alongside speed and logistical efficiency, the social quality of space needs to be considered from the earliest operational stages. This vision also opens the possibility of developing parametric digital tools, in line with the BIM Digital Integrated Design, which allow for the simple configuration of open spaces and layouts of temporary settlements (Calabria-Holley *et al.*, 2020; Castillo *et al.* 2020). Such potentially open-source tools could be applied not only in emergencies, but also in the design of small urban spaces that have demonstrated their transformative value during the recent pandemic[6]. The introduction of project elements studied to strengthen the social life of fragile communities also implies an ethical, systemic and shared value of 'care' (Baratta, Conti and Tatano, 2023) in the designer's work as a mediator who is sensitive to individual and collective needs.

NOTES
[1] Dipartimento Protezione Civile, Terremoto Centro Italia. Le SAE. Available at: https://mappe.protezionecivile.gov.it/it/mappe-e-dashboards-emergenze/mappe-terremoto-centro-italia-2016/soluzioni-abitative-emergenza/ (Accessed on18/11/2025).
[2] Agreement of cultural and scientific cooperation between DIDA of Florence and Faculty of Architecture and Design FAD of Özyeğin University of Istanbul 25/07/2019 – 24/07/2026.
Data interpretation occurs through hermeneutic tools with contributions from environmental psychology and neuroscience (Romice *et al.*, 2016; Gallese *et al.*, 2015). They demonstrate how legible environments sensitive to the multiple possibilities of action involved in built space (Gibson, 1979) reduce the physiological activation of stress (Canepa *et al.*, 2019), and support orientation and a sense of security (Jacobs, 1961).
[3] The study "Social reconstruction in post-seismic emergency" col-

danni alle relazioni sociali anche in altri contesti o fornire spunti per risposte urbane sensibili ai rapidi cambiamenti, nell'ottica di favorire la vivacità sociale nonostante le instabilità. La validazione dei criteri scelti ha previsto, oltre al DPC, un confronto con enti comunali, regionali e imprese di costruzioni coinvolte.

Conclusioni

L'impossibilità di individuare soluzioni univoche rimane un punto centrale: nessun elemento isolato può risolvere un problema che intreccia dimensioni normative, psicologiche, comunitarie, tecniche e logistiche. Da qui deriva la scelta di un approccio olistico e multiscalare, capace di mettere in relazione un sistema di risorse, ipotesi risolutive e strategie operative che superano e mettano in relazione la progettazione architettonica con il livello delle procedure governative.

Le fasi post-emergenziali, pur potendo protrarsi nel tempo, offrono un arco temporale sufficientemente definito entro cui applicare, verificare e modificare le strategie progettuali in modo rapido e mirato. A differenza degli ambiti urbani consolidati, caratterizzati solitamente da più lunghi processi di stratificazione (Lauria, Vessella and Romagnoli, 2020), gli insediamenti temporanei consentono un'osservazione diretta e accelerata degli esiti spaziali e sociali, permettendo replicabilità e trasferibilità ad altri contesti emergenziali. Inoltre, le aree interne italiane a rischio sismico sono caratterizzate da nuclei abitati di piccole e medie dimensioni per cui l'efficacia delle soluzioni va monitorata su un campione di dimensioni ridotte e facilmente consultabile, purché venga rispettata una soglia minima per garantirne la significatività. Queste condizioni rendono le strategie elaborate non solo sperimentabili, ma potenzialmente trasferibili ad altri contesti emergenziali nazionali e internazionali.

Il contributo presenta alcuni limiti strutturali che evidenziano la complessità del tema, ma aprono allo stesso tempo prospettive future significative. L'eterogeneità dei materiali raccolti, la diversa densità dei casi studio e l'assenza di un sistema di monitoraggio continuativo hanno reso difficile una comparazione perfettamente omogenea tra i contesti analizzati. Un ulteriore sviluppo riguarda l'applicazione degli otto ambiti analitici della fase propositiva per valutare in modo più sistematico questi e ulteriori casi studio e costruire così un repertorio più ampio di soluzioni replicabili.

La mancata possibilità di validare empiricamente le strategie proposte è un vincolo metodologico potenzialmente superabile attraverso le esercitazioni sul campo e le simulazioni virtuali già previste nell'A.Q. del DPC. Nonostante questi limiti, l'integrazione dei tre criteri elaborati di prossimità, inclusività e adattabilità mostra come gli spazi pubblici possano diventare veri dispositivi di resilienza sociale, capaci di attenuare gli effetti del trauma, sostenere la continuità delle relazioni comunitarie e favorire un senso di appartenenza anche nei contesti emergenziali più incerti.

L'esperienza internazionale evidenzia che, accanto alla rapidità e all'efficienza logistica, la qualità sociale dello spazio necessita di essere considerata fin dalle prime fasi operative. Questa visione apre inoltre alla possibilità di sviluppare strumenti digitali parametrici, in linea con la Progettazione Integrata Digitale BIM, che consentano di configurare in modo semplice gli spazi aperti e i layout degli insediamenti temporanei (Calabria-Holley *et al*., 2020; Castillo *et al.* 2020). Tali strumenti, potenzialmente open source, potrebbero trovare applicazione non solo nelle emergenze, ma anche nella progettazione degli spazi urbani che hanno dimostrato il loro valore trasformativo durante la recente pandemia[6]. L'introduzione di elementi progettuali pensati per rafforzare la vita sociale delle comunità fragili implica inoltre un valore etico, sistemico e condiviso di 'cura' (Baratta, Conti and Tatano, 2023) nel lavoro del progettista come mediatore attento ai bisogni individuali e collettivi.

NOTE

[1] Dipartimento Protezione Civile, Terremoto Centro Italia. Le SAE. Available at: https://mappe.protezionecivile.gov.it/soluzioni-abitative-emergenza (Accessed on18/11/2025).

[2] Agreement of cultural and scientific cooperation between DIDA of Florence and Faculty of Architecture and Design FAD of Özyeğin University of Istanbul 25/07/2019 – 24/07/2026.

[3] Lo studio "Social reconstruction in post-seismic emergency" ha raccolto interviste ai residenti (in corso di pubblicazione – Rif. FUP W00385 – collana Ricerche. Architettura, Pianificazione, Paesaggio, Design).

lected interviews with residents. (forthcoming - Ref. Firenze University Press W00385 - *Ricerca* series).

[4] Accordo Rep. 537 Prot. 41387 del 23/02/22 - Svolgimento attività di studio e ricerca presso il DPC, concordato durante il Dottorato in Sostenibilità e innovazione per il progetto dell'ambiente costruito e del sistema prodotto, DIDA – UNIFI.

[5] The concept of proximity is linked to the EU Green Deal, the New European Bauhaus, and the United Nations' 2030 Urban Agenda (Mecca, ibid.).

[6] The proposal *"Social reconstruction in post-emergency"* won the 2021 New European Bauhaus Prize – Under 30 Rising Star – *Reinvented places to meet and share.*

[4] Accordo Rep. 537 Prot. 41387 del 23/02/22 – Svolgimento attività di studio e ricerca presso il DPC, concordato durante il Dottorato in Sostenibilità e innovazione per il progetto dell'ambiente costruito e del sistema prodotto, DIDA – UNIFI.

[5] Il concetto di prossimità è legato al Green Deal UE, al New European Bauhaus e all'Agenda urbana 2030 delle Nazioni Unite (Mecca, ibid.).

La definizione delle dimensioni e delle caratteristiche degli spazi pubblici proposte nella revisione dell'A.Q., è basata su riferimenti scientifici multidisciplinari e/o su osservazioni empiriche. Questa raccolta tematica delle fonti in relazione a ciascun requisito proposto costituisce un risultato intermedio a conclusione della fase di indagine precedentemente descritta, implementabile per applicazioni in altri contesti progettuali.

[6] La proposta "Social reconstruction in post-emergency" ha vinto il 2021 New European Bauhaus Prize – Under30 Rising Star – Reinvented places to meet and share.

REFERENCES

AFAD (2015), *Directive on the Establishment, Administration, and Operation of Temporary Shelter Centers.* Available at: https://www.afad.gov.tr/kurumlar/afad.gov.tr/2310/files/Gecici_Barinma_Merkezlerinin_Kurulmasi_Yonetimi_Isletilmesi_Yonerge.pdf (Accessed on 29/11/25)

Aymonino, A., Mosco, V. P. (2006), *Spazi pubblici contemporanei: architettura a volume zero,* Skira, Milano.

Baratta, G., Conti, M., Tatano, V. (eds.) (2023), *Manifesto lessicale per l'accessibilità ambientale: 50 parole per progettare l'inclusione,* Anteferma, Treviso. Available at: https://doi.org/10.57623/979-12-5953-087-5

Biesta, G. (2010), "Pragmatism and the Philosophical Foundations of Mixed Methods Research", in A. Tashakkori and C. Teddlie (eds*), The SAGE Handbook of Mixed Methods in Social and Behavioral Research*, Ed. 2, Sage, Thousand Oaks, CA, pp. 95-118. Available at: https://doi.org/10.4135/9781506335193.n4

Bologna, R. (2020), "La dimensione operativa della temporaneità abitativa post-disastro e strumenti di controllo tecnico", *TECHNE*, 20, pp. 213-221. Available at: https://doi.org/10.13128/techne-8232

Calandra, L. M., Castellani, S. (2016), "La riconfigurazione territoriale dell'Aquila dopo il sisma del 2009 e il cambiamento dei luoghi e dei comportamenti della quotidianità", *Epidemiologia & Prevenzione*, 40(2 Suppl 1), pp. 82-92. Available at: https://doi.org/10.19191/EP16.2S1.P082.054

Canepa, E., Scelsi, V., Fassio, A., Avanzino, L., Lagravinese, G., Chiorri, C. (2019), "Atmospheres: Feeling Architecture by Emotions", *Ambiances*, n.5. Available at: https://doi.org/10.4000/ambiances.2907

Capanna, A., Spita, L. (eds.). (2020), *Wooden temporary housing group: Architettura per l'emergenza in Giappone*, Il Formichiere, Foligno.

David, A., Oppio, A. (2016), "Integrare la teoria dei pattern e le analisi multicriteriali per la pianificazione urbana. In Pagani, R., Chiesa, G. (ed.), *Urban data. Tecnologie e metodi per la città algoritmica*, Franco Angeli, Milano, pp. 129-168.

DPC (2007), *Manuale Operativo per la predisposizione di un piano comunale o intercomunale di Protezione Civile*. Available at: https://emergenze.protezionecivile.gov.it/static/aefd7127e73d0ba99d2f6a9a6063c39a/Manuale.pdf (Accessed: 29 November 2025).

DPC (2021), *Direttiva del 30 aprile 2021*. Available at: https://www.protezionecivile.gov.it/it/normativa/direttiva-del-30-aprile-2021-0/ (Accessed: 29 November 2025).

DPC (2023), *Gara a procedura aperta per la conclusione di un Accordo Quadro avente ad oggetto la realizzazione di insediamenti con Soluzioni Abitative in Emergenza - S.A.E. per conto della Presidenza del Consiglio dei Ministri - Ed. 3*. Available at: https://www.consip.it/bandi/aq-per-soluzioni-abitative-in-emergenza-sae-ed3 (Accessed on 18/11/25)

Fenoglio, M.T. (2016), "Origini e paradigmi della psicologia dell'emergenza", in Sbattella F., *Manuale di Psicologia dell'Emergenza*, Franco Angeli, Milano. Available at: https://www.psicologiperipopoli-torino.net/2020/06/10/m-t-fenoglio-origini-e-paradigmi-della-psicologia-dellemergenza/ (Accessed on 18/11/2025)

Ferroni, F., Gallese, V. (2022), "Social bodily self: conceptual and psychopathological considerations", in *The Routledge Handbook of Bodily Awareness*, Routledge, Londra, pp. 522–541. Available at: https://doi.org/10.4324/9780429321542

Norman Foster Foundation and Holcim (2023). *Essential Homes Research Project*. Available at: https://www.holcim.it/essential-homes-research-project (Accessed on 18/11/2025)

Gallese, V., Mallgrave, H. F., Pallasmaa, J., Robinson, S. (2015). *Architecture and Empathy*. A Tapio Wirkkala-Rut Bryk Design Reader, Espoo, FIN.

Gehl, J. (1971), *Life between buildings,* Arkitektens Forlag, Copenhagen.

Gibson, J. J. (1979), *The ecological approach to visual perception*, Houghton Mifflin, Boston, MA.

Gkoumas, I., Mavridou, T., Seymour, V., Nanos, N. (2025), "Post-disaster housing and social considerations", *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 124. Available at: https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2025.105537

Hall, E. T. (1966), *The hidden dimension,* Doubleday, Garden City, NY.

Lauria, A. (ed.) (2017), *Piccoli spazi urbani. Valorizzazione degli spazi residuali in contesti storici e qualità sociali,* Liguori, Napoli.

Lauria, A., Vessella, L., Romagnoli, M. (2020), "Public space and life in the city: Six challenges for a changing society", *Valori e Valutazioni. Teorie ed esperienze*, n. 24, pp. 131–146.

Mazumdar, S., Itoh, S., Iwasa, A. (2021). "Post-Disaster Temporary Housing: An Emic Study of Lived Experiences of Victims of the Great East Japan Earthquake and Tsunami", *International Journal of Mass Emergencies & Disasters*, Vol. 39, n. 1, pp. 87–119. Available at: https://doi.org/10.1177/028072702103900105

Mela, A. (2017), "La ricostruzione delle comunità", *Psicologia di comunità*, FrancoAngeli, Milano, n. 2, pp. 23–33. Available at: https://doi.org/10.3280/PSC2017-002003

Mecca, S. (ed.) (2023), *Prossimità. Il benessere nella città del futuro*, didapress, Firenze.

Morgan, D. L. (2007), "Paradigms Lost and Pragmatism Regained: Methodological Implications of Combining Qualitative and Quantitative Methods", *Journal of Mixed Methods Research*, Vol.1, n.1, pp. 48-76. Available at: https://doi.org/10.1177/2345678906292462

Perrucci, D., Baroud, H. (2020), "A Review of Temporary Housing Management Modeling: Trends, Design Strategies, Optimization Models, and Decision-Making Methods", *Sustainability*, Vol. 12, n. 24. Available at: https://doi.org/10.3390/su122410388

Ramazani, R., Yari, A., Heydari, A., Hanafi-Bojd, A., Soltani, A., Rostami, S., Ostadtaghizadeh, A. (2022), "War, displacement, and the best location for temporary sheltering: a qualitative study", *BMC Public Health*, Vol. 22, art. 2066. Available at: https://doi.org/10.1186/s12889-022-14495-w

Romice, O., Thwaites, K., Porta, S., Greaves, M., Barbour, G., Pasino, P. (2017), "Urban Design and Quality of Life", in Fleury-Bahi, G., Pol, E., Navarro, O. (eds.) *Handbook of Environmental Psychology and Quality of Life Research,* International Handbooks of Quality-of-Life, Springer, Cham, CH, pp. 241–273. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-319-31416-7_14

Robinson, S., Pallasmaa, J., Zambelli, M. (eds.) (2021), *La mente in architettura Neuroscienze, incarnazione e il futuro del design,* Firenze University Press FUP, Firenze. Available at: https://doi.org/10.36253/978-88-5518-286-7

Sapienza Università di Roma - Scuola di Dottorato in Scienze dell'Architettura (2024), *Architettura per l'emergenza. Modelli insediativi e prototipi architettonici nella città transitoria della ricostruzione. Il caso di Accumoli* [Seminario dottorale – Resp. Sc. Grimaldi A.].

Sphere Association (2018), *The Sphere Handbook: Humanitarian Charter and Minimum Standards in Humanitarian Response*. Sphere Association, Gineva. Available at: https://spherestandards.org/handbook/ (Accessed on 29/11/25).

Sugawaradaisuke (2011), *Temporary Housing of Rikuzentakata.* Available at: https://sugawaradaisuke.com/en/projects/temporary-housing-of-rikuzentakata/ (Accessed on 17/12/25).

Union of Chambers of Turkish Engineers and Architects UCTEA (2023), *Temporary Settlement Areas Guide*. Available at: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.spo.org.tr/resimler/ekler/03d8f73c2cf2f1e_ek.pdf (Accessed on 29/11/2025)

UN-Habitat (2015), *International Guidelines on Urban and Territorial Planning*. United Nations Human Settlements Programme, Nairobi. Available at: https://unhabitat.org/international-guidelines-on-urban-and-territorial-planning (Accessed on 29/11/25).

Van der Kolk, B. A. (2014). *The body keeps the score: Brain, mind, and body in the healing* of trauma. Viking Press, New York.

Mappatura del rischio da isole di calore urbane durante le ondate di calore mediante *clustering fuzzy* di dati satellitari

Rosa Cafaro[1], https://orcid.org/0009-0003-2330-383X rosa.cafaro@unina.it
Barbara Cardone[1], https://orcid.org/0000-0002-9844-9513 b.cardone@unina.it
Ferdinando Di Martino[1,2], https://orcid.org/0000-0001-5690-5384 fdmarti@unina.it
[1] Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II, Italia
[2] Centro di Ricerca Interdipartimentale "Alberto Calza Bini", Università degli Studi di Napoli Federico II, Italia

Abstract. Il lavoro presenta una metodologia per la mappatura del rischio da isole di calore urbane generate da ondate di calore, basata su dati satellitari Landsat 8 e su tecniche di intelligenza artificiale di classificazione *unsupervised*. L'integrazione tra il *raster* della temperatura superficiale (LST) e l'indice di vegetazione (NDVI) consente di identificare le aree urbane ad alta esposizione termica (*hot spot*), le zone più resilienti (*cold spot*) e stimare la popolazione residente a rischio. I test sono stati compiuti sulla città di Napoli, durante periodi di ondate di calore occorsi negli ultimi tre anni dal 2022 al 2024. I risultati mostrano che il *framework* proposto può fornire uno strumento operativo per il *decision maker* per il monitoraggio delle isole di calore e la pianificazione di soluzioni *climate proof* nei contesti urbani maggiormente critici. La metodologia proposta è portabile e trasferibile ad altri contesti urbani.

Parole chiave: Isola di calore urbana; *Fuzzy C-Means*; Indici satellitari; Rischio climatico; Resilienza urbana.

Introduzione

Il crescente riscaldamento globale sta intensificando la frequenza e la durata delle ondate di calore, eventi meteorologici estremi che interessano aree vaste e rappresentano una crescente criticità per le città mediterranee. Secondo la definizione dell'Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO), un'ondata di calore si verifica quando per almeno sei giorni consecutivi la temperatura massima risulta più alta del 90% delle temperature tipicamente osservate in quel medesimo giorno nel periodo climatologico di riferimento (Silvestrini, 2023).
Questi fenomeni, generati da condizioni atmosferiche persistenti – alta pressione, intensa radiazione solare, scarsa ventilazione e umidità elevata – rappresentano una delle manifestazioni più evidenti dei cambiamenti climatici in atto. Nei contesti urbani, le ondate di calore si combinano con un fenomeno locale originato dalle proprietà termofisiche e morfologiche della città: l'isola di calore urbano (*Urban Heat Island – UHI*). L'UHI è una condizione termo-climatica tipica delle aree urbanizzate, in cui le temperature dell'aria risultano più elevate rispetto alle zone circostanti. A differenza delle ondate di calore, che hanno origine atmosferica e scala ampia, l'UHI dipende dalle caratteristiche fisiche e funzionali della città: densità edilizia, geometrie urbane, materiali con elevata capacità termica, presenza limitata di vegetazione e riduzione della ventilazione. Questi fattori modificano il bilancio energetico urbano favorendo l'accumulo di calore nelle ore diurne e un lento rilascio notturno (Oke, 1982; Jones *et al*., 2008; Stewart, 2011; Oke, 2017; Ge *et al*., 2020; Lopes *et al*., 2022).
Numerosi studi hanno evidenziato le ricadute delle UHI in termini di incremento della mortalità e morbilità, aumento della domanda energetica per la climatizzazione e peggioramento della qualità dell'aria, con effetti che si concentrano soprattutto sui gruppi socialmente più vulnerabili (Buchin *et al*., 2016).
In questa prospettiva, la valutazione del rischio termico richiede non solo la caratterizzazione delle anomalie temiche, ma anche l'analisi dell'esposizione della popolazione residente e delle fasce demograficamnete fragili, a partire dai dati censuari di dettaglio.
Nell'ambito dello studio delle isole di calore urbane è possibile distinguere due principali modalità di analisi del fenomeno: la

Assessing urban heat island risk during heatwaves with satellite data and fuzzy clustering techniques

Abstract. This paper presents a methodology for mapping urban heat island risk generated by heat waves, based on Landsat 8 satellite data and unsupervised artificial intelligence classification techniques. The integration of the land surface temperature (LST) raster and the vegetation index (NDVI) allows the identification of urban areas with high thermal exposure (hot spots), the most resilient areas (cold spots), and the estimation of the resident population at risk. The tests were carried out on the city of Naples during heat waves that occurred in the last three years from 2022 to 2024. The results show that the proposed framework can provide an operational tool for decision makers to monitor heat islands and plan climate-proof solutions in the most critical urban contexts. The proposed methodology is portable and transferable to other urban contexts.

Keywords: Urban Heat Island; Fuzzy C-Means; Satellite indices; Climate risk; Urban resilience.

Introduction

Increasing global warming is intensifying the frequency and duration of heat waves, extreme weather events that affect large areas and represent a growing critical issue for Mediterranean cities. According to the World Meteorological Organization (WMO) definition, a heatwave occurs when, for at least six consecutive days, the maximum temperature is higher than 90% of the temperatures typically observed on that same day in the climatological reference period (Silvestrini, 2023).
These phenomena, generated by persistent atmospheric conditions – high pressure, intense solar radiation, poor ventilation, and high humidity – are one of the most obvious manifestations of ongoing climate change. In urban contexts, heat waves combine with a local phenomenon originating from the thermophysical and morphological properties of the city, which is the urban heat island (UHI). The UHI is a thermo-climatic condition typical of urbanised areas, where air temperatures are higher than in surrounding areas. Unlike heat waves, which are atmospheric in origin and large in scale, the UHI depends on the physical and functional characteristics of the city, such as building density, urban geometry, materials with high thermal capacity, limited vegetation, and reduced ventilation. These factors alter the urban energy balance, promoting heat accumulation during the day and slow release at night (Oke, 1982; Jones *et al*., 2008; Stewart, 2011; Oke, 2017; Ge *et al*., 2020; Lopes *et al*., 2022).

ISSN online: 2239-0243 | © 2025 Author(s) | http://www.fupress.com/techne | DOI: 10.36253/techne-18693
Open access, peer-reviewed article published by Firenze University Press (https://www.fupress.com) and distributed, except where otherwise noted, under the terms of the CC BY 4.0 License for content and CC0 1.0 Universal for metadata

Surface Urban Heat Island (SUHI) e la *Atmospheric Urban Heat Island* (AUHI).

La SUHI descrive l'anomalia termica delle superfici urbane, stimata tramite la *Land Surface Temperature* (LST) derivata da sensori di telerilevamento (Şengün *et al*., 2023). Essa rappresenta la risposta termo-radiativa dei materiali che compongono il tessuto urbano – asfalto, coperture edilizie, pavimentazioni – influenzata da proprietà come albedo, capacità termica e struttura fisica delle superfici. Grazie alle misure satellitari, la SUHI consente una rappresentazione spazialmente continua dell'assetto termico urbano, permettendo di identificare con precisione le aree a maggiore riscaldamento superficiale e di cogliere contrasti termici rilevanti tra superfici costruite e vegetate. L'integrazione con indicatori quali *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e *Normalized Difference Moisture Index* (NDMI) permette inoltre di interpretare il ruolo della copertura vegetale e dell'umidità dei suoli nel bilancio energetico urbano (Huete, 1988).

La AUHI, invece, riguarda l'aumento della temperatura dell'aria nello strato atmosferico urbano inferiore (canopy layer, che si estende dal suolo fino approssimativamente all'altezza media degli edifici, circa 20–30 m) rispetto alle aree non urbanizzate circostanti. Essa è generata da fattori come densità edilizia, geometrie urbane, ridotta ventilazione ed emissioni antropiche, ed è generalmente massima nelle ore notturne, quando il calore rilasciato dalle superfici urbane innalza la temperatura dell'aria. La sua analisi richiede dati provenienti da stazioni meteorologiche e da strumenti di osservazione atmosferica, oppure la simulazione tramite modelli numerici del microclima urbano.

La distinzione tra SUHI e AUHI è metodologicamente rilevante. Mentre la SUHI permette di rappresentare con elevato dettaglio spaziale le anomalie termo-radiative delle superfici urbane, la AUHI descrive il riscaldamento dell'aria su scala urbana locale, incorporando l'influenza delle forme e dei volumi edilizi. La SUHI rappresenta un precursore della AUHI, poiché superfici più calde rilasciano calore sensibile nelle ore serali e notturne, contribuendo all'innalzamento della temperatura dell'aria urbana.

Nel presente lavoro l'attenzione è rivolta alla SUHI, poiché la LST consente di cogliere con maggiore efficacia la variabilità superficiale e le dinamiche termo-vegetazionali tipiche degli eventi estremi nelle aree urbane complesse. Per comodità espositiva, nel resto dell'articolo il termine UHI farà riferimento alla SUHI.

Gli studi dedicati alle isole di calore urbane di superficie si basano prevalentemente sui dati di LST acquisiti tramite sensori di telerilevamento. Questi dati offrono una rappresentazione spazialmente continua del tessuto urbano e consentono di individuare con precisione le aree soggette a maggiore riscaldamento superficiale.

La principale limitazione dei dati satellitari è la loro risoluzione temporale, generalmente inferiore a quella dei dati raccolti in situ; tuttavia, la capacità di restituire il gradiente termico urbano con elevato dettaglio spaziale ne ha consolidato l'impiego negli studi recenti sulle dinamiche termo–ambientali urbane (Dang *et al*., 2023). L'evoluzione delle tecnologie di osservazione della Terra e il miglioramento della risoluzione geometrica e radiometrica dei sensori hanno favorito un crescente interesse

Numerous studies have highlighted the impact of UHIs in terms of increased mortality and morbidity, increased energy demand for air conditioning, and worsening air quality, with effects concentrated mainly on the most socially vulnerable groups (Buchin *et al*., 2016).

In this perspective, thermal risk assessment requires not only the characterisation of thermal anomalies, but also the analysis of the exposure of the resident population and of demographically fragile groups, starting from detailed census data.

In the study of urban heat islands, two main methods of analysing the phenomenon can be distinguished, namely the Surface Urban Heat Island (SUHI), and the Atmospheric Urban Heat Island (AUHI).

SUHI describes the thermal anomaly of urban surfaces, estimated using Land Surface Temperature (LST) derived from remote sensing sensors (Şengün *et al*., 2023). It is the thermo-radiative response of materials that make up the urban fabric – asphalt, building roofs, pavements – influenced by properties such as albedo, heat capacity, and physical structure of surfaces. Thanks to satellite measurements, SUHI allows for a spatially continuous representation of the urban thermal structure, making it possible to accurately identify areas with greater surface heating, and to capture significant thermal contrasts between built and vegetated surfaces. Integration with indicators such as the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Normalized Difference Moisture Index (NDMI) also allows the role of vegetation cover and soil moisture in the urban energy balance to be interpreted (Huete, 1988). AUHI refers to the increase in air temperature in the lower urban atmospheric layer (canopy layer, which extends from the ground to approximately the average height of buildings, about 20–30 m), compared to surrounding non-urbanised areas. It is generated by factors such as building density, urban geometry, reduced ventilation, and anthropogenic emissions, and is generally highest at night, when the heat released from urban surfaces raises the air temperature. Its analysis requires data from weather stations and atmospheric observation instruments, or simulation using numerical models of the urban microclimate.

The distinction between SUHI and AUHI is methodologically relevant. While SUHI allows for the representation of thermo-radiative anomalies of urban surfaces with high spatial detail, AUHI describes the warming of air on a local urban scale, incorporating the influence of building shapes and volumes. SUHI is a precursor to AUHI, as warmer surfaces release considerable heat in the evening and night hours, contributing to the rise in urban air temperature.

This study focuses on SUHI, as LST allows for more effective capture of surface variability and thermo-vegetation dynamics typical of extreme events in complex urban areas. For convenience, the term UHI will refer to SUHI in the rest of this paper.

Studies on surface urban heat islands are mainly based on LST data acquired by remote sensing sensors. These data provide a spatially continuous representation of the urban fabric, and allow for the precise identification of areas subject to greater surface heating.

The main limitation of satellite data is their temporal resolution, which is

verso l'analisi delle variazioni della LST (Roba *et al*., 2025) e degli indici di vegetazione, come l'NDVI (Li *et al*., 2008).
L'integrazione tra LST e indici ecologici consente di descrivere in maniera più completa i processi che governano le anomalie termo–radiative urbane e il ruolo della copertura vegetale nel mitigare il riscaldamento superficiale.
A partire da tali informazioni sono state sviluppate diverse metodologie per l'identificazione e la classificazione delle UHI. Gli approcci più consolidati si basano su soglie statistiche o su interpolazioni spaziali, che traducono i valori osservati in mappe tematiche uniformate (Brabant *et al*., 2024).
Negli ultimi anni, con l'aumento della disponibilità di dati geospaziali ha favorito l'impiego di tecniche di apprendimento supervisionato, come il machine learning e il deep learning, capaci di migliorare l'accuratezza della classificazione e di individuare correlazioni non lineari tra variabili ambientali 2(Ding *et al*., 2023).
Questi approcci presentano tuttavia limiti significativi: richiedono ampie basi di dati etichettati per l'addestramento, che non sempre sono disponibili nei contesti urbani complessi; la dipendenza da infrastrutture di monitoraggio non sempre disponibili e un notevole dispendio di risorse computazionali e temporali che ne limita la replicabilità e la trasferibilità in altre città o scenari climatici (Alahakoon *et al*., 2020).
Negli ultimi anni stanno emergendo metodologie non supervisionate capaci di superare parte di queste criticità, individuando pattern e strutture nei dati senza richiedere etichettature preliminari
Tali approcci permettono di individuare pattern ricorrenti direttamente dai dati e risultano particolarmente adatti a contesti urbani eterogenei dove coesistono superfici ad elevata variabilità morfologica e differenti livelli di vegetazione.
Nel presente contributo, il rischio da isole di calore urbane durante le ondate di calore è affrontato in termini prevalentemente termo-ambientali, ponendo l'accento sulla componente di pericolosità/esposizione legata alle anomalie di temperatura superficiale.
Tale lettura è integrata da una stima preliminare dell'esposizione della popolazione residente, ottenuta incrociando la classificazione fuzzy con i dati ISTAT per sezione di censimento. Questa informazione consente di evidenziare le aree urbane in cui le anomalie termiche coincidono con elevate concentrazioni di popolazione e fasce deboli.
In un'accezione più ampia, il rischio climatico urbano scaturisce dall'interazione tra hazard, esposizione e vulnerabilità; tuttavia, in questa prima applicazione l'attenzione è focalizzata sulla mappatura ad alta risoluzione delle condizioni di stress termico superficiale, che costituisce un prerequisito conoscitivo fondamentale per successive integrazioni con indicatori socio–demografici e di vulnerabilità insediativa. In questo senso, il modello proposto si configura come uno strumento operativo di lettura spaziale della pericolosità termica durante eventi estremi, funzionale all'impostazione di successive analisi di rischio multivariato.
In questo quadro, il presente studio applica tecniche di analisi automatica dei dati satellitari e di classificazione unsupervised per rilevare e mappare le aree urbane maggiormente esposte al rischio termico durante un evento di ondata di calore.
L'integrazione con la componente demografica arricchisce la lettura termo-ambientale con un primo livello di valutazione

generally lower than that of data collected in situ. However, their ability to return the urban thermal gradient with high spatial detail has consolidated their use in recent studies on urban thermo-environmental dynamics (Dang *et al*., 2023). The evolution of Earth observation technologies, and improvements in the geometric and radiometric resolution of sensors have fostered growing interest in the analysis of LST variations (Roba *et al*., 2025) and vegetation indices, such as NDVI (Li *et al*., 2008). The integration of LST and ecological indices allows for a more complete description of the processes governing urban thermo-radiative anomalies and the role of vegetation cover in mitigating surface warming.
Based on this information, various methodologies have been developed for the identification and classification of UHIs. The most established approaches are based on statistical thresholds or spatial interpolations, which translate the observed values into standardised thematic maps (Brabant *et al*., 2024).
In recent years, the increased availability of geospatial data has favoured the use of supervised learning techniques, such as machine learning and deep learning, which can improve classification accuracy and identify nonlinear correlations between environmental variables (Ding *et al*., 2023).
However, these approaches have significant limitations. They require large labelled databases for training, which are not always available in complex urban contexts, they depend on monitoring infrastructure that is not always available, and they require considerable computational and time resources, which limits their replicability and transferability to other cities or climate scenarios (Alahakoon *et al*., 2020).
In recent years, unsupervised methodologies have emerged that are capable of overcoming some of these critical issues by identifying patterns and structures in the data without requiring preliminary labelling.
These approaches allow recurring patterns to be identified directly from the data, and are particularly suitable for heterogeneous urban contexts where surfaces with high morphological variability and different levels of vegetation coexist.
In this paper, the risk from urban heat islands during heat waves is addressed mainly in thermo-environmental terms, with an emphasis on the hazard/exposure component linked to surface temperature anomalies.
This interpretation is supplemented by a preliminary estimate of the exposure of the resident population, obtained by cross-referencing the fuzzy classification with ISTAT data by census section. This information makes it possible to highlight urban areas where thermal anomalies coincide with high population concentrations and vulnerable groups.
In a broader sense, urban climate risk arises from the interaction between hazard, exposure, and vulnerability. However, in this first application, the focus is on high-resolution mapping of surface heat stress conditions, which is a fundamental prerequisite for subsequent integration with socio-demographic and settlement vulnerability indicators. In this sense, the proposed model is an operational tool for spatial interpretation of thermal hazards during extreme events, which can be used to set up subsequent multivariate risk analyses.

dell'esposizione, utile a orientare priorità di intervento e strategie di adattamento. Inoltre, il framework GIS-based messo a punto può fornire un solido strumento a supporto di decisori e pianificatori per il monitoraggio in continuum delle isole di calore urbane e l'individuazione delle aree urbane più critiche che necessitano di mitigazione del surriscaldamento urbano e riduzione del rischio termico.

Stato dell'arte

Il fenomeno delle isole di calore urbane è oggetto di un'ampia produzione scientifica in ragione degli impatti rilevanti che produce sulla salute pubblica, sulla domanda energetica e sulla qualità ambientale.

Numerosi studi hanno dimostrato come la presenza di UHI aggravi le conseguenze delle ondate di calore, accentuando le disuguaglianze territoriali e sociali, e rendendo necessario lo sviluppo di strumenti di analisi e mappatura utili alla gestione del rischio climatico. La capacità di restituire informazioni spazialmente e temporalmente affidabili è un requisito fondamentale per supportare politiche di adattamento e strategie di mitigazione orientate alla resilienza urbana. Le metodologie più consolidate per l'individuazione delle UHI si basano su soglie statistiche di temperatura superficiale, oppure su interpolazioni spaziali volte a estendere i dati puntuali raccolti da stazioni meteorologiche a intere porzioni di città (Brabant *et al*., 2024). Sebbene efficaci, questi approcci sono spesso limitati dalla scarsa risoluzione spaziale dei dati e dalla difficoltà di cogliere la complessità termica degli ambienti urbani densi.

Parallelamente, l'evoluzione dei dataset geospaziali ha ampliato le possibilità di caratterizzazione delle UHI. I servizi *Copernicus Land Monitoring* (CLMS) mettono oggi a disposizione prodotti tematici specifici – come gli High Resolution Layers sull'imperviousness, i dataset dedicati alle *Urban Heat Islands* e le serie HR-VPP sulla fenologia della vegetazione – che consentono di descrivere con maggiore precisione i fattori morfologici ed ecologici che contribuiscono al surriscaldamento urbano (Copernicus CLMS, 2023). Accanto agli aspetti legati alla copertura del suolo e alla distribuzione della vegetazione, un ruolo determinante nei processi di surriscaldamento superficiale è svolto dai materiali urbani. Le superfici ad alta capacità termica, le pavimentazioni scure e le coperture con basso albedo contribuiscono infatti all'accumulo di calore e alla persistenza delle anomalie termiche. In questo ambito, sono stati sviluppati negli ultimi anni materiali e soluzioni costruttive a elevata riflettanza, come i cosiddetti "*cool pavements*", capaci di ridurre l'assorbimento della radiazione solare e mitigare localmente l'intensità della SUHI (Hendel, 2020).

Sul piano metodologico, a questa evoluzione delle basi dati si affianca la diffusione di tecniche di apprendimento supervisionato, come il *machine learning* e il *deep learning*, applicate alla classificazione e al riconoscimento delle anomalie termiche urbane (Ding *et al*., 2023; Xu *et al*., 2023).

Tali metodi hanno migliorato l'accuratezza e la capacità predittiva delle classificazioni, permettendo di cogliere relazioni complesse tra variabili climatiche, morfologiche e ambientali. Tuttavia, essi presentano limiti significativi: la necessità di disporre di *dataset* ampi ed etichettati per l'addestramento, la dipendenza da reti di monitoraggio non sempre capillari, e l'elevato dispendio di risorse computazionali che ne riduce la replicabilità e la trasferibilità in altri contesti urbani (Alahakoon

In this context, the present study applies automatic satellite data analysis and unsupervised classification techniques to detect and map urban areas most exposed to thermal risk during a heatwave event.

The integration with the demographic component enriches the thermo-environmental reading with a first level of exposure assessment, which is useful for guiding intervention priorities and adaptation strategies. Furthermore, the GIS-based framework developed can provide a solid tool to support decision-makers and planners in continuously monitoring urban heat islands, and in identifying the most critical urban areas that need urban overheating mitigation and thermal risk reduction.

Related Work

The phenomenon of urban heat islands is the subject of extensive scientific research due to its significant impact on public health, energy demand, and environmental quality.

Numerous studies have shown that the presence of UHIs exacerbates the consequences of heat waves, accentuating territorial and social inequalities, and making it necessary to develop analysis and mapping tools useful for climate risk management. The ability to provide spatially and temporally reliable information is a fundamental requirement for supporting adaptation policies and mitigation strategies aimed at urban resilience. The most established methodologies for identifying UHIs are based on statistical surface temperature thresholds or spatial interpolations aimed at extending the point data collected by weather stations to entire portions of cities (Brabant *et al*., 2024).

Although effective, these approaches are often limited by the low spatial resolution of the data and the difficulty of capturing the thermal complexity of dense urban environments.

The evolution of geospatial datasets has expanded the possibilities for characterising UHIs. Copernicus Land Monitoring Services (CLMS) now provide specific thematic products – such as High Resolution Layers on imperviousness, datasets dedicated to Urban Heat Islands, and HR-VPP series on vegetation phenology – that allow for a more accurate description of the morphological and ecological factors contributing to urban overheating (Copernicus CLMS, 2023). Alongside aspects related to land cover and vegetation distribution, urban materials play a decisive role in surface overheating processes. Surfaces with high thermal capacity, dark paving, and low albedo roofing contribute to heat accumulation and the persistence of thermal anomalies. In this context, highly reflective materials and construction solutions have been developed in recent years, such as 'cool pavements', which are capable of reducing solar radiation absorption, and of mitigating the intensity of SUHI locally (Hendel, 2020).

On a methodological level, this evolution of databases has been accompanied by the spread of supervised learning techniques, such as machine learning and deep learning, applied to the classification and recognition of urban thermal anomalies (Ding *et al*., 2023; Xu *et al*., 2023).

These methods have improved the accuracy and predictive power of classifications, allowing complex relationships between climatic, morphological, and environmental variables to

01 | Flowchart del modello
Model flowchart

et al., 2020). In risposta a queste criticità, negli ultimi anni si è sviluppato un crescente interesse verso approcci non supervisionati, capaci di individuare strutture e *pattern* ricorrenti nei dati senza richiedere etichettature preliminari
Le tecniche di clustering, in particolare, consentono di rilevare gruppi omogenei di comportamento termico a partire da grandi moli di dati, offrendo una rappresentazione più flessibile del fenomeno urbano. All'interno di questa famiglia, il clustering fuzzy si distingue per la capacità di assegnare a ciascun elemento un grado di appartenenza a più cluster, superando la rigidità delle classificazioni crisp . Questa caratteristica risulta particolarmente utile nei contesti urbani, dove le transizioni tra aree densamente edificate e spazi verdi non sono mai nette, ma distribuite lungo gradienti complessi. Nonostante il potenziale, le applicazioni del *clustering fuzzy* allo studio delle UHI restano ancora limitate. Alcuni studi recenti hanno dimostrato la sua efficacia nell'individuare hotspot urbani con maggiore affidabilità rispetto ad altre metodologie, soprattutto quando integrato con indicatori come la LST e l'NDVI. Inoltre, la possibilità di implementare tali approcci in ambiente GIS ne amplifica la rilevanza operativa, offrendo strumenti facilmente interpretabili da amministratori e pianificatori urbani e alla valutazione preliminare del rischio termico.

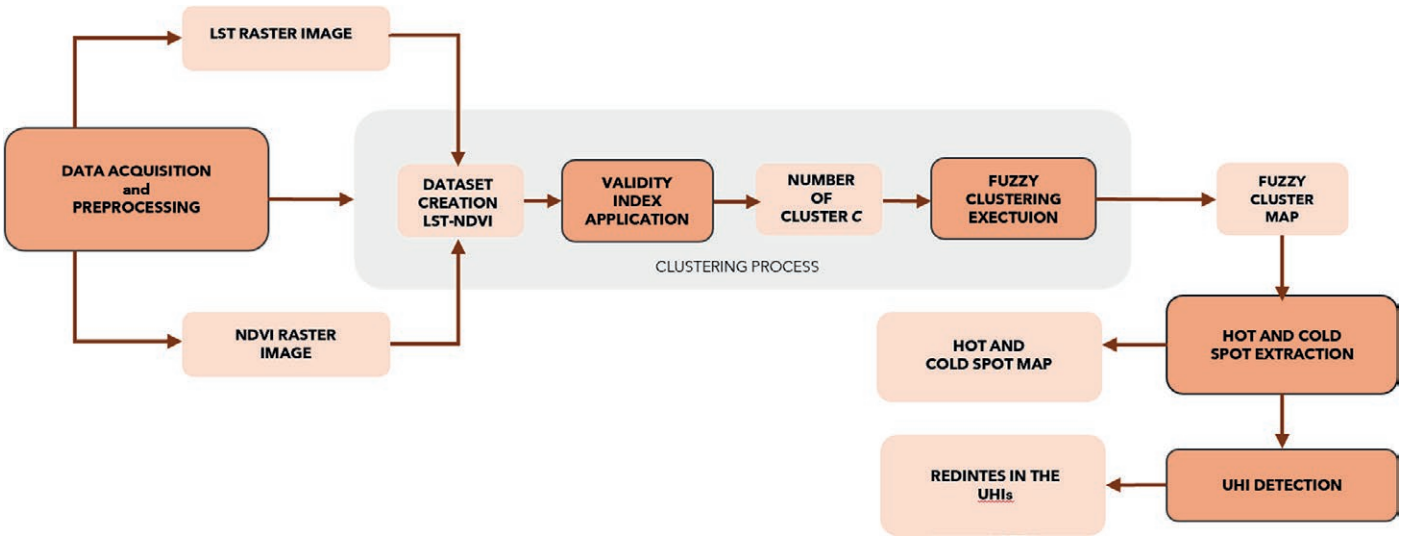
Metodologia *Caso Studio*

La città di Napoli è stata scelta come caso studio per la sua collocazione in area mediterranea, caratterizzata da estati calde e siccitose, e per la particolare vulnerabilità agli effetti delle ondate di calore. L'elevata densità edilizia, la scarsità di spazi verdi in alcune zone centrali e la presenza di forti disuguaglianze socio-economiche la rendono un contesto urbano emblematico per l'analisi del rischio termico e per la sperimentazione di metodologie di mappatura delle isole di calore urbane. L'analisi ha riguardato l'ondata di calore del luglio 2022. La scelta di un'unica immagine costituisce una scelta metodologica consapevole. Le UHIs raggiungono la massima intensità proprio durante eventi estremi, quando la radiazione solare, l'aridità dei suoli e l'accumulo di calore nei materiali urbani amplificano le differenze termo-radiative tra superfici. L'analisi di una scena rappresentativa di tali condizioni consente di cogliere la struttura spaziale dell'UHI con maggiore stabilità e interpretabilità rispetto a periodi non estremi, risultando particolarmente adatta a finalità conoscitive e di supporto alla pianificazione urbana.
Il quadro metodologico sviluppato per l'identificazione e l'analisi degli UHI prevede una sequenza sistematica di passaggi (Fig. 1).
Di seguito sono descritti gli step della metodologia.

Data acquisition and preprocessing – In questa fase sono acquisite dal satellite *Landsat 8 OLI/TIRS* immagini multispettrali in bande del visibile e dell'infrarosso per costruire due indicatori principali:

– *Land Surface Temperature* (LST), che esprime la temperatura radiativa della superficie terrestre, stimata a partire dalle bande termiche del sensore satellitare e consente di evidenziare le anomalie termiche presenti nel tessuto urbano. La LST viene calcolata a partire dalla banda termica TIRS mediante conversione dei Digital Number in radianza, correzione atmosferica e la successiva stima della temperatura superficiale.

| 01



– *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), un indice di misura della vigoria della vegetazione Esso è normalizzato tra -1 e +1: valori prossimi a +1 indicano una vegetazione densa e in buono stato, valori prossimi a 0 corrispondono a superfici urbane, rocciose o prive di vegetazione, mentre valori negativi (fino a -1) sono associati alla presenza di acqua o di suoli nudi.

Il preprocessing dei dati ha incluso correzioni atmosferiche e radiometriche, nonché il riallineamento geometrico delle immagini per garantire la perfetta corrispondenza spaziale tra i dataset. Le mappe di LST e NDVI sono state normalizzate e integrate in ambiente GIS, costituendo la base informativa per le fasi successive di clustering e analisi spaziale.

Validity index application – Dopo aver predisposto il dataset di input per l'attività di clustering, costituito dai raster LST e NDVI, è effettuata la selezione del numero ottimale di cluster C. La selezione è stata compiuta mediante la comparazione di tre validity index tra i più diffusi in letteratura:
– Xie–Beni Index (XBI)
– Davies–Bouldin Index (DBI)
– Fukuyama–Sugeno Index (FSI).

I tre indici determinano il numero ottimale di cluster come quello che fornisce lea migliore similarità intercluster e dissimilarità intracluster. Gli indici sono stati calcolati per valori di C compresi tra 3 e 15.

Poiché ogni indice tende a privilegiare differenti proprietà del clustering, la scelta è stata effettuata identificando la soluzione più stabile tra i criteri, ovvero il valore di C che emerge con maggiore frequenza come ottimale e che mostra coerenza nel comportamento dei tre validatori. Tale approccio garantisce una selezione robusta, non dipendente da un singolo indice e maggiormente interpretabile dal punto di vista termico ed ecologico.

Fuzzy clustering execution – Il cuore del metodo è da un processo unsupervised di fuzzy clustering, implementato mediante l'esecuzione dell'algoritmo Fuzzy C-Means (FCM). Si tratta di una tecnica non supervisionata che consente di raggruppare i pixel sulla base dei valori combinati di LST e NDVI, attribuendo a ciascun pixel un grado di appartenenza a ogni cluster.

L'algoritmo opera attraverso un processo iterativo articolato in due passaggi principali:
1. Aggiornamento dei centroidi dei cluster
   – a ogni iterazione viene calcolata la posizione media dei cluster, pesata in base ai gradi di appartenenza dei pixel;
   – i centroidi si spostano progressivamente verso le regioni dei dati che meglio rappresentano ciascun gruppo termo–vegetazionale.
2. Aggiornamento dei gradi di appartenenza
   – per ogni pixel sono ricalcolati i valori di appartenenza *fuzzy* in funzione della distanza relativa dai centroidi;
   – i pixel più vicini a un centroide hanno appartenenze elevate, mentre quelli in zone di transizione presentano valori intermedi.

Il processo si ripete fino al raggiungimento di una soglia di convergenza prestabilita.

Il risultato di questa fase è una mappa tematica, denominata, *Fuzzy Cluster Map*, in cui ogni pixel è etichettato col cluster cui appartiene con maggior grado di appartenenza.

be captured. However, they have significant limitations, including the need for large, labelled datasets for training, dependence on monitoring networks that are not always widespread, and high computational resource requirements that reduce their replicability and transferability to other urban contexts (Alahakoon *et al.*, 2020). In response to these critical issues, in recent years there has been growing interest in unsupervised approaches capable of identifying recurring structures and patterns in data without requiring preliminary labelling.

Clustering techniques, in particular, allow the detection of homogeneous groups of thermal behaviour from large amounts of data, offering a more flexible representation of the urban phenomenon. Within this family, fuzzy clustering stands out for its ability to assign each element a degree of membership to multiple clusters, overcoming the rigidity of crisp classifications. This feature is particularly useful in urban contexts, where transitions between densely built-up areas and green spaces are never sharp but distributed along complex gradients. Despite its potential, the applications of fuzzy clustering to the study of UHIs remain limited. Some recent studies have demonstrated its effectiveness in identifying urban hotspots with greater reliability than other methodologies, especially when integrated with indicators such as LST and NDVI. Furthermore, the possibility of implementing such approaches in a GIS environment amplifies their operational relevance, offering tools for preliminary thermal risk assessment, and devices that can be easily interpreted by urban administrators and planners.

Methodology

Case Study

The city of Naples was chosen as a case study due to its location in the Mediterranean region, characterised by hot, dry summers, and its particular vulnerability to the effects of heat waves. The high building density, the scarcity of green spaces in some central areas, and the presence of strong socio-economic inequalities make it an emblematic urban context for the analysis of thermal risk, and for testing methodologies for mapping urban heat islands. The analysis focused on the heatwave of July 2022. The choice of a single image is an intentional methodological approach. UHIs reach their maximum intensity during extreme events, when solar radiation, soil dryness, and heat accumulation in urban materials amplify the thermo-radiative differences between surfaces. The analysis of a scene representative of these conditions allows the spatial structure of the UHI to be captured with greater stability and interpretability than in non-extreme periods, making it particularly suitable for cognitive purposes and urban planning support.

The methodological framework developed for the identification and analysis of UHIs involves a systematic sequence of steps (Fig. 1).

The steps of the methodology are described below.

Dataset and preprocessing – At this stage, multispectral images in the visible and infrared bands are acquired by the Landsat 8 OLI/TIRS satellite to construct two main indicators:
– Land Surface Temperature (LST), which expresses the radiative temperature of the Earth's surface, estimated from the thermal bands of

Hot and cold spot extraction – Una volta ottenuta la classificazione dei pixel, l'analisi dei centroidi nello spazio LST-NDVI consente di distinguere tre principali tipi di aree con diversi comportamenti termo-vegetazionali:

- *hotspot*: appartenenti a cluster con centroidi con valori elevati di LST e valori negativi o prossimi a zero di NDVI, tipici di aree ad alta impermeabilizzazione e scarsa capacità di mitigazione;
- *coldspot*: appartenenti a cluster con valori LST contenuti e valori NDVI positivi e elevati, caratteristici di zone verdi periurbane e ambiti con buona dotazione ecosistemica;
- aree intermedie: appartenenti a cluster che descrivono condizioni di transizione tra tessuti urbani differenti.

Le aree hotspot rappresentano le potenziali aree UHI; esse identificano le aree urbane critiche durante il periodo di ondata di calore registrato.
Risultato di questo processo è mappa tematica che evidenzia le aree urbane *hot* e *coldspot*; le aree *hotspot* identificano le UHI generate e rappresentano le zone più critiche da monitorare; le aree *coldspot* identificano le zone urbane di rinfrescamento.
Il processo fornisce, inoltre, una stima della popolazione a rischio (*Residents in the UHIs*) costituita dalla popolazione residente nelle UHI. Essa è stimata a partire dai dati di censimento della popolazione suddivisi per zona di censimento.

Il framework è stato implementato su una piattaforma GIS costruita sulla *suite ESRI ARCGIS Pro* 3.4, utilizzando le librerie *Python ESRI ArcPy*. Il framework è stato sperimentato sull'area urbana di studi costituita dalla città di Napoli.

Di seguito sono mostrati e discussi i risultati dei *test* compiuti considerando periodi di ondata di calore estiva succeduti negli ultimi 3 anni, dal 2022 al 2024.

Risultati

I test sono stati compiuti costruendo da riprese Landsat dataset LST e NDVI durante ondate di calore succedute nei mesi estivi dal 2022 al 2024.
Di seguito si riportano in maniera completa i risultati ottenuti considerando una ondata di calore di 28 giorni consecutivi accaduta nella fine di luglio 2022; le riprese satellitari acquisite sono quelle compiute dal satellite in 30 luglio 2022.
La mappa LST (Fig. 2) mostra valori compresi tra 18°C e 50°C, con concentrazioni di temperature elevate nei quartieri centrali e lungo il fronte costiero orientale.
L'NDVI (Fig. 3) presenta valori più elevati nelle aree collinari e periurbane e valori prossimi allo zero nelle zone densamente urbanizzate.
La distribuzione congiunta LST – NDVI evidenzia che i valori più elevati di LST si riscontrano in presenza di superfici con bassa copertura vegetale.
I risultati del calcolo dei tre validity indices Xie–Beni, Davies–Bouldin e Fukuyama–Sugeno hanno evidenziato in 9 il numero ottimale di cluster. L'algoritmo FCM è stato eseguito sul dataset formato dai raster normalizzati LST e NDVI. Al termine dell'esecuzione l'algoritmo ha restituito la mappa tematica in Fig. 4, in cui è presente la classificazione in 9 gruppi termo-vegetazionali.
L'analisi dei centroidi nel piano LST–NDVI evidenzia due punti di flesso termici significativi (Fig. 5).

the satellite sensor. It allows thermal anomalies in the urban fabric to be highlighted. LST is calculated from the TIRS thermal band by converting Digital Numbers into radiance, atmospheric correction, and subsequent estimation of surface temperature.
- Normalised Difference Vegetation Index (NDVI), an index measuring vegetation vigour. It is normalised between -1 and +1. Values close to +1 indicate dense vegetation in good condition, values close to 0 correspond to urban, rocky or vegetation-free surfaces, while negative values (up to -1) are associated with the presence of water or bare soil.

Data preprocessing included atmospheric and radiometric corrections, as well as geometric realignment of images to ensure perfect spatial correspondence between datasets. The LST and NDVI maps were normalised and integrated into a GIS environment, forming the information base for the subsequent clustering and spatial analysis phases.

Validity index application – The optimal number of clusters C was selected after preparing the input dataset for clustering, consisting of LST and NDVI rasters. The selection was made by comparing three of the most widely used validity indices in the literature:
- Xie–Beni Index (XBI)
- Davies–Bouldin Index (DBI)
- Fukuyama–Sugeno Index (FSI).

The three indices determine the optimal number of clusters as the one that provides the best intercluster similarity and intracluster dissimilarity. The indices were calculated for C values between 3 and 15.

Since each index tends to favour different clustering properties, the choice was made by identifying the most stable solution among the criteria, i.e., the value of C that emerges most frequently as optimal and shows consistency in the behaviour of the three validators. This approach ensures a robust selection that does not depend on a single index, and is more interpretable from a thermal and ecological point of view.

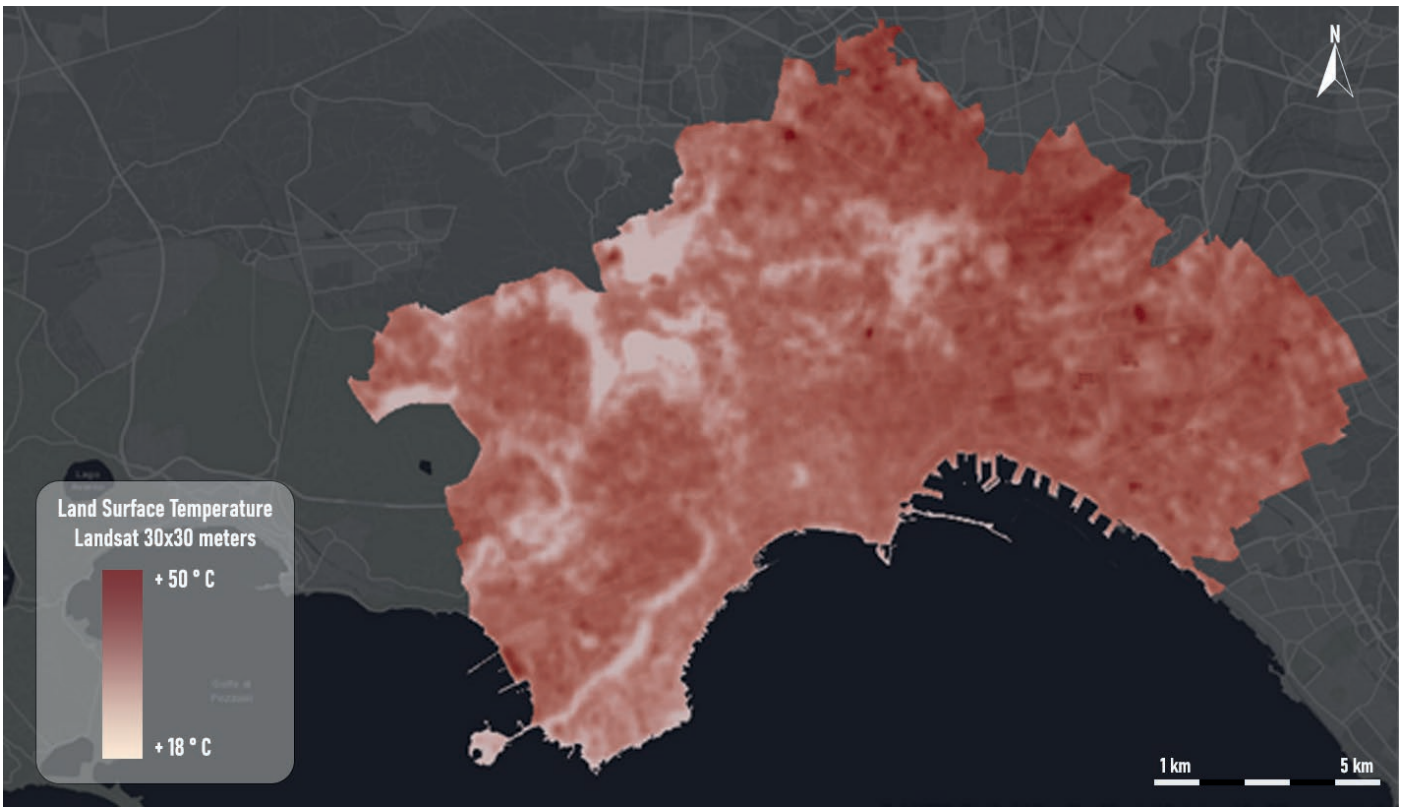
Fuzzy clustering execution – The core of the method is an unsupervised fuzzy clustering process implemented by running the Fuzzy C-Means (FCM) algorithm. This is an unsupervised technique that allows pixels to be grouped based on the combined values of LST and NDVI, assigning each pixel a degree of membership to each cluster.

The algorithm operates through an iterative process divided into two main steps:
1. Updating the cluster centroids
   - at each iteration, the average position of the clusters is calculated, weighted according to the degrees of membership of the pixels;
   - the centroids progressively move towards the data regions that best represent each thermo-vegetational group.
2. Updating the degrees of membership
   - For each pixel, the fuzzy membership values are recalculated according to the relative distance from the centroids.
   - The pixels closest to a centroid have high membership, while those in transition zones have intermediate values.

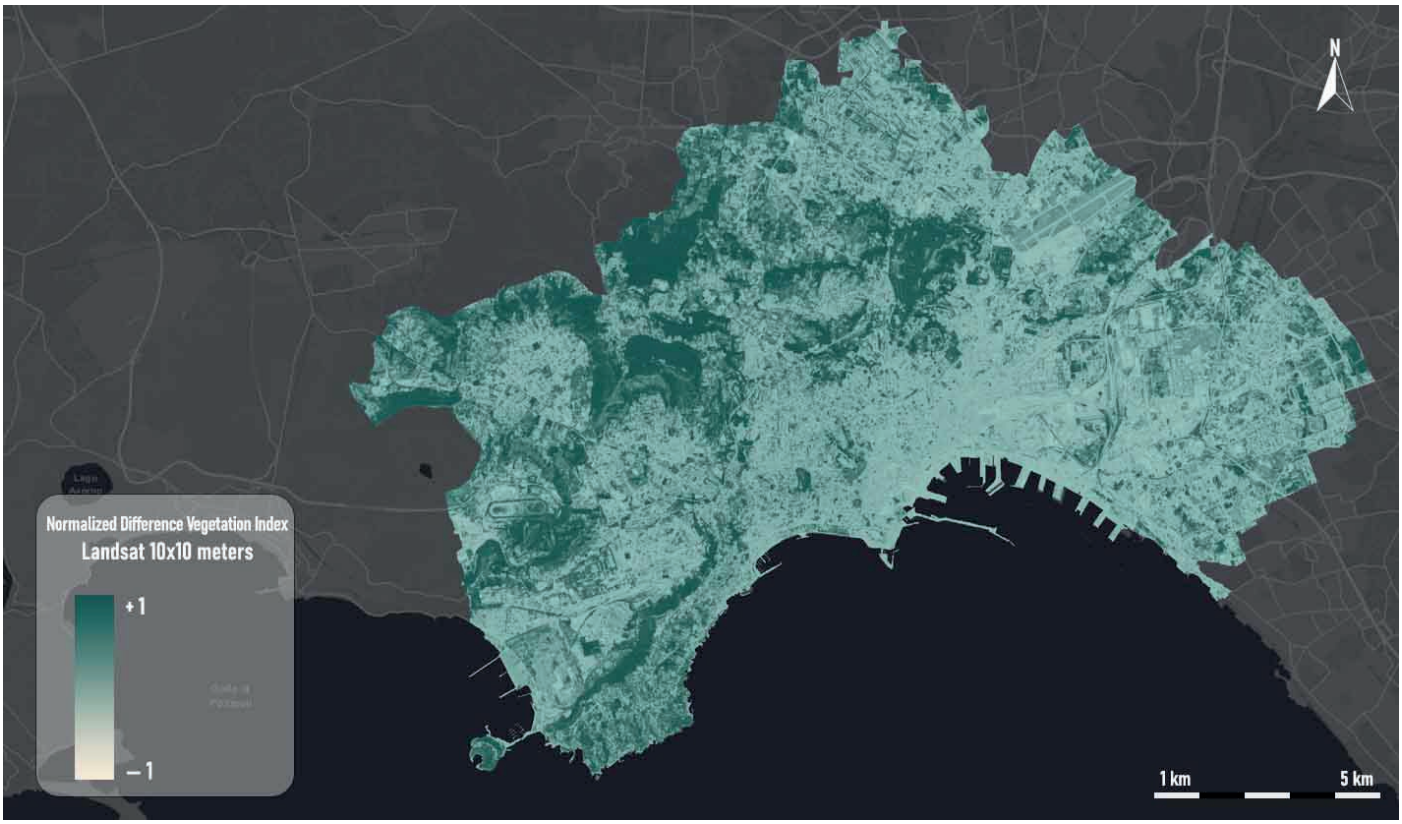
02 | Mappa della temperatura superficiale terrestre (LST) della città di Napoli durante l'ondata di calore di luglio 2022
Map of the land surface temperature (LST) of the city of Naples during the heatwave of July 2022

03 | Mappa dell'indice di vegetazione NDVI della città di Napoli durante l'ondata di calore di luglio 2022
Map of the NDVI vegetation index for the city of Naples during the heatwave of July 2022

02 |

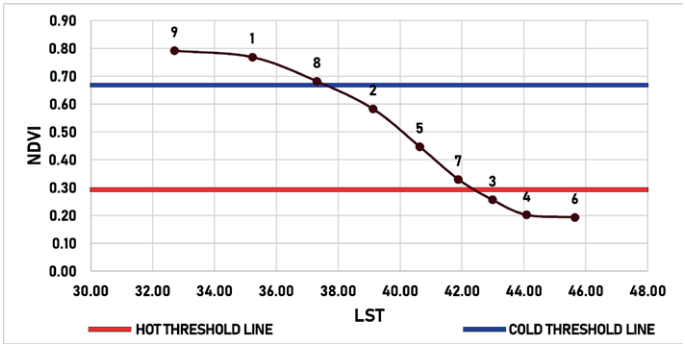


03 |



04 | Mappa dei fuzzy cluster
Map of fuzzy clusters

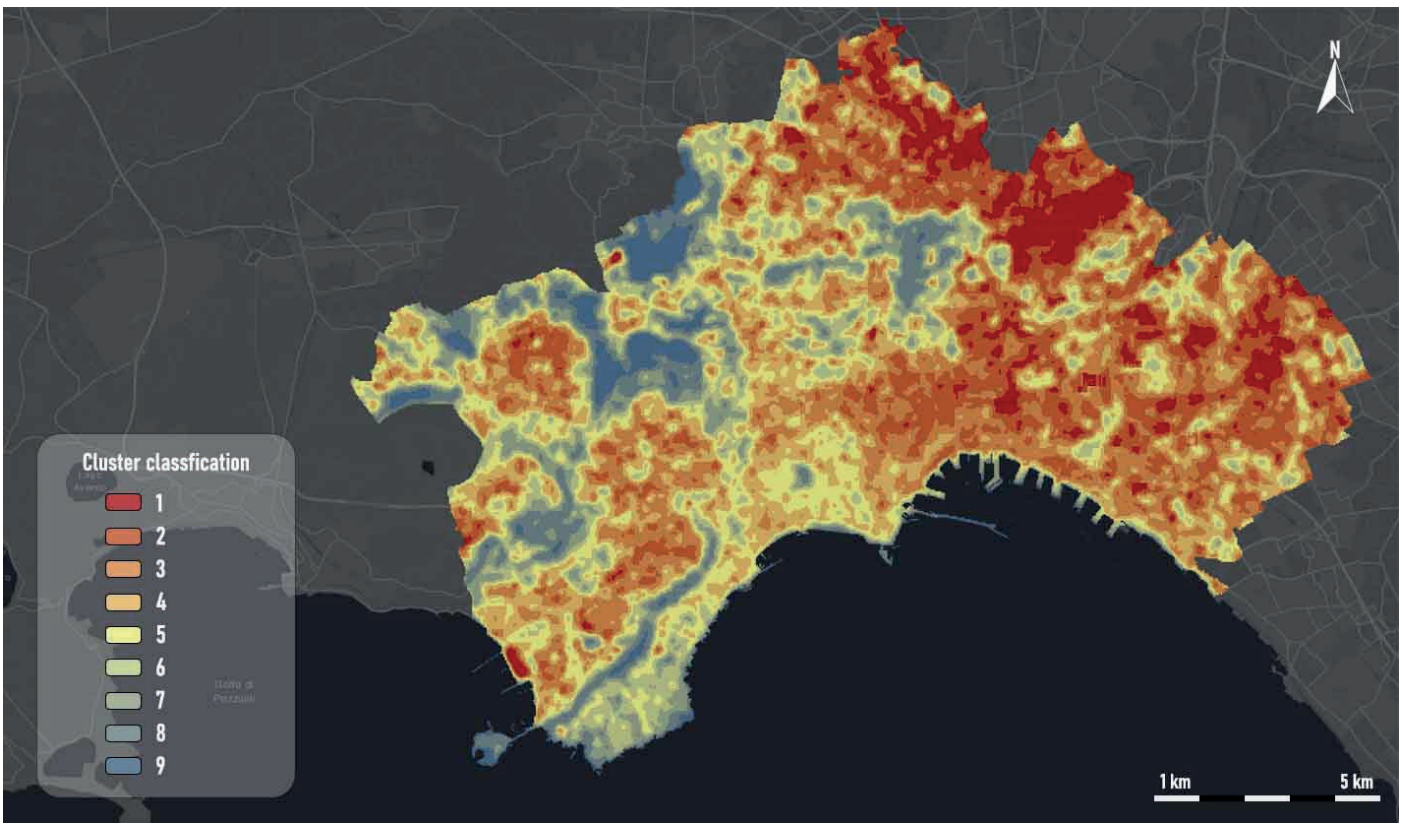
05 | Plot LST–NDVI dei centroidi
Plot of LST–NDVI of centroids



| 04

Per valori di LST inferiori a circa 34–35°C, l'NDVI rimane elevato e stabile, definendo la soglia cold. Superata questa soglia, l'NDVI decresce rapidamente fino a stabilizzarsi su valori prossimi allo zero oltre 44–45°C, configurando la soglia hot oltre la quale la vegetazione non è più in grado di mitigare l'accumulo termico.
Sulla base di tali soglie, i cluster 3, 4 e 6 ricadono nell'intervallo hot, con LST medie > 44°C e NDVI < 0.10, rappresentando le aree di massima intensità di SUHI.
Al contrario, i cluster 9, 1 e 8 si collocano nell'intervallo cold, con LST < 35°C e NDVI compresi tra 0.40–0.80, descrivendo le aree con maggiore capacità vegetazionale di mitigazione.
I cluster rimanenti rappresentano condizioni intermedie tra superfici altamente impermeabili e aree con coperture vegetali discontinue.
La Figura 6 mostra la distribuzione spaziale degli *hotspot* e dei coldspot derivati dalla classificazione fuzzy: gli *hotspot* coincidono con le porzioni urbane a più elevato surriscaldamento superficiale, mentre i *coldspot* delineano le aree con maggiore capacità di mitigazione vegetazionale. La mappa permette di cogliere con immediatezza i principali contrasti termo-ambientali del tessuto urbano.

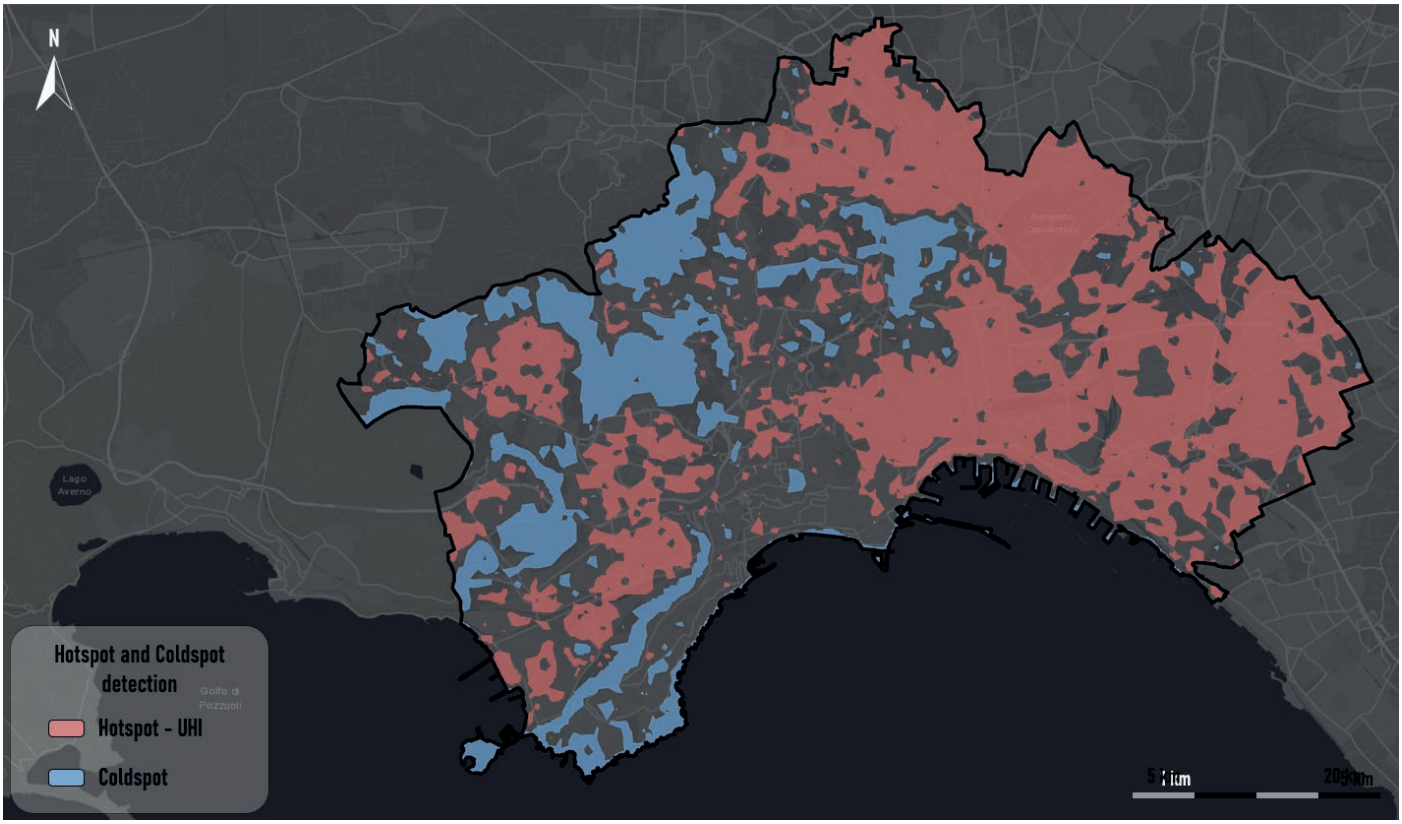
La stima del numero di residenti in aree critiche (Residents in UHIs) è stata compiuta intersecando le aree hotspot con le aree di censimento dell'ultimo censimento ISTAT del 2021.
La procedura è stata eseguita considerando due ulteriori ondate di calore accadute tra luglio e agosto del 2023 e del 2024.
In Tab. 1 sono mostrati i risultati ottenuti durante le ondate di calore analizzate acadute nei tre anni. Per ogni quartiere della città sono evidenziate, oltre alla superfice del quartiere e alla popolazione residente, il rapporto di copertura RC delle UHI, dato dal rapporto tra l'estensione delle UHI nel quartiere e l'estensione del quartiere e la popolazione del quartiere residente in UHI.
La tabella evidenzia una crescita negli anni dell'estensione media delle UHI e della popolazione a rischio. Rispetto al 2022 nel 2024 il rapporto di copertura delle UHI è mediamente cresciuto del 1.12%, con un picco massimo di oltre il 5% nel quartiere Porto. La popolazione a rischio, residente nelle UHI è cresciuta



| 05

06 | Mappa degli hotspot e coldspot
Map of hotspots and coldspots

06 |



da 485.671, nel periodo luglio-agosto 2022 a 494.515 nel periodo luglio-agosto 2024.

Discussione

I risultati mostrano come l'utilizzo congiunto degli indici LST e NDVI e del metodo *unsupervised* di fuzzy clustering FCM permette di rilevare con buon livello di dettaglio la configurazione termo–superficiale della città durante un evento estremo di ondata di calore e di estrarre le isole di calore urbane e stimare la popolazione a rischio. Rispetto alle metodologie tradizionali basate su soglie o interpolazioni, l'approccio *fuzzy-based* restituisce la natura continua dei processi termo-ambientali, evidenziando gradualmente le transizioni tra aree soggette a forte surriscaldamento e zone caratterizzate da maggiore dotazione vegetale.

The process is repeated until a previously established convergence threshold is reached.
The result of this phase is a thematic map, called a Fuzzy Cluster Map, in which each pixel is labelled with the cluster it belongs to with the highest degree of membership.

Hot and cold spot extraction – Once the pixels have been classified, analysis of the centroids in the LST–NDVI space allows three main types of areas with different thermal–vegetation behaviours to be distinguished:
– hotspots: belonging to clusters with centroids with high LST values and negative or near-zero NDVI values, typical of areas with high impermeability and poor mitigation capacity;
– coldspots: belonging to clusters with low LST values and positive, high NDVI values, characteristic of peri-urban green areas and areas with good ecosystem resources;
– intermediate areas: belonging to clusters that describe transitional conditions between different urban fabrics.

Hotspot areas represent potential UHI areas. They identify critical urban areas during the recorded heatwave period.
The result of this process is a thematic map highlighting urban hotspots and coldspots. Hotspot areas identify the UHIs generated and represent the most critical areas to monitor, while coldspot areas identify urban cooling zones.
The process also provides an estimate of the population at risk (Residents in the UHIs), consisting of the population residing in the UHIs. This is estimated from population census data broken down by census area.

The framework was implemented on a GIS platform built on the ESRI ARCGIS Pro 3.4 suite, using ESRI ArcPy Python libraries. The framework was tested on the urban study area consisting of the city of Naples. The results of the tests carried out considering summer heat wave periods over the last three years, from 2022 to 2024, are shown and discussed below.

Results

The tests were carried out by constructing LST and NDVI datasets from Landsat images during heat waves that occurred in the summer months from 2022 to 2024.
The results obtained for a heat wave lasting 28 consecutive days at the end of July 2022 are shown in full below. The satellite images acquired are those taken by the satellite on 30 July 2022.

The LST map (Fig. 2) shows values between 18°C and 50°C, with concentrations of high temperatures in the central districts and along the eastern coastline.
The NDVI (Fig. 3) shows higher values in hilly and peri-urban areas, and values close to zero in densely urbanised areas.
The joint LST–NDVI distribution shows that the highest LST values are found in areas with low vegetation cover.
The results of the calculation of the three validity indices Xie–Beni, Davies–Bouldin, and Fukuyama–Sugeno showed that 9 was the optimal number of clusters. The FCM algorithm was run on the dataset formed by the normalised LST and NDVI rasters. At the end of the execution, the algorithm returned the thematic map

Tab. 01 | Rapporti di copertura e popolazione residente in UHI per quartiere durante le ondate di calore nei periodi tra luglio e agosto del 2022, 2023 e 2024.
Coverage ratios and resident population in UHI by neighbourhood during heat waves in July and August 2022, 2023, and 2024.

| Tab. 01

Quartieri	Area Quart [km²]	Area UHI Quart [km²]	Abitanti	RC (luglio-agosto 2022)	Popolazione in UHI (luglio-agosto 2022)	RC (luglio-agosto 2023)	Popolazione in UHI (luglio-agosto 2023)	RC (luglio-agosto 2024)	Popolazione in UHI (luglio-agosto 2024)
Arenella	5,189	0,761	77.597	14,67%	11.385	15,15%	11.754	15,28%	11.857
Avvocata	1,210	0,876	43.523	72,36%	31.491	72,86%	31.710	73,43%	31.960
Bagnoli	8,038	1,513	23.884	18,82%	4.495	18,93%	4.521	19,91%	4.755
Barra	7,647	4,837	41.771	63,25%	26.419	63,62%	26.576	64,23%	26.831
Chiaia	2,791	0,109	50.909	3,92%	1.993	4,02%	2.044	4,13%	2.101
Chiaiano	9,570	1,130	29.576	11,81%	3.494	12,20%	3.610	12,76%	3.775
Fuorigrotta	6,510	2,593	75.264	39,84%	29.983	39,94%	30.061	40,28%	30.313
Mercato	0,571	0,348	9.624	61,00%	5.871	63,06%	6.069	63,30%	6.092
Miano	2,047	1,382	27.463	67,50%	18.536	68,54%	18.824	69,09%	18.975
Montecalvario	0,782	0,283	31.105	36,25%	11.275	36,63%	11.395	36,75%	11.430
Pendino	0,767	0,614	23.014	80,02%	18.415	80,12%	18.439	80,32%	18.485
Pianura	11,328	2,341	51.091	20,67%	10.559	21,19%	10.827	21,31%	10.889
Piscinola	3,854	1,904	32.609	49,40%	16.109	50,28%	16.396	51,08%	16.657
Poggioreale	4,581	2,909	24.210	63,50%	15.372	64,41%	15.594	64,96%	15.726
Ponticelli	9,392	6,771	42.585	72,09%	30.699	72,73%	30.972	72,75%	30.980
Porto	0,437	0,247	6.836	56,53%	3.865	60,41%	4.130	62,34%	4.262
Posillipo	4,956	0,028	24.807	0,56%	140	1,30%	323	1,76%	436
San Carlo all'Arena	7,615	2,183	70.883	28,66%	20.317	29,05%	20.593	29,32%	20.783
San Ferdinando	1,180	0,174	29.283	14,71%	4.307	15,23%	4.459	15,75%	4.614
San Giovanni a Teduccio	2,547	1,381	22.706	54,23%	12.314	54,73%	12.426	55,38%	12.575
San Giuseppe	0,418	0,302	8.525	72,24%	6.158	72,61%	6.190	72,92%	6.216
San Lorenzo	1,488	1,463	54.285	98,31%	53.368	98,84%	53.657	98,94%	53.712
San Pietro a Patierno	5,311	4,646	18.718	87,48%	16.375	87,61%	16.399	89,07%	16.672
Scampia	3,913	2,852	23.999	72,89%	17.493	73,00%	17.520	74,19%	17.805
Secondigliano	2,924	2,569	58.618	87,87%	51.507	87,90%	51.524	88,21%	51.710
Soccavo	5,118	1,831	46.732	35,78%	16.719	35,93%	16.793	36,17%	16.902
Stella	2,013	0,633	37.279	31,42%	11.713	31,94%	11.905	32,56%	12.139
Vicaria	0,704	0,688	19.428	97,75%	18.990	97,78%	18.997	98,75%	19.185
Vomero	2,086	0,229	57.619	10,96%	6.317	11,20%	6.456	11,21%	6.459
Zona Industriale	2,932	2,295	12.769	78,26%	9.993	79,26%	10.089	80,29%	10.220

in Fig. 4, which shows the classification into 9 thermo-vegetation groups.
The analysis of the centroids in the LST–NDVI plane highlights two significant thermal inflection points (Fig. 5).
For LST values below approximately 34–35°C, the NDVI remains high and stable, defining the cold threshold. Above this threshold, the NDVI decreases rapidly until it stabilises at values close to zero above 44–45°C, setting the hot threshold above which vegetation is no longer able to mitigate heat accumulation.
Based on these thresholds, clusters 3, 4, and 6 fall within the hot range, with average LSTs > 44°C and NDVIs < 0.10, representing the areas of maximum SUHI intensity.
Conversely, clusters 9, 1, and 8 fall within the cold range, with LST < 35°C and NDVI between 0.40–0.80, describing areas with greater vegetation mitigation capacity.
The remaining clusters represent intermediate conditions between highly impervious surfaces and areas with discontinuous vegetation cover.
Figure 6 shows the spatial distribution of hotspots and coldspots derived from fuzzy classification. Hotspots coincide with urban areas with the highest surface overheating, while coldspots delineate areas with greater vegetation mitigation capacity. The map provides an immediate overview of the main thermal-environmental contrasts in the urban fabric.
The estimate of the number of residents in critical areas (Residents in UHIs) was made by intersecting the hotspot areas with the census areas of the latest ISTAT census of 2021.
The procedure was carried out considering two additional heat waves that occurred between July and August 2023 and 2024.
Table 1 shows the results obtained during the heat waves analysed over the three years. In addition to the neighbourhood's surface area and resident population, the RC coverage ratio of the UHIs is highlighted for each neighbourhood in the city. It is given by the ratio between the extent of the UHIs in the neighbourhood, and the extent of the neighbourhood and the population of the neighbourhood residing in the UHI.
The table shows an increase over the years in both the average extent of UHIs and the population at risk. Compared to 2022, in 2024 the UHI coverage ratio grew by an average of 1.12%, with a peak of over 5% in the Porto district. The population at risk residing in UHIs grew from 485,671 in July-August 2022 to 494,515 in July-August 2024.

Discussion
The results show that the combined use of LST and NDVI indices, and the unsupervised fuzzy clustering FCM method allows for the detection, with a good level of detail, of the city's surface temperature configuration during an extreme heat wave event, as well as the extraction of urban heat islands and the estimation of the population at risk. Compared to traditional threshold or interpolation-based methodologies, the fuzzy-based approach reflects the continuous nature of thermal-environmental processes, gradually highlighting the transitions between areas subject to severe overheating and areas characterised by greater vegetation cover.

Le UHI, rappresentate da aree *hotspot*, coincidono con zone ad alta impermeabilizzazione, presenza di materiali a elevata capacità termica e configurazioni urbane compatte, mentre le aree *coldspot* ricadono in corrispondenza di superfici vegetate e tessuti a bassa densità edilizia. La classificazione continua permette inoltre di identificare con precisione le aree di transizione, che spesso corrispondono a margini tra tessuti edificati e spazi verdi, dove piccoli cambiamenti nella copertura o nelle superfici possono generare variazioni termiche significative.
L'analisi congiunta di LST e NDVI conferma l'effetto modulatore della copertura vegetale sulle temperature superficiali. La presenza di vegetazione influisce sulla distribuzione dei *cluster*, riducendo localmente l'intensità termica attraverso processi di evapotraspirazione e maggiore permeabilità del suolo. Le aree caratterizzate da materiali scuri o ad alta inerzia termica mostrano i valori più elevati di LST, mentre superfici chiare o trattate con materiali più riflettenti presentano anomalie termiche inferiori. Anche la presenza di elementi idrici contribuisce a mitigare localmente le temperature superficiali.
Il *framework* proposto è stato sperimentato per monitorare l'andamento delle UHI durante periodi di calore occorsi sulla città di Napoli durante i mesi di luglio e agosto dal 2022 al 2024. I risultati hanno evidenziato un *trend* in crescita delle superfici UHI nei tre anni e un corrispondente aumento della popolazione a rischio.
Questi risultati rendono il *framework* un valido strumento di monitoraggio che permette di localizzare le UHI e valutare la loro espansione nel tempo.
Alcune limitazioni restano tuttavia presenti. La risoluzione spaziale delle immagini Landsat (30 m) non consente di cogliere il dettaglio delle micro-configurazioni tipiche delle aree urbane storiche o dei tessuti compatti. Applicazioni future potranno beneficiare dell'integrazione con dati ad alta risoluzione provenienti da rilievi aerei, sensori locali o modelli climatici urbani, nonché dall'inclusione di indicatori socio-demografici utili a valutare la vulnerabilità delle popolazioni esposte.

Conclusioni

Lo studio ha dimostrato come l'integrazione di dati satellitari e metodi di intelligenza artificiale per l'analisi automatica dei dati, in particolare l'uso di tecniche di *clustering fuzzy*, consenta di individuare con precisione le aree urbane maggiormente esposte al rischio termico durante le ondate di calore.
L'analisi integrata di LST e NDVI, applicata al caso di Napoli, ha permesso di mappare con precisione *hotspot* e *coldspot*, fornendo una rappresentazione continua delle condizioni termo-vegetazionali, una analisi delle UHI localizzate e della loro espansione e valutazione quantitativa della popolazione a rischio.
Il valore aggiunto risiede nella capacità di superare la rigidità delle classificazioni tradizionali e di cogliere la complessità del tessuto urbano attraverso una rappresentazione fuzzy delle transizioni, che riflette in modo più realistico la natura graduale dei fenomeni termo superficiali.
L'integrazione in ambiente GIS conferisce al metodo una dimensione operativa, rendendolo uno strumento utilizzabile da amministratori e pianificatori urbani per orientare le analisi preliminari di rischio termico e supportare processi decisionali legati alla pianificazione climatica urbana.
Nel complesso, la metodologia proposta rappresenta una base solida, replicabile e scalabile per la caratterizzazione delle UHI

UHI, represented by hotspot areas, coincide with highly impermeable areas, the presence of materials with high thermal capacity, and compact urban configurations, while coldspot areas fall within vegetated surfaces and low-density building fabrics. Continuous classification also allows for the precise identification of transition areas, which often correspond to the margins between built-up areas and green spaces, where small changes in coverage or surface area can generate significant temperature variations.
The joint analysis of LST and NDVI confirms the modulating effect of vegetation cover on surface temperatures. The presence of vegetation affects the distribution of clusters, locally reducing thermal intensity through evapotranspiration processes and greater soil permeability. Areas characterised by dark materials or high thermal inertia show the highest LST values, while light surfaces or those treated with more reflective materials show lower thermal anomalies. The presence of water elements also contributes to locally mitigating surface temperatures.
The proposed framework was tested to monitor UHI trends during heat waves in the city of Naples during the months of July and August from 2022 to 2024. The results showed a growing trend in UHI surfaces over the three years, and a corresponding increase in the population at risk.
These results make the framework a valuable monitoring tool that allows UHIs to be located and their expansion over time to be assessed.
However, some limitations remain. The spatial resolution of Landsat images (30 m) does not allow for the capture of details typical of historic urban areas or compact fabrics. Future applications will benefit from integration with high-resolution data from aerial surveys, local sensors, or urban climate models, as well as the inclusion of socio-demographic indicators useful for assessing the vulnerability of exposed populations.

Conclusions

The study demonstrated how the integration of satellite data and artificial intelligence methods for automatic data analysis, in particular the use of fuzzy clustering techniques, allows for the accurate identification of urban areas most exposed to thermal risk during heat waves.
The integrated analysis of LST and NDVI, applied to the case of Naples, made it possible to accurately map hotspots and coldspots, providing a continuous representation of thermo-vegetation conditions, an analysis of localised UHIs and their expansion, and a quantitative assessment of the population at risk.
The added value lies in the ability to overcome the rigidity of traditional classifications and capture the complexity of the urban fabric through a fuzzy representation of transitions, which more realistically reflects the gradual nature of surface thermal phenomena.
Integration into a GIS environment gives the method an operational dimension, making it a tool that can be used by urban administrators and planners to guide preliminary thermal risk analyses and support decision-making processes related to urban climate planning.
Overall, the proposed methodology represents a solid, replicable and scalable basis for characterising surface UHIs during extreme events, contrib-

superficiali durante eventi estremi, contribuendo alla definizione di strumenti conoscitivi utili al rafforzamento della resilienza climatica delle città mediterranee.

ATTRIBUZIONE, RICONOSCIMENTI, DIRITTI D'AUTORE

Titolo della ricerca: RETURN - multi-risk science for resilient communites under a changing climate.

Responsabili scientifici: Domenico Calcaterra, Andrea Prota.

Project and funding typology: 2022-2025 "Progetto PNRR RETURN - multi-Risk sciEnce for resilienT commUnities undeR a chaNging climate". "Spoke 5 - TS1: Urban and metropolitan settlements". Bando nazionale Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza Partenariato Esteso PE3.

Coordinatori nazionali Spoke 5 - TS1: Prof. M. Losasso, Prof. A. Prota, Dott. M. Pittore.

Finanziamento complessivo dello Spoke € 15.000.000

Stakeholders: Atenei di Bologna, Milano, Firenze, Cà Foscari, Cagliari, Napoli Federico II (capofila), Palermo, Torino e altri partners (Alma Viva, Autostrade, FS, Dipartimento Protezione Civile, OBS).

Ruolo degli autori nella ricerca: Massa aggregata (Rosa Cafaro, Barbara Cardone), massa critica (Ferdinando Di Martino).

REFERENCES

Alahakoon, D., Nawaratne, R., Xu, Y., Silva, D., Sivarajah, U. and Gupta, B. (2020), "Self-building artificial intelligence and machine learning to empower big data analytics in smart cities", Information Systems Frontiers, Vol. 25 No. 1, pp. 221-240. Available at: https://doi.org/10.1007/s10796-020-10056-x

Brabant, C., Dubreuil, V. and Dufour, S. (2024), "Evaluation of spatial interpolation techniques for urban heat island monitoring in small and medium sized cities", Frontiers in Built Environment, Vol. 10, p. 1455047. Available at: https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1455047

Buchin, O., Hoelscher, M., Meier, F., Nehls, T. and Ziegler, F. (2016), "Evaluation of the health-risk reduction potential of countermeasures to urban heat islands", Energy and Buildings, Vol. 114, pp. 27-37. Available at: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.038

Copernicus Land Monitoring Service (2023), "Urban heat islands: measured, mapped and managed". Available at: https://land.copernicus.eu/en/feature-articles/urban-heat-islands-measured-mapped-and-managed (Accessed on 15/11/2025)

Dang, L. and Kim, S. (2023), "An analysis of the spatial and temporal evolution of the urban heat island in the city of Zhengzhou using MODIS data", Applied Sciences, Vol. 13 No. 12, p. 7013. Available at: https://doi.org/10.3390/app13127013

Ding, X., Zhao, Y., Fan, Y., Li, Y. and Ge, J. (2023), "Machine learning-assisted mapping of city-scale air temperature: using sparse meteorological data for urban climate modeling and adaptation", Building and Environment, Vol. 234, p. 110211. Available at: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110211

Ge, X., Mauree, D., Castello, R. and Scartezzini, J.-L. (2020), "Spatio-Temporal Relationship between Land Cover and Land Surface Temperature in Urban Areas: A Case Study in Geneva and Paris", ISPRS International Journal of Geo-Information, Vol. 9 No. 10, p. 593. Available at: https://doi.org/10.3390/ijgi9100593

Hendel, M. (2020), "Cool pavements", in Pacheco-Torgal, F., Amirkhanian, S., Wang, H. and Schlangen, E. (Eds.), Eco-Efficient Pavement Construction Materials, Woodhead Publishing, pp. 97–125. Available at: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818981-8.00006-0

Huete, A.R. (1988), "A soil-adjusted vegetation index (SAVI)", Remote Sensing of Environment, Vol. 25 No. 3, pp. 295-309. Available at: https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X

Jones, P.D., Lister, D.H. and Li, Q. (2008), "Urbanization effects in large-scale temperature records, with an emphasis on China", Journal of Geophysical Research: Atmospheres, Vol. 113 No. D16. Available at: https://doi.org/10.1029/2008JD009916

uting to the definition of knowledge tools that are useful for strengthening the climate resilience of Mediterranean cities.

ATTRIBUTION, ACKNOWLEDGMENTS, COPYRIGHT

Research title: RETURN - multi-risk science for resilient communities under a changing climate.
Scientific Directors: Domenico Calcaterra, Andrea Prota.
Project type and funding: 2022-2025 "Progetto PNRR RETURN - multi-Risk sciEnce for resilienT commUnities undeR a chaNging climate". "Spoke 5 - TS1: Urban and metropolitan settlements". Bando nazionale Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza Partenariato Esteso PE3
National Coordinators for Spoke 5 - TS1: Prof. M. Losasso, Prof. A. Prota, Dott. M. Pittore.
Total funding for the Spoke € 15,000.000
Stakeholders: Universities of Bologna, Milan, Florence, Cà Foscari, Cagliari, Naples Federico II (group lead), Palermo, Turin and other partners (Alma Viva, Autostrade, FS, Dipartimento Protezione Civile, OBS).
Role of the author/s in the research: aggregate team (Rosa Cafaro, Barbara Cardone), critical team (Ferdinando Di Martino).

Li, H. and Liu, Q. (2008), "Comparison of NDBI and NDVI as indicators of surface urban heat island effect in MODIS imagery", in International Conference on Earth Observation Data Processing and Analysis (ICEODPA), Vol. 7285, International Society for Optics and Photonics, p. 728503. Available at: https://doi.org/10.1117/12.815679

Oke, T.R. (1982), "The energetic basis of the urban heat island", Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 108 No. 455, pp. 1-24. Available at: https://doi.org/10.1002/qj.49710845502

Oke, T.R., Mills, G., Christen, A. and Voogt, J.A. (2017), Urban Climates, Cambridge University Press, Cambridge. Available at: https://doi.org/10.1017/9781139016476

Roba, Z.R. and Tabor, K.W. (2025), "Geospatial analysis of vegetation and land surface temperature for urban heat island mitigation in Hawassa City, Ethiopia", Scientific Reports, Vol. 15 No. 1. Available at: https://doi.org/10.1038/s41598-025-17014-0

Şengün, E., Arefi, H., Aksoy, S. and Taheri, P. (2023), "Modelling Urban Heat Island with Landsat Images and LiDAR Datasets", Journal of Geospatial Surveying, Vol. 3 No. 1, pp. 1-14. Available at: https://doi.org/10.4038/jgs.v3i1.46

Silvestrini, G. (2023), "The possible role of urban centres in the transition to climate neutrality", TECHNE - Journal of Technology for Architecture and Environment, No. 26, pp. 32-35. Available at: https://doi.org/10.36253/techne-14975

Stewart, I.D. (2011), "A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature", International Journal of Climatology, Vol. 31 No. 2, pp. 200-217. Available at: https://doi.org/10.1002/joc.2141

Xu, X., Pei, H., Wang, C., Xu, Q., Xie, H., Jin, Y., Feng, Y., Tong, X. and Xiao, C. (2023), "Long-term analysis of the urban heat island effect using multi-source Landsat images considering inter-class differences in land surface temperature products", Science of The Total Environment, Vol. 858 Part 1, 159777. Available at: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159777

Climate Shelters: una rete urbana per la resilienza climatica e i servizi di quartiere

Just Accepted: November 28, 2025 **Published:** July 29, 2026

Giovanni Nocerino[1], https://orcid.org/0000-0002-6778-6971 giovanni.nocerino@unina.it
Maria Teresa Girardi[2], https://orcid.org/0009-0001-1448-6879 mariateresa.girardi@unina.it
Mattia Federico Leone[2], https://orcid.org/0000-0003-2434-509X mattia.leone@unina.it
[1] Centro Interdipartimentale di Ricerca Laboratorio di urbanistica e pianificazione territoriale "Raffaele d'Ambrosio", Università degli studi di Napoli Federico II, Italia
[2] Dipartimento di Architettura, Università degli studi di Napoli Federico II, Italia

Abstract. Il lavoro propone una metodologia per l'individuazione e la progettazione di Climate Shelters: infrastrutture urbane permanenti capaci di mitigare gli effetti delle ondate di calore e di generare co-benefici sociali, energetici e ambientali. Il framework integra indicatori tecnici, ambientali e funzionali con strumenti GIS e *Algorithm Aided Design*, per trasformare spazi esistenti in nodi di resilienza e servizi di quartiere. L'applicazione al PAESC di Napoli dimostra come i rifugi climatici contribuiscano alla riduzione della povertà energetica e allo sviluppo di reti urbane inclusive. Il caso studio di Bagnoli evidenzia la capacità della metodologia di tradurre obiettivi strategici in soluzioni progettuali concrete, rafforzando il ruolo dello spazio pubblico nell'adattamento climatico.

Parole chiave: *Climate shelter*; Adattamento climatico; Resilienza urbana; Comfort termico; Spazio pubblico.

Introduzione

Il cambiamento climatico pone sfide sempre più complesse, con effetti evidenti sulle città e sugli ecosistemi urbani. L'intensificazione degli eventi meteorologici estremi compromette la vivibilità urbana e costituisce un serio rischio sanitario per anziani, bambini e persone con patologie croniche (IPCC, 2023; Amorim-Maia *et al*., 2023). Le temperature elevate accrescono ricoveri e mortalità e, in combinazione con l'urbanizzazione e un uso insostenibile delle risorse, intensificano l'effetto isola di calore urbano (D'Ippoliti *et al*., 2010; Vicedo-Cabrera *et al*., 2021; IPCC, 2023).

Diventa quindi essenziale integrare strategie di mitigazione e adattamento nella pianificazione urbana. La combinazione di soluzioni tecnologiche, approcci *nature-based* e interventi sociali è riconosciuta come leva fondamentale per trasformazioni sistemiche (Lin *et al*., 2021), ma ad oggi solo un quarto delle città europee dispone di piani che affrontano congiuntamente questi aspetti (Grafakos *et al*., 2020). In questo scenario, misure inizialmente concepite come risposte emergenziali stanno evolvendo in veri e propri dispositivi infrastrutturali. Fra queste, particolare rilevanza assumono i *Climate Shelters* (Lenzi *et al*., 2025): spazi urbani, *indoor* o *outdoor*, progettati per offrire protezione durante eventi climatici estremi e, al tempo stesso, migliorare la qualità della vita quotidiana in città.

Oltre a rispondere all'emergenza climatica, un *Climate Shelter* costituisce un'opportunità per il ripensamento dell'uso dello spazio pubblico, trasformando le città in ambienti più sostenibili e inclusivi (Montero-Gutiérrez *et al*., 2023). Se adeguatamente progettati, infatti, i rifugi climatici possono arricchire i quartieri con nuove attrezzature urbane, riqualificando lo spazio pubblico e generando benefici duraturi per la comunità. Configurandosi come "infrastrutture urbane di prossimità" li connette con altri strumenti di pianificazione e rigenerazione, rafforzandone il ruolo sistemico.

Alla luce di tali premesse, il contributo sviluppa un framework metodologico e progettuale capace di integrare indicatori tecnici (es. prestazioni energetiche degli edifici), criteri funzionali (accessibilità, distribuzione equa dei servizi), e dimensioni socio-spaziali, con l'obiettivo di individuare e trasformare spazi esistenti in *Climate Shelters*.

Climate Shelters: an urban network for climate resilience and neighbourhood services

Abstract. This paper proposes a methodology for identifying and designing Climate Shelters, precisely permanent urban infrastructures capable of mitigating heatwave effects and generating social, energy, and environmental co-benefits. The framework integrates technical, environmental, and functional indicators with GIS and Algorithm Aided Design tools in order to transform existing spaces into resilience and neighbourhood service nodes. The application of the methodology to Naples' SECAP demonstrates how climate shelters contribute to reducing energy poverty and developing inclusive urban networks. The Bagnoli case study highlights the methodology's capacity to translate strategic objectives into concrete design solutions, strengthening the role of public space in climate adaptation.

Keywords: Climate Shelter; Climate adaptation; Urban resilience; Thermal comfort; Public space.

Introduction

Climate change poses increasingly complex challenges with clear effects on cities and urban ecosystems. The intensification of extreme weather events impairs urban liveability, and poses a serious health risk to the elderly, children and people with chronic diseases (IPCC, 2023; Amorim-Maia *et al*., 2023). High temperatures increase hospital admissions and mortality and, in combination with urbanisation and unsustainable use of resources, intensify the urban heat island effect (D'Ippoliti *et al*., 2010; Vicedo-Cabrera *et al*., 2021; IPCC, 2023). It is, therefore, essential to integrate mitigation and adaptation strategies into urban planning. The combination of technological solutions, nature-based approaches and social interventions is recognised as a key lever for systemic transformation (Lin *et al*., 2021), but to date only a quarter of European cities have plans that address these aspects jointly (Grafakos *et al*., 2020). In this scenario, measures initially conceived as emergency responses are evolving into actual infrastructure devices. Among these, Climate Shelters (Lenzi *et al*., 2025) are particularly important, namely indoor or outdoor urban spaces designed to offer protection during extreme weather events and, at the same time, to improve the quality of daily life in cities.

Beyond addressing climate emergencies, Climate Shelters open opportunities for rethinking the use of public space, transforming cities into safer, more sustainable, and more inclusive environments (Montero-Gutiérrez *et al*., 2023).

If properly designed, climate shelters can enrich neighbourhoods with new urban facilities, redeveloping public

ISSN online: 2239-0243 | © 2025 Author(s) | http://www.fupress.com/techne | DOI: 10.36253/techne-18627
Open access, peer-reviewed article published by Firenze University Press (https://www.fupress.com) and distributed, except where otherwise noted, under the terms of the CC BY 4.0 License for content and CC0 1.0 Universal for metadata

01 | Evoluzione dei *Climate Shelters*: dai *cooling centres* negli USA (Seattle, New York) alle reti europee di Parigi e Barcellona, con spazi indoor e outdoor per protezione dal calore e coesione sociale. Fonte: elaborazione degli autori

Evolution of Climate Shelters: from U.S. cooling centres (Seattle, New York) to European networks in Paris and Barcelona, integrating indoor and outdoor spaces for heat protection and social cohesion. Source: created by the authors

Il lavoro si colloca nel quadro delle politiche delineate dal Piano d'Azione per l'Energia Sostenibile e il Clima (PAESC) del Comune di Napoli, il cui è obiettivo l'integrazione dei principi di resilienza climatica all'interno del contesto urbano. Lo sviluppo metodologico è stato inoltre supportato dal progetto europeo HORIZON EU: KNOWING (2022–2026, https://knowing-climate.eu), che contribuisce alla definizione di strumenti innovativi per la governance climatica locale.

Il PAESC mira a integrare sviluppo resiliente e adattamento al cambiamento climatico, riducendo emissioni di CO_2, favorendo l'adattamento agli eventi estremi e migliorando la qualità della vita. Al fine di perseguire quest'obiettivo il PAESC definisce cinque assi strategici – comunità energetiche e riqualificazione diffusa, infrastrutture verdi e blu, rifugi climatici, mobilità sostenibile, comunicazione – configurando un approccio multiscalare alla transizione ecologica. In questo quadro, i *Climate Shelters* sono riconosciuti come infrastrutture ad alta efficacia, capaci di rafforzare la gestione delle ondate di calore e di potenziare i servizi di quartiere.

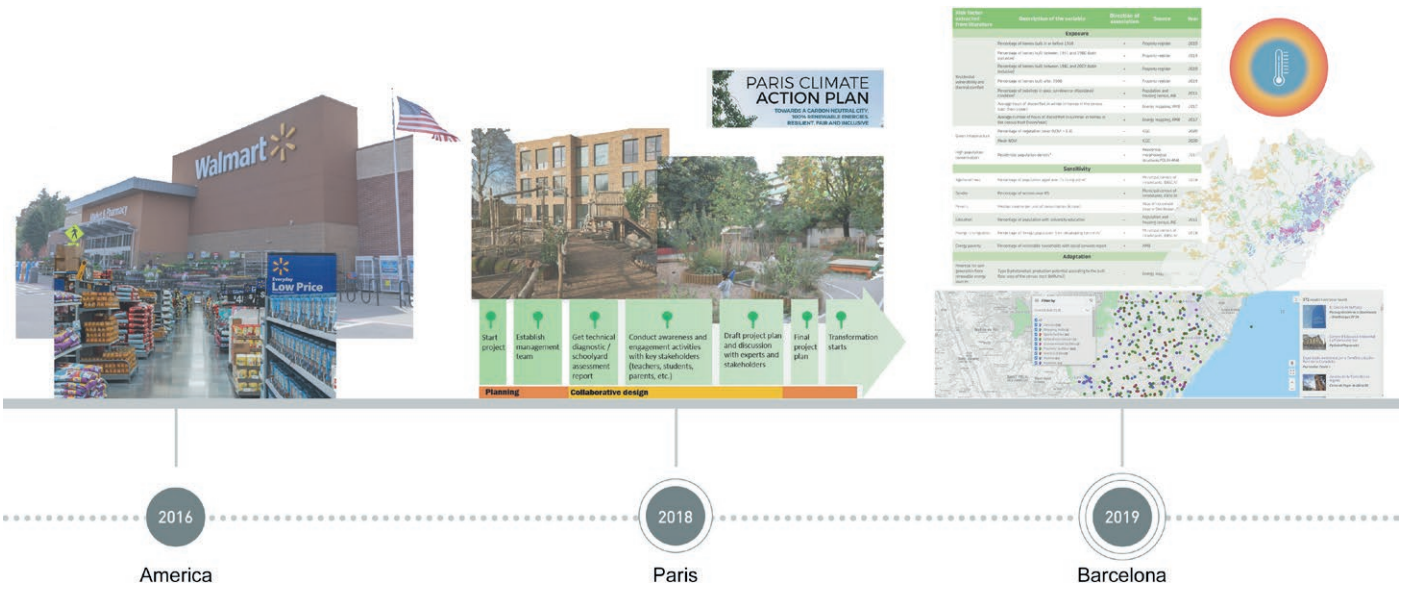
La metodologia proposta, adottata come strumento operativo del PAESC, consente di individuare una rete potenziale di Rifugi Climatici e di valutarne il contributo alla resilienza urbana non solo dal punto di vista termico, ma anche rispetto all'equità, all'accesso ai servizi e alla redistribuzione delle opportunità urbane. Questa visione sistemica permette di inserirli in un quadro più ampio di rigenerazione urbana, evidenziando il loro potenziale trasformativo oltre l'ambito emergenziale.

Evoluzione del concetto di Climate Shelter: dai rifugi emergenziali alle reti urbane

Il concetto di *Climate Shelter* è relativamente recente: i primi sviluppi significativi risalgono a metà degli anni 2010 negli Stati Uniti. In quel periodo, città come Seattle e New York iniziarono a riconvertire strutture esistenti, come supermercati e centri commerciali, in rifugi temporanei per proteggere la popolazione dalle temperature estreme durante le ondate di calore, strutturando una prima mappatura dei *cooling centers* (Seattle Office of the Mayor, 2016; New York City Office of Emergency Management, 2018). Tali luoghi, già accessibili e frequentati da un ampio numero di persone, rappresentavano infatti un'opportunità per creare rifugi immediati senza la necessità di nuove infrastrutture.

Nel contesto europeo il modello si è ulteriormente strutturato, estendendo il concetto di rifugio climatico anche agli spazi aperti. A Parigi, ad esempio, il progetto "Cours Oasis" del 2018 ha dato vita a un sistema di *Climate Shelters* trasformando i cortili scolastici diffusi sul territorio urbano in isole fresche e accessibili alla comunità durante l'orario extrascolastico, con il duplice obiettivo di ridurre l'effetto isola di calore e generare spazi per l'inclusione sociale (Ville de Paris, 2018). A Barcellona si registra un'ulteriore evoluzione con la nascita di una rete più complessa a scala metropolitana (Fig. 1). Una varietà di spazi pubblici, tra cui musei, biblioteche, parchi e centri culturali, viene riconvertita in rifugi climatici per garantire un'adeguata distribuzione e accessibilità su tutto il territorio urbano (Ajuntament de Barcelona, 2021; Amorim-Maia *et al.*, 2023). La rete catalana si fonda su indicatori tecnici e funzionali che ne garantiscono l'efficacia

01 |



e una distribuzione equa, valutando fattori come la capacità di raffrescamento naturale, la presenza di verde e ombra, e criteri sociodemografici. Questo approccio supera la logica emergenziale per costruire una rete stabile di protezione e inclusione: i rifugi diventano così strumenti di riqualificazione urbana e adattamento climatico di lungo periodo (Amorim-Maia *et al*., 2023).
L'evoluzione dei *Climate Shelters* in Europa dimostra come la loro trasformazione da spazi emergenziali a infrastrutture urbane permanenti sia capace di generare in maniera efficace cobenefici sociali, economici e ambientali, integrandosi con strumenti di pianificazione e rigenerazione urbana. La loro integrazione con altri strumenti di pianificazione – dalla rigenerazione degli spazi pubblici ai piani per la mobilità, fino alle strategie per la giustizia climatica – consente di riconoscerli come parti attive di una rete infrastrutturale urbana capace di generare impatti multi-scalari positivi.
Il caso di Barcellona costituisce un esempio emblematico di come una rete adeguatamente progettata possa ridurre vulnerabilità multiple e rafforzare la giustizia climatica (Amorim-Maia *et al*., 2024). La crescita della rete – da 200 a quasi 400 rifugi tra 2022 e 2025 – introduce il principio di densificazione progressiva basato su esigenze emergenti e vulnerabilità territoriali, evidenziando la necessità di un'evoluzione strategica del concetto. Sul fronte tipologico si osserva una diversificazione degli interventi: dagli spazi indoor climatizzati e accessibili, alle soluzioni outdoor con raffrescamento passivo/ibrido (ad esempio fermate del trasporto pubblico con moduli radianti) che ampliano il ventaglio di opzioni adattive (Montero-Gutiérrez *et al*., 2023). Nel complesso, la traiettoria che va dalle misure emergenziali ai sistemi infrastrutturali stabili mostra come i *Climate Shelters* possano funzionare sia come risposta a eventi estremi sia come dispositivo di rigenerazione urbana orientato a comfort microclimatico, accessibilità ed equità (Plazas *et al*., 2023).
Questa evoluzione concettuale costituisce la base dell'approccio qui proposto, che interpreta i Climate Shelters come una rete infrastrutturale di prossimità, capace di integrare dimensioni ambientali, sociali ed economiche, connettendosi coerentemente con processi più ampi di pianificazione urbana e rigenerazione.

Approccio integrato per la selezione e la progettazione dei rifugi climatici

Il metodo sviluppato per la progettazione e l'implementazione dei *Climate Shelters* si fonda sull'integrazione di analisi territoriali, criteri tecnici e valutazioni funzionali, con l'obiettivo di trasformare spazi urbani esistenti in infrastrutture resilienti capaci di rispondere agli impatti delle ondate di calore e, al contempo, di migliorare la qualità urbana. La metodologia si articola in due fasi principali, sviluppate a partire da esperienze consolidate in ambito internazionale (Barcellona, Parigi, Seattle) e adattate al contesto locale attraverso strumenti GIS e *Algorithm Aided Design (AAD)*.
La prima fase ha lo scopo di individuare le aree urbane più idonee alla realizzazione di un *Climate Shelter* e consiste in un'analisi territoriale supportata da un sistema di indicatori. Questi comprendono criteri sociodemografici (densità abitativa e presenza di gruppi vulnerabili) e parametri ambientali (ombreggiamento, copertura vegetale, accessibilità pedonale e disponibilità di servizi pubblici).

space and generating lasting benefits for the community. By acting as "local urban infrastructure", they connect with other planning and regeneration tools, strengthening their systemic role.
In light of these premises, this paper develops a methodological and design framework capable of integrating technical indicators (e.g., energy performance of buildings), functional criteria (accessibility, equitable distribution of services), and socio-spatial dimensions, with the aim of identifying and transforming existing spaces into Climate Shelters.
This study is framed within the strategies outlined by the Sustainable Energy and Climate Action Plan (SECAP) of the Municipality of Naples, which aims to integrate climate resilience principles into the urban context. The methodological development presented here has also been supported by the European project HORIZON EU: KNOWING (2022–2026, https://knowing-climate.eu), which contributes to defining innovative tools for local climate governance.
One of the SECAPS's core objectives is to integrate principles of climate-resilient development into the urban context, ensuring that every transformation of both infrastructures and the built environment contributes to CO_2 emission reduction, adaptation to extreme events, and the improvement of living conditions. To achieve this, the SECAP defines five strategic elements – energy communities and widespread retrofitting, green and blue infrastructures, climate shelters, sustainable mobility, and communication – thus shaping a multi-scalar approach to ecological transition. Within this framework, Climate Shelters are recognised as highly effective infrastructures, capable of both reinforcing heatwave management and enhancing neighbourhood services.
The proposed methodology, adopted as an operational tool of the PAESC, allows to identify a potential network of Climate Shelters and the assessment of their contribution to urban resilience, not only from a climate perspective, but also in terms of equity, access to services, and the redistribution of urban opportunities. This systemic vision allows them to be included in a broader framework of urban regeneration, highlighting their transformative potential beyond the emergency context.

The evolution of climate shelters: from emergency to urban networks

The concept of Climate Shelter is relatively recent. Its first significant developments date back to the mid-2010s in the United States, when cities such as Seattle and New York began converting existing facilities, including supermarkets and shopping malls, into temporary shelters to protect the population during heatwaves. This early mapping of *cooling centres* was an immediate and pragmatic response, which made use of already accessible and frequented spaces to provide refuge without the need for new infrastructure (Seattle Office of the Mayor, 2016; New York City Office of Emergency Management, 2018).
In Europe, the model was further consolidated, expanding the notion of Climate Shelters to include outdoor spaces. Paris, for instance, launched the *Cours Oasis* programme in 2018, transforming schoolyards distributed across the urban fabric into cool, accessible spaces available to communi-

Tab. 01| Indicatori utilizzati per l'individuazione dei potenziali spazi indoor e outdoor da attrezzare come rifugi climatici. Fonte: elaborazione degli autori
Indicators used to identify potential indoor and outdoor spaces suitable for Climate Shelters. Source: created by the authors

Tab. 01 |

Category	Indicator	Variable	Typology	Unit of measurement	Reference value
Hazard	Heat wave	TMRT	Quantitative	°C	26°C
Exposure and Vulnerability	Population distribution	Statistics on demographic groups	Quantitative	inh/mq	0,02-0,05 inh/mq
	Energy resources	Energy Consumption	Quantitative	kWh/mq	30-70 kWh/mq
		Energy Poverty	Quantitative	%	>10%
Availability of suitable spaces	Accessibility	Presence of a cycle/pedestrian network	Qualitative	Yes/No	Yes
		Percentage of inaccessible areas	Quantitative	%	<10%
		Free access	Qualitative	Yes/No	Yes
		Walking distance	Quantitative	m	500-1000 m
	Building typology	Percentage of abandoned buildings	Quantitative	%	5-10%
	Land Cover	Ratio between permeable and impermeable areas	Quantitative	%	25%
	Urban facilities and services	Percentage of public facilities in the area	Quantitative	%	<10%
	Ecosystem Services	Percentage of ecosystem services of the area	Quantitative	%	<15%
	Areas subject to plan regulations	Presence of ongoing projects in the metropolitan area	Qualitative	Yes/No	Yes
	Shortage	Ratio between Facilities and Services and Walking Distance	Quantitative	%	<60-70%

Gli indicatori sono organizzati secondo un sistema di variabili, raggruppate a loro volta in tre categorie fondamentali (Tab. 1):
- Pericolosità: zone maggiormente esposte all'effetto "isola di calore" urbana;
- Esposizione e Vulnerabilità: presenza di gruppi vulnerabili e condizioni socioeconomiche critiche;
- Disponibilità di spazi idonei: aree all'aperto o al chiuso potenzialmente trasformabili in rifugi climatici sulla base delle condizioni attuali, dell'accessibilità e dell'adattabilità a strategie di raffrescamento.

L'applicazione di criteri di selezione specifici ha il duplice obiettivo di individuare i luoghi più adatti a diventare *Climate Shelters* e garantire una distribuzione capillare di questi ultimi. A questo proposito, uno dei criteri fondamentali considerati, mutuato dal modello di Barcellona, è la distanza pedonale massima di dieci minuti tra un rifugio e l'altro, allo scopo di assicurare una equa distribuzione e garantire l'accessibilità a tutta la popolazione, comprese le persone con mobilità ridotta o risorse limitate.

A seguito dell'individuazione delle aree urbane, nella seconda fase della metodologia vengono definite le specifiche prestazionali e progettuali dei siti individuati. A tal fine è stato sviluppato un insieme di elementi progettuali chiave, definiti "invarianti progettuali", elaborati a partire da un'analisi di diversi aspetti prestazionali quali: condizioni di comfort indoor e outdoor, prestazioni energetiche, accessibilità, dotazione di servizi e flessibilità d'uso del luogo individuato.

Le invarianti includono sia soluzioni tecnologiche come sistemi di ventilazione e materiali con elevate prestazioni termiche, sia aspetti spaziali e funzionali che incidono sulla flessibilità d'uso (Fig. 2). Ogni invariante si compone di una serie di elementi tecnici suddivisi in base alla tipologia dello spazio da progettare (indoor o outdoor). Per quanto riguarda gli ambienti interni, l'attenzione si focalizza principalmente sull'ef-

ties outside school hours. These interventions pursued the dual objective of mitigating the urban heat island effect, while generating inclusive social spaces (Ville de Paris, 2018).

Barcelona presents a further evolution by introducing a complex, metropolitan-scale network (Fig. 1). A wide variety of public spaces, including museums, libraries, parks, and cultural centres were converted into Climate Shelters to ensure adequate distribution and accessibility across the entire city (Ajuntament de Barcelona, 2021; Amorim-Maia *et al*., 2023). The network is supported by a structured system of technical and functional indicators, designed to ensure both effectiveness and equity. These indicators consider factors such as natural cooling capacity, presence of vegetation and shade, passive cooling technologies, and socio-demographic criteria such as population density and vulnerability. This approach moves beyond an emergency rationale, establishing a stable urban infrastructure of protection and inclusion. Climate Shelters are thus conceived not only as responses to extreme events, but as instruments of urban regeneration and climate adaptation over the long term (Amorim-Maia *et al*., 2023).

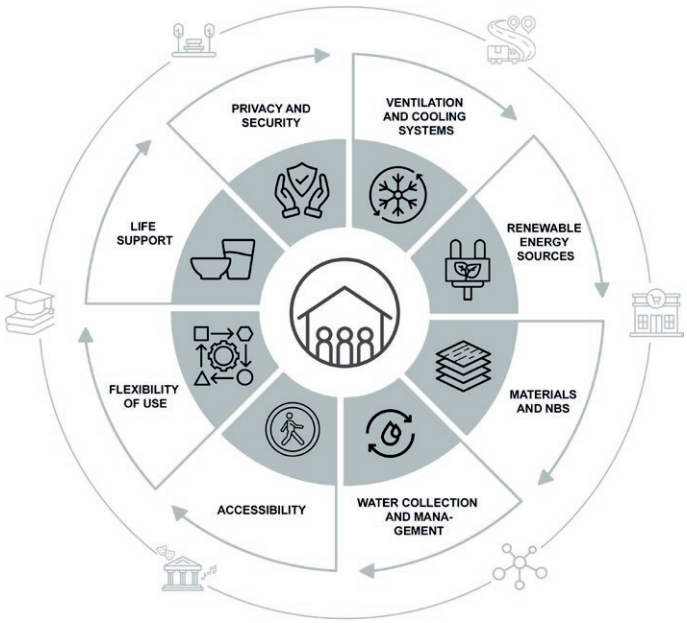
The evolution of Climate Shelters in Europe demonstrates how their transformation from emergency spaces to permanent urban infrastructure can effectively generate social, economic and environmental co-benefits, integrating with urban planning and regeneration tools. Their integration with other planning tools – from the regeneration of public spaces to mobility plans and climate justice strategies – allows them to be recognised as active parts of an urban infrastructure network capable of generating positive multi-scale impacts.

The case of Barcelona is an emblematic example of how a properly designed network can reduce multiple vulnerabilities and strengthen climate justice (Amorim-Maia *et al*., 2024). The growth of the network – from 200 to almost 400 shelters between 2022 and 2025 – introduces the principle of progressive densification based on emerging needs and territorial vulnerabilities, highlighting the need for a strategic evolution of the concept. In terms of typology, there is a diversification of interventions, spanning air-conditioned and accessible indoor spaces, as well as outdoor solutions with passive/hybrid cooling (e.g., public transport stops with radiant modules) that expand the range of adaptive options (Montero-Gutiérrez *et al*., 2023). Overall, the trajectory from emergency measures to stable infrastructure systems shows how Climate Shelters can function both as a response to extreme events, and as a device for urban regeneration focused on microclimatic comfort, accessibility and equity (Plazas *et al*., 2023).

This conceptual evolution provides the basis for the approach presented in this paper, which considers Climate Shelters a local infrastructure network capable of integrating environmental, social, and economic dimensions, connecting coherently with broader urban planning and regeneration processes.

Integrated approach for the selection and design of climate shelters

The formulated approach for the design and implementation of Climate Shelters is based on the integration of territorial analysis, technical criteria, and functional assessments, with the



02 | Schema degli "invarianti progettuali" dei *Climate Shelters*: caratteristiche tecniche, funzionali e spaziali – comfort, prestazioni energetiche, accessibilità e flessibilità d'uso – per spazi indoor e outdoor. Fonte: elaborazione degli autori
Diagram of Climate Shelter "design invariants": technical, functional, and spatial features–comfort, energy performance, accessibility, and flexible use–for both indoor and outdoor spaces. Source: created by the authors

ficienza dell'involucro edilizio, sulle prestazioni dei sistemi di climatizzazione e sui requisiti di accessibilità. Nel caso degli spazi esterni, invece, la valutazione considera prioritariamente la presenza e qualità della copertura vegetale, le proprietà termo-ottiche delle pavimentazioni, la disponibilità di punti d'acqua e la dotazione di elementi per l'ombreggiamento. Parallelamente, entrambe le tipologie spaziali vengono analizzate attraverso una serie di indicatori trasversali che valutano la flessibilità d'uso e l'adeguatezza delle dotazioni funzionali presenti. Questo approccio multidimensionale assicura che ogni *Climate Shelter* risponda agli standard prestazionali necessari per garantire condizioni di comfort termico ottimali, piena accessibilità per tutte le categorie di utenti e capacità di adattamento alle diverse esigenze d'uso che possono emergere nel tempo.

Il metodo così strutturato consente di tradurre linee guida generali in specifiche tecniche misurabili e concrete, fornendo uno strumento operativo per la progettazione e la valutazione dell'efficacia dei *Climate Shelters* in diversi contesti urbani.

La Tabella 2 riporta una sintesi delle caratteristiche tecniche individuate e organizzate per categoria, sintetizzando i parametri chiave per ambienti interni ed esterni (Tab. 2). Vengono individuati tre macro-ambiti prestazionali. Il primo riguarda l'efficienza tecnologico-ambientale, includendo aspetti passivi (verde, superfici riflettenti, ombreggiamento, permeabilità) e attivi (isolamento termico, climatizzazione, fonti rinnovabili). Il secondo concerne le caratteristiche funzionali, ovvero dotazioni essenziali come ad esempio la presenza di kit di primo soccorso. Il terzo riguarda le caratteristiche spaziali, che garantiscono accessibilità fisica e flessibilità d'uso. Questa strutturazione rende operativa la valutazione dei rifugi esistenti e orienta gli interventi di adeguamento necessari per includerli nella rete.

Caso applicativo: il PAESC di Napoli e la sperimentazione a Bagnoli

La metodologia descritta ha trovato applicazione diretta nel contesto della redazione del PAESC del comune di Napoli, che include i *Climate Shelters* tra gli assi strategici per il raggiungimento di specifici obiettivi in termini di mitigazione, adattamento e contrasto alla povertà energetica. In particolare, il PAESC prevede una riduzione del 18,23% dell'indice di povertà energetica entro il 2030 (Comune di Napoli, 2024), da conseguire attraverso azioni mirate e misure indirette, tra cui la realizzazione di rifugi climatici indoor e outdoor che, infatti, mitigando l'impatto delle ondate di calore, limitano i costi energetici connessi alla climatizzazione domestica supportan-

goal of transforming existing urban spaces into resilient infrastructures capable of addressing the impacts of heatwaves, while simultaneously enhancing urban quality.

The methodology is structured into two main phases, developed from consolidated international experiences (Barcelona, Paris, Seattle) and adapted to the local context through GIS tools and Algorithm Aided Design (AAD) approaches.

The first phase aims to identify the urban areas most suitable for the establishment of a Climate Shelter, and consists of territorial analysis supported by a system of indicators. These include sociodemographic criteria (such as population density and the presence of vulnerable groups), and environmental parameters (such as shading, vegetation cover, pedestrian accessibility, and the availability of public services).

The indicators are organised into a system of variables, grouped into three fundamental categories (Tab. 1):

- Hazard: zones most exposed to the urban heat island effect;
- Exposure and Vulnerability: presence of vulnerable groups and critical socioeconomic conditions;
- Availability of suitable spaces: indoor or outdoor areas potentially transformable into Climate Shelters, based on their current conditions, accessibility, and adaptability to cooling strategies.

The application of these selection criteria has the dual objective of identifying the most suitable locations for Climate Shelters, and of ensuring their widespread distribution. A key criterion adopted from the Barcelona model is the maximum walking distance of ten minutes between shelters in order to guarantee equitable distribution and accessibility for the entire population, including those with reduced mobility or limited resources.

Following the identification of urban areas, the second phase of the methodology focuses on defining the performance and design specifications of the selected sites. To this end, a set of key design elements, referred to as "design invariants", has been developed. These were processed by analysing performance aspects, such as indoor and outdoor comfort conditions, energy efficiency, accessibility, service provision, and spatial flexibility.

The invariants include technological solutions such as ventilation systems and high thermal performance materials, as well as spatial and functional aspects influencing flexibility of use (Fig. 2). Each invariant is composed of specific technical elements categorised according to whether the targeted space is indoor or outdoor. For indoor environments, the focus is primarily on the efficiency of the building envelope, the performance of climate-control systems, and accessibility requirements. For outdoor environments, the evaluation emphasises vegetation cover, the thermo-optical properties of pavements, the presence of water features, and shading devices.

In both cases, the spaces are assessed through a set of transversal indicators addressing flexibility of use and adequacy of functional provisions. This multidimensional approach ensures that each Climate Shelter meets the necessary performance standards for optimal thermal comfort, full accessibility, and adaptability to diverse uses over time.

This methodological structure allows general guidelines to be translated into measurable and concrete technical

Tab. 02 | Caratteristiche principali degli spazi indoor e outdoor attrezzati come rifugi climatici incluse nelle schede. Fonte: elaborazione degli autori
Characteristics of indoor and outdoor spaces equipped as Climate Shelters included in the assessment forms. Source: created by the authors

Tab. 02 |

Category	Indicator	Variable	Typology	Unit of measurement	Reference value
Technological, environmental and spatial efficiency	Technological-environmental features	Presence of green surfaces	Quantitative	%	<20%
		Presence of vegetation	Qualitative	Yes/No	Yes
		Presence of water retention and channeling systems	Qualitative	Yes/No	Yes
		Presence of permeable pavements	Quantitative	%	<5%
		Presence of reflective surfaces	Quantitative	%	>10%
		Presence of shading systems	Qualitative	Yes/No	Yes
		Thermal insulation of the envelope	Quantitative	W/mqK	<0,2 W/mqK
	Functional features	Modular and adaptable design	Qualitative	Yes/No	Yes
		Presence of basic necessities and first aid supplies	Qualitative	Yes/No	Yes
	Spatial features	Presence of adequate ramps and passages	Qualitative	Yes/No	Yes

do le famiglie e gli individui che non riescono a permettersi un adeguato livello di servizi energetici.
Per quanto riguarda l'adattamento, il PAESC adotta alcuni indicatori chiave come l'Universal Thermal Climate Index (UTCI) e la Temperatura Media Radiante (TMRT) per monitorare la riduzione dei livelli di stress termico percepito negli spazi urbani. I rifugi climatici concorrono direttamente al miglioramento di tali indicatori, contribuendo così a rafforzare la resilienza urbana.
Nel contesto del PAESC, un caso studio significativo è rappresentato dal quartiere di Bagnoli, dove la metodologia proposta è stata sperimentata per tradurre le linee teoriche in soluzioni operative.
L'analisi iniziale ha indagato in maniera integrata rischi climatici e vulnerabilità sociale, evidenziando la coincidenza tra aree più esposte al calore, alta densità abitativa e presenza di popolazioni fragili. Il patrimonio edilizio abbandonato è stato valutato per riconversione in Climate Shelters, migliorando accesso ai servizi e riattivando aree sottoutilizzate. L'analisi ha preso in considerazione anche le risorse ambientali del luogo, come le colline boscate e la fascia costiera. Queste, pur avendo un ruolo cruciale nella regolazione microclimatica, risultano oggi scarsamente accessibili, accentuando la disconnessione tra popolazione e risorse naturali e disparità nell'accesso ai servizi ecosistemici.
Infine, sono state analizzate le iniziative urbanistiche in corso. Trovandosi ancora oggi aduno stadio preliminare, queste risultano scarsamente efficaci ai bisogni della popolazione. Da ciò deriva una criticità strutturale: l'isolamento di Bagnoli dal resto della città, dovuto a spazi abbandonati e a una rete infrastrutturale frammentata, che ostacola l'accesso a opportunità e riduce l'efficacia inclusiva delle strategie di adattamento climatico.
La fase successiva si è concentrata sull'individuazione dei potenziali *Climate Shelters ed* è stata supportata dall'implementazione di modelli di simulazione sviluppati tramite strumenti GIS e (AAD). Questi hanno consentito una lettura incrociata e un'analisi multiscalare di dati spaziali, ambientali e sociali provenienti da diversi database geospaziali (es. *Copernicus, European Environment Agency* per i dati meteorologici e ambientali e Istat per quelli relativi a esposizione e vulnerabilità).

specifications, thus providing an operational tool for both the design and the evaluation of Climate Shelters in different urban contexts.
Table 2 summarises the technical characteristics identified and organised into categories, outlining the key parameters for indoor and outdoor environments (Tab. 2). Three performance macro-ambits are identified. The first concerns technological and environmental efficiency, including passive aspects (greenery, reflective surfaces, shading, permeability), and active aspects (thermal insulation, air conditioning, renewable sources). The second concerns functional characteristics, i.e., essential equipment such as first aid kits. The third concerns spatial characteristics, which guarantee physical accessibility and flexible use. This structure makes it possible to evaluate existing shelters, and guides the necessary adaptation measures to include them in the network.

Application case: the SECAP of Naples and the Bagnoli experiment
The methodology described above found direct application in the drafting of the Sustainable Energy and Climate Action Plan (SECAP) of the Municipality of Naples, which identifies Climate Shelters as one of the strategic pillars to achieve specific objectives in terms of mitigation, adaptation, and energy poverty reduction. In particular, the SECAP sets the goal of reducing the energy poverty index by 18.23% by 2030 (Municipality of Naples, 2024), through both direct measures and indirect actions such as the creation of indoor and outdoor Climate Shelters. By mitigating the impact of heatwaves, these shelters reduce reliance on domestic cooling, thereby lowering energy costs and supporting households and individuals who cannot afford adequate energy services.
Regarding adaptation, the SECAP employs key indicators such as the Universal Thermal Climate Index (UTCI) and the Mean Radiant Temperature (MRT) to monitor the reduction of perceived thermal stress in urban spaces. Climate Shelters contribute directly to the improvement of these indicators, thus strengthening urban resilience.
A significant case study within the SECAP framework is the Bagnoli district, where the proposed methodology was tested to translate strategic guidelines into operational solutions.
The initial analysis investigated climate risks and social vulnerability in an integrated perspective, highlighting the coincidence between areas most exposed to heat, high population density, and the presence of vulnerable populations. Abandoned buildings were assessed for conversion into Climate Shelters, improving access to services and reactivating underutilised areas.
The analysis also examined local environmental resources, such as wooded hills and the coastal strip. While these elements play a crucial role in regulating the urban microclimate, they are currently poorly accessible, exacerbating the disconnection between residents and natural assets. Added to this is an uneven distribution of urban services and limited usability of ecosystem services, reinforcing disparities between central and peripheral areas.
Urban planning initiatives underway were also considered. At present, these remain in a preliminary stage and risk not fully addressing the needs of residents. This reflects a structural is-

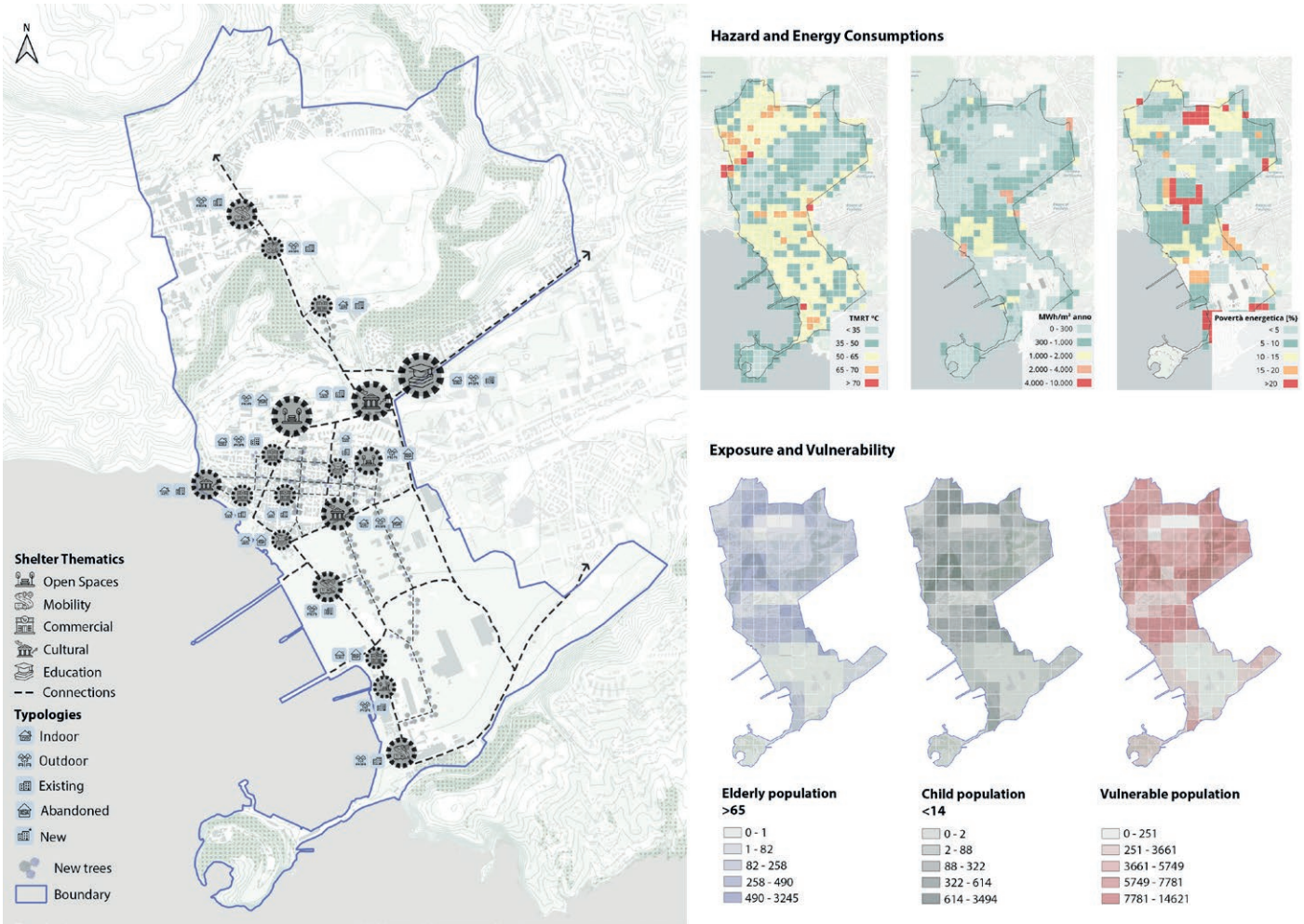
03 | Rete dei possibili *Climate Shelters* a Bagnoli elaborata con modelli GIS: analisi di hazard, esposizione e vulnerabilità. La mappatura finale della rete include sia spazi esistenti sia spazi potenziali. Fonte: elaborazione degli autori

Network of potential Climate Shelters in Bagnoli developed with GIS models: analysis of hazard, exposure, and vulnerability. The final mapping of the network includes both existing and potential spaces. Source: created by the authors

I modelli di calcolo, sviluppati nell'ambito del progetto KNOWING, hanno permesso la valutazione di diversi aspetti chiave legati agli obiettivi del PAESC, come il fabbisogno energetico, i livelli di emissione di gas serra e i livelli di stress termico percepito valutati attraverso gli indicatori UTCI e TMRT. Sulla base dei risultati ottenuti è stata delineata una rete di spazi – esistenti e potenziali – caratterizzati da elevata accessibilità e particolare rilevanza per le fasce vulnerabili della popolazione (Fig. 3). In seguito, sono state valutate le caratteristiche progettuali e prestazionali dei potenziali *Climate Shelters* nei luoghi individuati. L'obiettivo di questa fase è stato quello di definire con maggiore dettaglio le condizioni di comfort *indoor/outdoor* e le eventuali dotazioni funzionali da implementare negli spazi candidati.

A tal fine sono state predisposte, per ogni potenziale *shelter*, specifiche schede di rilievo corredate da checklist. Le schede sono state costruite adattando il quadro di indicatori illustrato in precedenza al contesto specifico del PAESC (Tabb. 3; 4), e hanno guidato la definizione di strategie mirate a migliorare sia le prestazioni ambientali, sia l'inclusività sociale, garantendo coerenza con gli obiettivi di resilienza urbana e adattamento climatico definiti nel piano.

Nel caso di Bagnoli, la sperimentazione ha riguardato la riconversione di un edificio abbandonato con area esterna, prevedendo soluzioni integrate indoor e outdoor. Per l'edificio sono stati ipotizzati interventi di retrofit energetico, facciate verdi, installazione di fotovoltaico e miglioramento dell'involucro termico; per lo spazio esterno sono state proposte coperture ombreggianti, vegetazione, specchi d'acqua e superfici permeabili per incrementare il comfort microclimatico. In quanto infrastrutture permanenti, i *Climate Shelters* sono stati pensati anche come luoghi multifunzionali, capaci di ospitare attività



Tab. 03 | Indicatori adottati nel PAESC per l'individuazione degli spazi idonei alla realizzazione di *climate shelter*. Fonte: Comune di Napoli, 2024
Framework of indicators for identifying suitable spaces for the implementation of Climate Shelters adopted in the SECAP. Source: Municipality of Naples, 2024

Tab. 03 |

Macro-categoria	Categoria	Indicatore
Pericolosità	Stress termico in condizioni di ondate di calore	Temperatura media radiante
Esposizione e vulnerabilità	Presenza di gruppi vulnerabili	Popolazione > 65 anni
		Popolazione < 14 anni
		Persone con mobilità ridotta
		Livello di povertà energetica
Presenza di spazi idonei per la realizzazione di rifugi climatici	Presenza di spazi outdoor potenzialmente idonei	Aree abbandonate/inutilizzate
		Aree interessate da progetti in corso
		Parchi pubblici
		Aree verdi attrezzate
		Aree accessibili lungo la linea di costa
		Aree attrezzate con fontane
		Piazze e slarghi ombreggiati
		Fermate trasporto pubblico
	Presenza di spazi indoor utilizzabili potenzialmente idonei	Edifici abbandonati/inutilizzati
		Edifici interessati da progetti in corso
		Scuole e università
		Biblioteche e centri culturali
		Centri sociali
		Mercati e spazi commerciali
		Fermate trasporto pubblico

culturali e comunitarie (auditorium, installazioni artistiche), rafforzando così la loro dimensione sociale. La fase finale ha previsto anche una verifica delle soluzioni progettuali, nella quale l'efficacia delle misure proposte è stata valutata attraverso nuove simulazioni dei valori di UTCI e TMRT, insieme a stime aggiornate dei consumi energetici degli edifici. Questo processo ciclico – analisi, progetto, verifica – ha evidenziato un miglioramento significativo sia del comfort percepito, sia della riduzione della domanda energetica (Fig. 4). I risultati hanno confermato l'applicabilità degli indicatori individuati e la capacità del metodo di tradurre obiettivi strategici in soluzioni concrete, con benefici integrati sul piano climatico, sociale ed energetico.

Conclusioni

Il lavoro presentato propone un approccio integrato alla progettazione dei *Climate Shelters* come risposta strategica all'aumento delle ondate di calore urbane.
L'originalità del lavoro risiede nella combinazione coordinata di indicatori climatici, sociali, energetici e funzionali, che consente di considerare i *Climate Shelters* non solo come dispositivi di

sue, namely the isolation of Bagnoli from the rest of the city, caused by abandoned spaces and a fragmented infrastructure network that hinders access to opportunities, and weakens the inclusiveness of climate adaptation strategies.
Based on this multi-level analysis, the second phase focused on identifying potential Climate Shelters. This process was supported by simulation models developed through GIS and Algorithm Aided Design (AAD) tools, enabling a cross-scale analysis of spatial, environmental, and social data drawn from multiple geospatial databases (including Copernicus, the European Environment Agency, and the PLINIVS Research Centre for meteorological and environmental data, as well as Istat and dati.gov.it for exposure and vulnerability data).
The computational models developed within the KNOWING project allowed the evaluation of key aspects linked to SECAP objectives, such as energy demand, greenhouse gas emissions, and thermal stress levels measured in terms of UTCI and MRT. Based on these results, a network of spaces – existing and potential – was delineated, characterised by high accessibility and strategic relevance for vulnerable population groups (Fig. 3). Subsequently, the methodology's second phase concentrated on evaluating the design and performance characteristics of the identified Climate Shelter sites. The objective was to define in greater detail the indoor/outdoor comfort conditions and functional provisions of candidate spaces, thereby assessing their suitability and the interventions required to incorporate them into the neighbourhood shelter network.
For each case, specific survey sheets were prepared with checklists adapted to the SECAP indicator framework (Tabs. 3; 4). These supported the definition of targeted strategies to enhance both environmental performance and social inclusiveness, ensuring alignment with the resilience and adaptation goals set by the SECAP.
In the case of Bagnoli, the experimentation focused on the reconversion of an abandoned building with an adjacent open area, proposing integrated indoor and outdoor solutions. For the building, potential interventions included energy retrofit measures, green façades, photovoltaic systems, and improvements to the thermal performance of the envelope. For the outdoor space, shading structures, vegetation, water features, and permeable surfaces were proposed to enhance microclimatic comfort. Conceived as permanent infrastructures, Climate Shelters were also designed as multifunctional places capable of hosting cultural and community activities (auditoriums, artistic installations), thereby reinforcing their social dimension.
Finally, the proposed design solutions were tested by recalculating performance indicators. The effectiveness of the measures was validated through new simulations of UTCI and MRT values, along with updated estimates of building energy demand. This iterative process – analysis, design, verification – highlighted significant improvements in both perceived comfort and energy consumption reduction (Fig. 4). The results confirmed the applicability of the proposed indicators, and the ability of the method to translate strategic objectives into concrete so-

Tab. 04 | Caratteristiche tecniche definite nel PAESC per gli spazi indoor e outdoor attrezzati come rifugi climatici. Fonte: Comune di Napoli, 2024
Technical characteristics defined in the SECAP for indoor and outdoor spaces equipped as Climate Shelters. Source: Municipality of Naples, 2024

protezione climatica, ma come nuove infrastrutture urbane in grado di generare co-benefici ambientali, sociali ed economici, ampliando servizi di prossimità e favorendo l'inclusione. L'integrazione della metodologia nel PAESC mostra inoltre il suo valore come strumento operativo a supporto della pianificazione urbana. La sperimentazione nel quartiere di Bagnoli evidenzia il potenziale del metodo nel rispondere a sfide complesse attraverso interventi localizzati ed *evidence based*. I risultati confermano l'adattabilità degli indicatori e delle invarianti progettuali proposte, mostrando come i rifugi climatici possono andare oltre la funzione di infrastrutture emergenziali, per configurarsi come dotazioni urbane permanenti capaci di rafforzare i servizi di quartiere, promuovere inclusione sociale e contribuire all'adattamento climatico di lungo periodo. L'impiego di strumenti di verifica delle prestazioni ambientali ed energetiche si è rivelato fondamentale per validare l'efficacia degli interventi proposti e orientare le future decisioni di pianificazione.
Persistono tuttavia alcuni limiti: disponibilità e qualità dei dati, necessità di rafforzare i processi partecipativi e l'allineamento con strumenti urbanistici vigenti. Questi aspetti rappresentano ambiti prioritari di miglioramento.
In definitiva, l'esperienza di Bagnoli offre un modello replicabile per integrare adattamento climatico e rigenerazione urbana, incoraggiando le città a ripensare il ruolo dello spazio pubblico in un contesto di cambiamento climatico. La metodologia proposta può costituire una base per futuri sviluppi di ricerca e di policy urbana, a supporto della creazione di reti diffuse, multifunzionali e socialmente eque di *Climate Shelters* in diversi contesti urbani.

Riconoscimenti

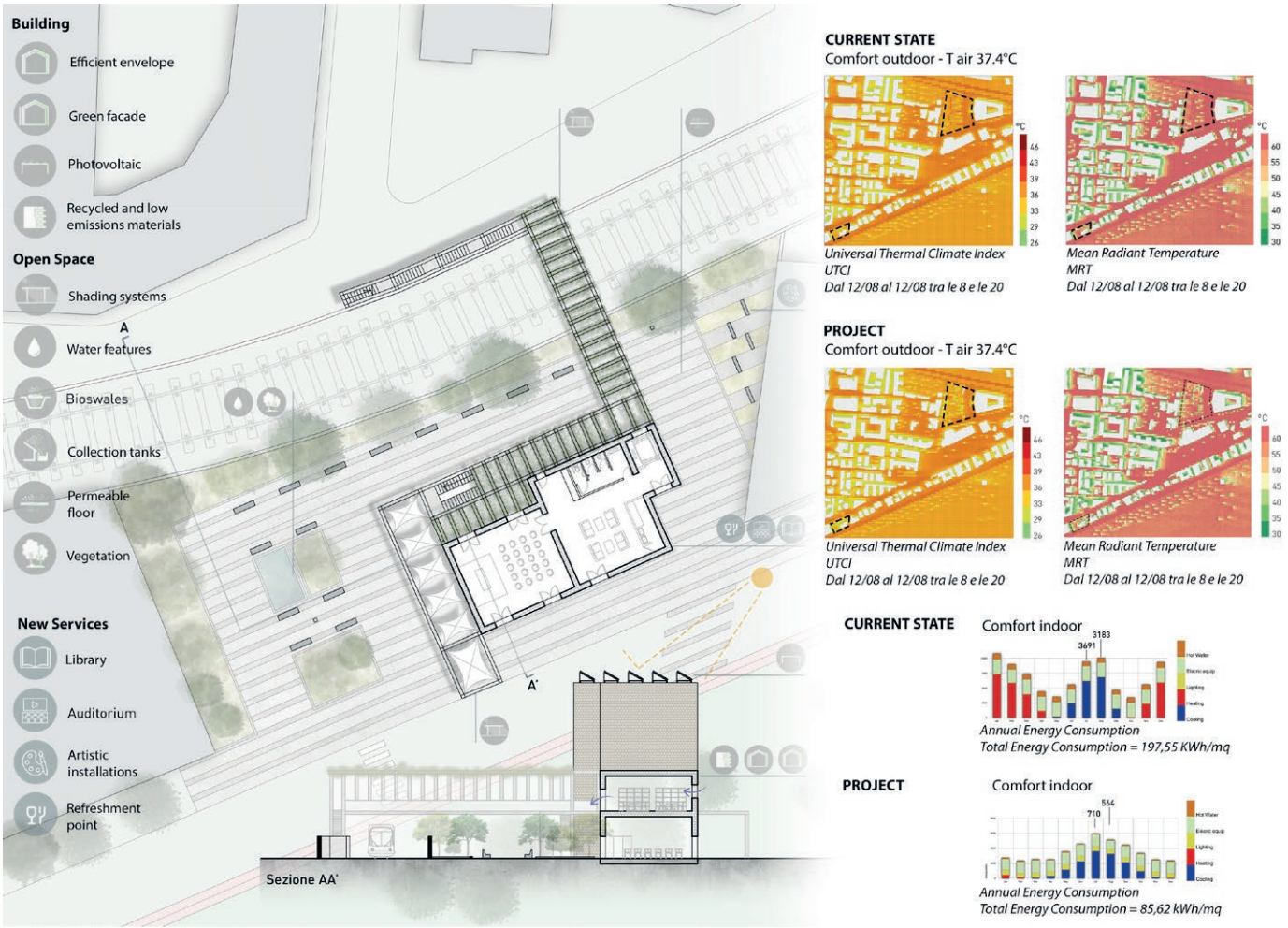
Gli autori desiderano ringraziare il Comune di Napoli per il supporto nell'elaborazione del Piano d'Azione per l'Energia Sostenibile e il Clima (PAESC) e il progetto europeo HORIZON EU: KNOWING (2022–2026) per il contributo scientifico e metodologico. Un sentito ringraziamento va inoltre ai colleghi del Centro Studi PLINIVS e del Dipartimento di Architettura dell'Università di Napoli Federico II.

| Tab. 04

Tipologia di spazio	Categoria	Caratteristiche tecniche
Indoor	Efficienza dell'involucro edilizio	Sistemi di isolamento e inerzia termica dell'involucro
		Sistemi di ombreggiamento
	Efficienza impiantistica	Sistemi di climatizzazione e ventilazione
		Sistemi per la produzione di energia da fonti rinnovabili
	Accessibilità	Accesso libero
		Assenza di barriere architettoniche
Outdoor	Vegetazione	Alberi
		Vegetazione orizzontale
		Arbusti
	Pavimentazioni	Pavimentazione riflettente
		Pavimentazione permeabile
	Acqua	Fontane e lame d'acqua
		Accesso al mare
		Vaporizzatori
	Ombreggiatura	Elementi di ombreggiatura
		Zone ombreggiate nei periodi/orari più caldi
Indoor/outdoor	Flessibilità d'uso	Arredi modulari o adattabili
		Spazi modulari o adattabili
		Spazi per la convivialità
		Spazi per il riposo
	Dotazioni funzionali	Beni di primo soccorso
		Disponibilità di acqua potabile
		Sistemi di emergenza
		Dotazioni per attività bambini
		Dotazioni per attività anziani

04 | Masterplan con soluzioni progettuali per Bagnoli e simulazioni di stato di fatto e progetto tramite strumenti AAD. Le analisi mostrano miglioramento del comfort termico e riduzione della domanda energetica. Fonte: elaborazione degli autori

Masterplan with design solutions for Bagnoli and scenario simulations (current/project) through AAD tools. Analyses highlight improved thermal comfort and reduced energy demand. Source: created by the authors



lutions, generating integrated climate, social, and energy benefits.

Conclusions

The work presented proposes an integrated approach to the design of Climate Shelters as a strategic response to the increase in urban heat waves.

The originality of the work lies in the coordinated combination of climatic, social, energy and functional indicators. This allows Climate Shelters to be considered not only as climate protection devices, but also as new urban infrastructures capable of generating environmental, social and economic co-benefits, expanding local services and promoting inclusion. The integration of the methodology into the PAESC also demonstrates its value as an operational tool to support urban planning. The experiment in the Bagnoli neighbourhood highlights the method's potential to respond to complex challenges through localised, evidence-based interventions. The results confirm the adaptability of the proposed indicators and design invariants, showing how climate shelters can go beyond their function as emergency infrastructure to become permanent urban facilities capable of strengthening neighbourhood services, promoting social inclusion, and contributing to long-term climate adaptation. The use of environmental and energy performance verification tools has proved essential for validating the effectiveness of the proposed interventions, and for guiding future planning decisions. Nevertheless, there are still some limitations to consider, such as data availability and quality, the necessity to strengthen participatory processes, and the alignment with existing urban planning tools. These aspects are considered to be of paramount importance with regard to potential areas for improvement.

Ultimately, the Bagnoli case study provides a replicable model for integrating climate adaptation and urban regeneration, encouraging cities to rethink the role of public space under climate change. The methodology can serve as a foundation for future research and urban policy, supporting the creation of widespread, multifunctional, and socially equitable networks of Climate Shelters in diverse urban contexts.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to thank the Municipality of Naples for supporting the development of the SECAP and the Horizon EU project KNOWING (2022–2026) for its scientific and methodological contribution. Special thanks go to colleagues at the PLINIVS Study Centre and the Department of Architecture, University of Naples Federico II.

REFERENCES

Amorim-Maia, A. T., Anguelovski, I., Connolly, J., & Chu, E. (2023). "Seeking refuge? The potential of urban climate shelters to address intersecting vulnerabilities". *Landscape and Urban Planning*, *238*, 104836. Available at: https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104836

Amorim-Maia, A. T., Anguelovski, I., Chu, E., & Connolly, J. (2024). "Governing intersectional climate justice: Tactics and lessons from Barcelona". *Environmental Policy and Governance, 34(3), 256–274*. Available at: https://doi.org/10.1002/eet.2075

Comune di Napoli. (2024). *Piano d'Azione per l'Energia Sostenibile e il Clima (PAESC).* Napoli, Italia. Available at: https://www.comune.napoli.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/35107 (Accessed on: 26/11/2025)

D'Ippoliti, D., Michelozzi, P., Marino, C., de'Donato, F., Menne, B., Katsouyanni, K., ... & Perucci, C. A. (2010). "The impact of heat waves on mortality in 9 European cities: results from the EuroHEAT project", *Environmental Health*, *9*(1), 37. Available at: https://doi.org/10.1186/1476-069X-9-37

Grafakos, S., Viero, G., Reckien, D., Trigg, K., Viguie, V., Sudmant, A., ... & Dawson, R. (2020). "Integration of mitigation and adaptation in urban climate change action plans in Europe: A systematic assessment", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *121*, 109623. Available at: https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109623

Lenzi, S., Sádaba, J. & Retegi, A. (2025) "Climate adaptation in urban space: the need for a transdisciplinary approach", *Frontiers in Sustainable Cities, 7*. Available at: https://doi.org/10.3389/frsc.2025.1562066

Lin, B. B., Ossola, A., Alberti, M., Andersson, E., Bai, X., Dobbs, C., ... & Tan, P. Y. (2021). "Integrating solutions to adapt cities for climate change", *The Lancet Planetary Health*, *5*(7), e479-e486. Available at: https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00135-2

Montero-Gutiérrez, P., Ramos, J. S., Delgado, M. G., Cerezo-Narváez, A., Amores, T. P., & Dominguez, S. A. (2023). "Natural cooling solution for thermally conditioning bus stops as urban climate shelters in hot areas: Experimental proof of concept", *Energy Conversion and Management*, *296*, 117627. Available at: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117627

Plazas, F. L., Sánchez, E. C., Pérez, R. L., & Albanilla, E. S. (2023). "Schools as climate shelters: Design, implementation and monitoring methodology based on the Barcelona experience", *Journal of Cleaner Production*, *432*, 139588. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139588

Vicedo-Cabrera, A. M., Scovronick, N., Sera, F., Royé, D., Schneider, R., Tobias, A., ... & Gasparrini, A. (2021). "The burden of heat-related mortality attributable to recent human-induced climate change", *Nature climate change*, *11*(6), 492-500. Available at: https://doi.org/10.1038/s41558-021-01058-x

Strumenti di supporto al progetto di sistemi agrivoltaici *risk* e *climate oriented*

Federica Marandino, https://orcid.org/0009-0001-4191-0479
Department of Architecture, University of Naples Federico II, Italy
federica.marandino@unina.it

Abstract. La ricerca indaga i sistemi agrivoltaici come tecnologie innovative per la mitigazione dei rischi ambientali e climatici, con l'obiettivo di elaborare strumenti di supporto alla progettazione *risk* e *climate oriented*. L'analisi integra scoping review, confronto con stakeholder e dati di monitoraggio, consentendo di individuare rischi prioritari, soluzioni agro-tecnologiche ricorrenti e configurazioni spaziali e funzionali adattive. Le schede comparative elaborate sintetizzano obiettivi, funzioni e capacità di riduzione della vulnerabilità, offrendo strumenti operativi per progettisti e decisori. Il contributo presenta esiti sviluppati in continuità con i risultati del PTR 2022–2024 MASE–ENEA, Linea 2.7 Linee guida per la sostenibilità ambientale del progetto di sistemi agrivoltaici.

Parole chiave: Sistemi agrivoltaici; Resilienza climatica; Tecnologie innovative; Progettazione ambientale; Rischi climatici.

Rischi climatici negli agroecosistemi e ruolo dei sistemi agrivoltaici

Secondo il quadro IPCC, il rischio climatico deriva dall'interazione tra pericolosità o *hazard*, esposizione e vulnerabilità. Le regioni mediterranee, considerate hotspot climatici, registrano un riscaldamento medio pari a 1,5 volte quello globale e una riduzione delle precipitazioni fino al 20% entro metà secolo (MedECC, 2020). In questo quadro, ridurre la vulnerabilità degli agroecosistemi assume rilievo strategico, poiché essi regolano i cicli idrici, sostengono processi ecologici vitali e garantiscono servizi ecosistemici (FAO, 2021). Lo stress termico, legato all'aumento delle temperature e alla maggiore frequenza delle ondate di calore, determina riduzione di rese e qualità dei prodotti e altera i cicli colturali. La scarsità idrica, amplificata da siccità e incremento dell'evapotraspirazione, accresce fenomeni di desertificazione e salinizzazione con effetti sulla fertilità e sulla stabilità produttiva (FAO, 2021). La degradazione del suolo, esito combinato di fattori climatici e pratiche agricole intensive, produce erosione, perdita di sostanza organica e riduzione della biodiversità, compromettendo i servizi ecosistemici. Questi processi si sommano generando rischi complessi, che incidono sulla sicurezza alimentare (Pandey *et. al*., 2025), sui redditi agricoli, sulla salute dei lavoratori e sulla resilienza dei territori rurali (Fig. 1) (UNDRR, 2022). In questo scenario, letteratura e linee guida nazionali (MASE, 2022) riconoscono nei sistemi agrivoltaici un'opportunità. L'integrazione tra moduli fotovoltaici e colture consente di attenuare la radiazione solare, ridurre l'evapotraspirazione e migliorare l'efficienza d'uso dell'acqua, con incrementi riportati fino al 30% e una maggiore stabilità delle rese in condizioni siccitose. Rispetto al fotovoltaico convenzionale, tali sistemi riducono il consumo di suolo fino al 70%, mantenendo attive le superfici agricole (Jreich and Mahjoubi, 2023). Accanto ai benefici diretti, emergono vantaggi di sistema: rafforzamento della biodiversità e dei servizi ecosistemici, sostegno a pratiche agroecologiche e rigenerative, valorizzazione dei territori come infrastrutture multifunzionali in grado di integrare dimensioni produttive, ecologiche e sociali (Toledo and Scognamiglio, 2021). Non meno rilevante è la produzione di energia rinnovabile, che consolida l'autosufficienza energetica delle comunità e diversifica le fonti di reddito agricolo. La progettazione tecnologica e ambientale consente di interpretare queste innovazioni non solo in termini tecnici, ma come nuove configurazioni spaziali ed ecologiche, ridefinendo il rapporto tra insediamenti, paesaggi e processi produttivi (Ladiana, 2015; Gangemi, 1972). Alla luce di questa visione, l'agrivoltaico si configura dunque non solo come dispositivo tecnico, ma come opportunità per la

Design support tools for climate and risk-oriented agrivoltaic systems

Abstract. The research investigates agrivoltaic systems as innovative technologies for mitigating environmental and climate risks with the aim of developing risk and climate-oriented design support tools. The analysis integrates a scoping review, stakeholder consultation, and monitoring data, allowing for the identification of priority risks, recurrent agri-technological solutions, and adaptive spatial and functional configurations. The comparative cards developed summarise objectives, functions, and vulnerability reduction capacities, offering operational tools for designers and decision-makers. The contribution presents outcomes developed in continuity with the results of the PTR 2022–2024 MASE–ENEA, Line 2.7 Guidelines for the environmental sustainability of agrivoltaic system projects.

Keywords: Agrivoltaic systems; Climate resilience; Innovative technologies; Environmental design; Climate risks.

Climate risks in agroecosystems and the role of agrivoltaic systems

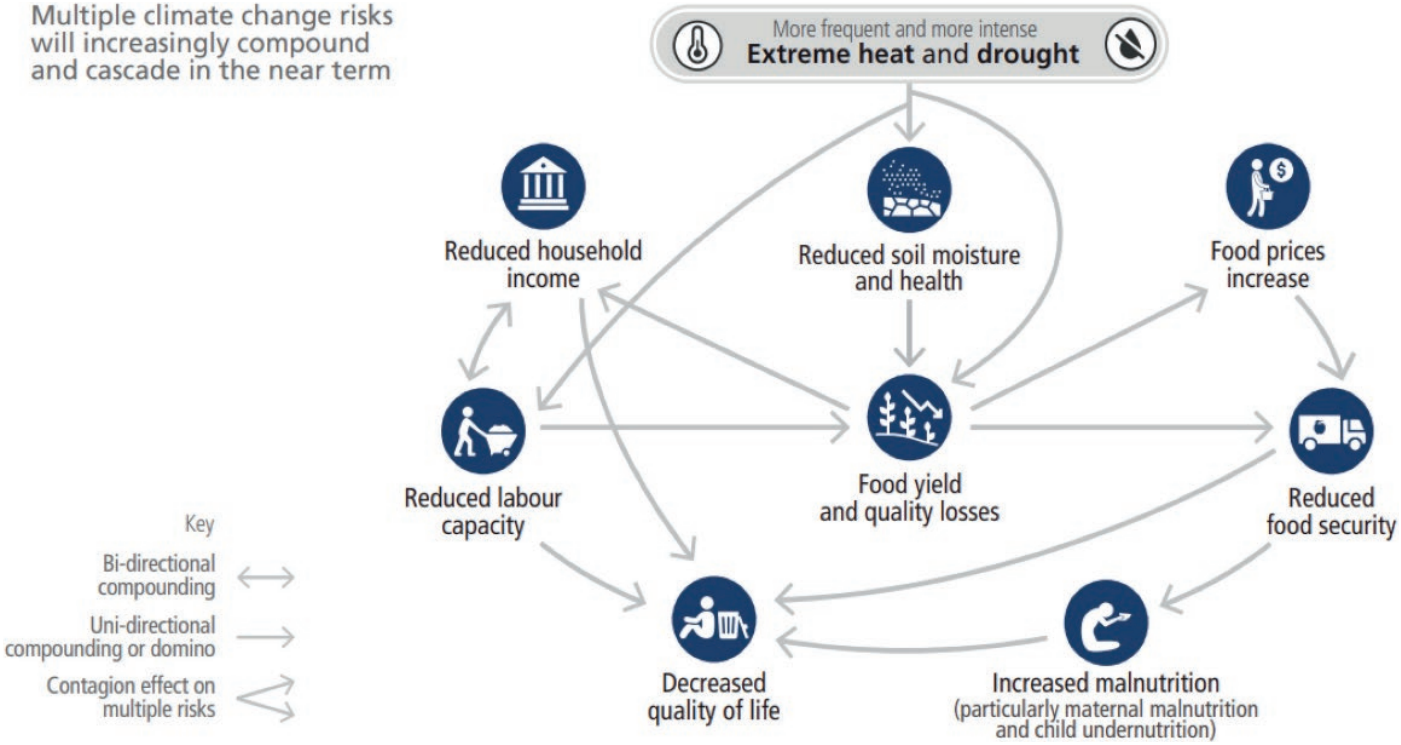
According to the IPCC framework, climate risk derives from the interaction between hazard, exposure, and vulnerability. The Mediterranean regions, considered climate hotspots, record an average warming 1.5 times higher than the global rate, and a reduction in precipitation of up to 20% by mid-century (MedECC, 2020). In this context, reducing the vulnerability of agroecosystems assumes strategic importance as they regulate water cycles, sustain vital ecological processes, and ensure ecosystem services (FAO, 2021). Heat stress, linked to rising temperatures and the increased frequency of heatwaves, causes reductions in yields and product quality, and alters crop cycles. Water scarcity, amplified by drought and increased evapotranspiration, intensifies desertification and salinisation phenomena with effects on soil fertility and production stability (FAO, 2021). Soil degradation, resulting from the combined effect of climatic factors and intensive agricultural practices, produces erosion, loss of organic matter, and reduced biodiversity, compromising ecosystem services.

These processes converge to generate complex risks that affect food security (Pandey *et. al*., 2025), agricultural income, workers' health, and the resilience of rural territories (Fig. 1) (UNDRR, 2022). In this scenario, both literature and national guidelines (MASE, 2022) recognise agrivoltaic systems as an opportunity. The integration of photovoltaic modules and crops helps attenuate solar radiation, reduce evapotranspiration, and improve water use efficiency, with reported increases of up to 30% and greater yield stability under drought

ISSN online: 2239-0243 | © 2025 Author(s) | http://www.fupress.com/techne | DOI: 10.36253/techne-18628
Open access, peer-reviewed article published by Firenze University Press (https://www.fupress.com) and distributed, except where otherwise noted, under the terms of the CC BY 4.0 License for content and CC0 1.0 Universal for metadata

01 | Esempio di rischio a cascata: eventi climatici estremi generano effetti concatenati su agricoltura e comunità rurali, riducendo salute del suolo, rese e qualità alimentare, con impatti su prezzi, sicurezza alimentare e vulnerabilità socio-ambientale (IPCC, 2023)

Example of cascading risk: extreme climate events generate chain effects on agriculture and rural communities, reducing soil health, yields, and food quality, with impacts on prices, food security, and socio-environmental vulnerability (IPCC, 2023)



gestione integrata dei rischi, capace di connettere mitigazione, innovazione progettuale e salvaguardia ecologica.

Approccio e metodologia della ricerca

La ricerca si pone in continuità con i risultati sviluppati nell'ambito dell'Accordo MASE-ENEA "Progettazione sostenibile e tecnologie innovative per sistemi agrivoltaici" PTR 22/24, linea 2.7, da cui derivano le Linee guida per la sostenibilità ambientale e lo strumento EASY-APV *tool* , concepito per la valutazione dei progetti agrivoltaici rispetto alla loro capacità di integrare produzione agricola ed energetica, garantire la tutela ecosistemica e contribuire alla resilienza climatica (D'Ambrosio *et. al.*, 2024). Le linee guida hanno definito i sistemi agrivoltaici come il risultato della scomposizione in due macro-componenti: il sistema tecnologico, relativo agli aspetti tecnico-costruttivi e il sistema agro-ambientale, che comprende

conditions. Compared to conventional photovoltaics, these systems reduce land consumption by up to 70%, while keeping agricultural surfaces active (Jreich and Mahjoubi, 2023). Alongside direct benefits, system-wide advantages emerge by strengthening biodiversity and ecosystem services, supporting agroecological and regenerative practices, and enhancing territories as multifunctional infrastructures capable of integrating productive, ecological, and social dimensions (Toledo and Scognamiglio, 2021). Equally significant is the production of renewable energy, which consolidates the energy self-sufficiency of communities and diversifies agricultural income sources.

Technological and environmental design allows these innovations to be interpreted not only in technical terms but also as new spatial and ecological configurations, redefining the relationship between settlements, landscapes, and productive processes (Ladiana, 2015; Gangemi, 1972). In this light, agrivoltaics can be understood not merely as a technical device but as an opportunity for integrated risk management, capable of linking mitigation, design innovation, and ecological safeguarding.

Approach and research methodology

The research builds on the results developed within the MASE–ENEA Agreement "Sustainable design and innovative technologies for agrivoltaic systems" PTR 22/24, Line 2.7, which produced the Guidelines for Environmental Sustainability and the EASY-APV tool, designed to assess agrivoltaic projects in terms of their ability to integrate agricultural and energy production, ensure ecosystem protection, and contribute to climate resilience (D'Ambrosio *et. al.*, 2024). The guidelines defined agrivoltaic systems as the outcome of two macro-components, namely the technological system, concerning technical and construction aspects, and the agri-environmental system, encompassing the functional and spatial organisation of the project and the areas of interaction with the agricultural and territorial ecosystem. This framework made it possible to interpret projects in their complexity, and to highlight how design quality does not depend solely on the configuration of either the photovoltaic component or crop selection, but also on the integration of additional agri-technological solutions. The solutions analysed consist of a set of practices, systems, and devices that combine the principles of Nature-based Solutions[1] with innovative technologies. For the purposes of the analysis, a corpus of case studies was constructed on the basis of agrivoltaic projects submitted at the national level within authorisation procedures[2], only selecting those that: (i) were supported by sufficiently detailed technical documentation (plant layout, description of the solutions adopted, cropping and management framework); (ii) reported at least minimum information on the territorial context and pedoclimatic conditions; and (iii) included at least one additional agri-technological solution beyond those strictly related to energy and agricultural production. The selection mainly concerned contexts in central and southern Italy, with one case located in north-western Italy, representative of temperate-Mediterranean and sub-Mediterranean conditions. This study made it possible to identify

l'organizzazione funzionale e spaziale del progetto e le aree di interazione con l'ecosistema agricolo e territoriale.
Questa impostazione ha permesso di interpretare i progetti nella loro complessità e di evidenziare come la qualità progettuale non dipenda unicamente dalla configurazione della componente fotovoltaica o dalla scelta colturale, ma anche dall'integrazione di ulteriori soluzioni agro-tecnologiche. Le soluzioni analizzate costituiscono un insieme di pratiche, sistemi e dispositivi che coniugano principi delle Nature-based Solutions[1] con tecnologie innovative. Ai fini dell'analisi è stato costruito un corpus di casi studio a partire dai progetti agrivoltaici presentati a livello nazionale per le procedure autorizzative[2], selezionando esclusivamente quelli: (i) disponevano di una documentazione tecnica sufficientemente dettagliata (layout di impianto, descrizione delle soluzioni adottate, inquadramento colturale e gestionale); (ii) riportavano informazioni minime sul contesto territoriale e sulle condizioni pedoclimatiche; (iii) includevano almeno una soluzione agro-tecnologica aggiuntiva rispetto alle sole soluzioni per la produzione energetica e agricola. La selezione ha interessato prevalentemente contesti dell'Italia centro-meridionale, con un caso localizzato nell'Italia nord-occidentale, rappresentativi di condizioni temperato-mediterranee e sub-mediterranee. Tale studio, ha permesso di individuare le soluzioni agro-tecnologiche ricorrenti e di organizzarle in categorie e sottocategorie distinte sulla base delle funzioni svolte e degli obiettivi perseguiti. A queste categorie si aggiungono le coperture agrivoltaiche, declinate nelle tre configurazioni tipologiche definite dal MASE (MASE, 2022).
Successivamente, è stata condotta una *scoping review* sul database Scopus con l'obiettivo di mappare sistematicamente i principali rischi climatici per il settore agroecologico e di ricostruire i driver di vulnerabilità ricorrenti. L'analisi dei rischi climatici, incentrata sugli effetti di tre hazard prioritari (stress termico, scarsità idrica e degradazione del suolo), è stata condotta con un approccio sistematico volto a evidenziarne gli impatti sull'agricoltura, sulla biodiversità e sulle comunità rurali. Identificati gli impatti, l'attenzione si è concentrata sulla valutazione delle risposte fornite dalle diverse categorie di soluzioni agro-tecnologiche. Ogni soluzione è stata valutata mediante un processo di codifica qualitativa, che ha consentito di organizzare e sintetizzare evidenze eterogenee provenienti da fonti scientifiche, documentazione progettuale e rapporti di sperimentazione. A ciascuna soluzione è stato attribuito un punteggio qualitativo (–1, 0, +1) per esprimere un effetto negativo, neutro o positivo sulla capacità di incidere sul rischio climatico. I valori ottenuti sono stati in seguito normalizzati. Tale procedura si colloca nell'ambito delle pratiche consolidate di analisi qualitativa che fanno ricorso a matrici e sistemi di categorizzazione (Miles, Huberman and Saldaña, 2014). L'intero processo è stato sottoposto a validazione tramite confronto con progettisti e stakeholder dei settori coinvolti, in modo da garantire la pertinenza dei risultati.
Tali risultati sono stati tradotti in schede comparative sintetiche, in grado di restituire funzioni, obiettivi e potenzialità progettuali. Un aspetto originale del lavoro consiste nell'aver collocato le diverse soluzioni all'interno della scomposizione agro-ambientale (D'Ambrosio *et. al*., 2024), restituendo così uno strumento capace di orientare le scelte progettuali in termini operativi. In questo quadro, ciascuna soluzione è stata interpretata non come unità isolata, ma come componente inte-

recurrent agri-technological solutions, and to organise them into distinct categories and subcategories on the basis of the functions performed and the objectives pursued. These categories are complemented by agrivoltaic cover systems, articulated in the three typological configurations defined by MASE (MASE, 2022). A scoping review (Arksey and O'Malley, 2005) was conducted on the Scopus database to systematically map the main climate risks for the agroecological sector, and to reconstruct recurrent vulnerability drivers. The climate risk analysis, focused on the effects of three priority hazards (heat stress, water scarcity, and soil degradation), was carried out using a systematic approach to highlight their impacts on agriculture, biodiversity, and rural communities.
Once the impacts were identified, attention turned to evaluating the responses provided by the different categories of agri-technological solutions. Each solution was assessed through a qualitative coding process, which made it possible to organise and synthesise heterogeneous evidence from scientific sources, project documentation, and experimental reports. Each solution was assigned a qualitative score (–1, 0, +1) to express a negative, neutral, or positive effect on its ability to influence climate risk. The values obtained were then normalised. This procedure falls within consolidated qualitative analysis practices that make use of matrices and categorisation systems (Miles, Huberman and Saldaña, 2014). The entire process was validated through consultation with designers and stakeholders from the relevant sectors to ensure the relevance of the results.
The results were translated into comparative synthetic cards, designed to summarise functions, objectives, and design potential. An original aspect of this work consists in having positioned the various solutions within the agri-environmental framework (D'Ambrosio *et al*., 2024), thereby providing a tool capable of guiding design choices in operational terms. Within this framework, each solution was interpreted not as an isolated unit but as an integrated and relational component connected to the functional and spatial subsystems of the agrivoltaic project.

Evidence from case studies and recurrent configurations

The analysis made it possible to evaluate agri-technological solutions (Tab. 1) with respect to their ability to influence climate risk through two complementary modalities, precisely the reduction of vulnerability, understood as the strengthening of structural and ecological conditions that make agro-ecosystems less susceptible to climate risks, and the mitigation of impact, understood as the limitation of damages when climate events occur. For each category, the cards summarise objectives, prevailing functions, spatial placement, possible integrations with other solutions, and the capacity to reduce vulnerability in response to climate risks (Figs. 2–6). Each factsheet is organised into three levels: (i) a concise two-column header specifying category, subcategories and prevailing function; (ii) a central body that sets out the main positions within the functional/spatial system and the potential synergies with other solutions; and (iii) an evaluation matrix in which qualitative coding and score normali-

grata e relazionale connessa ai sottosistemi funzionali e spaziali del progetto agrivoltaico.

Soluzioni agro-tecnologiche integrate nel progetto *risk* e *climate-oriented*

L'analisi condotta ha permesso di valutare le soluzioni agro-tecnologiche (Tab. 1) rispetto alla loro capacità di incidere sul rischio climatico attraverso due modalità complementari: la riduzione della vulnerabilità, intesa come rafforzamento delle condizioni strutturali ed ecologiche che rendono gli agroecosistemi meno suscettibili ai rischi climatici, e la mitigazione degli impatti, intesa come contenimento dei danni nel momento in cui gli eventi climatici si manifestano. Per ciascuna categoria riassumono obiettivi, funzioni prevalenti, collocazioni spaziali, possibili integrazioni con altre soluzioni e capacità di riduzione della vulnerabilità in risposta ai rischi climatici (Fig. da 2 a 6).
Ogni scheda è organizzata in tre livelli: (i) una testata descrittiva sintetica in due colonne che specifica categoria e sottocategorie e funzione prevalente; (ii) un corpo centrale che esplicita i principali posizionamenti all'interno del sistema funzionale/spaziale e le possibili sinergie con altre soluzioni; (iii) una matrice di valutazione in cui la codifica qualitativa e la normalizzazione dei punteggi consentono di tradurre in forma grafica la capacità della soluzione di ridurre le vulnerabilità legate a stress termico, scarsità idrica e degradazione del suolo.
A titolo esemplificativo, la scheda relativa alla categoria SAT 1. Coperture agrivoltaiche (Fig. 2) mostra come le tre sottocategorie (SAT 1.1 Tipo 1 Elevato, SAT 1.2 Tipo 2 Interfilare, SAT 1.3 Tipo 3 Verticale) declinino in modo differenziato il contributo alla riduzione della vulnerabilità. Nelle configurazioni elevate (SAT 1.1), l'altezza dei moduli e la maggiore distanza dal suolo determinano un'ombreggiatura più diffusa e una ventilazione più efficace, con effetti significativi sul contenimento dello stress termico e sull'efficienza d'uso delle risorse idriche; tali benefici si associano tuttavia a una maggiore complessità strutturale e a specifici requisiti di stabilità e gestione del deflusso superficiale, poiché la concentrazione del ruscellamento in corrispondenza del bordo dei moduli può amplificare i fenomeni erosivi, richiedendo idonei dispositivi di drenaggio e pratiche conservative del suolo (Elamri *et al.*, 2018).
Le configurazioni interfilari (SAT 1.2), che collocano i moduli in alternanza con i filari coltivati, riducono la superficie agricola effettiva e lasciano filtrare una quota maggiore di radiazione verso il suolo; ne deriva una minore efficacia nella mitigazione delle temperature superficiali, a fronte del mantenimento di buone condizioni di accessibilità per le lavorazioni meccanizzate.
Le configurazioni verticali (SAT 1.3) risultano ancora poco diffuse nel contesto nazionale, ma sono oggetto di sperimentazione come sistemi di tipo *wind-breaker*, in cui file di moduli bifacciali disposti in verticale combinano ridotta impronta al suolo e schermatura rispetto ai venti prevalenti, contribuendo a ridurre la vulnerabilità delle colture ai danni da vento e allo stress idrico (Honningdalsnes *et al.*, 2025).
La lettura integrata delle barre di soddisfacimento e delle annotazioni testuali consente di interpretare la categoria non come una soluzione univoca, ma come un ventaglio di assetti progettuali in cui le prestazioni climatiche, agronomiche e spaziali variano in funzione delle configurazioni e delle modalità di combinazione con altre soluzioni agro-tecnologiche.

sation make it possible to graphically represent the capacity of the solution to reduce vulnerabilities related to heat stress, water scarcity and soil degradation.
By way of example, the factsheet for category SAT 1. Agrivoltaic canopies (Fig. 2) illustrates how the three subcategories (SAT 1.1 Type 1 Elevated, SAT 1.2 Type 2 Inter-row, SAT 1.3 Type 3 Vertical) articulate differentiated contributions to vulnerability reduction. In elevated configurations (SAT 1.1), the height of the modules and their greater distance from the ground generate more diffuse shading and more effective ventilation, with significant effects both on the mitigation of heat stress, and on the efficiency of water use. However, these benefits are associated with greater structural complexity and specific requirements in terms of stability and management of surface runoff, since the concentration of overland flow at the edge of the modules can amplify erosion processes and, therefore, requires appropriate drainage devices and soil conservation practices (Elamri *et al.*, 2018). Inter-row configurations (SAT 1.2), in which the modules are placed alternately with the cultivated rows, reduce the effective agricultural surface area, and allow a larger share of radiation to reach the ground. This results in lower effectiveness in mitigating surface temperatures, while preserving good accessibility conditions for mechanised operations. Vertical configurations (SAT 1.3) are still relatively uncommon in the national context, but are being tested as wind-breaker systems in which rows of vertically mounted bifacial modules combine a reduced land take with shielding from prevailing winds, thereby helping to reduce crop vulnerability to wind damage and water stress (Honningdalsnes *et al.*, 2025).
The integrated reading of the performance bars and textual annotations enables the category to be interpreted not as a single solution, but as a spectrum of design configurations in which climatic, agronomic and spatial performances vary according to the layouts adopted, and the ways in which they are combined with other agri-technological solutions. In this sense, the factsheets do not merely perform a descriptive function. They operate as critical devices that explicitly present the evaluation criteria and their links with the methodological pathway. Indeed, they refer back to the phases of qualitative coding and score assignment, while also supporting comparison between design alternatives. The result is a tool that is useful not only for synthesising research outcomes, but also for transparently guiding decision-making in the preliminary stages of agrivoltaic system design.
Graphical representation through satisfaction bars provides concise visualisation of the scores assigned to the different solutions, allowing immediate comparison between categories and highlighting strengths, weaknesses, and potential synergies.
The configurations observed in the case studies[2] show how the solution categories identified in the comparative cards find application in recurrent functional and spatial layouts (Fig. 7), contributing to the reduction of vulnerabilities and the construction of integrated, adaptive, and multifunctional agrivoltaic systems. In particular, the presence of vegetated screening strips (C1) along at least one side of the layout emerges as a constant.

Tab. 01 | Categorie e sottocategorie di soluzioni agro-tecnologiche
Categories and subcategories of agro-technological solutions

Tab. 01 |

AGRO-TECHNOLOGICAL SOLUTIONS (SAT)

1. Agrivoltaic canopies

1.1. Type 1 - Elevated

1.2. Type 2 – Inter-row

1.3. Type 3 - Vertical

Vulnerability reduction

Heat stress

The literature shows that high-elevation agrivoltaic canopies (Type 1) ensure a significant reduction in the physiological stress of crops, thanks to more homogeneous shading and regular ventilation, which stabilise microclimatic conditions and agricultural productivity (Barron-Gafford *et al*., 2019). Inter-row systems (Type 2) generate localised benefits, mainly in the areas close to the module rows, but are nevertheless effective in reducing crop exposure to thermal peaks (Elamri *et al*., 2018; Wahid, 2007). Vertical configurations (Type 3), which are still underexplored, show variable results but offer potential for crop diversification. Overall, the different typologies converge in their ability to mitigate the effects of heatwaves and to enhance the physiological resilience of plants.

Water scarcity

Under water deficit conditions, high-elevation systems (Type 1) stand out for their capacity to reduce evapotranspiration and irrigation requirements, thereby stabilising yields even during prolonged drought periods (Elamri *et al*., 2018). Inter-row (Type 2) and vertical (Type 3) systems are less performant from a water perspective, yet they still contribute to strengthening productive resilience and crop diversification, especially when implemented in complex agro-ecological contexts (Altieri *et al*., 2015). All configurations also help mitigate surface salinisation processes, with positive effects on soil quality and production continuity (Blanco-Canqui, 2018).

Soil degradation

Agrivoltaic canopies, regardless of configuration, have proven effective in limiting erosion and loss of fertility by attenuating the impact of solar and rainfall energy and improving infiltration processes (Blanco-Canqui, 2018). Several studies further highlight their contribution to strengthening soil biodiversity and pollinator presence, with positive implications for ecological connectivity and the stability of ecosystem services (Lal, 2020). Although effects are more pronounced in high-elevation systems (Type 1), significant benefits also emerge in inter-row (Type 2) and vertical (Type 3) configurations, confirming the importance of agrivoltaic canopies in enhancing agro-ecological resilience.

References: Altieri, M.A., Nicholls, C.I., Henao, A. and Lana, M.A. (2015), "Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems", Agronomy for Sustainable Development, Vol. 35, pp. 869–890. Available at: https://doi.org/10.1007/s13593-015-0285-2 *(Accessed on 13/09/2025); Barron-Gafford, G.A., Pavao-Zuckerman, M.A., Minor, R.L., Sutter, L.F., Barnett-Moreno, I., Blackett, D.T., Thompson, M., Dimond, K., Gerlak, A.K., Nabhan, G.P. and Macknick, J.E. (2019), "Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands", Nature Sustainability, Vol. 2 No. 11, pp. 848–855. Available at:* https://doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5 *(Accessed on 13/09/2025); Blanco-Canqui, H. (2018), "Cover crops and water quality: Grass cover crops increase time to runoff start and reduce runoff sediment loss", Agronomy Journal, Vol. 110 No. 6, pp. 1633–1644. Available at:* https://doi.org/10.2134/agronj2018.02.0077 *(Accessed on 13/09/2025); Elamri, Y., Cheviron, B., Lopez, J.-M., Dejean, C. and Belaud, G. (2018), "Water budget and crop modelling for agrivoltaic systems: Application to irrigated lettuces", Agricultural Water Management, Vol. 208, pp. 440–453. Available at:* https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.07.001*; Lal, R. (2020), "Regenerative agriculture for food and climate", Journal of Soil and Water Conservation, Vol. 75 No. 5, pp. 123A–124A. Available at:* https://doi.org/10.2489/jswc.2020.0620A *(Accessed on 13/09/2025); Wahid, A., Gelani, S., Ashraf, M. and Foolad, M.R. (2007), "Heat tolerance in plants: An overview", Environmental and Experimental Botany, Vol. 61 No. 3, pp. 199–223. Available at:* https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.05.011 *(Accessed on 13/09/2025).*

2. Eco-compatible strips and barriers

2.1. Vegetated / ecological areas

2.2. Artificial systems and barriers

Vulnerability reduction

Heat stress

Vegetative barriers act as effective microclimate mitigation measures, as they reduce wind speed and generate localised shaded areas, with positive effects on crop physiology and yield stability. The creation of ecological corridors characterised by melliferous and bioindicator species further contributes to strengthening pollination processes and crop resilience, and is particularly relevant in polycultural contexts (Altieri *et al*., 2015). Shrub belts and hedgerows also provide sheltered spaces along paths and work areas, enhancing operational comfort and reducing health risks associated with prolonged heat exposure (Flouris *et al*., 2018).

Water scarcity

Under water deficit scenarios, vegetative strips play a significant role in limiting evapotranspiration and improving the soil's water retention capacity. The shading canopy reduces evaporative losses, while shrub and tree root systems promote infiltration processes and limit surface runoff, thereby improving overall water availability and supporting productive resilience (Blanco-Canqui, 2018). The indirect effect on crop diversity manifests primarily through the increase in auxiliary and melliferous species rather than in terms of direct agricultural yields.

Soil degradation

With regard to soil degradation processes, hedgerows and buffer strips are effective in limiting surface erosion and nutrient loss, while permeable artificial barriers contribute to reducing runoff and strengthening soil stability (Santangeli *et al*., 2016). Vegetative strips characterised by deep root systems increase soil porosity and infiltration capacity, with beneficial effects also on biodiversity and functional entomofauna (Marzelli and Lintzmeyer, 2024). Moreover, the presence of ecological corridors and eco-compatible fencing ensures habitat continuity, reducing the ecological fragmentation often associated with photovoltaic infrastructures.

References: Altieri, M.A., Nicholls, C.I., Henao, A. and Lana, M.A. (2015), "Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems", Agronomy for Sustainable Development, Vol. 35, pp. 869–890. Available at: https://doi.org/10.1007/s13593-015-0285-2 (Accessed on 15/09/2025); Blanco-Canqui, H. (2018), "Cover crops and water quality: Grass cover crops increase time to runoff start and reduce runoff sediment loss", *Agronomy Journal*, Vol. 110 No. 6, pp. 1633–1644. Available at: https://doi.org/10.2134/agronj2018.02.0077 (Accessed on 13/09/2025); Flouris, A.D., Dinas, P.C., Ioannou, L.G., Nybo, L., Havenith, G., Kenny, G.P. and Kjellstrom, T. (2018), "Workers' health and productivity under occupational heat strain: a systematic review and meta-analysis", Lancet Planetary Health, Vol. 2 No. 12, pp. e521–e531. Available at: https://doi.org/10.1016/S2542-5196(18)30237-7 (Accessed on 15/09/2025); Marzelli, M. and Lintzmeyer, F. (2024), Threats report on alpine ecological connectivity, renewable energies and upcoming spatial needs (Deliverable D.1.3.1, PlanToConnect Project), ifuplan – Institute for Environmental Planning and Spatial Development GmbH & Co.KG, Munich. Available at: https://plan2connect.eu (Accessed on 13/09/2025); Santangeli, A., Di Minin, E., Toivonen, T., Pogson, M., Hastings, A., Smith, P. and Moilanen, A. (2016), "Synergies and trade-offs between renewable energy expansion and biodiversity conservation – a cross-national multi-factor analysis", GCB Bioenergy, Vol. 8 No. 6, pp. 941–951. Available at: https://doi.org/10.1111/gcbb.12337 (Accessed on 13/09/2025).

3. Solutions for climate and soil protection

3.1. Soil protection and enhancement systems

3.2. Agricultural protection systems

Vulnerability reduction

Heat stress
Permeable surfaces, biodegradable mulches and anti-compaction mats help stabilise soil microclimatic conditions. These solutions reduce the reflection of solar radiation and the transfer of heat to the root zone, maintaining lower temperatures and improving crop resilience to heatwaves (Lal, 2015).
Water scarcity
Geotextiles and soil covers promote water infiltration and reduce evaporative losses, thereby increasing the availability of usable water. The use of permeable pavements and controlled drainage systems also allows for better groundwater recharge and stormwater management, with positive effects on the overall water-use efficiency of agricultural systems (Apollonio *et al.*, 2021).
Soil degradation
Geogrids and geosynthetic products mitigate erosion processes, with experimental results showing reductions in soil loss of up to 98–99% compared with unprotected surfaces. The use of anti-compaction mats and nature-based engineering solutions also limits the physical degradation of soil, preserving its fertility, structure and ecological functionality (Mohawesh *et al.*, 2022; Lal, 2015).

References: Apollonio, C., Masi, F., Bacci, D., Ranieri, E. and Piro, P. (2021), "Hillslope Erosion Mitigation: An Experimental Proof of a Nature-Based Solution", Sustainability, Vol. 13 No. 11, 6058. Available at: https://doi.org/10.3390/su13116058 *(Accessed on 13/09/2025); Kotilainen, T., Robson, T.M. and Hernández, R. (2018), "Light quality characterization under climate screens and shade nets for controlled-environment agriculture", PLoS ONE, Vol. 13 No. 6, e0199628. Available at:* https://doi.org/10.1371/journal.pone.0199628 *(Accessed on 13/09/2025); Lal, R. (2015), "Restoring soil quality to mitigate soil degradation", Sustainability, Vol. 7, pp. 5875–5895. Available at:* https://doi.org/10.3390/su7055875 *(Accessed on 13/09/2025); Mohawesh, O., Al-Abdallat, A., Al-Bakri, J. and Qrunfleh, M. (2022), "Effects of colored shading nets on air temperature and light intensity", HortTechnology, Vol. 32 No. 1, pp. 21–30. Available at:* https://doi.org/10.21273/HORTTECH04895-21 *(Accessed on 13/09/2025).*

4. Resources management solutions

4.1. Precision irrigation systems

4.2 Devices for the collection, treatment and reuse of rainwater and wastewater/brackish water

Vulnerability reduction

Heat stress
The adoption of precision irrigation systems makes it possible to modulate irrigation volumes with high accuracy according to microclimatic and phenological conditions, thereby reducing the negative effects of heatwaves on crop physiology. Targeted water supply to the root zone helps maintain a balanced water status and higher photosynthetic efficiency, mitigating heat stress and preserving productivity even under critical conditions (Lakhiar *et al.*, 2024).
Water scarcity
Technologies for the collection, treatment and reuse of rainwater, wastewater and brackish water expand the availability of non-conventional resources. These measures reduce dependence on traditional water sources, support productive resilience during prolonged droughts and enhance water-use efficiency (Al-Addous *et al.*, 2024; Olufisayo and Olanrewaju, 2024).
Soil degradation
Integrated water resource management, through precision irrigation and the controlled reuse of treated wastewater, helps mitigate salinisation and nutrient leaching processes. Phytoremediation and constructed wetland techniques, in addition to treating agricultural and urban effluents, make it possible to recover water resources suitable for irrigation, thus safeguarding soil fertility and ecological quality. Such practices counteract degradation processes and strengthen the long-term functionality of agroecological systems (Lakhiar *et al.*, 2024).

References: Al-Addous, M., Bdour, M., Rabaiah, S., Boubakri, A., Schweimanns, N., Barbana, N. and Wellmann, J. (2024), "Innovations in Solar-Powered Desalination: A Comprehensive Review of Sustainable Solutions for Water Scarcity in the Middle East and North Africa (MENA) Region", Water, Vol. 16 No. 13, 1877. Available at: https://doi.org/10.3390/w16131877 *(Accessed on 13/09/2025); Lakhiar, I.A., Yan, H., Zhang, C., Wang, G., He, B., Hao, B., Han, Y., Bao, R., Syed, T.N. et al. (2024), "A Review of Precision Irrigation Water-Saving Technology under Changing Climate for Enhancing Water Use Efficiency, Crop Yield, and Environmental Footprints", Agriculture, Vol. 14 No. 7, 1141. Available at:* https://doi.org/10.3390/agriculture14071141 *(Accessed on 13/09/2025); Olufisayo, O.E. and Olanrewaju, O. (2024), "A Review of Renewable Energy Powered Seawater Desalination Treatment Process for Zero Waste", Water, Vol. 16 No. 19, 2804. Available at:* https://doi.org/10.3390/w16192804 *(Accessed on 13/09/2025).*

5. Solutions for climate and crop management

5.1. Digital and monitoring tools

5.2. Crop management practices

5.3. Regenerative agriculture practices

Vulnerability reduction

Heat stress
Digital monitoring tools such as IoT sensors, drones and decision-support systems make it possible to detect microclimatic and crop physiological conditions in real time, enabling targeted interventions to reduce the effects of heatwaves. This adaptive capacity helps mitigate physiological stress and stabilise yields (Zhuang *et al.*, 2022).
Water scarcity
Crop practices based on cover crops, crop rotations and intercropping strengthen agroecological diversification and increase water-use efficiency, thanks to enhanced infiltration and reduced evaporative losses (Altieri *et al.*, 2015). These approaches are particularly effective in supporting agricultural resilience under prolonged drought conditions.
Soil degradation
Regenerative practices, including the application of biochar, carbon farming and soil health management programmes, help improve soil structure and fertility, increase water retention and promote functional biodiversity (Schmidt *et al.*, 2021). Recent studies show that biochar increases yields, water-use efficiency and carbon sequestration while simultaneously reducing the risks of erosion and salinisation (Han *et al.*, 2023; Gross *et al.*, 2021).

References: Altieri, M.A., Nicholls, C.I., Henao, A. and Lana, M.A. (2015), "Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems", Agronomy for Sustainable Development, Vol. 35, pp. 869–890. Available at: https://doi.org/10.1007/s13593-015-0285-2 *(Accessed on 13/09/2025); Gross, A., Glaser, B. and Bird, M. (2021), "Soil Organic Carbon Sequestration after Biochar Application: A Global Meta-Analysis", Agronomy, Vol. 11 No. 12, 2474. Available at:* https://doi.org/10.3390/agronomy11122474 *(Accessed on 13/09/2025); Han, X., Xu, C., Fu, Q., Wang, G., Wang, X., Song, X. and Zhang, Y. (2023), "Effects of biochar on crop yield, water use efficiency and nitrogen use efficiency: A global meta-analysis", Journal of Cleaner Production, Vol. 403, 136782. Available at:* https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136782 *(Accessed on 13/09/2025); Schmidt, H.P., Anca-Couce, A., Hagemann, N., Werner, C., Gerten, D., Lucht, W., Aust, C. et al. (2021), "Biochar in agriculture – A systematic review of 26 global meta-analyses", Global Change Biology Bioenergy, Vol. 13 No. 11, pp. 1708–1730. Available at:* https://doi.org/10.1111/gcbb.12889 *(Accessed on 13/09/2025); Zhuang, J., Yang, P., Tang, J., Fu, P., Gao, Y. and Xu, D. (2022), "Applications of UAV and sensor-based technologies in agriculture for climate-smart farming: A review", Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 198, 107091. Available at:* https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107091 *(Accessed on 13/09/2025).*

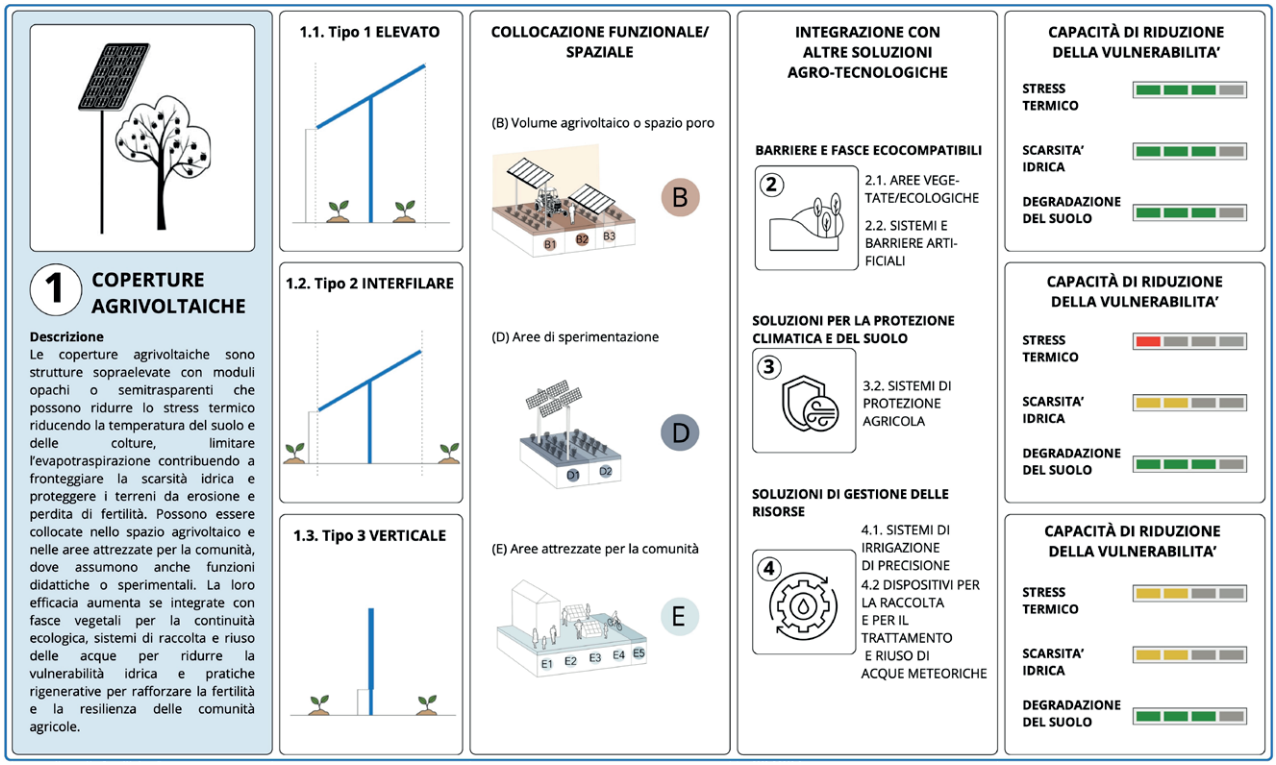
02 | Scheda sintetica della categoria di soluzione agro-tecnologica SAT 1. Coperture agrivoltaiche, articolata nelle sottocategorie SAT 1.1 Tipo 1 Elevato, SAT 1.2 Tipo 2 Interfilare e SAT 1.3 Tipo 3 Verticale, con indicazioni relative a collocazione spaziale, integrazione con altre soluzioni e capacità di riduzione della vulnerabilità rispetto a stress termico, scarsità idrica e degradazione del suolo

Synthetic card of the agri-technological solution category SAT 1. Agrivoltaic coverings, articulated in subcategories SAT 1.1 Type 1 Elevated, SAT 1.2 Type 2 Inter-row, and SAT 1.3 Type 3 Vertical, with indications on spatial placement, integration with other solutions, and vulnerability reduction capacity against heat stress, water scarcity, and soil degradation

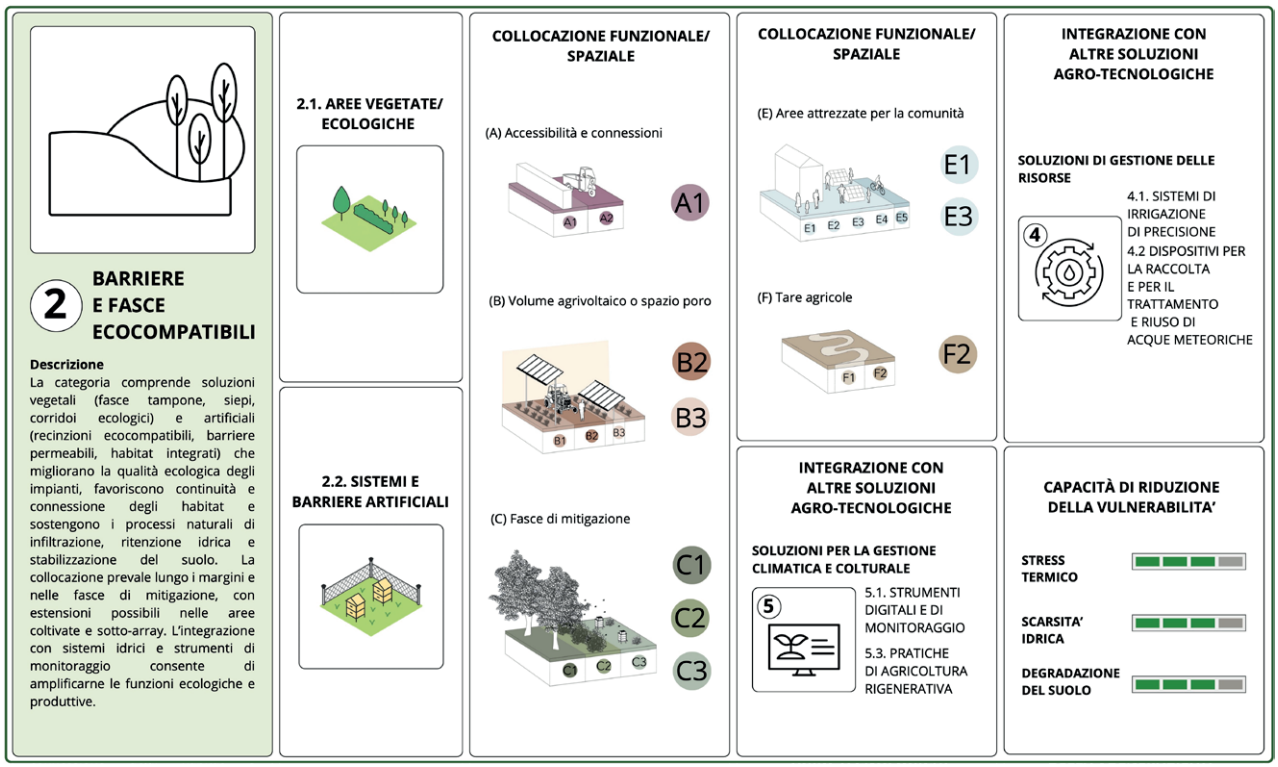
03 | Scheda sintetica della categoria di soluzione agro-tecnologica SAT 2. Barriere e fasce ecocompatibili, articolata nelle sottocategorie SAT 2.1 Aree vegetate/ecologiche e SAT 2.2 Sistemi e barriere artificiali

Synthetic card of the agri-technological solution category SAT 2. Eco-compatible barriers and strips articulated in subcategories SAT 2.1 Vegetated/ecological areas and SAT 2.2 Artificial systems and barriers

02 |



03 |

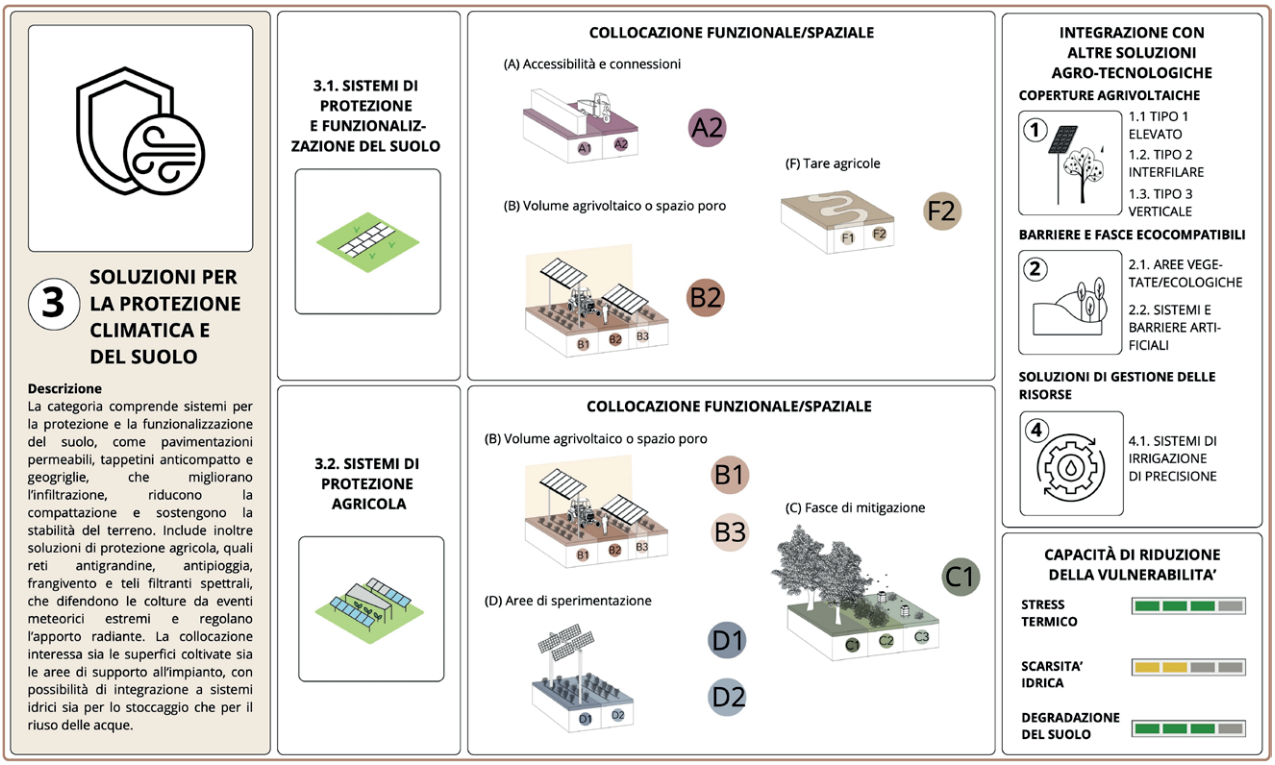


04 | Scheda sintetica della categoria di soluzione agro-tecnologica SAT 3. Soluzioni per la protezione climatica e del suolo, articolata nelle sottocategorie SAT 3.1 Sistemi di protezione e funzionalizzazione del suolo e SAT 3.2 Sistemi di protezione agricola

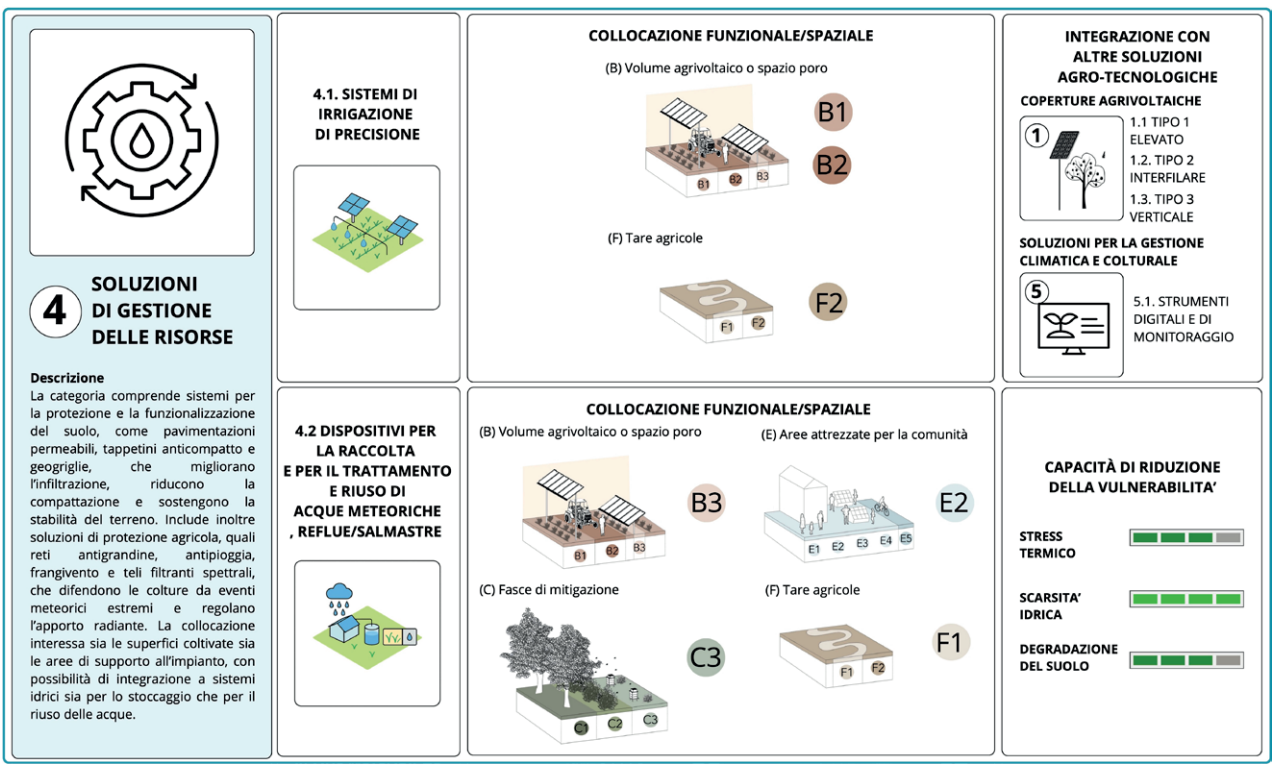
Synthetic card of the agri-technological solution category SAT 3. Climate and soil protection solutions, articulated in subcategories SAT 3.1 Soil protection and functionalisation systems, and SAT 3.2 Agricultural protection systems

05 | Scheda sintetica della categoria di soluzione agro-tecnologica SAT 4. Soluzioni di gestione delle risorse, articolata nelle sottocategorie SAT 4.1 Sistemi di irrigazione di precisione e SAT 4.2 Dispositivi per la raccolta e il riuso di acque meteoriche, reflue e salmastre

Synthetic card of the agri-technological solution category SAT 4. Resource management solutions, articulated in subcategories SAT 4.1 Precision irrigation systems and SAT 4.2 Devices for collection and reuse of rainwater, wastewater, and brackish water



| 04

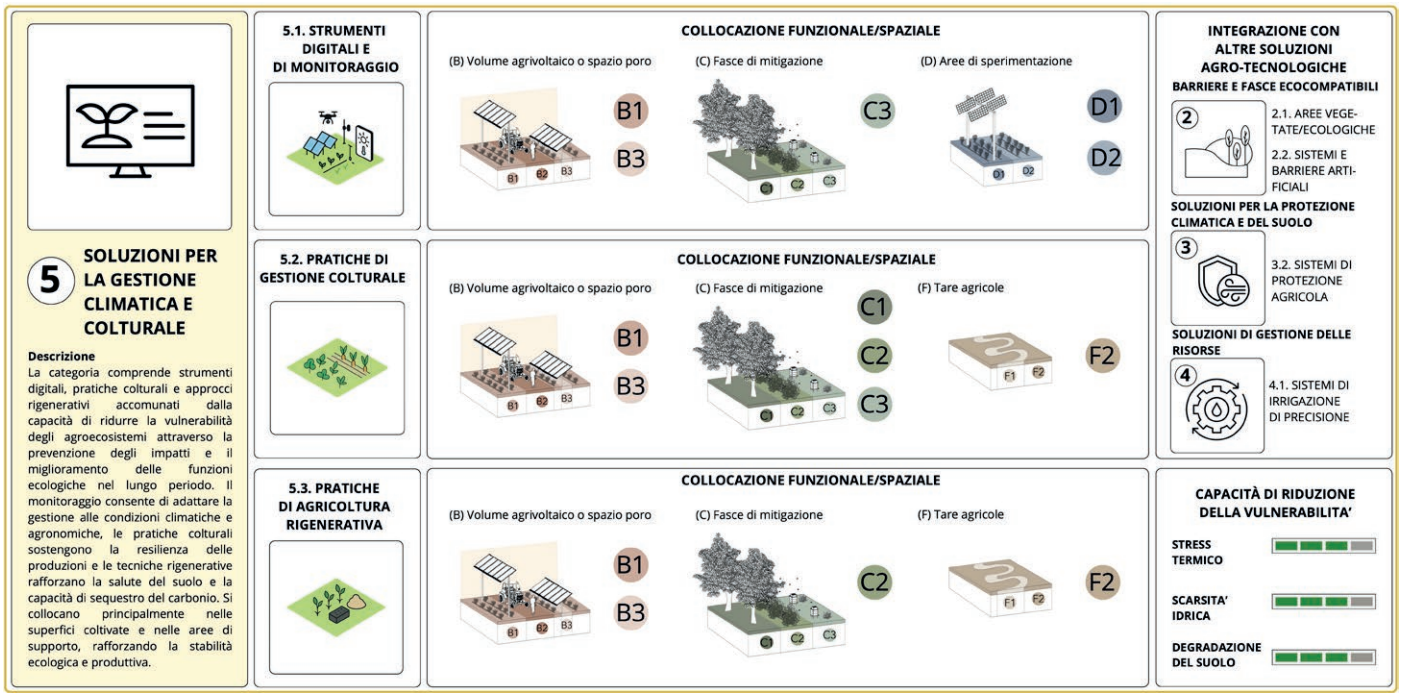


| 05

06 | Scheda sintetica della categoria di soluzione agro-tecnologica SAT 5. Soluzioni per la gestione climatica e colturale, articolata nelle sottocategorie SAT 5.1 Strumenti digitali e di monitoraggio, SAT 5.2 Pratiche di gestione colturale e SAT 5.3 Pratiche di agricoltura rigenerativa

Synthetic card of the agri-technological solution category SAT 5. Climate and crop management solutions, articulated in subcategories SAT 5.1 Digital and monitoring tools, SAT 5.2 Crop management practices, and SAT 5.3 Regenerative agriculture practices

06 |



In questo senso, le schede non svolgono solo una funzione descrittiva, ma operano come dispositivi critici che rendono espliciti i criteri di valutazione e i nessi con il percorso metodologico: da un lato, rimandano alle fasi di codifica qualitativa e di attribuzione dei punteggi; dall'altro, supportano la comparazione tra alternative progettuali. Ne deriva uno strumento utile non solo per sintetizzare esiti di ricerca, ma per guidare le scelte nelle fasi preliminari di impostazione progettuale di sistemi agrivoltaici.

Evidenze dai casi studio e configurazioni ricorrenti

Le configurazioni riscontrate nei casi studio2 mostrano come le categorie di soluzioni individuate nelle schede comparative trovino applicazione in assetti funzionali e spaziali ricorrenti (Fig. 7), contribuendo alla riduzione delle vulnerabilità e alla costruzione di sistemi agrivoltaici integrati, adattivi e multifunzionali.

In particolare, la presenza di fasce vegetate di schermatura (C1) lungo almeno un lato del layout si configura come una costante. Tali fasce, non svolgono solo una funzione di mitigazio-

These strips provide not only visual mitigation but also environmental protection by shielding against wind and enhancing soil stability through root systems (Polacchi *et al.*, 2024). Perimeter fences (A1) present diversified layouts, which can be continuous (CS01 – SB), partial (CS02 – CP), or absent (CS05 – SG). Where fencing is continuous, it is often complemented by openings for wildlife (SAT 2.2), facilitating ecological corridors and reducing habitat fragmentation (Marzelli and Lintzmeyer, 2024). Vegetated strips (C2, C3), positioned within the layout, can further increase functional biodiversity, improve soil water retention, reduce erosion and compaction, and foster ecological regeneration (Polacchi *et al.*, 2024). In some cases, such strips are integrated beneath photovoltaic modules to contain erosion caused by surface runoff during intense rainfall.

The use of pollinator-friendly species and artificial nesting (SAT 2.2), either in internal strips (C3) or incorporated in screening elements (A1), strengthens ecosystem services and reduces reliance on chemical inputs. Another significant recurrence is precision irrigation systems (SAT 1), integrated within the productive space (B). These systems are often supported by water collection tanks, configured as underground basins or ponds with phytoremediation, located both along the margins (C1, C2) and within naturalised areas.

In arid contexts, the reuse of brackish water is also tested, expanding irrigation resources and reinforcing the water resilience of agroecosystems (Polacchi *et al.*, 2024). Experimental areas (D), located at the margins or adjacent to productive spaces (B), serve for monitoring crop performance, and generating data useful for adaptive management. The research highlights how the effectiveness of agroecological solutions does not lie in the isolated application of individual measures, but in their ability to be combined and integrated into complex design configurations. The systemic arrangement of heterogeneous ecological, technological, and managerial components allows to act simultaneously on multiple risk dimensions, thus amplifying benefits and reducing potential trade-offs. As a result, the resilience of agroecosystems does not only depend on the presence of specific solutions but on how they are aggregated and articulated in relation to the productive, environmental, and social functions of the project.

Conclusions, limitations and perspectives

The research positions agrivoltaic systems within integrated management strategies, highlighting their potential in reducing vulnerabilities linked to heat stress, water scarcity, and soil degradation. Its innovative contribution lies in the development of comparative tools capable of organising heterogeneous design solutions within a unified framework of technical, ecological and management criteria, thereby making the interrelationships between technological components, agronomic practices and ecosystem quality more legible. The tools are thus able to orient ex-ante design choices, and facilitate comparison between projects.

However, limitations remain due to empirical availability. Indeed, the limited number of operational plants, the still short monitoring periods, and the frag-

ne visiva ma anche ambientale, fornendo protezione dal vento e aumentando tramite l'apparato radicale la stabilità del suolo (Polacchi *et. al*., 2024). Le recinzioni perimetrali (A1) presentano assetti diversificati: continue (CS01 – SB), parziali (CS02 – CP) o assenti (CS05 – SG). Laddove la recinzione è continua, questa è spesso compensata da varchi per la fauna selvatica (SAT 2.2), che favoriscono la creazione di corridoi ecologici, riducendo gli effetti di frammentazione degli habitat (Marzelli and Lintzmeyer, 2024). Le fasce vegetate (C2, C3), inoltre, collocate all'interno del layout, possono incrementare la biodiversità funzionale, migliorare la capacità dei suoli di assorbire e trattenere acqua piovana, ridurre erosione e compattazione e favorire processi di rigenerazione ecologica (Polacchi *et. al*., 2024). In alcuni casi, tali fasce sono integrate sotto i moduli fotovoltaici per contenere l'erosione dovuta al deflusso idrico superficiale durante piogge intense. L'impiego di specie mellifere e impollinatori, anche attraverso nidi artificiali (SAT 2.2) in tali aree (C3) o integrate negli elementi di schermatura (A1), contribuisce inoltre a rafforzare i servizi ecosistemici e a ridurre la dipendenza da input chimici. Un'altra ricorrenza significativa è rappresentata dai sistemi di irrigazione di precisione (SAT 1), integrati nello spazio produttivo (B). Questi sistemi sono spesso coadiuvati da vasche di raccolta idrica, configurate come bacini artificiali interrati o stagni con fitodepurazione, collocati sia lungo i margini (C1, C2) sia nelle aree naturalizzate. In contesti aridi si sperimenta anche il riuso delle acque salmastre, strategia che consente di ampliare le risorse disponibili per l'irrigazione e rafforzare la resilienza idrica degli agroecosistemi (Polacchi *et. al*., 2024). Le aree sperimentali (D), poste al margine o in adiacenza agli spazi produttivi (B), svolgono una funzione di monitoraggio delle prestazioni colturali, generando dati utili per la gestione adattiva.

La ricerca evidenzia come l'efficacia delle soluzioni agro-tecnologiche non risieda nell'applicazione isolata di singoli interventi, ma nella capacità di essere combinate e integrate all'interno di configurazioni progettuali complesse. La messa a sistema di componenti eterogenee, ecologiche, tecnologiche e gestionali, permette di agire simultaneamente su più dimensioni del rischio, amplificando i benefici e riducendo i potenziali trade-off. Ne risulta che la resilienza degli agroecosistemi non dipende soltanto dalla presenza di determinate soluzioni, ma dal modo in cui esse sono aggregate e articolate in relazione alle funzioni produttive, ambientali e sociali del progetto.

Conclusioni, limiti e prospettive

La ricerca colloca i sistemi agrivoltaici nelle strategie di gestione integrata, evidenziandone il potenziale nel ridurre vulnerabilità legate a stress termico, scarsità idrica e degradazione dei suoli. L'elemento innovativo risiede nell'elaborazione di strumenti comparativi capaci di orga-

Caso Studio	Localizzazione	Sistema APV	Configurazione in sistemi agro-ambientali	Soluzioni agro-tecnologiche
CS 01 - SB	Ruvo di Puglia, Località Lama Pagliara (BA)	T1	A1 C3 B C3 A2 C3 B C3 C2 C1 A1	
CS 02 - CP	Barengo e Briona, Località Cascina Pompogno (NO)	T1	A1 C1 A2 B A2 D A2	
CS 03 - TS	Giugliano in Campania, Comune di Napoli (NA)	T1	A1 C1 C2 A2 B A2 C3 E C3 C1 A1	
CS 04 - FA	Troia, Comune di Foggia (FG)	T2	A1 C1 C2 A2 B D C3 C1 A1	
CS 05 - SG	Acquapendente, Provincia di Viterbo (VT)	T2	C1 C2 C3 A2 B A2 B A2 C3 C2 C1	
CS 06 - LP	Castrovillari (CS), Calabria	T1	A1 C1 A2 C2 C3 B C2 C3 B A2 C1 A1	

LEGENDA SISTEMA AGRO-AMBIENTALE

(A) Accessibilità e connessioni
- A1 Recinzione perimetrale
- A2 Accesibilità e passaggio carrabile

(B) Volume agrivoltaico o spazio poro
- B1 Aree per la coltivazione agricola e attività zootecnica
- B2 Accessibilità e passaggio per mezzi agricoli e persone
- B3 Area di ingombro dell'impianto

(C) Fasce di mitigazione
- C1 Schermature visuali
- C2 Aree di rinaturalizzazione e salvaguardia della biodiversità
- C3 Aree di inserimento di specie vegetali e animali funzionali

(D) Aree di sperimentazione
- D1 Aree di sperimentzione tecnologica
- D2 Terreno di controllo

(E) Aree attrezzate per la comunità
- E1 Aree attrezzate a scopo didattico
- E2 Aree per la trasformazione o consumo in loco
- E3 Aree attrezzate a scopo ricreativo
- E4 Aree per la vendita diretta
- E5 Accessibilità e percorsi per la mobilità lenta

(F) Tare agricole
- F1 Superifici occupate da elementi naturali e/o artificiali
- F2 Aree di buffer

nizzare soluzioni progettuali eterogenee in un quadro unitario di criteri tecnici, ecologici e gestionali, rendendo più leggibili le interrelazioni tra componenti tecnologiche, pratiche agronomiche e qualità ecosistemica, in grado di orientare in fase ex-ante le scelte progettuali e facilitare la comparazione tra progetti.
Permangono tuttavia limiti legati alla disponibilità empirica: il numero ridotto di impianti in esercizio, i tempi di monitoraggio ancora troppo brevi e la frammentarietà dei dati rendono complessa la validazione delle valutazioni e ne limitano la comparabilità tra contesti.
Le prospettive future riguardano l'ampliamento della base empirica attraverso l'inclusione di progetti in differenti aree geografiche e la raccolta di dati di lungo periodo, da integrare con modelli predittivi che considerino anche scenari climatici specifici. L'adozione di indicatori multidimensionali potrà consentire di valutare congiuntamente i fattori agricoli, ecologici e socio-economici, rafforzando la capacità di lettura sistemica dei progetti. In questa direzione, la ricerca si rivolge a progettisti, fornendo strumenti per l'impostazione delle fasi preliminari, dalla lettura dei profili di rischio climatico sito-specifici alla scelta delle combinazioni agrivoltaiche e delle soluzioni agro-tecnologiche più coerenti con gli obiettivi di adattamento e mitigazione climatica, e a decisori e valutatori, offrendo criteri per l'analisi e la comparazione dei progetti, la definizione di condizioni e prescrizioni progettuali, con l'obiettivo di orientare le scelte verso configurazioni climaticamente adattive, resilienti e multifunzionali e di fornire, nel medio periodo, una base per linee guida operative e protocolli valutativi condivisi tra amministrazioni, enti di ricerca e operatori del settore. Le prospettive di sviluppo richiedono, in particolare, di affrontare i sistemi agrivoltaici in una chiave più marcatamente ambientale e tecnologica, nel senso di ragionamento sul loro inserimento nel "paesaggio ambientale" inteso come luogo del cambiamento e dell'evoluzione delle relazioni tra natura e artificio (Vittoria, 1975). In questa prospettiva, tali progetti possono essere concepiti come forme di antropizzazione "leggera" dell'ambiente naturale e agricolo, capaci di generare nuovi habitat produttivi a bassa intensità infrastrutturale nei quali campi coltivati, infrastrutture idrauliche e insediamenti rurali concorrono a definire un unico ambiente di vita strutturato dal rapporto tra lavoro agricolo, forme insediative e organizzazione del suolo (Gangemi, 1979). Ciò consente di rispondere in modo più articolato alle critiche sugli impatti ambientali emerse nei procedimenti VIA/VAS, che risultano particolarmente rilevanti quando l'agrivoltaico è valutato solo in termini tecnico-prestazionali: il tema diventa allora l'individuazione di punti di equilibrio tra efficienza energetica e contenimento dell'impatto, definendo configurazioni "conformi" rispetto alla superficie occupata, alla potenza installata, alla quota di superficie agricola effettivamente produttiva e alla qualità dei nuovi habitat che si vengono a creare. Su questo bilanciamento tra prestazioni, impatti e capacità generativa di nuovi paesaggi agro-energetici si collocano le principali prospettive di lavoro di ricerca, in particolare per gli architetti e per la disciplina della progettazione ambientale, chiamati a tradurre tali equilibri in criteri e dispositivi spaziali capaci di tenere insieme produzione, efficienza energetica e mitigazione della vulnerabilità ai rischi.

mentation of available data make it difficult to validate assessments and limit comparability across different contexts.
Future perspectives concern the expansion of the empirical base through the inclusion of projects in other geographical areas, and the collection of long-term data, to be integrated with predictive models that also consider specific climate scenarios. The adoption of multidimensional indicators will make it possible to jointly assess agricultural, ecological, and socio-economic factors, strengthening the systemic understanding of projects.
In this perspective, the research addresses designers by providing tools for the set-up of preliminary phases, from the analysis of site-specific climate risk profiles to the selection of agrivoltaic configurations and agri-technological solutions that are most consistent with adaptation and mitigation objectives, and with policy-makers and evaluators. They offer criteria for project analysis and comparison, for the definition of design conditions and prescriptions, with the aim of steering decisions towards climate-adaptive, resilient and multifunctional configurations. In the medium term, this approach may provide a basis for operational guidelines and shared assessment protocols among public administrations, research institutions, and sector operators.
The development perspectives particularly call for agrivoltaic systems to be addressed from a more explicitly environmental and technological standpoint, that is, through reflection on their integration into the "environmental landscape", the locus of change and of the evolving relationships between nature and artefact (Vittoria, 1975). From this standpoint, such projects can be conceived as forms of "light" anthropisation of natural and agricultural environments, capable of generating new productive habitats with low infrastructural intensity, in which cultivated fields, hydraulic infrastructures and rural settlements contribute to defining a single living environment structured by the relationship between agricultural work, settlement forms, and soil organisation (Gangemi, 1979).
This makes it possible to provide a more articulated response to criticisms concerning environmental impacts that have emerged in EIA/SEA procedures, which become particularly significant when agrivoltaics are assessed solely in technical-performance terms. The key issue then becomes the identification of points of balance between energy efficiency and impact mitigation, defining configurations that are "conforming" in relation to the land take, installed capacity, share of effectively productive agricultural surface, and the quality of the new habitats generated. The main future research directions lie in this balance between performance, impacts and the generative capacity of new agro-energetic landscapes, particularly for architects and for the field of environmental design. The latter are called upon to translate these equilibria into spatial criteria and devices capable of holding together production, energy efficiency and the mitigation of vulnerability to risks.

NOTES

[1] European Environment Agency (EEA), 2021.

[2] The case studies considered were selected from the MASE VIA/VAS portal, consistently with the MASE Guidelines (2022) and validated as good practices in the EASY-APV testing (D'Ambrosio *et. al.*, 2024).

NOTE

[1] European Environment Agency (EEA), 2021.

[2] I casi studio considerati sono stati selezionati dal portale VIA/VAS del MASE, conformi alle Linee guida MASE (2022) e validati come buone pratiche nel testing di EASY-APV (D'Ambrosio *et. al.*, 2024).

REFERENCES

Barron-Gafford, G.A., Pavao-Zuckerman, M.A., Minor, R.L., Sutter, L.F., Barnett-Moreno, I., Blackett, D.T., Thompson, M., Dimond, K., Gerlak, A.K., Nabhan, G.P. and Macknick, J.E. (2019), "Agrivoltaics provide mutual benefits across the food-energy-water nexus in drylands", *Nature Sustainability*, Vol. 2, pp. 848-855. Available at: https://doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5 (Accessed on 13/09/2025).

D'Ambrosio, V., Tersigni, E., Scognamiglio, A., Cervelli, E., Losasso, M., Pindozzi, S., Rigillo, M., Castaldi, F., Girardi, C., Marandino, F., Mokrane, S., Recchi, P.F. and Santomartino, G. (2024), *Linee guida per la sostenibilità ambientale del progetto di sistemi agrivoltaici*, ENEA – DiARC, Roma. Available at: https://www.ricercasistemaelettrico.enea.it/archivio-documenti.html?task=download.send&id=5420:sistemi-agrivoltaici-indirizzi-per-la-sostenibilità-ambientale-del-progetto-la2-7&catid=585 (Accessed on 13/09/2025).

EEA (2021), *Nature-based solutions in Europe: policy, knowledge and practice for climate change adaptation and disaster risk reduction*, EEA Report No 1/2021, European Environment Agency, Copenhagen. Available at: https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/nature-based-solutions-in-europe (Accessed on 13/09/2025).

Elamri, Y., Cheviron, B., Lopez, J.-M., Dejean, C. and Belaud, G. (2018), "Rain concentration and sheltering effect of solar panels on pasture growth in a Mediterranean climate", *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 22, pp. 1285-1298. Available at: https://doi.org/10.5194/hess-22-1285-2018 (Accessed on 29/11/2025).

Gangemi, V. (Ed.) (1972), *Tecnologia e Ambiente*, Istituto di Tecnologia dell'Architettura, Napoli.

Gangemi, V. (Ed.) (1979), *L'habitat agricolo del Basso Volturno*, Istituto di Tecnologia dell'Architettura, Facoltà di Architettura dell'Università di Napoli, Napoli.

Honningdalsnes, E.H., Marstein, E.S., Lindholm, D., Bonesmo, H. and Riise, H.N. (2025), "Wind sheltering in vertical agrivoltaics can increase crop yields: a modeling study for Northern Europe", *Energy Nexus*, Vol. 19, pp. 100516. Available at: https://doi.org/10.1016/j.nexus.2025.100516 (Accessed on 29/11/2025).

IPCC (2023), *Climate change 2023: synthesis report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, Geneva. Available at: https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647 (Accessed on 13/09/2025).

Jreich, R. and Mahjoubi, C. (2023), *Agrivoltaics: harvesting solar energy in the Mediterranean. Morocco, Algeria, Tunisia, Egypt, Jordan, Lebanon*, RES4Africa Foundation, Rome. Available at: https://res4africa.org/wp-content/uploads/2023/06/Agrivoltaics-harvesting-solar-energy-in-the-Med-Online-Verison.pdf (Accessed on 13/09/2025).

Ladiana, D. (2015), "Degraded or everyday landscapes. Vulnerability vs. resilience. I paesaggi degradati o del quotidiano. Vulnerabilità vs resilienza", in Angelucci, F., Braz Afonso, R., Di Sivo, M. and Ladiana, D. (Eds.), *The technological design of resilience landscape. Il progetto tecnologico del paesaggio resiliente*, FrancoAngeli, Milano, pp. 207-224. Available at: https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/162764/2/695406.pdf (Accessed on 13/09/2025).

MASE (2022), *Linee guida in materia di impianti agrivoltaici*, Ministero della Transizione Ecologica, Roma. Available at: https://www.mase.gov.it/portale/documents/d/guest/linee_guida_impianti_agrivoltaici-pdf (Accessed on 13/09/2025).

Marzelli, M. and Lintzmeyer, F. (2024), *Threats report on alpine ecological connectivity, renewable energies and upcoming spatial needs*, Deliverable D.1.3.1, PlanToConnect Project, ifuplan – Institute for Environmental Planning and Spatial Development GmbH & Co.KG, Munich. Available at: https://www.alpine-space.eu/wp-content/uploads/2025/04/D.1.3.1_threats_report_ifuplan_202410_2.pdf (Accessed on 13/09/2025).

MedECC (2020), *Climate and environmental change in the Mediterranean basin – current situation and risks for the future. First Mediterranean Assessment Report*, Cramer, W., Guiot, J. and Marini, K. (Eds.), Union for the Mediterranean, Plan Bleu, UNEP/MAP, Marseille. Available at: https://doi.org/10.5281/zenodo.4768833 (Accessed on 13/09/2025).

Miles, M.B., Huberman, A.M. and Saldaña, J. (2014), *Qualitative data analysis: a methods sourcebook*, 3rd ed., Sage, Thousand Oaks, CA. Available at: https://www.metodos.work/wp-content/uploads/2024/01/Qualitative-Data-Analysis.pdf (Accessed on 13/09/2025).

Pandey, G., Lyden, S., Franklin, E., Millar, B. and Harrison, M.T. (2025), "A systematic review of agrivoltaics: productivity, profitability, and environmental co-benefits", *Sustainable Production and Consumption*, Vol. 56, pp. 13-36. Available at: https://doi.org/10.1016/j.spc.2025.03.006 (Accessed on 13/09/2025).

Polacchi, C., Cornella, A., Louwen, A., Borz, G. and Moser, D. (2024), *Eco-design requirements and guidelines for agri-PV*, Deliverable D4.1, SYMBIOSYST Project, EURAC Research, Bolzano. Available at: https://www.symbiosyst.eu/wp-content/uploads/2026/03/SYMBIOSYST_D4.1-final-7.12.2025.pdf (Accessed on 13/09/2025).

Toledo, C. and Scognamiglio, A. (2021), "Agrivoltaic systems design and assessment: a critical review, and a descriptive model towards a sustainable landscape vision (three-dimensional agrivoltaic patterns)", *Sustainability*, Vol. 13, pp. 6871. Available at: https://doi.org/10.3390/su13126871 (Accessed on 13/09/2025).

UNDRR (2023), *Annual report 2022*, United Nations Office for Disaster Risk Reduction, Geneva. Available at: https://www.undrr.org/annual-report/2022 (Accessed on 13/09/2025).

Vittoria, E. (1975), "Abitabilità del territorio", in *Argomenti per un corso in Tecnologia dell'architettura*, Multigrafica Brunetti, Roma.

Architettura, rischio e co-progettazione. Approcci *community-based* per la mitigazione del rischio in Lomellina

Just Accepted: November 28, 2025 **Published:** July 29, 2026

Francesco Airoldi, https://orcid.org/0009-0000-0890-9401 francesco.airoldi@polimi.it
Francesca Vigotti, https://orcid.org/0000-0002-5144-5371 francesca.vigotti@polimi.it
Emilia Corradi, https://orcid.org/0000-0002-0040-4166 emilia.corradi@polimi.it
Cassandra Cozza, https://orcid.org/0000-0003-3165-0172 cassandra.cozza@polimi.it
Camillo Frattari, https://orcid.org/0000-0003-0158-1137 camillo.frattari@polimi.it
Stefano Sartorio, https://orcid.org/0000-0001-5372-1301 stefano.sartorio@polimi.it
Dipartimento di Architettura e Studi Urbani, Politecnico di Milano, Italia

Abstract. Il contributo presenta i risultati di una ricerca condotta nell'ambito del Task 7.4.4 del progetto PNRR MUR RETURN. Essa si fonda su un quadro teorico multidisciplinare e adotta una metodologia che combina la co-progettazione architettonica e urbana con pratiche di riconoscimento del patrimonio territoriale diffuso in contesti fragili esposti a scenari multirischio. L'obiettivo è lo sviluppo di strategie antifragili integrando pianificazione ordinaria ed emergenziale con azioni community-based attraverso approcci partecipativi basati sul coinvolgimento delle comunità. In questo quadro, la costruzione di una conoscenza condivisa diventa strumento per attivare processi trasformativi che rispondano in modo adattivo e resiliente alle incertezze dell'attuale condizione di "permacrisi".

Parole chiave: Co-progettazione; Rischio; Incertezza; Adattamento; Architettura.

Introduzione

Il tema del rapporto tra rischio e ambiente costruito suggerisce l'esistenza di una profonda relazione tra luoghi, comunità e contesto. Gli approcci integrati con cui vengono affrontate oggi le urgenze legate ai disastri necessitano del contributo delle discipline della composizione architettonica e urbana e del restauro per inquadrare le tematiche del rischio nella dimensione spaziale.

Negli ultimi decenni, la definizione e configurazione degli spazi di città e territori hanno subito cambiamenti radicali in riferimento agli impatti dei rischi naturali ed antropici: l'incertezza – che rappresenta la caratteristica principale della società del rischio (Beck, 1986) e determina nuove complessità spaziali – è da sempre fattore di fragilità per territori e comunità. L'accelerazione dei tempi di ritorno degli eventi disastrosi e la loro maggiore intensità sono fenomeni che aumentano le disuguaglianze spaziali in tutto il mondo (Lobao and Hooks, 2025) generando «nuove geografie» (Galderisi *et al.*, 2020); inoltre, gli scenari multirischio amplificano i processi di abbandono, spopolamento e sottoutilizzo del costruito. Il ruolo delle discipline del progetto è quello di leggere e interpretare queste circostanze, accostando gli obiettivi di resilienza e *preparedness* a quelli di prevenzione.

L'individuazione di strategie, progetti e metodologie per la riduzione del rischio disastri, la loro mitigazione e l'adattamento al cambiamento climatico[1] sono gli obiettivi del progetto RETURN[2], indagati dal gruppo di ricerca con un approccio *community-based* accostando agli impatti dei rischi sui territori una dimensione sociale. La rilevanza di una ricerca condotta attraverso l'applicazione sperimentale di metodologie di co-progettazione architettonica e urbana ai temi del rischio risiede nella velocità dei cambiamenti in atto – climatici, ambientali, socioeconomici, culturali – e negli effetti che questi hanno sia sull'ambiente costruito sia su chi lo abita.

La partecipazione nei processi di trasformazione di contesti a rischio può colmare i possibili divari tra comunità e luoghi,

Architecture, risk, and co-design. Community-based approaches for risk mitigation in Lomellina

Abstract. This paper presents the results of a research project conducted as part of Task 7.4.4 of the PNRR MUR RETURN project. It is based on a multidisciplinary theoretical framework, and adopts a methodology that combines architectural and urban co-design with practices for recognising the widespread territorial heritage in fragile contexts exposed to multi-risk scenarios. The objective is to develop anti-fragile strategies by integrating ordinary and emergency planning with community-based actions through participatory approaches based on people engagement. In this framework, the construction of shared knowledge becomes a tool for activating transformative processes that respond in an adaptive and resilient way to the uncertainties of the contemporary "permacrisis" condition.

Keywords: Co-design; Risk; Uncertainty; Adaptation; Architecture.

Introduction

The topic of the relationship between risk and the built environment suggests the existence of a profound connection between places, communities, and context. The integrated approaches used today to deal with disaster emergencies require the contribution of architectural and urban design, as well as of conservation disciplines to frame risk issues in a spatial dimension.

In recent decades, the definition and configuration of urban and territorial spaces have radically changed in relation to the impacts of natural and anthropic risks. Indeed, uncertainty – which is the main characteristic of «risk society» (Beck, 1986) and determines new spatial complexities – has always been a factor of fragility for territories and communities. The acceleration in the recurrence of disastrous events and their greater intensity are phenomena that increase spatial inequalities throughout the world (Lobao and Hooks, 2025), generating new geographies (Galderisi *et al.*, 2020). Moreover, multi-risk scenarios amplify the processes of abandonment, depopulation, and underuse of buildings. The role of design disciplines is to read and interpret these circumstances, intersecting the objectives of resilience and preparedness with those of prevention.

The RETURN project aims to identify strategies, projects, and methodologies for disaster risk reduction, mitigation, and adaptation to climate change[1,2]. The research group is investigating these objectives by using a community-based approach that combines the social dimension with the impact of risks on local areas. The relevance of a research project conducted through

ISSN online: 2239-0243 | © 2025 Author(s) | http://www.fupress.com/techne | DOI: 10.36253/techne-18634
Open access, peer-reviewed article published by Firenze University Press (https://www.fupress.com) and distributed, except where otherwise noted, under the terms of the CC BY 4.0 License for content and CC0 1.0 Universal for metadata

minacciati dalla crescente incertezza e dal verificarsi di eventi estremi. Se intesi in chiave trasformativa (Till, 2005) e calati in dinamiche di co-produzione di spazi (Petrescu, 2005), i processi partecipativi possono portare allo sviluppo di metodologie di co-progettazione efficaci, in grado di avvicinare le temporalità del progetto a quelle del rischio e di lavorare prima, durante e dopo i disastri (Lari *et al*., 2013).
La necessità di un approccio *ex-ante,* in alternativa agli interventi post-disastro che hanno caratterizzato la maggior parte delle recenti politiche di ricostruzione, risiede nell'inefficacia di queste ultime come azioni preventive. In contrapposizione con la narrazione occidentale dei cambiamenti in atto e delle agende del 2050, «che sembra voler spingere il 'punto di catastrofe' in avanti, in un momento futuro, predeterminato tecnocraticamente» (Post Disaster *et al*., 2023), la ricerca considera gli approcci *community-based* come una «alternativa in architettura» (Ward, 1976)[3] efficace per raggiungere condizioni di antifragilità per territori e comunità.

Proof of Concept: la Lomellina

Interpretando la condizione di "permacrisi"[4] come «un'occasione per innescare cambi di paradigma» (Post Disaster *et al*., 2023), la ricerca mira a sviluppare una metodologia basata sulla co-progettazione attraverso un processo induttivo, applicando i contenuti teorici e gli aspetti rilevanti delle *best practices* ad uno specifico *Proof of Concept* (PoC). Un orientamento *bottom-up* è incarnato dal metodo stesso e dalle dinamiche partecipative adottate, considerando tutti gli attori coinvolti nei processi trasformativi come agenti spaziali (Awan *et al*., 2011), dal progettista-specialista – investito del ruolo stesso di abitante, in aggiunta al suo *expertise* – ai committenti, dagli utenti al pubblico generale (Jenkins e Forsyth, 2010).
Questo metodo induttivo è basato su azioni integrate e co-progettate derivanti dall'analisi di uno specifico ambito territoriale. Il contesto definito come caso studio interessa il territorio sud-occidentale della Lomellina, una "area interna" lombarda posta all'estremo ovest della provincia di Pavia, ai confini con il Piemonte. Topograficamente, si tratta di un territorio della bassa pianura irrigua, ricco di corsi d'acqua che hanno origine dai tre principali fiumi che lo attraversano: il Po, il Sesia e l'Agogna. La presenza di questi e dei loro affluenti torrentizi costituisce sia una risorsa preziosa per la coltivazione del riso, la principale coltura del territorio, sia un rilevante fattore di rischio idraulico (Fig. 1): nel corso della storia, sono stati numerosi i fenomeni alluvionali, anche disastrosi, che hanno minacciato e duramente colpito gli insediamenti situati lungo i corsi d'acqua principali (Fig. 2). Ad eccezione di Vigevano, Mortara, Mede e Sannazzaro de' Burgondi, centri di medie dimensioni e principali poli di servizi essenziali del territorio, la maggior parte dei Comuni della Lomellina conta un numero di residenti inferiore a 5000 persone: questi insediamenti sono solitamente organizzati in un centro abitato principale, dotato delle infrastrutture amministrative e di alcuni servizi essenziali, e da numerose località e frazioni. I centri abitati "capoluogo" sono caratterizzati da un tessuto urbano denso e consolidato, che presenta in alcuni casi espansioni recenti di frangia. Le frazioni coincidono spesso con i nuclei di cascina, posti in maniera puntuale ma diffusa sul territorio: un'impronta che restituisce ancora in modo evidente l'organizzazione, nei secoli, del tessuto abitativo attorno alle

the experimental application of architectural and urban co-design methodologies to risk issues lies in the speed of the changes taking place – climatic, environmental, socioeconomic, and cultural – and in the effects these have on both the built environment and those who live in it.
Participation in the transformation processes of at-risk contexts can bridge the potential gaps between communities and places threatened by growing uncertainty and extreme events. When understood in a «transformative» sense (Till, 2005) and applied to the dynamics of «co-production» of spaces (Petrescu, 2005), participatory processes can lead to the development of effective co-design methodologies that bring the project temporalities closer to those of risk, working «before, during and after disasters» (Lari *et al*., 2013).

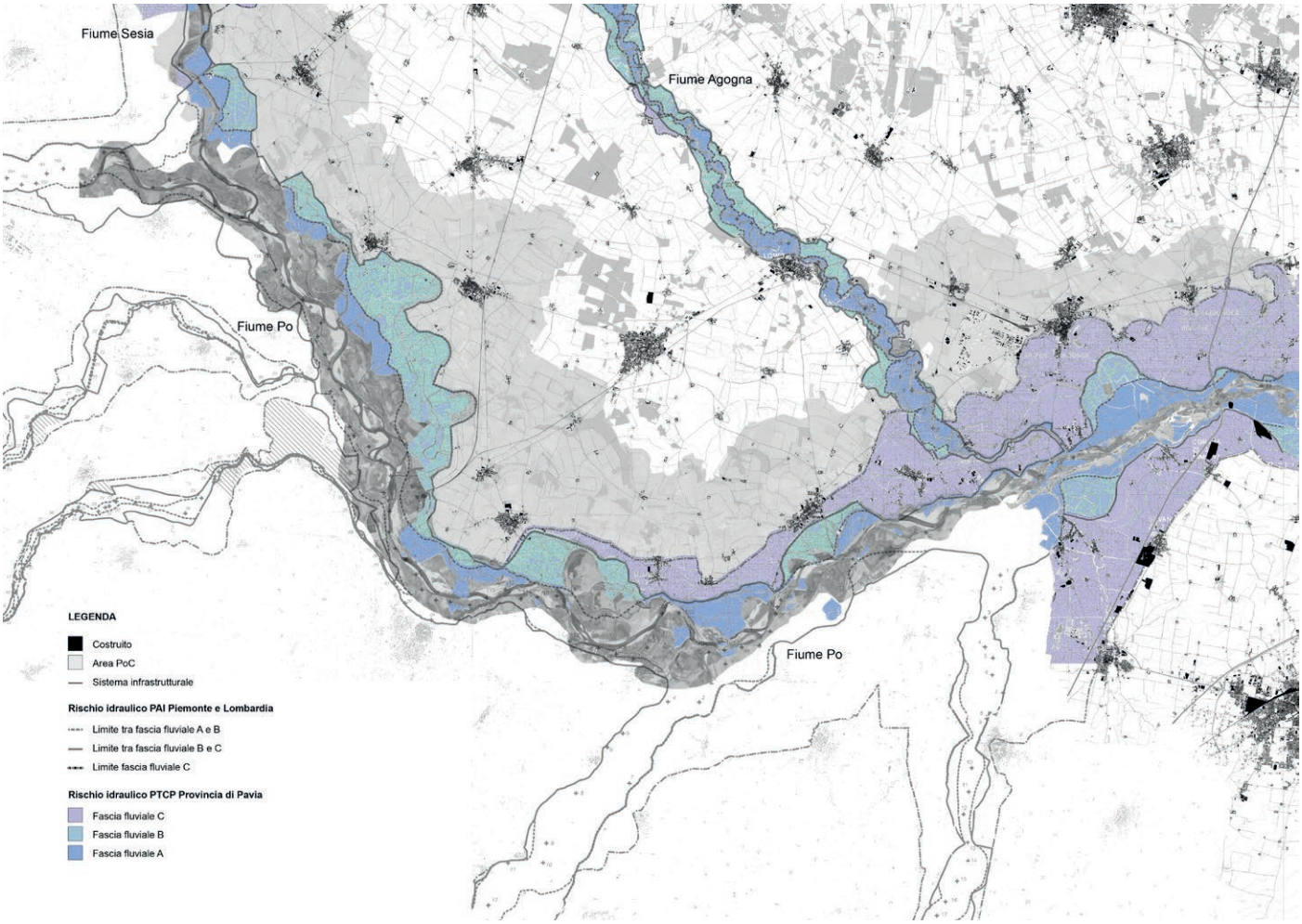
The need for an *ex-ante* approach, as an alternative to the post-disaster interventions that have characterised most recent reconstruction policies, lies in the ineffectiveness of the latter as preventive actions. In contrast to the Western narrative of the changes underway and to the 2050 agendas, which seem to want to push the "catastrophe point" forward into a technocratically predetermined future moment (Post Disaster *et al*., 2023), the research considers community-based approaches as an «alternative in architecture» (Ward, 1976)[3] that is effective in achieving anti-fragility conditions for territories and communities.

Proof of Concept: Lomellina

Interpreting the condition of "permacrisis"[4] as an opportunity to trigger paradigm shifts (Post Disaster *et al*., 2023), the research aims to develop a methodology based on co-design through an inductive process by applying theoretical content and relevant aspects of best practices to a specific Proof of Concept (PoC). A bottom-up approach is embodied by the method itself and the participatory dynamics adopted, considering all actors involved in the transformative processes as spatial agents (Awan *et al*., 2011), from the designer-specialist – invested with the role of inhabitant, in addition to their expertise – to clients, from users to the general public (Jenkins and Forsyth, 2010).
This inductive method is based on integrated and co-designed actions resulting from the analysis of a specific territorial area. The context defined as a case study concerns the southwestern territory of Lomellina, an "inner area" of Lombardy located in the western portion of the province of Pavia, on the border with the Piedmont region. Topographically, it is a low irrigated plain, rich in waterways that originate from the three main rivers that cross it, namely the Po, the Sesia and the Agogna. The presence of these and their torrential tributaries present a valuable resource for rice cultivation, the principal crop in the area, but also a significant hydraulic risk factor (Fig. 1). Throughout history, there have been numerous floods, some of them disastrous, which have threatened and severely affected the settlements located along the main watercourses (Fig. 2). Except for Vigevano, Mortara, Mede and Sannazzaro de' Burgondi, which are medium-sized towns and the main centres for essential services in the area, most of the municipalities in Lomellina have fewer than 5,000 residents. The organisation of these settlements is typically around

01 | Il rischio idraulico in Lomellina
Hydraulic risk in Lomellina

01 |



a primary inhabited centre, which is equipped with administrative infrastructure and some essential services, besides numerous scattered localities. The primary urban centres are distinguished by a dense and consolidated urban fabric, which in certain instances has recently expanded as a fringe into the surrounding areas.
The localities frequently coincide with farmsteads spread throughout the territory, thus providing a clear indication of the organisation of settlements built around rural economic activities over the centuries (Fig. 3). Despite agriculture remaining the primary economic sector in Lomellina, following World War II, the mechanisation of agricultural techniques and the advancement of manufacturing in Vigevano and Mortara contributed to the gradual depopulation of rural settlements. The construction of the ENI (*Ente Nazionale Idrocarburi*) refinery in the municipalities of Sannazzaro de' Burgondi and Ferrera Erbognone — it began operating in 1963 — further exacerbated this dynamic. Although it generated new employment opportunities and promoted the development of the industrial sector, the presence of the refinery also represents one of the main risk factors for the area[5].
The area has been identified as being particularly vulnerable to socio-economic decline and fragmented governance, which have collectively resulted in a fragile environment. Lomellina is also exposed to a multi-risk scenario that includes flooding, drought, industrial hazards and, to a lesser extent, seismic risks, which are further compounded by the effects of climate change.
Twelve municipalities in the Lomellina area were selected for the purposes of the research activities and objectives of the Task[6]. The selection of these municipalities as pilot case studies was based on their exposure to hydraulic risk, due to their location along the Po and Sesia rivers, which have historically been prone to flooding. The impact of climate change on agriculture was also considered, particularly with regard to local rice cultivation. In addition, the potential exposure to industrial risk was considered, due to the presence of two Major Accident Risk (MAR) establishments that handle hazardous substances[7].

Methodology
The methodology adopted by the research, which has the potential for replication and adaptation to other fragile contexts characterised by multi-risk scenarios, is based on three conceptual pillars, precisely prevention and resilience, through the analysis of the urban structure of municipalities and the spatiality of places considered safe or vulnerable in planning tools; regeneration, to promote participatory processes that translate into co-design activities; and co-education, with the aim of strengthening risk awareness among communities and building shared knowledge among the population, local administrators, technicians and specialists.
The proposed inductive research approach is based on the circularity of the methodology itself, which takes the form of a set of interconnected and workable moments (Figs. 4; 5). These phases, consisting of both analytical studies and fieldwork, do not have a predefined degree of participation, but are conceived as open systems. Active citizen participation is regarded as a possibility throughout the entire pro-

02 | La memoria del disastro
The memory of disaster

03 | Insediamenti rurali, edifici e infrastrutture agricole in Lomellina
Rural settlements, buildings, and agricultural infrastructure in Lomellina



| 02


| 03

attività economiche rurali (Fig. 3). Sebbene tutt'oggi l'agricoltura rappresenti il principale settore economico della Lomellina, dopo la Seconda Guerra Mondiale la meccanizzazione delle tecniche e l'avanzare della manifattura a Vigevano e Mortara hanno contribuito a un progressivo spopolamento degli insediamenti a carattere principalmente rurale. La costruzione della raffineria ENI nei Comuni di Sannazzaro de' Burgondi e Ferrera Erbognone, entrata in funzione nel 1963, ha ulteriormente acutizzato questa dinamica: pur avendo generato nuove opportunità occupazionali e favorito lo sviluppo del settore industriale, la presenza dell'impianto rappresenta anche uno dei principali fattori di rischio per il territorio[5].
Le tendenze socioeconomiche negative e la *governance* frammentata hanno reso la Lomellina un territorio fragile, esposto a uno scenario multirischio caratterizzato da alluvioni, siccità, pericoli industriali e, in misura minore, rischi sismici, ulteriormente acutizzato dal cambiamento climatico. Ai fini delle attività di ricerca e degli obiettivi del *Task* sono stati selezionati dodici Comuni della Lomellina come caso studio pilota[6]: la scelta si basa sull'esposizione al rischio idraulico, dovuto alla loro posizione lungo il Po e il Sesia, fiumi storicamente soggetti a esondazioni, all'impatto dei cambiamenti climatici sull'agricoltura, in particolare sulla risicoltura locale e all'esposizione al rischio industriale, per la presenza di due stabilimenti a Rischio di Incidenti Rilevanti (RIR) che trattano sostanze pericolose[7].

Metodologia
La metodologia adottata dalla ricerca, potenzialmente replicabile e adattabile ad altri contesti fragili caratterizzati da scenari multirischio, si fonda su tre pilastri concettuali: quello della

cess, as co-design is viewed within the methodology as both an object and a research tool.
The "zero" phase of the research is represented by an extensive review of scientific and grey literature, as well as of key documents on DRR, DRM and CCA. The literature review was defined to delineate the theoretical scope of the field of investigation, starting from the international reference Frameworks on disaster risk (UNDRR, 2005; UNDRR, 2015). This analysis was accompanied by a review of the state of the art in the management of heritage at risk, also regarding cultural production in architectural and urban co-design in fragile contexts.
The analysis and systematisation of the literature have enabled the placement of the research within a regulatory and bibliographic framework from which certain difficulties in combining the different semantic fields of risk and co-design have been identified. Even though both spheres have been the subject of in-depth disciplinary studies for many years, there is an absence of equally robust cultural production that relates them. Consequently, the study of design references and best practices has assumed a pivotal role, contributing to the delineation of the methodology and its applications.

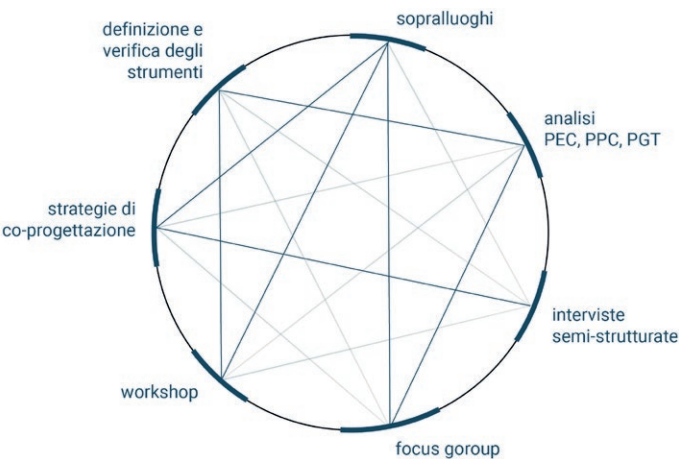
On-field Applications
The first phase of the work programme identified a number of key issues relating to the research questions, starting with an initial round of site visits to the municipalities of the PoC. These on-field activities facilitated the acquisition of direct knowledge through rapid surveys concerning the characteristics of the settlements, the built environ-

04 | La circolarità del processo di ricerca
The circularity of the research process

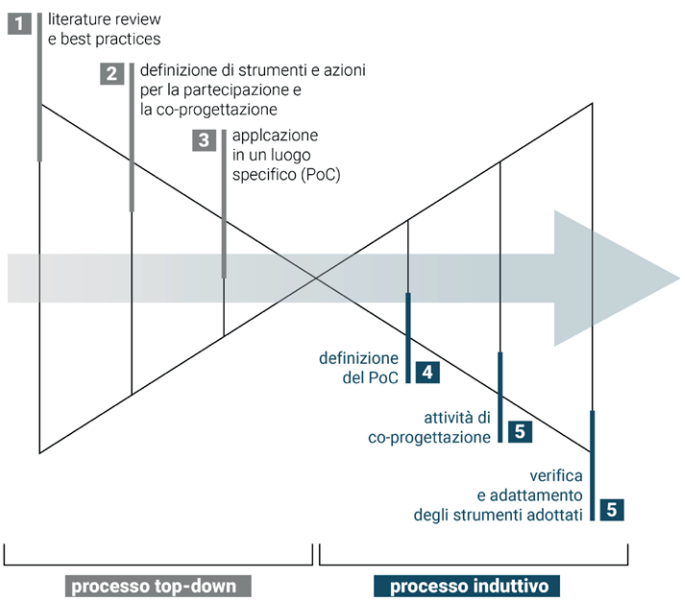
05 | Schema della metodologia di ricerca
Research methodology diagram

prevenzione e resilienza, attraverso l'analisi della struttura urbana dei comuni e delle spazialità dei luoghi considerati sicuri o vulnerabili nella pianificazione; quello della rigenerazione, per promuovere processi partecipativi che si traducano in attività di co-progettazione; e quello della co-educazione, con l'obiettivo di rafforzare la consapevolezza del rischio da parte della comunità e di costruire una conoscenza condivisa tra la popolazione, gli amministratori locali, i tecnici e gli specialisti.
L'approccio di ricerca induttivo proposto si basa sulla circolarità della metodologia stessa, che si configura come un insieme di momenti interconnessi e iterabili (Figg. 4; 5). Questi ultimi, costituiti sia da studi analitici sia da attività di lavoro sul campo, non presentano un grado di partecipazione definito a priori, ma sono concepiti come sistemi aperti. Una partecipazione attiva dei cittadini è infatti ritenuta possibile durante l'intero processo, poiché all'interno della metodologia la co-progettazione è intesa sia come oggetto sia come strumento di ricerca.
Nella fase definibile come "zero" della ricerca è stata condotta una estesa revisione della letteratura scientifica, grigia e dei principali documenti in materia di DRR, DRM e CCA. La *literature review* si è configurata come uno sforzo di perimetrazione teorico del campo di indagine, a partire dai *Framework* di riferimento internazionali sul rischio da disastri (UNDRR, 2005; UNDRR, 2015). A questa analisi è stata affiancata una restituzione dello stato dell'arte sulla gestione del patrimonio a rischio, rispetto anche alla produzione culturale nella co-progettazione architettonica e urbana in contesti fragili.
L'analisi e sistematizzazione della letteratura ha permesso di posizionare la ricerca in un quadro di riferimento normativo e bibliografico, dal quale sono emerse alcune difficoltà nell'accostare i diversi campi semantici del rischio e della co-progettazione. Infatti, sebbene entrambe le sfere siano da anni oggetto di approfonditi studi disciplinari, non esiste una produzione culturale altrettanto solida che le metta in relazione. Per questo motivo lo studio di riferimenti progettuali e *best practices* ha assunto un ruolo di primaria importanza, contribuendo a definire i caratteri della metodologia e le sue applicazioni.

Applicazioni sul campo
La prima fase del lavoro ha identificato alcune questioni culturali rispetto alle domande di ricerca, prendendo avvio da un'iniziale ciclo di sopralluoghi nei comuni del PoC, che ha permesso una conoscenza diretta, anche tramite rilievo speditivo,



| 04



| 05

ment, and open spaces. A particular focus was placed on the relationship between public buildings and their pertaining spaces, with consideration given to both their potential vulnerability to the main risks, and their potential in terms of strategic importance in the various stages of the risk chain. The preliminary on-field work established the basis for the definition and collaborative construction of the application tools developed during the research process.
Concurrently, an initial mapping of local and supra-local actors, along with the relationships between them, was conducted in the twelve PoC municipalities. It facilitated the delineation of the network of institutional stakeholders (e.g., mayors, the director and the president of the Local Action Group) and civil society (e.g., representatives of the local Ecomuseum and of Foundations active in the area, municipal groups of Civil Protection volunteers). These reflections were explored in depth through a dialogue, conducted by means of semi-structured interviews with some of the local actors identified previously, and the drafting of online questionnaires. Community engagement took place gradually, with an initial comparison of local and scientific knowledge during the Task kick-off seminar "*Conoscere per prevenire: approcci, metodi e strumenti partecipativi per comunità resilienti al rischio*" held at the Politecnico di Milano on 4th-5th June 2024.
A thorough analysis of data and cartography was conducted with a focus on risk assessment and the interpretation of emergency documentation (Civil Protection Plans - PPC and Municipal Emergency Plans - PEC). This investigation was undertaken in

dei caratteri degli insediamenti, dell'ambiente costruito e degli spazi aperti. Particolare attenzione è stata posta alla relazione tra gli edifici pubblici e gli spazi di loro competenza, considerandone sia le potenziali vulnerabilità ai principali rischi, sia le potenzialità in termini di strategicità nelle diverse fasi della catena del rischio. Come vedremo, il lavoro sul campo costituisce la base per la definizione e co-costruzione degli strumenti applicativi elaborati nel processo di ricerca.

Parallelamente, è stata disegnata una prima mappatura degli attori locali e sovralocali e delle relazioni esistenti tra questi nei dodici comuni PoC. Essa ha permesso di tracciare la rete *stakeholders* istituzionali (come Sindaci, il Direttore e il Presidente del Gruppo di Azione Locale – GAL), e della società civile (ad esempio i rappresentanti dell'Ecomuseo del Paesaggio Lomellino e di Fondazioni attive nel territorio, gruppi comunali di Volontari della Protezione Civile). Le riflessioni sono state approfondite attraverso un dialogo condotto mediante interviste semi-strutturate con alcuni degli attori locali precedentemente individuati e la stesura di questionari online. Il coinvolgimento della comunità è avvenuto gradualmente, con un iniziale confronto tra conoscenze locali e scientifiche durante il seminario di avvio dal titolo *Conoscere per prevenire: approcci, metodi e strumenti partecipativi per comunità resilienti al rischio* tenutosi al Politecnico di Milano il 4-5 giugno 2024.

Un'analisi dei dati e della cartografia incentrata sul dimensionamento dei rischi e sulla lettura della documentazione di emergenza (Piani di Protezione Civile – PPC e Piani di Emergenza Comunale – PEC) messa a sistema con i documenti che costituiscono la pianificazione territoriale ordinaria (Piani di Governo del Territorio – PGT) è stata preliminare al successivo lavoro sul campo. Questa fase è stata dedicata alla verifica dei luoghi considerati sicuri o vulnerabili dagli strumenti di pianificazione di emergenza o ordinaria, accompagnata da una definizione delle criticità esistenti del costruito e degli spazi aperti. Un'attenzione particolare è stata data alla forma e alla sezione territoriale degli insediamenti, al fine di spazializzare il rischio e comprenderne le relazioni con i caratteri tipologici e morfologici del tessuto urbano.

Una seconda fase è stata avviata nell'ottobre del 2024 con un *focus group* con Enti locali, Terzo Settore e comunità presso la sede del GAL Risorsa Lomellina a Mede (Pavia). Questo momento è stato dedicato alla costruzione di una conoscenza condivisa del rischio sul territorio, attraverso attività di mappatura partecipata con le comunità (Fig. 6). Gli spazi sicuri e i luoghi vulnerabili dell'area sono stati confrontati con quelli identificati dalla pianificazione studiata nella prima fase della ricerca. Il *focus group* ha permesso di individuare anche gli edifici e gli spazi aperti considerati "identitari" per le comunità, in alcuni casi coincidenti con i luoghi "sicuri" o "vulnerabili". La divergenza in alcuni dei risultati ottenuti è stata un elemento di studio necessario per lo sviluppo delle fasi successive della ricerca. Il passaggio successivo è dedicato allo sviluppo di strumenti per il coinvolgimento della comunità nelle trasformazioni spaziali legate a DRR, DRM e CCA. Un primo strumento è costituito da due tracciati schedografici – una scheda di rilievo partecipato degli edifici e una per gli spazi aperti – pensati per verificare e valutare sia in fase *ex-ante* sia *ex-post* l'adeguatezza degli spazi individuati come strategici e/o sicuri dagli strumenti di pianificazione di emergenza. Seguendo i tre pilastri delle strategie di ricerca, è stato definito un progetto di comunicazione attra-

conjunction with the analysis of documents that constitute ordinary territorial planning (Territorial Government Plans - PGT). This preparatory phase preceded the subsequent fieldwork, entailing the verification of locations deemed safe or vulnerable by emergency or ordinary planning tools, accompanied by the delineation of the prevailing critical issues pertaining to the built environment and open spaces. Particular attention was paid to the shape and territorial section of the settlements to spatialise the risk and understand its relationship with the typological and morphological characteristics of the urban fabric.

A second phase started in October 2024, and consisted of a focus group involving local authorities, the third sector and communities. The event took place at the headquarters of the Local Action Group *Risorsa Lomellina* in Mede (Pavia). This phase was dedicated to the definition of a shared understanding of risk in the area through participatory mapping activities with the communities (Fig. 6). The safe spaces and vulnerable places in the area were then compared with those identified by the planning tools analysed in the first phase of the research. The focus group also facilitated the identification of buildings and open spaces considered "identitarian" for the communities, which in some cases coincided with "safe" or "vulnerable" places. The presence of a divergence in some of the results obtained was an essential component of the study, which was fundamental to the subsequent phases of the research.

The next step is dedicated to the development of tools for community involvement in spatial transformations related to DRR, DRM and CCA. A first tool consists of two participatory survey forms – one for buildings and one for open spaces – designed to verify and assess, both *ex-ante* and *ex-post*, the adequacy of spaces identified as strategic and/or safe by emergency planning tools. Following the three pillars of the research strategies, a communication project was then defined by designing images to explain risk factors, the correct use of space, and the behaviour to adopt in an emergency. The tools respond to the need for a common language within the community through a practical learning process involving both specialists and non-experts.

With a view to the circularity of the proposed methodology, the participatory survey forms were structured based on issues that emerged during discussions with local stakeholders, on-field tested with a series of organised exercises, and modified where necessary. The critical issues and potentialities that emerged during the participatory survey activities were the subject of a co-design workshop held on 18th October 2025. Two working round tables made up of community representatives, Civil Protection volunteers, and the research group addressed the issues of transforming and adapting safe places – buildings and open spaces – in the municipality of Sannazzaro de' Burgondi (Figs. 7; 8). This moment of collective action made it possible to lay the foundations for the development of a community-based architectural project, and also to raise the community's awareness and spatial thinking around risk issues.

06 | *Focus group* e mappatura partecipata: Sannazzaro de' Burgondi
Focus group and co-mapping: Sannazzaro de' Burgondi

06 |



Building shared knowledge: towards a collective spatial education

The definition of DRR, DRM, and CCA strategies that integrate participatory approaches to policy spatialisation is now a topic of renewed interest, although risk and co-design are already shared and discussed themes in the fields of architectural and urban design, and conservation.

An innovative element lies in considering the built environment and design actions not as formal solutions, but as tools derived from a process of shared knowledge construction. Since the relationships between social groups and their physical environment do not occur according to linear processes (De Carlo, 1972), a community-based approach oriented to co-design is essential in multi-risk scenarios such as Lomellina. In this context, participatory processes, in addition to promoting more equitable and anti-fragile conditions, can contribute to the formation of risk awareness within the built environment. Co-design of transformations in exposed areas can thus trigger dynamics of shared spatial learning among all the actors engaged. The idea of collective awareness as the co-educational effect of co-design actions is one of the possible contemporary interpretations of participation, alongside community empowerment, and creative collaboration among people. As we have seen, these methods require a transformative approach, and lead to forms of spatial co-production.

Some recent virtuous experiences of architectural co-design in emergency contexts have set the stage to spread common spatial education linked to the relationship between risk and the built environment. Some examples include Yasmeen Lari's experience with Barefoot Social Architecture; that of Marco Navarra and the Riparare Fiumare research group in the *Strategic Plan for Giampilieri* (Navarra and Adamo, 2017); the experiences of Atelier Bow-Wow, VAN and Home-For-All networks in Japan; Semillas Peru in South America; the Italian experimentations of ViviamolaQ, Laboratorio Alta Valle Aterno, the Camposaz workshops, and numerous other young practitioners dealing with risk, uncertainty, and built environment.

Openings

The growing intensity and frequency of catastrophic events requires the community of technicians and experts to become more aware of the current state of "permacrisis", and of their role within design communities, although – as we have seen – the establishment of a risk-based design culture has already begun, and co-design experiences in fragile contexts have produced significant results in DRR, DRM, and CCA.

It will thus be possible to promote design not "for" or even 'with' people, but "by" them, through *inter pares* activities (Paolella, 2017) that enhance the skills of each actor engaged, a circumstance that only shared languages and intentions can achieve:

«Quanto a noi (perché anche noi siamo investiti dall'onda dell'esplosione di rifiuto), cominciamo ad avere il dubbio che il nostro ruolo, oltre a essere precario, è anche ambiguo e che forse occorre revisionare il modo di fare architettura per restituire legittimità a noi stessi e all'architettura. Possiamo allora dire che siamo pronti a cambiare direzione? Forse possiamo dire soltanto che la nuova direzione è aperta e che rappresenta una concreta

07 | Workshop di co-progettazione: tavolo "edifici"
Co-design workshop: round table about buildings

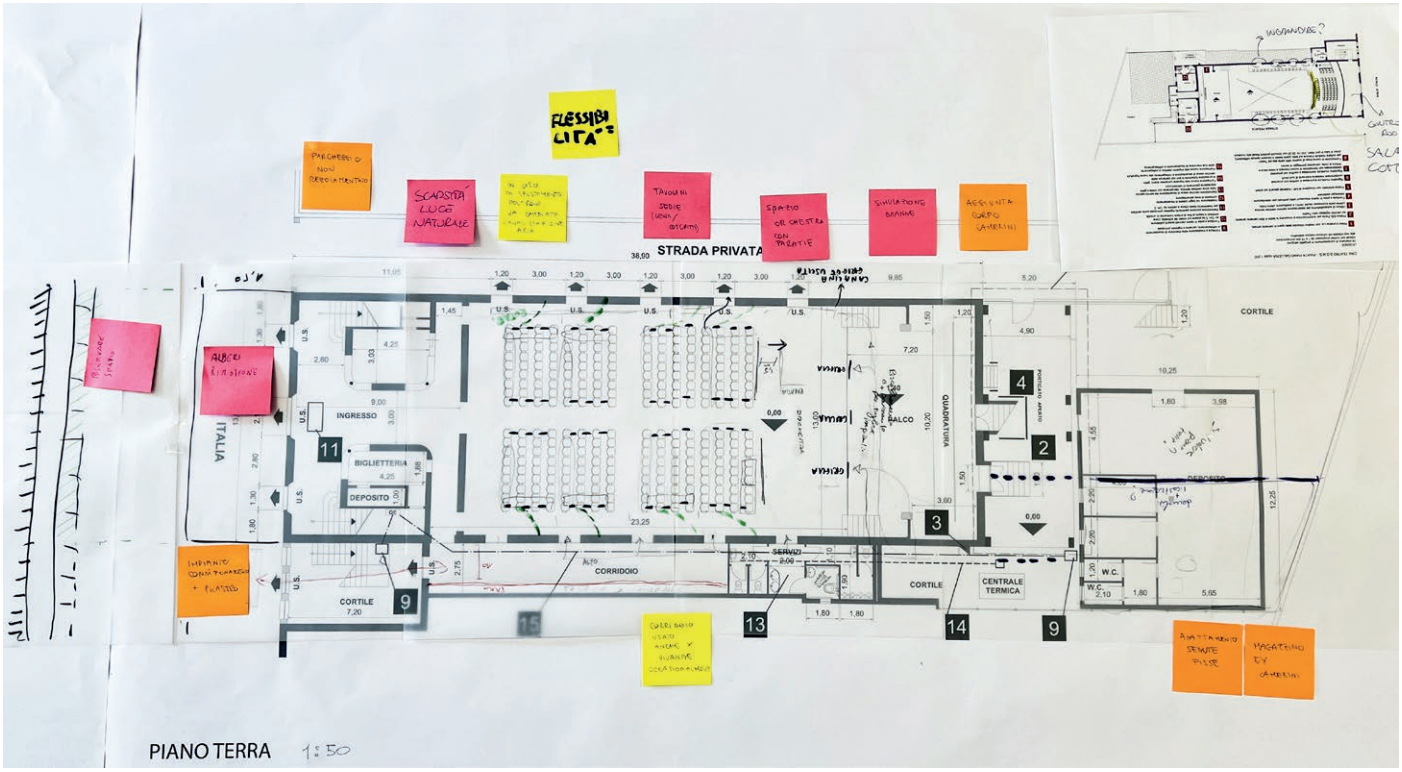
verso immagini per la comprensione dei fattori di rischio, l'uso corretto dello spazio e i comportamenti da adottare in caso di emergenza. Entrambi gli strumenti propongono una risposta all'esigenza di un linguaggio comune all'interno della comunità attraverso un processo di apprendimento pratico che ha coinvolto sia specialisti sia non esperti.

Nell'ottica della circolarità della metodologia proposta, le schede di adeguatezza dei luoghi sono state strutturate a partire dalle questioni emerse nei momenti di confronto con gli attori locali, testate sul campo con una serie di esercitazioni organizzate con la comunità e modificate dove necessario. Le criticità e le potenzialità emerse durante le attività di rilievo partecipato sono state oggetto di un workshop di co-progettazione svoltosi il 18 ottobre 2025: due tavoli di lavoro costituiti dai rappresentanti della comunità, dai volontari di Protezione Civile e dal gruppo di ricerca hanno affrontato i temi della trasformazione e dell'adattamento dei luoghi sicuri – edifici e spazi aperti – nel comune di Sannazzaro de' Burgondi (Figg. 7; 8). Questo momento di azione collettiva ha permesso, da un lato, di gettare le basi per lo sviluppo di un progetto di architettura *community-based*, dall'altro di accrescere la consapevolezza della comunità e il proprio pensiero spaziale attorno ai temi del rischio.

La costruzione di una conoscenza condivisa: verso un'educazione spaziale collettiva

La definizione di strategie di DRR, DRM e CCA che integrino approcci partecipativi nella spazializzazione delle politiche costituisce oggi un elemento di rinnovato interesse, sebbene il rischio e la co-progettazione siano già temi condivisi e discussi nell'ambito della composizione architettonica, urbana e del restauro.

Uno degli elementi di innovazione risiede nel considerare lo spazio costruito e le azioni progettuali non come soluzioni formali, ma come strumenti derivanti da un processo di costruzione di conoscenza condivisa. Poiché le relazioni tra i gruppi sociali e il loro ambiente fisico «non avvengono secondo processi lineari biunivoci» (De Carlo, 1972), un approccio *community-based* orientato alla co-progettazione è essenziale negli scenari multirischio come quello della Lomellina. In questo contesto, i processi partecipativi, oltre a favorire condizioni più eque e antifragili, possono contribuire alla formazione di una consapevolezza del rischio nell'ambiente costruito; la co-progettazione delle trasformazioni in aree esposte può così innescare dinamiche di apprendimento spaziale condiviso tra tutti gli attori coinvolti. L'idea di una coscienza collettiva come esito di un'azione co-educativa della co-progettazione rappresenta una delle



07

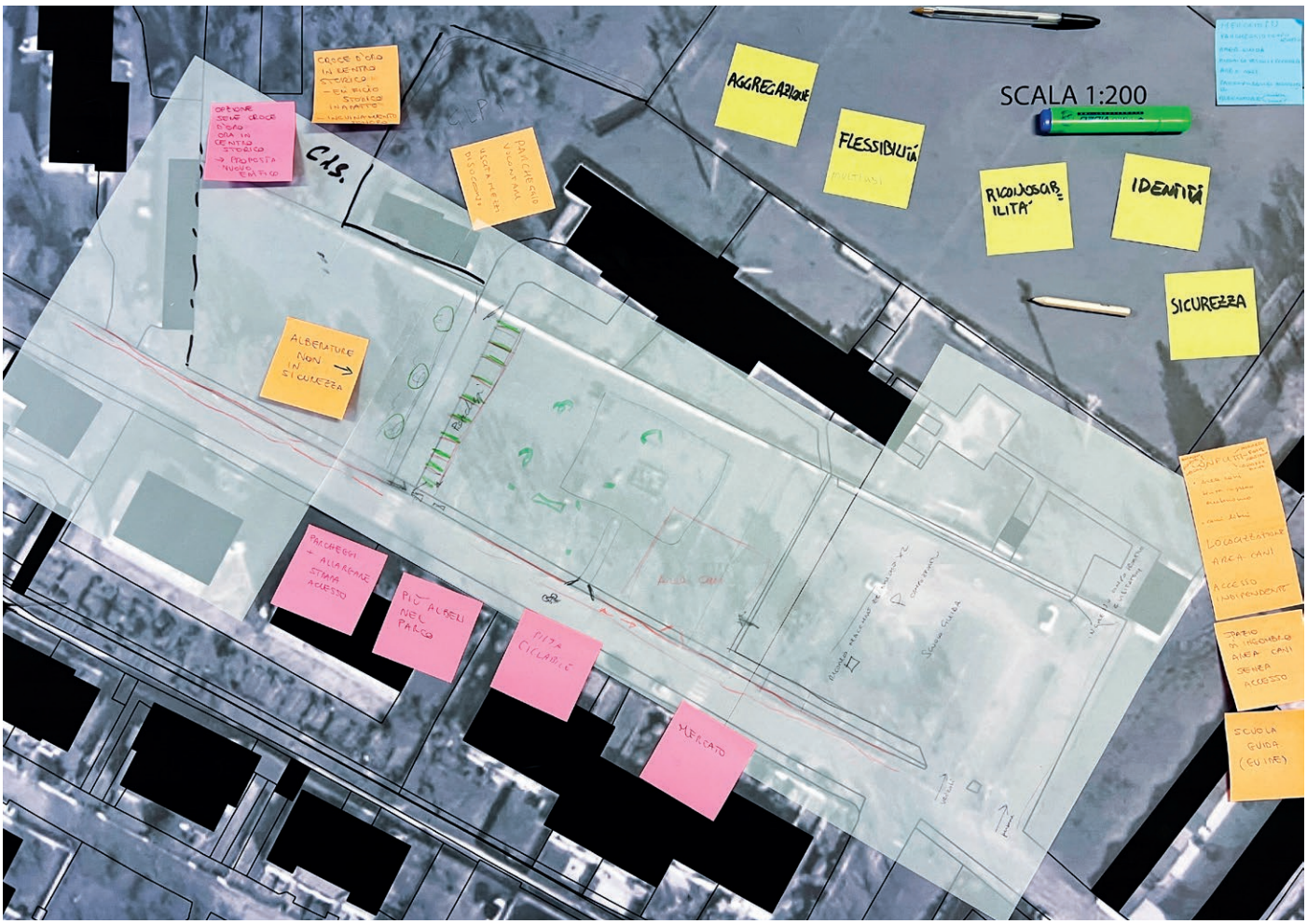
08 | Workshop di co-progettazione: tavolo "spazi aperti"
Co-design workshop: round table about open spaces

possibili interpretazioni contemporanee della partecipazione, accanto all'*empowerment* delle comunità e alla collaborazione creativa degli individui. Si tratta di modalità che, come visto, presuppongono un approccio trasformativo e aprono la strada a forme di co-produzione spaziale.
Alcune recenti esperienze virtuose di co-progettazione architettonica in contesti emergenziali hanno gettato le basi per una diffusione del concetto di co-educazione spaziale relativa al rapporto tra rischio e ambiente costruito. L'esperienza di Yasmeen Lari con la *Barefoot Social Architecture;* quella di Marco Navarra e del gruppo di ricerca Riparare Fiumare nel *Piano Strategico per Giampilieri* (Navarra e Adamo, 2017); le esperienze di Atelier Bow-Wow, le reti VAN e Home-For-All in Giappone; Semillas Peru in Sudamerica; le sperimentazioni italiane di ViviamolaQ, Laboratorio Alta Valle Aterno, i workshop di Camposaz e numerose altre giovani realtà che si occupano di rischio, incertezza e ambiente costruito.

Aperture

La crescente intensità e frequenza degli eventi catastrofici richiede che la comunità di tecnici ed esperti assuma maggiore consapevolezza della condizione di "permacrisi" contemporanea e del proprio ruolo all'interno di comunità progettanti, sebbene – come si è visto – l'affermazione di una cultura progettuale del rischio sia già iniziata e le esperienze di co-progettazione in contesti fragili abbiano prodotto esiti significativi anche nelle DRR, DRM e CCA.
In questo modo, sarà possibile promuovere «una progettazione non 'per', e nemmeno 'con', ma 'dei' cittadini, attraverso una attività *inter pares*» (Paolella, 2017) che valorizzi le competenze di ciascun attore coinvolto, una circostanza che solo un'attività condivisione di linguaggi ed intenti può realizzare:
«Quanto a noi (perché anche noi siamo investiti dall'onda dell'esplosione di rifiuto), cominciamo ad avere il dubbio che il nostro ruolo, oltre a essere precario, è anche ambiguo e che for-

08 |



se occorre revisionare il modo di fare architettura per restituire legittimità a noi stessi e all'architettura. Possiamo allora dire che siamo pronti a cambiare direzione? Forse possiamo dire soltanto che la nuova direzione è aperta e che rappresenta una concreta alternativa, nel presente» (De Carlo, 1972, 67).
L'architettura partecipata e la co-progettazione sono un veicolo per questo necessario cambio di rotta, guardando alle utopie realistiche (De Carlo, 1972), alle utopie domestiche (Kroll, 1996) e alle utopie realizzabili (Friedman, 2003) come ambienti culturali per lo sviluppo di visioni alternative.
L'architettura deve quindi essere la materia di lavoro di un pensiero complesso (Morin e Kern, 1999): questo deve essere incluso nella formulazione di strategie applicate alla progettazione architettonica, alla pianificazione urbana e al progetto di restauro in maniera adattabile alle caratteristiche dei diversi contesti sociali e territoriali. Fondandosi su principi induttivi, l'elaborazione di azioni di coinvolgimento delle comunità e l'organizzazione di attività partecipate – workshop, *focus group*, seminari, interviste, attività di autocostruzione – costituisce il vero apparato di azioni conoscitive e trasformative che configura il progetto stesso. Tuttavia, per renderla realmente sensibile alle questioni contemporanee, è necessario ripensare la co-progettazione architettonica «al di fuori degli schemi tradizionali» (Navarra e Adamo, 2017), esplorando nuovi orizzonti di ricerca e ridefinendo il ruolo dell'architetto: non più solo specialista, ma membro della comunità e utente di uno spazio condiviso e incerto, capace di affrontare il rischio non soltanto in senso scientifico, ma anche attraverso la costruzione di una conoscenza collettiva che coinvolga e responsabilizzi le comunità.

ATTRIBUZIONE, RICONOSCIMENTI, DIRITTI D'AUTORE
Studio condotto nell'ambito del Partenariato Esteso RETURN, finanziato dall'Unione Europea – NextGenerationEU (Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza – PNRR, Missione 4 Componente 2, Investimento 1.3 - D.D. 1243 2/8/2022, PE0000005). I disegni sono di Francesco Airoldi e Stefano Sartorio, le fotografie di Francesca Vigotti.

NOTE

[1] Nel testo sono utilizzate le sigle DRR: *Disaster Risk Reduction*; DRM: *Disaster Risk Mitigation*; CCA: *Climate Change Adaptation*.

[2] Progetto PNRR MUR RETURN: *Multi-Risk sciEnce for resilienT commUnities undeR a changiNg climate*. Spoke TS3 *Communities' resilience to risks: social, economic, legal and cultural dimensions* (Spoke Leader Fabio Castelli, Università degli Studi di Firenze; Co-Leaders Marina Morando, Nicola Rebora, CIMA Research Foundation). Work Package 4 *Community-Based (CB) approaches, codesign and policies* (WP Leader Marina Morando, CIMA Research Foundation). Task 7.4.4 *New Approach in Integrated Planning Based on Co-Design Processes for DRR and CCA Policies.* Unità DAStU: Emilia Corradi (Responsabile Scientifico), Daniele Chiffi, Cassandra Cozza, Francesca Vigotti, Camillo Frattari, Pavel Janda, Stefano Sartorio, Francesco Airoldi. Riferimenti al sito web della Fondazione Return, www.fondazionereturn.it (Accessed on: 03/08/2025).

[3] Tra le «alternative in architettura» che Colin Ward annovera nel suo saggio del 1976, gli approcci *community-based* possono essere riferiti alla «alternativa adattiva», a quella della «controcultura» e al «quinto approccio alternativo» (Ward, 1976).

[4] "Permacrisi" è un neologismo che deriva dal precedente "policrisi". Il *Collins Dictionary* – che l'ha nominata parola dell'anno 2022 – definisce la "permacrisi" come «un periodo prolungato di instabilità e insicurezza, in particolare quello che deriva da una serie di eventi catastrofici».

alternative, nel presente» (De Carlo, 1972, 67).
Participatory architecture and co-design are a vehicle for this necessary change of direction, looking to realistic utopias (De Carlo, 1972), domestic utopias (Kroll, 1996), and realisable utopias (Friedman, 2003) as cultural environments for the development of alternative visions.
Architecture must, therefore, be the subject of complex thinking (Morin and Kern, 1999). This must be included in the formulation of strategies applied to architectural design, urban planning, and restoration projects in a way that is adaptable to the characteristics of different social and territorial contexts. Based on inductive principles, the development of community engagement actions and the organisation of participatory activities – workshops, focus groups, seminars, interviews, self-construction activities – constitutes the true apparatus of cognitive and transformative actions that shapes the project itself. However, in order to make it truly responsive to contemporary issues, it is necessary to rethink architectural co-design outside the box (Navarra and Adamo, 2017) by exploring new horizons of research and redefining the role of the architect. He is no longer just a specialist, but a member of the community, and user of a shared and uncertain space, capable of addressing risk not only in a scientific sense, but also through the construction of collective knowledge that involves and empowers communities.

ATTRIBUTION, ACKNOWLEDGMENTS, COPYRIGHT
Study conducted as part of the RETURN Extended Partnership, funded by the European Union – NextGenerationEU (Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza – PNRR, Missione 4 Componente 2, Investimento 1.3 - D.D. 1243 2/8/2022, PE0000005).
Drawings are by Francesco Airoldi and Stefano Sartorio, photographs are by Francesca Vigotti.

NOTES

[1] The text uses the following abbreviations: DRR: Disaster Risk Reduction; DRM: Disaster Risk Mitigation; CCA: Climate Change Adaptation.

[2] PNRR MUR Project RETURN: *Multi-Risk sciEnce for resilienT commUnities undeR a changiNg climate*. Spoke TS3 *Communities' resilience to risks: social, economic, legal and cultural dimensions* (Spoke Leader Fabio Castelli, Università degli Studi di Firenze; Co-Leaders Marina Morando, Nicola Rebora, CIMA Research Foundation). Work Package 4 *Community-Based (CB) approaches, codesign and policies* (WP Leader Marina Morando, CIMA Research Foundation). Task 7.4.4 *New Approach in Integrated Planning Based on Co-Design Processes for DRR and CCA Policies.* DAStU Research Unit: Emilia Corradi (Scientific Director), Daniele Chiffi, Cassandra Cozza, Francesca Vigotti, Camillo Frattari, Pavel Janda, Stefano Sartorio, Francesco Airoldi. Reference to the website of Fondazione Return, www.fondazionereturn.it (Accessed on: 03/08/2025).

[3] Within the «alternatives in architecture» that Colin Ward lists in his 1976 essay, community-based approaches can be referred to as the «adaptive alternative», the «counterculture alternative», and the «fifth alternative» (Ward, 1976).

[4] "Permacrisis" is a neologism derived from the earlier "policrisis". The Collins Dictionary – which named it *word*

[5] Per approfondimenti sulle dinamiche presenti nel territorio, si veda il sito https://www.altrelombardie.polimi.it/ (Accessed on: 10/09/2025) che restituisce il *Ritratto Territoriale* della Lomellina.

[6] L'area di ricerca comprende i Comuni di Pieve Albignola, Sannazzaro de' Burgondi, Ferrera Erbognone, Mezzana Bigli, Pieve del Cairo, Suardi, Gambarana, Frascarolo, Torre Beretti e Castellaro, Sartirana Lomellina, Breme e Candia Lomellina.

[7] Si fa riferimento alla Direttiva 2012/18/UE (Direttiva Seveso III) del Parlamento Europeo e del Consiglio del 4 luglio 2012 sul controllo del pericolo di incidenti rilevanti con sostanze pericolose.

REFERENCES

Awan, N., Schneider, T. and Till, J. (2011), *Spatial Agency: Other Ways of Doing Architecture,* Routledge, London. Available at: https://doi.org/10.4324/9781315881249 (Accessed on 13/03/2026).

Beck, U. (1992) [1986], *Risk Society: Towards a New Modernity*, Sage Publications, London. Available at: https://books.google.com.sv/books?id=W2sDTHaSiiYC&printsec=frontcover&hl=it#v=onepage&q&f=false (Accessed on 14/03/2026).

De Carlo, G. (1972), "L'architettura della partecipazione", in Marini, S. (Ed.) (2013), *Giancarlo De Carlo: L'architettura della partecipazione,* Quodlibet, Macerata, pp. 37-78. Available at: https://books.google.it/books/about/L_architettura_della_partecipazione.html?id=n0feXwAACAAJ&redir_esc=y (Accessed on 14/03/2026).

Friedman, Y. (2003), *L'architettura di sopravvivenza, una filosofia della povertà*, Bollati Boringhieri Editore, Torino. Available at: https://books.google.de/books?id=4Iqt0AEACAAJ&hl=it&source=gbs_book_other_versions (Accessed on 14/03/2026).

Galderisi, A., Di Venosa, M., Fera, G. and Menoni, S. (Eds.), *Geografie del rischio: nuovi paradigmi per il governo del territorio*, Donzelli Editore, Roma. Available at: https://hdl.handle.net/11591/434162 (Accessed on 14/03/2026).

Jenkins, P. and Forsyth, L. (2010), *Architecture, Participation and Society*, Routledge, New York. Available at: https://doi.org/10.4324/9780203869499 (Accessed on 14/03/2026).

Kroll, L. (1996), *Ecologie Urbane*, in Cavallari, L. (Ed.) (2001), *Lucien Kroll: Ecologie Urbane* Franco Angeli, Milano. Available at: http://hdl.handle.net/11564/103307 (Accessed on 14/03/2026).

Lari, Y., Meadows, A. and Meadows, P.S. (2013), *Disaster Preparedness Manual*, Heritage Foundation of Pakistan, Karachi. Available at: https://www.gla.ac.uk/media/Media_445671_smxx.pdf (Accessed on 14/03/2026).

Lobao, L.M. and Hooks, G. (2025), *Rethinking Spatial Inequality,* Edward Elgar Publishing, Cheltenham. Available at: https://doi .org /10 .4337 /9781803926131 (Accessed on 14/03/2026).

Morin, E. and Kern, A.B. (1991), *Terre-Patrie,* Éditions du Seuil, Paris. Available at: https://doi.org/10.20396/ideias.v2i2.8677866 (Accessed on 14/03/2026).

Navarra, M. and Adamo, L. (Ed.) (2017), *Terre fragili: Architettura e catastrofe*, Letteraventidue, Siracusa. Available at: https://issuu.com/letteraventidue/docs/tf_issuu (Accessed on 14/03/2026).

Paolella, A. (2017), *Partecipare l'architettura: Ovvero come progettare nella comunità,* Luigi Pellegrini Editore, Cosenza. Available at: https://www.pellegrinieditore.it/partecipare-larchitettura/ (Accessed on 14/03/2026).

Petrescu, D. (2005), "Losing Control, Keeping Desire", in Blundell Jones, P., Petrescu, D. and Till, J. (Eds.), *Architecture & Participation*, Taylor & Francis, London, pp. 43-63. Available at: https://doi.org/10.4324/9780203022863 (Accessed on 14/03/2026).

Post Disaster, Calderoni, S., Caleo, I. and Fosbury Architecture, "Convivere con il disastro ambientale", in Fosbury Architecture (Eds.), *Spaziale. Ognuno appartiene a tutti gli altri*, Humboldt Books, Milano, pp. 34-43. Available at: https://www.humboldtbooks.com/en/book/spaziale/ (Accessed on 14/03/2026).

Till, J. (2005), "The Negotiation of Hope", in Blundell Jones, P., Petrescu, D. and Till, J. (Eds.), *Architecture & Participation*, Taylor & Francis, London, pp. 23-41. Available at: https://doi.org/10.4324/9780203022863 (Accessed on 14/03/2026).

UNDRR (Eds.) (2005), *Hyogo Framework for Action (2005-2015)*, UNDRR, Geneva. Available at: https://www.unisdr.org/files/1037_hyogoframeworkforactionenglish.pdf (Accessed on 09/09/2025).

UNDRR (Eds.) (2015), *The Sendai Framework for Disaster Risk Reduction (2015-2030)*, UNDRR, Geneva. Available at: https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction- 2015-2030 (Accessed on 08/09/2025).

Ward, C. (1976), "Alternatives in Architecture", in Borella, G. (Ed.) (2016), *Colin Ward: Architettura del Dissenso,* Elèuthera, Milano, pp. 19-33. Available at: https://www.perlego.com/book/1096652/architettura-del-dissenso-forme-e-pratiche-alternative-dello-spazio-urbano-pdf (Accessed on 08/09/2025).

of the year for 2022 – defines "permacrisis" as «an extended period of instability and insecurity, resulting from a series of catastrophic events».

[5] For further information on the dynamics present in Lomellina, see the website https://www.altrelombardie.polimi.it/ (Accessed on: 10/09/2025).

[6] The Proof of Concept includes the municipalities of Pieve Albignola, Sannazzaro de' Burgondi, Ferrera Erbognone, Mezzana Bigli, Pieve del Cairo, Suardi, Gambarana, Frascarolo, Torre Beretti and Castellaro, Sartirana Lomellina, Breme and Candia Lomellina.

[7] Reference to the Directive 2012/18/Eu of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on the control of major-accident hazards involving dangerous substances, amending and subsequently repealing Council Directive 96/82/EC.

Febbre di Lassa: una revisione di tre centri di trattamento in Nigeria

Francesca De Filippi[1], https://orcid.org/0000-0002-8236-3862 francesca.defilippi@polito.it
Francesca Pagano[1], https://orcid.org/0009-0009-4643-8263 francesca.pagano@polito.it
Michele Di Marco[1,2], https://orcid.org/0009-0009-5407-7576 michele.dimarco@polito.it
Luca Fontana[2], https://orcid.org/0000-0002-8614-4114 fontanal@who.int
Anna Silenzi[2], https://orcid.org/0000-0002-3893-8171 silenzia@who.int
[1] Dipartimento di Architettura e Design, Politecnico di Torino, Italia
[2] Organizzazione Mondiale della Sanità, Operations Support and Logistic, Ginevra, Svizzera

Abstract. Durante le epidemie di febbre di Lassa, i Centri di Trattamento (CT) sono cruciali per la cura e il controllo della trasmissione, ma la loro progettazione resta poco esplorata. Lo studio analizza tre CT in Nigeria con approccio di reverse-engineering. I risultati mostrano differenze in capacità, zonizzazione e integrazione dei servizi, con effetti su controllo delle infezioni, sicurezza del personale e inclusività. Emergono tendenze ricorrenti e lacune critiche; viene proposto un set di indicatori spaziali e le evidenze cross-case sono tradotte in principi di design per i CT. Lo studio propone un quadro per standard progettuali a supporto della gestione dei focolai e richiama la necessità di strutture adattabili e ricerche che colleghino il design a esiti sanitari ed esperienza dei pazienti.

Parole chiave: Febbre di Lassa; Centri di trattamento; Design; Salute materna e neonatale; Reverse engineering.

Introduzione

La febbre di Lassa (Lassa Fever, LF) è una malattia virale emorragica (Viral Hemorrhagic Fever, VHF) endemica dell'Africa occidentale, con un'incidenza annua stimata tra 100.000 e 300.000 casi e un tasso di letalità di circa il 15% tra i pazienti ospedalizzati (Naeem *et al*., 2023).

I primi casi nell'uomo furono segnalati negli anni Cinquanta e il virus identificato nel 1969. L'infezione avviene attraverso il contatto con roditori infetti o con i loro escreti; la trasmissione secondaria tra esseri umani è legata all'esposizione a fluidi corporei infetti o superfici contaminate (Goeijenbier *et al*., 2013; Redding *et al*., 2021). Le donne in gravidanza costituiscono uno dei gruppi più vulnerabili, con tassi di mortalità fino al 30% nel terzo trimestre e perdita fetale superiori all'80% (Price *et al*., 1988; Finnegan *et al*., 2004; Shehu *et al*., 2018; Chaudhary *et al*., 2025).

La trasmissione nosocomiale ha avuto un ruolo centrale nelle epidemie di LF, dai primi casi in Nigeria, Liberia e Togo (Balogun, Akande e Hamer, 2020). Nelle aree endemiche, gran parte dei focolai si è sviluppata all'interno di strutture sanitarie, evidenziando le conseguenze di sistemi di Prevenzione e Controllo delle Infezioni (PCI) inadeguati o non funzionanti (Fisher-Hoch, 2005; Kernéis *et al*., 2009). La prevenzione richiede l'applicazione rigorosa dei protocolli PCI per limitare la trasmissione tra pazienti, operatori sanitari (OS) e assistenti familiari.

La Nigeria sostiene il maggiore carico di LF, con oltre 5.000 casi confermati dal 2020 e il ripetersi di epidemie dal 2018. Tra gennaio 2018 e dicembre 2024, il 75% dei casi confermati è stato registrato negli stati di Ondo (33%), Edo (31%) e Bauchi (11%); nello stesso periodo 212 OS sono stati contagiati, pari al 4% del totale dei casi, con una concentrazione prevalente negli stessi stati (NCDC, 2022).

In continuità con precedenti analisi sui CT per Ebola e Marburg (ETC, MTC) (Fontana *et al*., 2024), questo studio si concentra su strutture permanenti per LF in Nigeria, paese in cui la malattia è endemica, ed esplora come soluzioni spaziali più efficaci possano rispondere ai bisogni di salute materna e neonatale.

Nonostante i progressi nella gestione clinica della LF (Alli *et al*., 2021; Doohan *et al*., 2024), la progettazione dei CT rima-

Lassa fever: A review of three treatment centres in Nigeria

Abstract. During Lassa fever outbreaks, Treatment Centres (TCs) are critical for patient care and transmission control, yet their design remains underexplored. The study analyses three TC in Nigeria, using a reverse-engineering approach. Findings reveal major differences in capacity, zoning, and service integration, with implications for infection control, staff safety, and inclusivity. Recurring layout trends and critical gaps are identified; a set of spatial indicators is proposed and cross-case results are translated into design principles for LF centres. The work offers a framework for developing design standards to strengthen outbreak management, and highlights the need for adaptable facilities and future research to define indicators linking design with health outcomes and patient experience.

Keywords: Lassa fever; Treatment centres; Design; Maternal and neonatal health; Reverse engineering.

Introduction

Lassa fever (LF) is a viral haemorrhagic disease endemic to West Africa, with an estimated annual incidence of 100,000 to 300,000 cases, and a Case Fatality Rate (CRF) of approximately 15% in hospitalised patients (Naeem *et al*., 2023).

First reported in the 1950s and identified in 1969, LF spreads via contact with infected rodents and their excreta and, secondarily, through body fluids of infected persons and contaminated surfaces (Goeijenbier *et al*., 2013; Redding *et al*., 2021). Pregnancy carries high risk, maternal mortality up to 30% in the third trimester, and more than 80% foetal loss, with obstetric complications increasing healthcare worker (HCW) exposure (Price *et al*., 1988; Finnegan *et al*., 2004; Shehu *et al*., 2018; Chaudhary *et al*., 2025).

Nosocomial transmission is central in LF outbreaks since the earliest cases were documented in healthcare settings in Nigeria, Liberia, and Togo (Balogun, Akande and Hamer, 2020). In endemic regions, most recorded outbreaks have occurred in health facilities, underscoring the consequences of inadequate Infection Prevention and Control (IPC) systems (Fisher-Hoch, 2005; Kernéis *et al*., 2009). Prevention requires strict adherence to IPC protocols to avoid cross-transmission between patients, HCWs and caregivers.

Nigeria bears the highest LF burden, with more than 5,000 confirmed cases reported since 2020, and repeated large outbreaks since 2018. From January 2018 to December 2024, 75% of confirmed cases originated from Ondo (33%), Edo (31%), and Bauchi (11%) states. During the same period,

ISSN online: 2239-0243 | © 2025 Author(s) | http://www.fupress.com/techne | DOI: 10.36253/techne-18620
Open access, peer-reviewed article published by Firenze University Press (https://www.fupress.com) and distributed, except where otherwise noted, under the terms of the CC BY 4.0 License for content and CC0 1.0 Universal for metadata

ne ancora poco indagata, particolarmente per quanto riguarda l'organizzazione spaziale e l'integrazione dei servizi destinati ai pazienti più vulnerabili, come donne in gravidanza e neonati.

Obiettivo della ricerca Lo studio analizza la progettazione e la costruzione dei CT per LF in Nigeria, con particolare attenzione a flussi, zonizzazione e integrazione delle funzioni di supporto. L'obiettivo è comprendere in che modo le configurazioni spaziali influenzino PCI, la gestione dei pazienti e la sicurezza degli OS durante le epidemie.
Oltre all'analisi delle strutture esistenti, lo studio intende individuare principi e indicazioni progettuali utili allo sviluppo di modelli di CT adattabili, sicuri e inclusivi.

Metodologia e metodi Per raccogliere dati sulla progettazione e funzionalità dei CT, è stata condotta una ricerca sistematica della letteratura su MEDLINE, Embase e Google Scholar, combinando termini liberi e vocabolari controllati (MeSH). Titoli e abstract sono stati selezionati da due revisori secondo criteri predefiniti; i testi completi sono stati valutati per la rilevanza. Eventuali discrepanze sono state risolte tramite confronto o con il supporto di un terzo revisore. Le liste di riferimenti degli articoli inclusi sono state esaminate manualmente per individuare ulteriori contributi.
Due organizzazioni umanitarie internazionali, che collaborano con il Ministero della Salute nigeriano, hanno fornito le planimetrie di tre CT; i direttori delle strutture hanno condiviso documentazione fotografica e rapporti descrittivi.
Gli spazi disponibili (Tab. 1) sono stati analizzati con una metodologia precedentemente descritta (Fontana *et al*., 2024): le planimetrie sono state ricostruite a partire dagli elaborati tecnici originali al fine di ottenere misure omogenee e visualizzare i flussi (Fig. 1).
Le planimetrie sono state analizzate mediante una tabella comparativa, per il confronto tra i CT e l'estrazione di principi progettuali (Tab. 2).
Gli indicatori (Figg. 2, 5) e le relative soglie di riferimento si basano su standard architettonici consolidati in ambito umanitario (CDC, 2014; World Health Organization, 2014; Médecins Sans Frontières, 2015).
Interviste semi-strutturate con i responsabili dei CT hanno fornito un contesto operativo ed esperti esterni hanno revisionato le planimetrie ricostruite e le analisi spaziali. Le strutture sono state anonimizzate e le osservazioni integrate iterativamente, al fine di garantire coerenza tra evidenze tecniche e condizioni operative reali.
Le differenze emerse tra i CT selezionati hanno permesso di individuare criticità trasversali, soluzioni progettuali ricorrenti e margini di miglioramento.
Sono stati analizzati tre CT utilizzati come principali strutture di riferimento durante i focolai in Nigeria: N01 (21 posti letto), N02 (53 posti letto) e N03 (132 posti letto). Sebbene concepiti come strutture permanenti di riferimento, i CT presentavano variazioni significative negli assetti spaziali, nelle capacità funzionali e nella dotazione di spazi di supporto. Tali differenze evidenziano il rapporto tra scala della struttura, diversità funzionale e capacità di sostenere le pratiche di PCI durante i focolai.

212 HCWs were infected, accounting for 4% of total cases, with the majority concentrated in these three states (NCDC, 2022).
Building on previous analyses of Ebola and Marburg Treatment Centres (Fontana *et al*., 2024), this study focuses on permanent LF facilities that were chosen because the disease is endemic in Nigeria, and explores how more durable and inclusive spatial solutions can address maternal and neonatal health needs.
Although clinical care for LF has advanced and is relatively well documented (Alli *et al*., 2021; Doohan *et al*., 2024), the design of TC remains underexplored in either the scientific literature or in professional practice. Little evidence exists regarding optimal spatial organisation and the integration of services for vulnerable patients such as pregnant women and neonates.

Objective of the research
The study examines the design and construction of LF TCs in Nigeria, focusing on flows, zoning, and support functions. The research aims to investigate how architectural layouts influence IPC, patient management, and HCW safety during outbreaks.
Beyond analysing existing facilities, the study aims to derive architectural design principles and lessons to support the development of adaptable, safe, and inclusive treatment centre models.

Methodology and methods
To obtain comprehensive data on the design and functionality of LF TCs, a systematic literature search was conducted in MEDLINE, Embase, and Google Scholar. Search strategies combined free-text terms with controlled vocabulary (MeSH) where available. Titles and abstracts were independently screened by two researchers against predefined eligibility criteria with full texts assessed for relevance. Discrepancies were resolved by discussion or consultation with a third reviewer. Reference lists of included articles were hand-searched to identify additional material.
In addition, two international humanitarian organisations collaborating with Nigeria's Ministry of Health were contacted, and provided the layouts of three TCs. Furthermore, the directors of these TCs were invited to provide photographic documentation and reports describing their facilities.
The spaces available (Tab. 1) in the collected layouts were analysed with a methodology previously described (Fontana *et al*., 2024). Layouts were reconstructed from technical drawings to both obtain consistent spatial measurements, and visualise circulation patterns (Fig. 1).
Beyond descriptive redrawing, the layouts were analysed using the following table 2 to compare the different TCs and to extract the design principles.
Indicator (figures 02 to 05) selection and thresholds were informed by established humanitarian architectural standards (CDC, 2014; World Health Organization, 2014; Médecins Sans Frontières, 2015).
Semi-structured interviews with facility managers added context beyond drawings. External experts reviewed reconstructed layouts and interpretations of the spatial analyses. Facilities were anonymised, and revisions incorporated iteratively to ensure consistency with operational realities.

Tab. 01 | Funzioni e definizioni degli spazi analizzati
Functions and definitions of physical spaces assessed

| Tab. 01

Physical Spaces Assessed	Functions and Definitions
Ambulance bay	Area reserved for the arrival of the ambulance and the transfer of patients.
Waiting area	The place where patients with symptoms wait to be taken care of by health personnel.
Screening and triage	Screening is the process in which an individual is evaluated to see whether that person meets a standardized case definition. Triage is the process of sorting patients into categories based on the need for time-sensitive treatment using validated tools. Triage identifies those who require immediate medical intervention, and those who can safely wait. Triage may occur at a health post, primary health center, clinic, or emergency unit. It typically requires close physical contact (within 1 m) with the patient during the assessment. Within VHFs treatment centers, often screening and triage take place in the same physical space; therefore, for the sake of this study, these areas were assessed and labeled as screening/triage areas.
Morgue	Morgue is the designated area within the treatment center for the temporary storage of deceased patients' bodies pending final disposition. This space may also feature a designated observation area that allows family members to safely view the deceased.
Offices	Dedicated spaces within the treatment center designated for administrative and operational staff to perform non-clinical duties essential to the facility's functioning. These areas are structured to support tasks such as data management, coordination of services, and communication without direct exposure to the pathogens.
Waste area	Waste area is a specifically allocated space within the treatment center dedicated to storage and management of medical and non-medical waste generated by the facility's operations.
Suspect patients' area	This is a designated section within the treatment center specifically allocated for the isolation and clinical management of individuals who meet the case definition for a suspected case.
Confirmed patients' area	This is a designated section within the treatment center specifically allocated for the isolation and clinical management of individuals who meet the case definition for confirmed case.
Intensive care unit (ICU)	In the context of this study, an "Intensive Care Unit" (ICU) can be defined as a specialized section dedicated to providing advanced medical care and continuous monitoring for patients suffering from severe and life-threatening manifestations of Ebola or Marburg virus diseases.
Obstetric and delivery room	In the context of this study, an "Obstetric and Delivery Room" refers to a specially designated area where pregnant women diagnosed with Lassa Fever diseases receive focused care during labor and delivery.
Laboratory service	In the context of this study, "Laboratory Service" refers to a dedicated facility designed to perform a wide range of medical diagnostics, including the detection of Lassa Fever using Polymerase Chain Reaction (PCR) testing, as well as various biochemistry analyses and other diagnostic procedures.
Children and family spaces	In the context of this study, "Children and Family Spaces" are specialized areas designed to support the unique needs of children and families of patients undergoing treatment for these severe viral infections.
Outdoor area	In the context of this study, this is a designated outdoor space for suspect and confirmed patients.
Visitor area	In the context of this study, this is a designated space within or outside the treatment center designed to accommodate visitors, allowing for controlled interaction with patients.
Low-risk area	In the context of this study, the low-risk area is a designated section within the treatment center allocated for activities and functions that involve no direct exposure to the pathogens. This area, also referred to as the staff area, is where the presence of the virus is not expected.
High-risk area	In the context of this study, the high-risk area is a designated section within the treatment center allocated for activities and functions that involve direct exposure to the pathogens. This area, also referred to as the patients' area, is where the presence of the virus is expected.
Donning area	A specifically designated space within the treatment center where healthcare workers and other staff members put on personal protective equipment (PPE).
Doffing area	A specifically designated space within the treatment center where healthcare workers and other staff members take off PPE.

The diversity among the selected TCs allows the identification of recurrent design strategies, critical gaps and opportunities for improvement.
Three TCs were analysed as main referral facilities used during outbreaks in Nigeria, precisely N01 (21 beds), N02 (53 beds), and N03 (132 beds). Although all three were conceived as permanent referral facilities, their spatial layouts, functional capacities, and allocation of support spaces varied substantially. These differences highlight trade-offs between facility scale, functional diversity, and the capacity to sustain IPC practices during outbreaks.

Results and discussion
The three sites reflect geographic variation and operational diversity, enabling comparison of different architectural and clinical approaches.

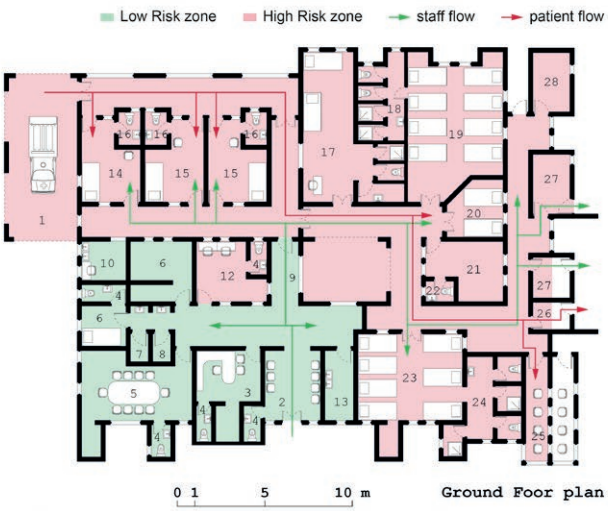
Centre profiles
Three referral TCs were analysed, namely N01, with 21 beds; N02, with 53 beds; N03, with 132 beds. All conceived as permanent facilities, they differed markedly in spatial layouts, functional capacities, and support-space allocation. All three centres serve as referral facilities for confirmed LF patients, which explains the consistent absence of screening spaces in their layouts (Fig. 1).
N01 is the smallest facility and has a compact design. It features a single ambulance bay of 36.9 m² located inside the high-risk zone. Despite its limited size, it includes ICU and dialysis capacity. However, it does not provide maternity, obstetric, or paediatric services. Interviews revealed that obstetric emergencies frequently required outsourced solutions, often leading to external referrals, with the risk of delays and higher cross-contamination. Lack of training areas and unclear circulation limit preparedness and IPC consistency. The facility has a high/low-risk ratio of 1.7 with 19.7 m² per bed in the high-risk area. While N01 is functional at small scale, its constraints in space and service scope could limit its ability to manage complex or vulnerable cases.
N02 is integrated into a teaching hospital and is a medium-capacity facility. The facility does not have an ambulance bay but it offers the most comprehensive range of clinical services, including maternity wards, a delivery suite, ICU capacity, dialysis, a surgery room, and staff training areas. This diversity enables management of both severe cases and vulnerable patient groups. The facility has a high/low-risk ratio of 1.5 with 24.1 m² per bed in the high-risk area. N02 stands out as the only facility equipped to combine advanced care for severe LF with services for obstetric and paediatric patients.
N03, the largest facility, was conceived as a specialised infectious disease hospital. It included two ambulance bays totalling 142 m², both located in the high-risk zone. ICU space is available, but the absence of maternity and paediatric services forces transfers. Notes on the facility highlighted inadequacies in donning and doffing areas, and incomplete separation between disinfection and changing spaces.
From a design perspective, compact layouts such as N01 enhance containment and staff control but restrict functional expansion. In contrast, larger facilities like N03, while scalable, risk spatial fragmentation and reduced visibility. N02 represents a more balanced configuration integrating

01 | Planimetrie generali dei tre CT per la febbre di Lassa, ridisegni di elaborati tecnici originali
General layouts of the three Lassa Fever Treatment Centres, redrawing from the original technical drawing

01 | Treatment Centers layouts

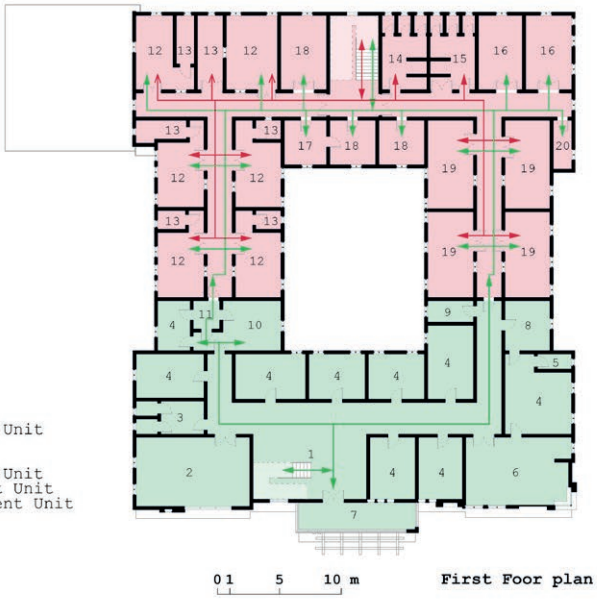
N01

1. Ambulance bay
2. Reception
3. Office
4. Staff toilet
5. Conference room
6. Staff rest room
7. Men locker
8. Women locker
9. Donning
10. Laboratory
12. Nursing station
13. Pharmacy
14. Dialysis room
15. Individual patient room
16. Individual toilet and shower
17. Intensive Care Unit (ICU)
18. Shared toilet and shower (women)
19. Shared room (women)
20. Shared room (children)
21. Delivery room
22. Shared toilet and shower (pregnant women)
23. Shared room (men)
24. Shared toilet and shower (men)
25. Visitor area
26. Disharge station
27. Doffing
28. Storage



N02

1. Lobby
2. Conference room
3. Staff toilet
4. Office
5. Staff toilet
6. Library
7. Balcony
8. Secretariat
9. House kepping
10. Nurse/Doctor station, into Special Isolation Unit
11. Donning
12. Shared room - Special Isolation Unit
13. Shared toilet and shower - Special Isolation Unit
14. Shared toilet and shower (men) - Convalescent Unit
15. Shared toilet and shower (women) - Convalescent Unit
16. Funtional space/Clinical trials/Storage
17. Doffing
18. Functional space/Storage
19. Shared room - Convalescent Unit
20. House keeping



N03

1. Staff entrance
2. Doctor's common room
3. Staff Toilet/Shower
4. Nurse's room
5. Cleaners' closet (Donning)
6. Attendant's room
7. Changing room
8. Ambulance/Patient entrance
9. Patient entrance
10. Waiting room
11. Office
12. Pharmacy
13. Store
14. Intensive Care Unit (ICU) and Dialysis
15. Shared toilet and shower (ICU)
16. Monitoring station
17. Equipment room
18. Sterilizing room
19. Storage
20. Shared room
21. Shared toilet and shower
22. Monitoring station
23. Shared room
24. Shared toilet and shower
25. Disinfection/Changing point (Doffing)
26. Staff exit
27. Laundry
28. Staff shower
29. Outdoor staff office



Tab. 02 | Tipologia di dati estratti e definizioni
Type of data extracted and definitions

Tab. 02 |

Risk zoning balance	Ratio between High-risk floor area (m²) / Low-risk floor area (m²)
Bed ratio	Surface in m²/bed in High-Risk zones.
Flow integrity	**1. Staff flow**: – Separate clean/dirty staff access? (Yes/No) – Unidirectional flow from low → high → low? (Yes/No/Partial) **2. Patient flow:** – Dedicated entrance/exit, no cross-over with staff/waste? (Yes/No) **3. Waste flow:** – Dedicated path for waste that does not cross clean flows? (Yes/No) **4. Donning/doffing points:** – Donning before entry to high-risk (present/absent); – Doffing before re-entry to low-risk (present/absent); – Physical separation with clear demarcation (adequate/inadequate).
Visibility without entry	Visibility index = (Visible beds / Total high-risk beds) × 100%
Accessibility	– **Door clear width** (cm) vs ≥110–120 cm – **Turning radius** at junctions (does a bed/stretcher make a 90° turn without multi-point maneuver? Yes/No
Support functions	**1. Presence (Y/N)** – Triage area – Morgue – Visitor area – Survivor clinic (or long-term follow-up area) **2. Adequacy of size** – Simple ordinal scale per function: o 0 = absent o 1 = present but undersized o 2 = present and adequate **3. Adjacency / zoning quality** – Triage: close to main entrance? (Yes/No) – Morgue: accessible without crossing clean flows? (Yes/No) – Survivor clinic: accessible from outside high-risk zone, with separation from patient entry. (Yes/No)
Vulnerable-group readiness	– **Dedicated maternity bed/room available?** (Yes/No) – **Dedicated pediatric bed/room available?** (Yes/No) – **Ability to isolate mother + newborn together** safely? (Yes/No/Partial) – **Ability to isolate pediatric patient with caregiver** (bed or proper space)? (Yes/No/Partial)
Outdoor therapeutic space	Open-air surface available per bed (m²/bed).

both infection control and functional diversity (Fig. 1).

Zoning, donning and doffing areas and flows

Quantitative analysis highlighted significant contrasts in spatial allocation across the three centres. N01 and N02 demonstrated relatively balanced high/low-risk ratios of 1.70 and 1.46, respectively, whereas N03 was heavily skewed toward high-risk areas at 3.17. High-risk space per bed was most generous in N02 (24.1 m²), followed by N01 (19.7 m²), while N03 offered only 7.6 m². A similar pattern was observed for low-risk space, with N02 allocating 16.5 m² per bed, N01 11.6 m², and N03 just 2.4 m².

Inpatient space per bed also varied, being 6.4 m² in N01, 8.7 m² in N02, and 11.4 m² in N03. Although N03 provided the largest per-bed allocation, low-risk space reduced operational effectiveness. In contrast, N02 achieved a more balanced distribution, while N01 remained the most spatially restricted.

Donning areas were provided in all centres but varied in both size and redundancy. N01 included a single 6 m² donning space, limiting throughput during busy periods. N02 incorporated two donning areas with a combined surface of 16 m², offering greater operational flexibility. N03 provided a single, larger donning space of 20 m², but the absence of duplication reduced resilience during peak demand or staff surges.

Doffing areas showed an even greater variation. N01 contained one minimal 6 m² space with cross-ventilation. N02 included two doffing areas totalling 16 m², supporting safer exit strategies under pressure. N03 dedicated 76 m² to doffing, the largest provision overall. While larger areas theoretically facilitate safer doffing and accommodate surges, their effectiveness depends on integration with clear unidirectional flows and well-defined zoning.

Unidirectional flow was variably maintained. N01 and N03 preserved integrity through staff training, though challenges remained. In N02, the two-storey configuration forced staff to pass through the same areas multiple times, undermining flow consistency. While this limitation was not critical under conditions where only confirmed patients were admitted, the design would require major modifications to safely accommodate suspected cases.

Zoning, donning and doffing area differences are illustrated in figure 2.

Visibility, accessibility, and provision of outdoor areas

Differences also emerged in patient visibility and accessibility. In N01, the absence of transparent barriers prevented staff from monitoring patients from low-risk areas, necessitating entry into wards with PPE even for basic surveillance. In contrast, N02 incorporated transparent partitions, enabling direct visual monitoring from the low-risk area to the ICU. However, staff stations in the low-risk zone lacked visual access to high-risk wards. As a result, routine monitoring still required donning PPE and entering patient areas. N03 also utilised transparent partitions, allowing continuous visual monitoring and reducing unnecessary PPE use.

Design implications: Transparent partitions enable low-risk visual monitoring, cutting unnecessary entries and PPE use. They could be included as standard IPC and case management features (Fig. 3).

Risultati e discussione I tre siti analizzati riflettono differenti contesti geografici e operativi, consentendo il confronto tra approcci architettonici e clinici diversi.

Profili dei centri

Sono stati esaminati tre CT: N01, con 21 posti letto; N02, con 53 posti letto; N03, con 132 posti letto. Concepite come strutture permanenti, presentano differenze nelle planimetrie, nelle capacità funzionali e nella dotazione di spazi di supporto. Tutti operano come centri di riferimento per pazienti confermati, condizione che spiega l'assenza di aree di screening (Fig. 1).

N01 è la struttura più piccola e presenta un impianto compatto. È dotato di un'unica area per ambulanze di 36,9 m², situata all'interno della zona ad alto rischio. Nonostante la scala contenuta, N01 include spazi di terapia intensiva (ICU) e dialisi, ma non dispone di servizi di maternità, ostetricia o pediatria. Dalle interviste emerge che le emergenze ostetriche richiedono soluzioni esterne, con trasferimenti, ritardi e aumento del rischio di contaminazione. L'assenza di spazi per la formazione e di percorsi definiti indebolisce l'aderenza alle misure di PCI. Con un rapporto tra aree ad alto e basso rischio pari a 1,7 e una superficie di 19,7 m² per posto letto in area ad alto rischio, N01 risulta funzionale su piccola scala, ma i vincoli di spazio e di servizi possono limitare la gestione di casi complessi o di pazienti vulnerabili.

N02 è integrato all'interno di un ospedale universitario e rappresenta una struttura di capacità intermedia. Non dispone di un'area per ambulanze, ma offre la gamma più completa di servizi clinici, con reparti di maternità, sala parto, ICU, dialisi,

una sala operatoria e aree per la formazione. Questa articolazione funzionale consente la gestione sia di casi gravi sia di pazienti più vulnerabili. Il centro è caratterizzato da un rapporto tra aree ad alto e basso rischio pari a 1,5 e una superficie di 24,1 m^2 per posto letto in area ad alto rischio, configurandosi come l'unica struttura in grado di integrare cure avanzate per LF con l'assistenza ostetrica e pediatrica.
N03, la struttura più grande, è stata concepita come ospedale specializzato per le malattie infettive. Comprende due aree per ambulanze per un totale di 142 m^2, entrambe situate nella zona ad alto rischio. Sono presenti spazi ICU, ma non servizi di maternità e pediatria, rendendo necessari trasferimenti o cure non ottimali. Sono state rilevate carenze nelle aree di vestizione e svestizione e una separazione incompleta tra spazi di decontaminazione e spogliatoi.
Da un punto di vista progettuale, i layout compatti (N01) favoriscono il controllo delle attività, ma limitano la possibilità di espansione. Al contrario, strutture più grandi (N03), pur scalabili, rischiano frammentazione spaziale e minore visibilità. N02 mostra un equilibrio migliore tra controllo delle infezioni e diversità funzionale (Fig. 1).

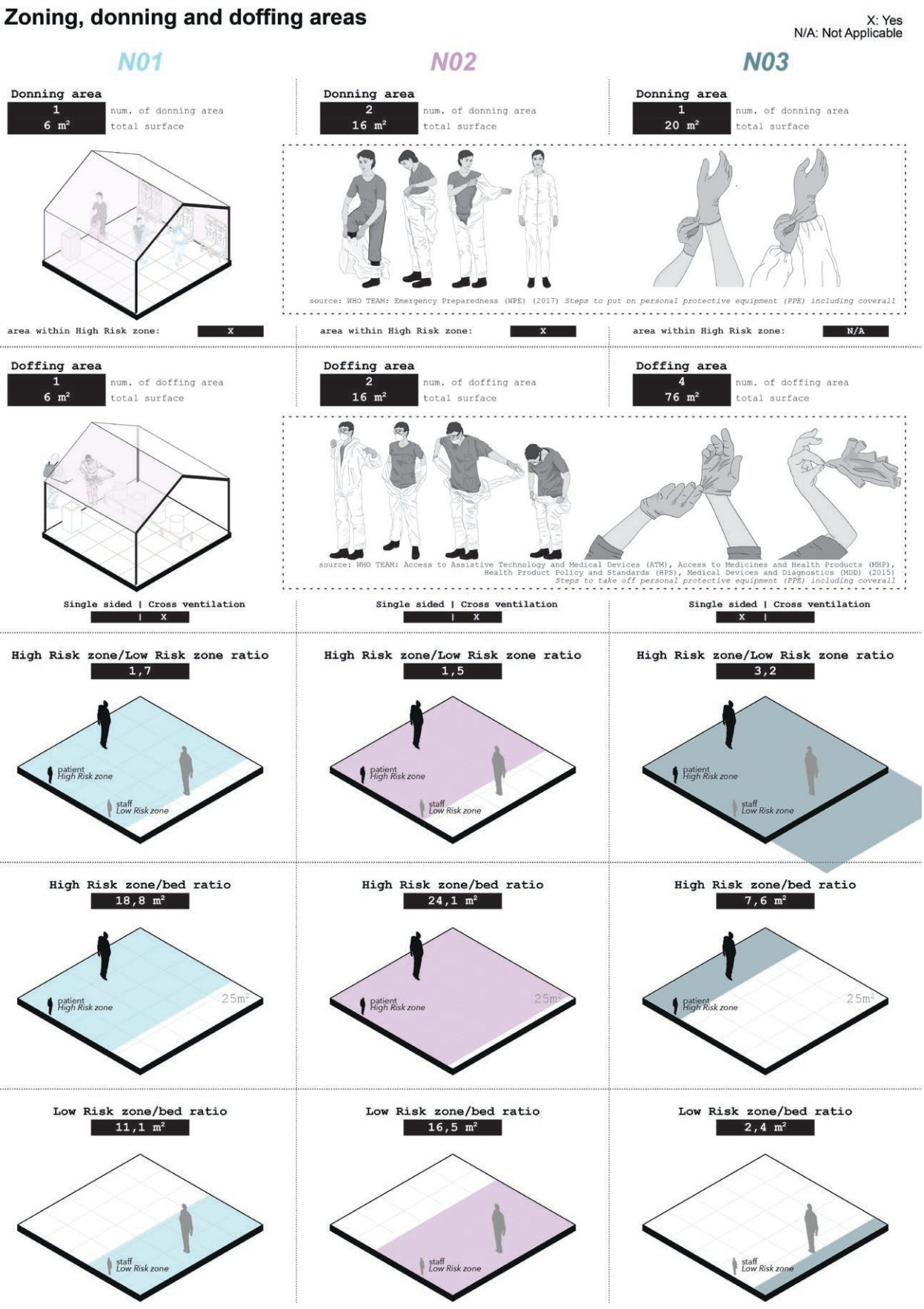
Zonizzazione, aree di vestizione/svestizione e flussi
L'analisi quantitativa ha evidenziato differenze significative nella distribuzione spaziale tra i tre centri. N01 e N02 hanno rapporti tra zona ad alto e basso rischio relativamente equilibrati (1,70 e 1,46), mentre N03 risulta fortemente sbilanciato a favore delle aree ad alto rischio con un rapporto pari a 3,17. La superficie ad alto rischio per posto letto è maggiore in N02 (24,1 m^2), seguita da N01 (19,7 m^2), e minore in N03 con 7,6 m^2. Un andamento analogo si osserva per le aree a basso rischio: 16,5 m^2 in N02, 11,6 m^2 in N01 e appena 2,4 m^2 in N03.
Anche lo spazio complessivo per posto letto varia tra i CT: 6,4 m^2 in N01, 8,7 m^2 in N02 e 11,4 m^2 in N03. In N03, la prevalenza di aree ad alto rischio e la scarsità di aree a basso rischio ne compromettono l'efficacia operativa; N02 risulta il più bilanciato, N01 il più vincolato.
Le aree di vestizione di Dispositivi di Protezione Individuale (DPI) sono presenti in tutti i centri, ma variano per dimensioni e numero: N01 include un unico spazio di 6 m^2, che limita la capacità nei periodi di maggiore affluenza; N02 include due aree per un totale di 16 m^2, offrendo maggiore flessibilità operativa. N03 dispone di un unico spazio più ampio (20 m^2), ma l'assenza di altre aree riduce la capacità in caso di aumento di pazienti o di personale.
Le aree di svestizione mostrano differenze ancora più marcate. N01 dispone di uno spazio minimo di 6 m^2, con ventilazione incrociata. N02 dispone di due aree per un totale di 16 m^2, favorendo modalità di uscita più sicure. N03 dispone di aree di svestizione per un totale di 76 m^2, la più estesa tra i tre CT. Tuttavia, superfici più ampie non garantiscono maggiore sicurezza senza una zonizzazione chiara e flussi unidirezionali.
La gestione dei flussi nei centri N01 e N03 è garantita grazie alla formazione del personale, nonostante le criticità. In N02 la configurazione su due livelli costringe il personale a passaggi ripetuti nelle stesse aree, compromettendo la coerenza dei flussi. Tale limite richiederebbe modifiche sostanziali qualora il centro dovesse accogliere anche casi sospetti.
Le differenze relative alla zonizzazione e alle aree di vestizione (*Donning*) e svestizione (*Doffing*) sono illustrate in figura 2.

Accessibility standards were inconsistently applied across sites. The ward entrance in N01 measured only 0.85 m, below the international standard of 1.0 m, thereby restricting wheelchair access and complicating stretcher transfers. N02 fully complied with accessibility standards, whereas N03 provided the most generous access, with an entrance width of 1.70 m, facilitating smooth mobility for both wheelchairs and stretchers.
Outdoor space provision further distinguished the centres. Neither N01 nor N03 included outdoor areas, while N02 incorporated an outdoor space equivalent to 1.2 m^2 per bed, supporting patient rehabilitation and psychosocial well-being.
Areas and services related to visibility, accessibility, and outdoor spaces are illustrated in figure 3.

Supportive areas
The configuration of waiting, triage, morgue and visitor areas varied considerably across the three centres. N03 incorporated a waiting area of 43 m^2 (0.3 m^2 per bed), designed to be accessible for patients with reduced mobility, and included a dedicated triage space.
Visitor policies reflected distinct design philosophies. N01 included a 17 m^2 visitor room (0.8 m^2 per bed) located within ten metres of patient wards. While this facilitated family presence, it also raised IPC concerns. N02 did not include visitor areas within the facility, restricting family interaction to external spaces. N03 provided no visitor space, thereby eliminating family presence from the treatment environment altogether.
Survivor clinics were the only outpatient service consistently integrated in all three centres. These facilities provided follow-up care for discharged patients, including management of sequelae and psychosocial support. It reflected a shared recognition of the need for continuity of care beyond acute treatment.
Morgues were inconsistently integrated. N01 and N03 lacked mortuary capacity, relying instead on external arrangements. N02, by contrast, included a 44 m^2 morgue (0.8 m^2 per bed) with a viewing area for relatives, reflecting more comprehensive planning for safe and dignified management of the deceased.
Figure 4 highlights the absence of standardised solutions for visitor management and morgue provision. Architectural solutions enabling controlled family contact-through viewing areas or separated visitor zones-could enhance psychosocial support without compromising infection control.
The screening-visitor-survivor-morgue chain follows VHF operational guidance for safe and dignified burial management (CDC, 2014).

Specialised care
Specialised services also varied substantially. ICUs were present in all three facilities, reflecting a uniform recognition of the importance of advanced monitoring and treatment for severe cases. However, surgical capacity was provided only in N02. This absence in N01 and N03 restricted their ability to manage complications requiring operative intervention, such as obstetric emergencies.
Dialysis services were integrated across all centres but differed in configuration. N01 and N02 offered standalone dialysis units, whereas N03

02 | Zonizzazione, aree di vestizione/svestizione dei DPI nei tre CT, elaborazione di Francesca Pagano
Zoning and donning/doffing areas for PPE in the three TCs, created by Francesca Pagano

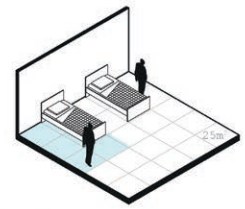


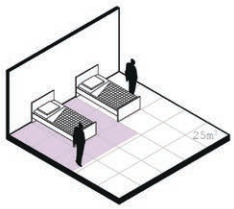
03 | Visibilità delle aree di degenza, accessibilità agli ingressi e dotazione di spazi esterni nei tre CT, elaborazione di Francesca Pagano
Visibility of patient wards, entrance accessibility and provision of outdoor areas in the three TCs, created by Francesca Pagano

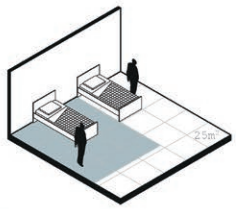
03 | Visibility, accessibility and outdoor area

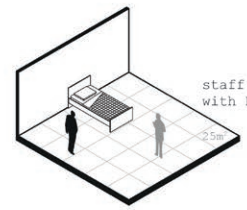
X: Yes
NA: Not Available

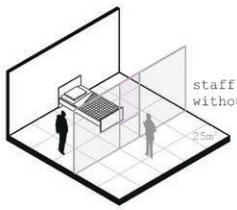
	N01	N02	N03
Bed capacity	21 beds	53 beds	121 beds
Patient ward|room	98|37 m² total surface 6,4 m²/bed surface per bed	**Patient ward** 460 m² total surface 8,7 m²/bed surface per bed	**Patient ward** 1.510 m² total surface 11,4 m²/bed surface per bed
Transparent barrier	NA — no direct visibility of the patient from Low Risk zone	X — direct visibility of the patient from Low Risk zone	X — direct visibility of the patient from Low Risk zone
Accessibility	patient ward/room not accessible	X — patient ward/room accessible	X — patient ward/room accessible
Outdoor area	NA	1.2 m²/bed surface per bed	NA

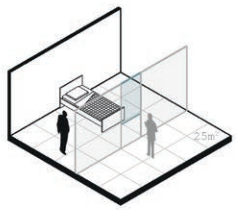


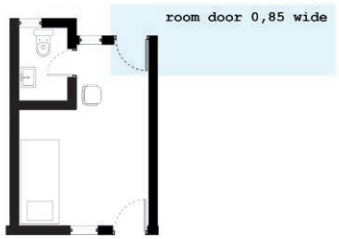


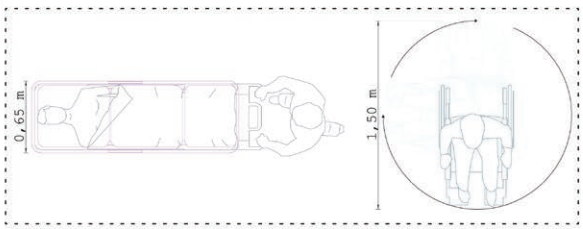


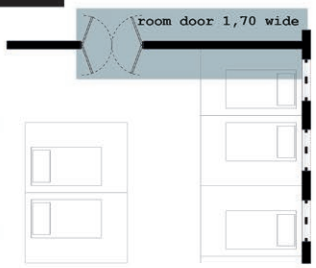






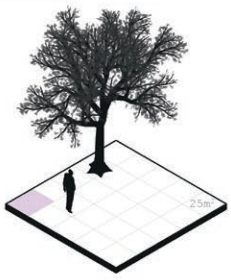






accessible: whether the access door is at least 1,0 meter wide and is on the level 0, to allow passage for a wheelchair. The space should ensure enough clearance for a wheelchair to turn within a 1,50 meter diameter.







Visibilità, accessibilità e spazi esterni

Sono emerse differenze in termini di visibilità dei pazienti e accessibilità. In N01, l'assenza di partizioni trasparenti impedisce al personale di monitorare i pazienti dalle aree a basso rischio, rendendo necessario l'ingresso nei reparti con DPI anche per controlli di base. In N02 sono presenti partizioni trasparenti verso l'ICU, ma le postazioni del personale non garantiscono una visibilità adeguata sui reparti ad alto rischio, rendendo comunque necessario l'accesso con DPI. In N03, l'adozione di partizioni trasparenti permette un monitoraggio continuo, riducendo l'uso non necessario di DPI.

Le partizioni trasparenti consentono il monitoraggio dei pazienti dalle aree a basso rischio e potrebbero essere considerati elementi standard a supporto delle strategie di PCI e della gestione clinica dei casi (Fig. 3).

Gli standard di accessibilità sono applicati in modo non uniforme. In N01, l'ingresso del reparto misura solo 0,85 m, al di sotto dello standard internazionale di 1,0 m, limitando l'accesso in sedie a rotelle e i trasferimenti con barella. N02 rispetta pienamente i requisiti di accessibilità, mentre N03 garantisce l'accesso più ampio con una larghezza di 1,70 m, facilitando la mobilità sia delle sedie a rotelle sia delle barelle.

La presenza di spazi esterni rappresenta un ulteriore differenza tra i CT. Solo N02 include uno spazio esterno pari a 1,2 m^2 per posto letto, a supporto della riabilitazione e del benessere psicosociale dei pazienti.

Aree e servizi relativi a visibilità, accessibilità e spazi esterni sono illustrati in figura 3.

Aree di supporto

La configurazione delle aree di attesa, triage, obitorio e spazi per i visitatori varia tra i tre CT. N03 include un'area di attesa di 43 m^2 (0,3 m^2 per posto letto), accessibile per pazienti con mobilità ridotta, e un triage dedicato, utile in caso di accesso di pazienti sospetti.

La gestione dei visitatori riflette diversi approcci progettuali. N01 dispone di una sala visitatori di 17 m^2 (0,8 m^2 per posto letto) entro dieci metri dai reparti, facilitando la presenza dei familiari, ma con criticità in termini di PCI. N02 non prevede spazi per i visitatori all'interno della struttura, limitando l'interazione familiare, mentre N03 non include spazi per le visite.

Le cliniche per sopravvissuti sono l'unico servizio ambulatoriale comune ai tre CT e garantiscono follow-up clinico e supporto psicosociale dopo la dimissione.

Gli obitori non sono presenti nei centri N01 e N03 e si affidano a soluzioni esterne, mentre N02 dispone di un obitorio di 44 m^2 (0,8 m^2 per posto letto) con un'area di osservazione per i familiari, evidenziando la necessità di una gestione sicura e dignitosa dei defunti.

La figura 4 evidenzia l'assenza di soluzioni standardizzate. Aree di osservazione o spazi per visitatori separati, che consentano un contatto familiare controllato, potrebbero rafforzare il supporto psicosociale senza compromettere il controllo delle infezioni. La sequenza funzionale screening-visitatori-sopravvissuti-obitorio è coerente con la guida operativa VHF per la gestione sicura e dignitosa dei deceduti (CDC, 2014).

co-located dialysis within the ICU, a design that facilitated oversight but limited flexibility when both services were required simultaneously.

Maternity and delivery rooms were included in N01 and N02 but were absent in N03. Given the disproportionate risk LF poses to pregnant women, the omission of obstetric capacity in the largest facility represented a critical shortcoming. Paediatric wards followed a similar pattern, being included in N01 and N02 but excluded in N03. This omission highlighted the limited inclusivity of the largest centre, which, despite its scale, failed to address the needs of vulnerable populations.

Laboratories were the only consistently provided function across all three facilities, underscoring universal recognition of the need for on-site diagnostics to confirm cases and monitor treatment progression.

Figure 5 shows inconsistent integration of obstetric and paediatric services.

Adherence to national guidance

Nigerian VHF IPC guidance requires entrance screening, unidirectional flows (staff, patients, waste, deceased), barrier nursing and rigorous hygiene/disinfection (Akpede *et al.*, 2018; NCDC, 2020). Among the three referral centres – each admitting confirmed cases – none included screening/triage spaces in the layouts, which is consistent with their referral role but implies reliance on external screening nodes (Fig. 1). Flow integrity varied with N02 showing clearer zoning and redundant donning/doffing, compared with N01 and N03, aligning more closely with IPC expectations (Fig. 2). Visitor mediation and mortuary solutions were standardised only in N02 (Fig. 4). Overall, partial adherence was observed with gaps in visibility features and services for vulnerable groups, especially in N03 (Figs. 3, 5).

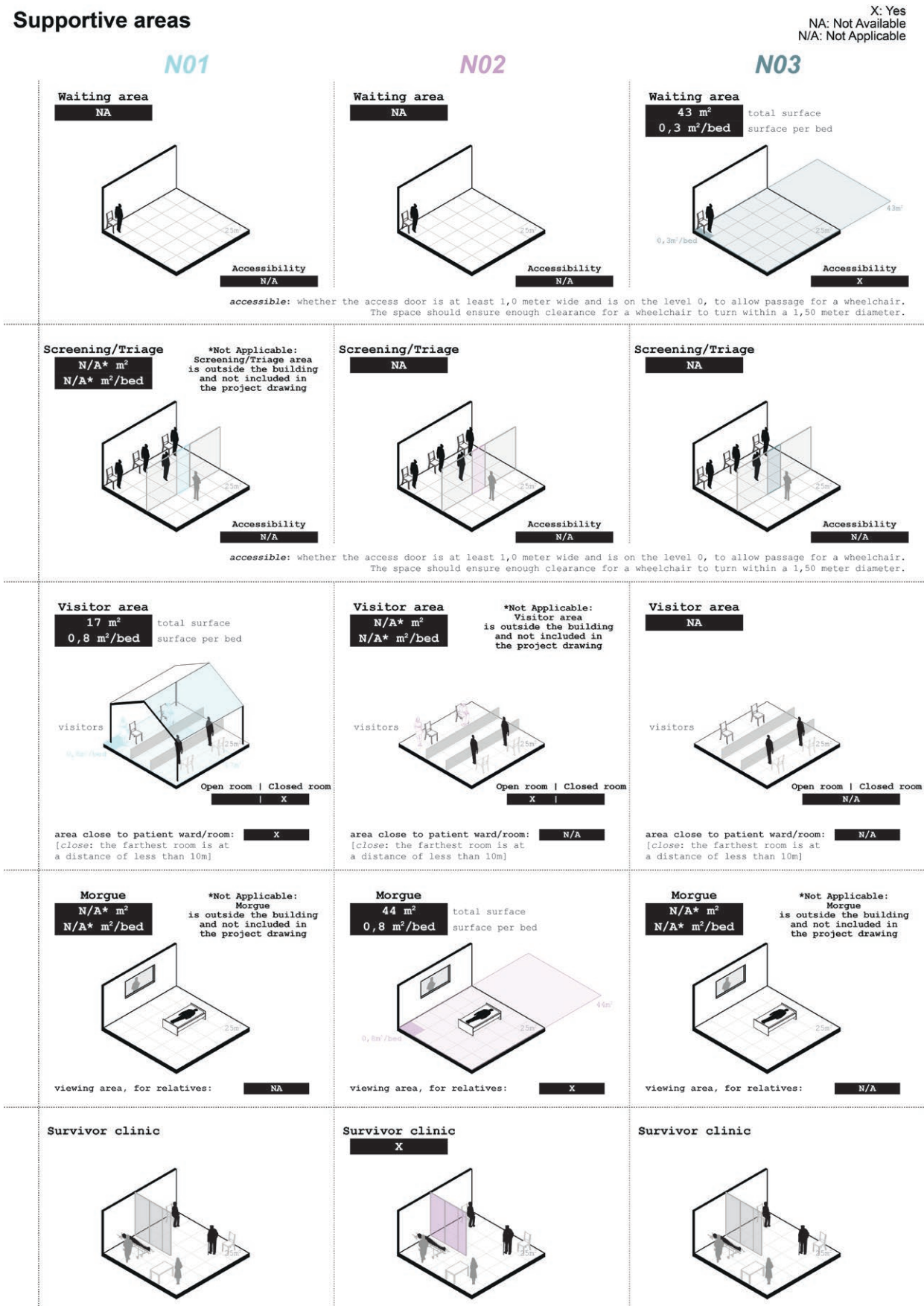
Common challenges

Several recurrent challenges were observed, despite some variations. In all three centres, demarcation of donning and doffing areas could be further clarified to reduce contamination risks. Facilities for staff support and training were limited. Only one of the three centres (N02) included dedicated training areas, which may contribute to fatigue and affect adherence to IPC measures. Circulation patterns did not always achieve a fully unidirectional flow between high-risk and low-risk areas, thus raising potential safety concerns. Provision of maternity and paediatric care was inconsistent, leaving some gaps in services for vulnerable patient groups. Visitor areas were often improvised or not well integrated, making safe family interaction more difficult.

HCW interviews supported these observations. Staff described challenges in facilitating patient-family contact, and in adapting facilities to the changing needs of outbreak response. These qualitative insights reinforced the architectural analysis, suggesting that spatial and functional constraints can translate into operational difficulties during outbreaks.

Concerning pathogen-specific implications, LF's burden in pregnancy makes obstetric/delivery capacity and neonatal isolation core functions. Ebola/Marburg TCs prioritise larger doffing suites, longer suspect holding, and stricter cohorting. LF referral TCs – often for confirmed cases – still benefit from entry screening to redirect

04 | Aree di supporto (attesa, triage, obitori, spazi visitatori e ambulatori per sopravvissuti) nei tre CT, elaborazione di Francesca Pagano
Supportive areas (waiting, triage, morgues, visitor spaces and survivor clinics) in the three TCs, created by Francesca Pagano



Cure specialistiche
Tutti i CT sono dotati di ICU, confermando l'importanza del monitoraggio avanzato e del trattamento dei casi gravi, ma solo N02 include una sala operatoria dedicata. L'assenza in N01 e N03 limita la gestione di complicanze, incluse le emergenze ostetriche.
La dialisi è presente nei tre CT, ma con configurazioni diverse: unità autonome in N01 e N02; integrazione con l'ICU in N03, una scelta progettuale che facilita la supervisione, ma limita la flessibilità quando i due servizi sono richiesti contemporaneamente.
I servizi di maternità, parto e pediatria sono presenti in N01 e N02, ma assenti in N03. Considerato l'elevato rischio associato alla LF in gravidanza, questa mancanza nella struttura più grande rappresenta una importante criticità.
Tutti i centri dispongono di laboratori, sottolineando la necessità di diagnostica in loco per la conferma dei casi e il monitoraggio clinico.
La figura 5 mostra la distribuzione disomogenea dei servizi ostetrici e pediatrici.

Aderenza alle linee guida nazionali.
Le linee guida nigeriane per la PCI nelle VHF prevedono screening, flussi unidirezionali (personale, pazienti, rifiuti, deceduti), barrier nursing e rigorose misure di igiene e disinfezione (Akpede *et al*., 2018; NCDC, 2020). Nei tre centri non sono presenti aree di screening/triage, in coerenza con il ruolo di CT per pazienti confermati; ciò implica la necessità di spazi di screening esterni (Fig. 1).
N02 presenta una zonizzazione più chiara e più aree di vestizione e svestizione rispetto a N01 e N03, mostrando maggiore aderenza alle indicazioni PCI (Fig. 2). Aree destinate alle visite e l'obitorio risultano presenti solo in N02, mentre sono parziali o assenti negli altri centri (Fig. 4). Nel complesso emerge un'aderenza parziale alle linee guida, con carenze su visibilità e servizi per pazienti vulnerabili, in particolare in N03 (Figg. 3, 5).

Sfide comuni
Nonostante le differenze, emergono criticità comuni: delimitazione poco chiara delle aree di vestizione e svestizione, per ridurre i rischi di contaminazione; spazi limitati per la formazione del personale (solo N02 dispone di aree dedicate), che può influire sull'aderenza alle misure di PCI; flussi non sempre unidirezionali, sollevando criticità in termini di sicurezza; carenza nei servizi di maternità e pediatria, con lacune nell'assistenza ai gruppi più vulnerabili; aree per i visitatori, quando presenti, poco integrate, rendendo complessa l'interazione familiare sicura.
Le interviste con gli OS hanno confermato tali osservazioni, evidenziando difficoltà nel garantire un contatto sicuro con i familiari e nell'adattare le strutture a esigenze variabili. Queste evidenze qualitative rafforzano l'analisi, mostrano come vincoli spaziali e funzionali si traducano in difficoltà operative durante i focolai.
L'impatto della LF in gravidanza rende centrali le funzioni ostetriche e neonatali. Al contrario, i CT per Ebola e Marburg privilegiano aree di svestizione più ampie, una degenza più lunga dei sospetti e un isolamento più rigoroso. I CT per LF - spesso per i casi confermati - beneficiano di uno screening all'ingresso per reindirizzare i sospetti, ma dovrebbero privi-

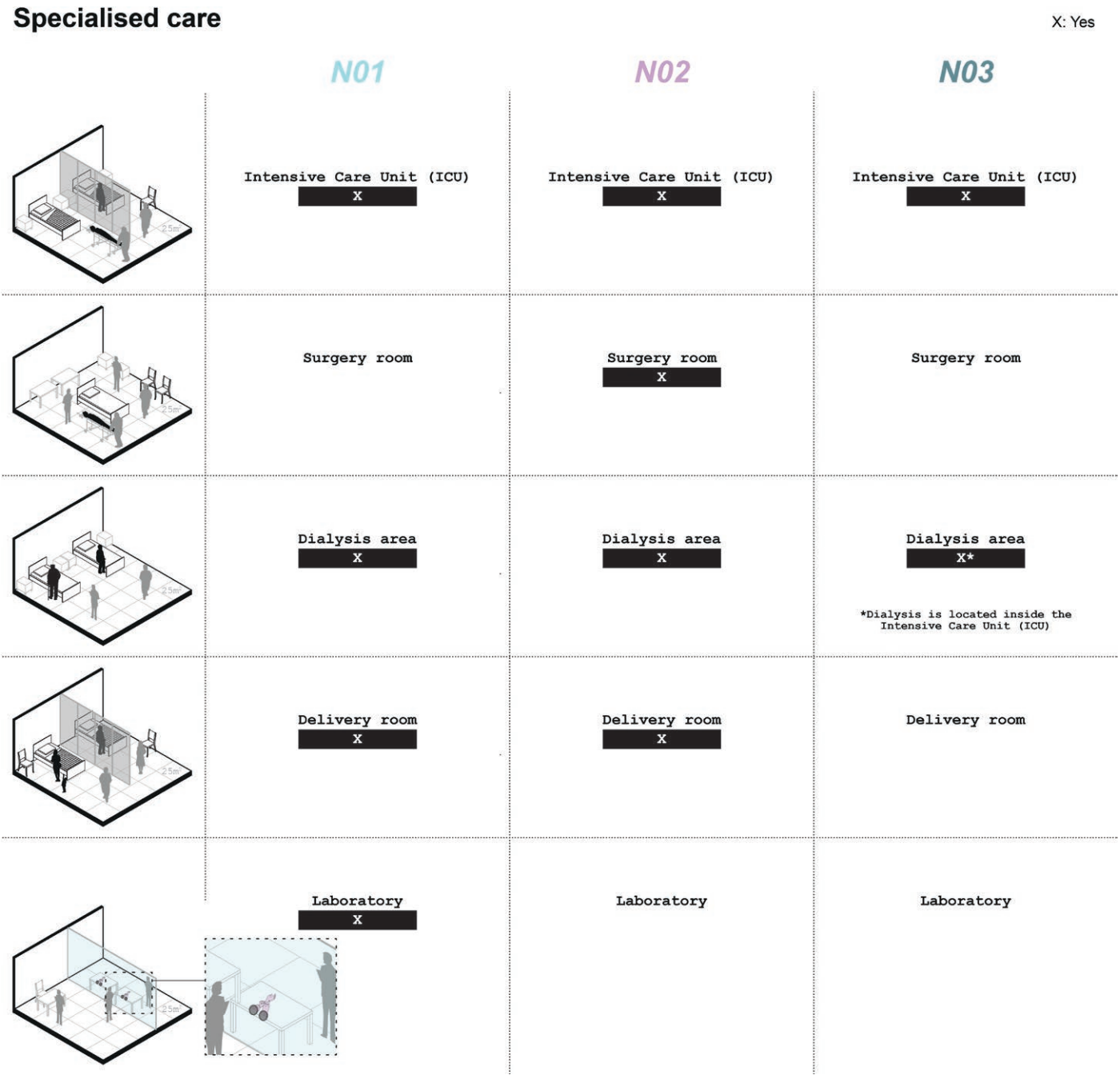
mis-routed suspects, but should shift footprint toward maternity/paediatrics and Low-Risk visibility (transparent partitions) without weakening IPC (Fig. 3). This explains why N02's balanced zoning and maternity/surgery stack fit LF needs better than N03's scale without inclusive services (Figs. 2, 5).

From layouts to design principles
Cross-case synthesis yields five principles for Lassa Fever TCs (Tab. 3).
These principles adapt established ETC architectural standards to LF referral contexts (CDC, 2014; World Health Organization, 2014; Médecins Sans Frontières, 2015).

Limitations
The limited number of case studies precludes statistical generalisation. Nevertheless, triangulating layouts, literature-derived evidence, HCW interviews and external expert review offers robust qualitative insight. The diversity among the selected TCs supports the identification of recurrent design strategies, critical gaps and opportunities for improvement.

Conclusions
The comparative analysis of three LF TCs in Nigeria highlights important variability in spatial configuration, functional scope, and supportive infrastructure, underscoring the need for harmonised, evidence-based design criteria.
The absence of harmonised design standards has contributed to inconsistent provision of functions such as maternity and paediatric care, morgue capacity, and staff support spaces. Clear design criteria are needed to ensure safe, inclusive and resilient facilities.
This study offers an architectural and functional assessment of three main TCs used during recent LF outbreaks in Nigeria. Findings show variations in capacity, zoning, accessibility, and service integration, influencing patient care, staff safety, and IPC effectiveness. Only one facility had a dedicated maternity ward, while others lacked services for pregnant women and children, who are particularly vulnerable to LF. Limited separation of flows, constrained donning and doffing areas, and inflexible layouts sometimes hindered adaptability during emergencies. In certain cases, spatial arrangements reduced staff visibility of patients from low-risk areas, necessitating more frequent entry into high-risk zones. These issues affected operational efficiency, and underline the importance of spatial design in outbreak response.
Addressing such gaps will require evidence-based design guidance tailored to epidemic-prone contexts. Priorities include dedicated maternity and paediatric spaces, minimum per-bed space standards, well-demarcated donning and doffing areas for unidirectional flows, and modular layouts for surges.
Although centred on Nigeria, the lessons from this analysis on IPC, patient privacy and staff support can inform TC planning globally, especially in epidemic-prone regions. Facility design can become a core component of global health preparedness.
Future work should seek to establish standardised indicators to assess how design influences clinical outcomes, staff safety, and patient experience. Expanding data collection through both quantitative and qualitative methods will deepen understanding of the im-

05 | Servizi specialistici (terapia intensiva, sale operatorie, dialisi, maternità, pediatria e laboratori) nei tre CT, elaborazione di Francesca Pagano
Specialised services (intensive care, surgery, dialysis, maternity, paediatrics and laboratories) in the three TCs, created by Francesca Pagano



pact of facility design on outbreak response.
In conclusion, integrating evidence-based architectural principles into LF TC planning can strengthen preparedness, reduce transmission, and sustain efficient, inclusive responses.

ATTRIBUTION, ACKNOWLEDGMENTS, COPYRIGHT
The authors thank Dr. Mahmood Dalhat, Dr. Yusuf Jibrin, Dr. Anaïs Legand, Dr. Sylvanus Okogbenin, and Dr. Joshua Ofoli for facilitating access to technical documentation. Special thanks are extended to Dr. Mahmood Dalhat, Dr. Yusuf Jibrin, and Dr. Sylvanus Okogbenin for their availability, and for generously sharing their in-depth knowledge during the interviews.

Tab. 03 | Principi di progettazione per CT per febbre di Lassa
Design principles for Lassa fever TCs

		Tab. 03
Balance risk zoning	to avoid staff congestion and keep unidirectional flows (Fig. 2).	
Visibility	transparent partitions and clear staff sightlines, to cut avoidable entries into High-Risk zones and reduce PPE burden (Fig. 3).	
Design for vulnerable groups	by integrating dedicated maternity/delivery and paediatrics, as standard programme elements, not add-ons (Fig. 5).	
Complete the supportive chain	entry screening, visitor mediation spaces, survivor clinic, and a morgue with viewing (Fig. 4).	
Dimension for surge	ensuring layouts remain safe and legible under peak loads.	

legiare funzioni di maternità/pediatria e visibilità dalle zone a basso rischio, senza compromettere PCI (Fig. 3). Questo spiega perché la zonizzazione equilibrata e i servizi di maternità e chirurgia in N02 rispondono meglio alle esigenze della LF, rispetto alle maggiori dimensioni di N03 privo di servizi inclusivi (Figg. 2, 5).

Dai layout ai principi di progettazione
La sintesi trasversale restituisce cinque principi per i CT per LF (Tab. 3).
Questi principi rielaborano gli standard architettonici consolidati per ETC, adattandoli ai contesti di riferimento per LF (CDC, 2014; World Health Organization, 2014; Médecins Sans Frontières, 2015).

Limitazioni
Il numero ridotto di casi studio non consente generalizzazioni statistiche. Tuttavia, la triangolazione tra planimetrie, evidenze in letteratura, interviste con OS e revisione da esperti esterni fornisce un quadro qualitativo solido. La diversità tra i tre CT permette l'identificazione di strategie ricorrenti, criticità e margini di miglioramento.

Conclusioni

L'analisi comparativa di tre CT per LF in Nigeria evidenzia una marcata variabilità nella configurazione spaziale, funzionale e nelle infrastrutture di supporto, sottolineando la necessità di criteri progettuali coerenti basati su evidenze.
L'assenza di standard condivisi ha contribuito a una dotazione disomogenea di servizi di maternità e pediatria, capacità mortuaria e spazi per il personale, rendendo necessarie linee guida progettuali per strutture sicure, inclusive e resilienti.
Lo studio propone una valutazione architettonica e funzionale di tre CT per LF impiegati durante i recenti focolai in Nigeria, evidenziando differenze in termini di capienza, zonizzazione, accessibilità e integrazione dei servizi. Questi aspetti incidono sull'assistenza ai pazienti, sulla sicurezza del personale e sull'efficacia delle misure di PCI. La carenza di servizi sia per donne in gravidanza sia per bambini (presenti entrambi in un solo CT), la limitata separazione dei flussi, gli spazi ridotti per vestizione e svestizione dei DPI e le planimetrie rigide hanno talvolta ostacolato l'adattabilità nelle emergenze. In alcuni casi, le configurazioni spaziali riducono la visibilità dalle aree a basso rischio, aumentando gli ingressi del personale nelle zone ad alto rischio. Tali criticità incidono sull'efficienza operativa e confermano l'importanza della progettazione dello spazio nella risposta ai focolai.
Colmare queste lacune richiede linee guida progettuali basate su evidenze, adattate ai contesti a rischio epidemico. Tra le priorità emergono spazi per maternità e pediatria, standard minimi di superficie per posto letto, aree di vestizione e svestizione chiaramente delimitate a supporto di flussi unidirezionali e l'adozione di planimetrie modulari capaci di espandersi.
Sebbene focalizzata sulla Nigeria, l'analisi offre indicazioni di più ampia rilevanza. Approcci progettuali orientati al controllo delle infezioni, alla tutela della privacy dei pazienti e al supporto al personale possono aiutare la pianificazione dei CT a livello globale, particolarmente nelle regioni soggette a focolai di malattie infettive. La progettazione delle strutture può assumere un ruolo strategico nella preparazione a emergenze sanitarie.
Il lavoro futuro dovrebbe mirare alla definizione di indicatori standardizzati in grado di valutare l'influenza della progettazione sugli esiti clinici, sulla sicurezza del personale e sull'esperienza dei pazienti. L'ampliamento della raccolta dati, sia quantitativa sia qualitativa, consentirà di approfondire la comprensione del ruolo dell'ambiente costruito nella risposta alle epidemie.
In conclusione, lo studio mostra come l'integrazione di principi architettonici basati su evidenze nella pianificazione dei CT per LF può rafforzare la preparazione, ridurre i rischi di trasmissione e garantire risposte più efficienti e inclusive, in grado di rispondere alle esigenze delle popolazioni vulnerabili.

ATTRIBUZIONE, RICONOSCIMENTI, DIRITTI D'AUTORE

Gli autori desiderano ringraziare il Dr. Mahmood Dalhat, il Dr. Yusuf Jibrin, la Dr.ssa Anaïs Legand, il Dr. Sylvanus Okogbenin e il Dr. Joshua Ofoli per aver facilitato l'accesso alla documentazione tecnica. Un ringraziamento al Dr. Mahmood Dalhat, al Dr. Yusuf Jibrin e al Dr. Sylvanus Okogbenin per la disponibilità e per aver generosamente condiviso la propria conoscenza del contesto durante le interviste.

REFERENCES

Akpede, G. O., Asogun, D. A., Okogbenin, S. A., & Okokhere, P. O. (2018), "Lassa fever outbreaks in Nigeria", *Expert Review of Anti-Infective Therapy*, Vol. 16, n. 9. Available at: https://doi.org/10.1080/14787210.2018.1512856 (Accessed on 27/08/2025)

Alli, A., Ortiz, J. F., Fabara, S. P., Patel, A., & Halan, T. (2021), "Management of Lassa Fever: A Current Update" *Cureus*, Vol. 13, n. 5. Available at: https://doi.org/10.7759/CUREUS.14797 (Accessed on 27/08/2025)

Balogun, O. O., Akande, O. W., & Hamer, D. H. (2020), "Lassa Fever: An Evolving Emergency in West Africa", *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, Vol. 104, n. 2, pp. 466. Available at: https://doi.org/10.4269/AJTMH.20-0487 (Accessed on 05/11/2025)

CDC. (2014). Safe Handling of Human Remains of VHF Patients in U.S. Hospitals and Mortuaries. Available at: https://www.cdc.gov/viral-hemorrhagic-fevers/hcp/ (Accessed on 05/11/2025)

Chaudhary, M., Cutland, C. L., Bonet, M., Gentile, A., Jones, C. E., Marshall, H. S., Stergachis, A., Voss, G., Darko, D. M., Sevene, E., Hyde, T., Fairlie, L., Kampmann, B., Everett, D., & Munoz, F. M. (2025), "Burden of Lassa fever disease in pregnant women and children and options for prevention", *Vaccine*, Vol. 43 (pt 1). Available at: https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2024.126479 (Accessed on 05/11/2025)

Doohan, P., Jorgensen, D., Naidoo, T. M., McCain, K., Hicks, J. T., McCabe, R., Bhatia, S., Charniga, K., Cuomo-Dannenburg, G., Hamlet, A., Nash, R. K., Nikitin, D., Rawson, T., Sheppard, R. J., Unwin, H. J. T., van Elsland, S., Cori, A., Morgenstern, C., Imai-Eaton, N., … Cucunuba Perez, Z. (2024), "Lassa fever outbreaks, mathematical models, and disease parameters: a systematic review and meta-analysis" *The Lancet Global Health*, Vol. 12, n. 12, pp. e1962-e1972. Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S2214-109X(24)00379-6 (Accessed on 27/08/2025)

Finnegan, L., Sheffield, J., Sanghvi, H., & Anker, M. (2004), "Infectious Diseases and Maternal Morbidity and Mortality", *Emerging Infectious Disease Journal*, Vol. 10, n. 11. Available at: https://doi.org/10.3201/eid1011.040624_05 (Accessed on 04/09/2025)

Fisher-Hoch, S. P. (2005), "Lessons from nosocomial viral haemorrhagic fever outbreaks", *British Medical Bulletin*, Vol. 73-74, pp. 123-137. Available at: https://doi.org/10.1093/BMB/LDH054 (Accessed on 05/11/2025)

Fontana, L., Pagano, F., De Filippi, F., Silenzi, A., Ait-Ikhlef, K., & Di Marco, M. (2024), "Evolution of Ebola and Marburg Treatment Centers Design, a Review of the Last Ten Years of Outbreaks in Africa", *Architecture*, Vol. 4, n. 4, pp. 930-947. Available at: https://doi.org/10.3390/architecture4040049 (Accessed on 20/11/2025)

Goeijenbier, M., Wagenaar, J., Goris, M., Martina, B., Henttonen, H., Vaheri, A., Reusken, C., Hartskeerl, R., Osterhaus, A., & Van Gorp, E. (2013), "Rodent-borne hemorrhagic fevers: under-recognized, widely spread and preventable – epidemiology, diagnostics and treatment", *Critical Reviews in Microbiology*, Vol. 39, n. 1, pp. 26-42. Available at: https://doi.org/10.3109/1040841X.2012.686481 (Accessed on 20/11/2025)

Kernéis, S., Koivogui, L., Magassouba, N., Koulemou, K., Lewis, R., Aplogan, A., Grais, R. F., Guerin, P. J., & Fichet-Calvet, E. (2009), "Prevalence and risk factors of lassa seropositivity in inhabitants of the Forest Region of Guinea: A cross-sectional study", *PLoS Neglected Tropical Diseases*, Vol. 3, n. 11. Available at: https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0000548 (Accessed on 05/11/2025)

Médecins Sans Frontières. (2015), *Ebola Treatment Centres: design and construction PART I-PART II*. Available at: https://evaluation.msf.org/sites/default/files/attachments/seu_ebola_report_etc_design_and_construction_part_i_final_0.pdf ; https://evaluation.msf.org/sites/default/files/attachments/seu_ebola_report_etc_design_and_construction_part_ii_final.pdf (Accessed on 05/11/2025)

Naeem, A., Zahid, S., Hafeez, M. H., Bibi, A., Tabassum, S., & Akilimali, A. (2023), "Re-emergence of Lassa fever in Nigeria: A new challenge for public health authorities", *Health Science Reports*, Vol. 6, n. 10. Available at: https://doi.org/10.1002/hsr2.1628 (Accessed on 05/11/2025)

NCDC. (2020), *National Guidelines on Infection Prevention and Control for Viral Hemorrhagic Fevers (VHF)*. Available at: https://ncdc.gov.ng/themes/common/docs/protocols/111_1579986179.pdf (Accessed on 27/08/2025)

NCDC. (2022), Update of Lassa fever outbreak in Nigeria. In Nigeria Centre for Disease Control and Prevention. Available at: https://ncdc.gov.ng/diseases/sitreps/?cat=5&name=An%20update%20of%20Lassa%20fever%20outbreak%20in%20Nigeria (Accessed on 05/11/2025)

Price, M. E., Fisher-Hoch, S. P., Craven, R. B., & McCormick, J. B. (1988), "A prospective study of maternal and fetal outcome in acute Lassa fever infection during pregnancy", *British Medical Journal*, Vol. 297, pp. 584-587. Available at: https://doi.org/10.1136/BMJ.297.6648.584 (Accessed on 05/11/2025)

Redding, D. W., Gibb, R., Dan-Nwafor, C. C., Ilori, E. A., Yashe, R. U., Oladele, S. H., Amedu, M. O., Iniobong, A., Attfield, L. A., Donnelly, C. A., Abubakar, I., Jones, K. E., & Ihekweazu, C. (2021), "Geographical drivers and climate-linked dynamics of Lassa fever in Nigeria", *Nature Communications*, Vol. 12, n. 1. Available at: https://doi.org/10.1038/s41467-021-25910-y (Accessed on 04/09/2025)

Shehu, N. Y., Gomerep, S. S., Isa, S. E., Iraoyah, K. O., Mafuka, J., Bitrus, N., Dachom, M. C., Ogwuche, J. E., Onukak, A. E., Onyedibe, K. I., Ogbaini-Emovon, E., Egah, D. Z., Mateer, E. J., & Paessler, S. (2018), "Lassa Fever 2016 Outbreak in Plateau State, Nigeria–The Changing Epidemiology and Clinical Presentation", *Frontiers in Public Health*, Vol. 6. Available at: https://doi.org/10.3389/FPUBH.2018.00232 (Accessed on 05/11/2025)

World Health Organization. (2014), *Hospital Preparedness for Epidemics*, Emergency Preparedness (WPE), Geneva. Available at: https://www.who.int/publications/i/item/hospital-preparedness-for-epidemics (Accessed on 04/09/2025)

Mappe integrate del rischio e architetture tecniche per contesti fragili. I borghi dauni

Nicoletta Faccitondo, https://orcid.org/0009-0002-5228-7421
Dipartimento di Architettura Costruzione e Design, Politecnico di Bari, Italia
nicoletta.faccitondo@poliba.it

Abstract. La diffusa franosità caratterizza i piccoli centri urbani del Subappennino Dauno in Puglia, ponendoli in condizione di fragilità. Un'attività del PRIN TEArch, qui illustrata, è incentrata sullo studio delle cartografie del rischio su tale contesto. L'obiettivo è costruire un archivio di materiali di conoscenza del territorio, per il supporto alla gestione della vulnerabilità nel progetto di architettura. L'osservazione delle carte evidenzia l'acuirsi delle frane in prossimità dei borghi, dimostrando la relazione reciproca tra pressione antropica e ambiente. Per questo l'attività ha prodotto delle mappe integrate del rischio insieme a un abaco delle principali architetture tecniche già usate come strategie di mitigazione in alcuni casi applicativi locali, per fare sintesi sui dati, creando uno strumento di agile consultazione per le fasi successive di pre- e meta-progetto.

Parole chiave: Borghi dauni; Franosità; Modelli conoscitivi; Cartografia; *Nature based solutions*.

La condizione di fragilità di un ambiente costruito è il risultato dell'interrelazione tra molteplici processi; interventi puntuali o emergenziali non risultano sufficienti a governarli, perché inadeguati ad affrontarne le cause profonde. Pertanto, «le criticità relative alla rigenerazione urbana e territoriale [...] segnano la necessità di un'inversione di tendenza negli approcci pianificatori e progettuali. Con riflessioni, ricerche e sperimentazioni per processi di rigenerazione orientati alla e dalla transizione eco-sociale, per far convergere le risorse entro piani di azione e interventi integrati (*site specific* e *resources based*) in una prospettiva di medio lungo periodo» (Mussinelli *et al*., 2022).
Tali piani "integrati" richiedono analoghi strumenti, da definire e sperimentare, ed è in questa consapevolezza che si inserisce il lavoro sviluppato nell'ambito del PRIN TEArch (Towards an Earthling Architecture), per la "definizione di strategie di coesistenza e cura per i paesaggi a rischio nell'Italia meridionale". Ne viene qui illustrata un'attività specifica e introduttiva, incentrata su uno degli ambiti di azione individuati dal quadro del PRIN: i borghi dauni, ovvero alcuni dei piccoli centri urbani del territorio del Subappennino Dauno, area interna della Puglia settentrionale – selezionata come oggetto di studio perché interessata dal diffuso e peculiare rischio di frana (Fig. 1). L'attività presentata ha l'obiettivo di comporre un modello conoscitivo della vulnerabilità del territorio e di elaborare uno strumento, derivante da tale modello, per il supporto pratico alla lettura del contesto, e alle attività di progettazione su di esso. È verso il metodo della mappatura che si è orientato il PRIN, per sperimentare sulla rappresentazione integrata di dati qualitativi e quantitativi, ma anche verso la raccolta sistematizzata dei dati in forma di archivio. Di conseguenza, lo strumento sviluppato in questo studio integra due funzioni complementari: da un lato la costruzione di una cartografia multilivello che sovrappone le diverse informazioni, finalizzata alle attività successive di pre- e meta-progetto; dall'altro lo studio di casi applicativi locali di soluzioni tecnologiche già adottate come strategie di mitigazione, per disporre di un abaco di esempi reali da poter valutare nella loro efficacia e replicabilità.

I borghi dauni e la franosità. Interazioni e cause

La ricostruzione dello stato dell'arte sull'oggetto dello studio – primo passo del modello conoscitivo – ha avuto uno sguardo multidisciplinare, avvalendosi dei contributi interni al PRIN, raccogliendo gli studi di geotecnica sviluppati sui borghi dauni.
I borghi dauni sono 25, censiti dal PPTR (Piano Paesaggistico Territoriale Regionale) della Puglia, che definisce l'ambito territoriale in cui si trovano come "Subappennino Dauno",

Integrated risk maps and technical architectures for fragile contexts. The Daunia villages

Abstract. Widespread landslides characterise the small urban centres of the Daunia Sub-Apennines in Apulia, placing them in a fragile state. A PRIN TEArch activity, illustrated here, focuses on the study of risk maps in this context. The goal is to build an archive of knowledge materials for the area to support vulnerability management in architectural design. Observation of the maps highlights the increased frequency of landslides near the villages, demonstrating the reciprocal relationship between human pressure and the environment. Hence, the activity produced integrated risk maps along with an abacus of the main technical architectures already used as mitigation strategies in some local applications. This serves to summarise the data and create a user-friendly consultation tool for subsequent pre-project and meta-project phases.

Keywords: Daunia villages; Landslides; Knowledge models; Cartography; Nature-based solutions.

The fragility of a built environment results from the interrelations between multiple processes. One-off or emergency interventions are insufficient to manage them, as they are inadequate to address their root causes.
«The criticalities relating to urban and territorial regeneration [...] mark the need for a trend inversion in planning and design approaches, with reflections, research and experiments for regeneration processes oriented to and from the eco-social transition. The aim is to make resources converge within action plans and integrated interventions (site-specific and resource-based) in a medium to long-term perspective» (Mussinelli *et al*., 2022).
Such "integrated" plans require similar tools to be defined and tested. It is with this awareness that the work developed within the PRIN TEArch (Towards an Earthling Architecture) project contributes to the "definition of coexistence and care strategies for landscapes at risk in Southern Italy". A specific and introductory activity is illustrated here, focusing on one of the areas of action identified by the PRIN framework, namely the Daunia villages, or some of the small urban centres in the Daunia Sub-Apennines, an inland area of northern Apulia. This area was selected as a study object because it is affected by a widespread and unique landslide risk (Fig. 1). The objective of the presented activity is to develop a cognitive model of the territory's vulnerability, and to develop a tool, derived from this model, to provide practical support for interpreting the context, and for planning activities based on it. The PRIN has oriented itself towards the mapping method, experimenting with the integrated representation of qualitative

ISSN online: 2239-0243 | © 2025 Author(s) | http://www.fupress.com/techne | DOI: 10.36253/techne-18633
Open access, peer-reviewed article published by Firenze University Press (https://www.fupress.com) and distributed, except where otherwise noted, under the terms of the CC BY 4.0 License for content and CC0 1.0 Universal for metadata

01 | Rocchetta Sant'Antonio nel Subappennino Dauno, vista generale e crollo di un corpo di frana, foto a sinistra di M. Mannino, a destra dell'a., 2025
Rocchetta Sant'Antonio in the Daunia Sub-Apennines, general view and collapse of a landslide, photo on the left by M. Mannino, on the right by the author, 2025

01 |





confinato dalla catena appenninica da un lato e dal Tavoliere delle Puglie dall'altro. I borghi e il loro territorio sono di fatto un sistema, con le stesse identitarie "dominanti paesaggistiche" (Regione Puglia, 2015), insediative, fisiche e ambientali; e tra queste vi è la franosità, capillarmente estesa.
Riferimento fondamentale sono le analisi condotte sull'area, anche a supporto del Progetto Strategico 119 della Regione Puglia[1], che spiegano il fenomeno e sviluppano un modello complesso, non solo per l'interpretazione fenomenologica delle frane, ma anche per la loro valutazione, misurazione e monitoraggio, considerandone l'impatto e la possibile evoluzione (Cotecchia *et al*., 2016). Da tali ricerche si evince che la franosità ha cause sia intrinseche – proprie della geomorfologia del territorio – sia associate a fattori esterni. Prima ragione sono la conformazione idrogeologica e i materiali del suolo: «formazioni flysch ricche di argilla sono diffuse in Daunia e rendono i versanti suscettibili a frane. La presenza di unità geologiche intensamente deformate è un altro fattore predisponente all'instabilità» (Wasowski *et al*., 2010, tradotto dall'autrice).
E in generale nel territorio appenninico «i pendii a bassa pendenza (ad esempio 10°-12°), formati da argille tettonizzate ad alta plasticità, sono frequentemente interessati da frane profonde (più di 20 m) molto lente (meno di 1,6 m/anno). Questi movimenti lenti possono subire accelerazioni, che rappresentano la fase finale di un'evoluzione di lunga durata in equilibrio. Inoltre, spesso la velocità di questi movimenti segue un andamento stagionale, con valori minimi in estate e massimi tra fine inverno e metà primavera, quando si registrano carichi piezometrici molto elevati fino a grandi profondità» (Cotecchia *et al*., 2016, tradotto dall'autrice).
L'acqua è fattore cruciale: «le storie dei casi di frana dimostrano che i fattori temporali più significativi sono spesso quelli correlati ai processi indotti dalle precipitazioni e alla loro influenza sull'idrologia, sulle pressioni delle falde acquifere e sulle resistenze effettive dei materiali dei pendii», sebbene non vada tralasciato che «la distribuzione dei cedimenti dei pendii nel tempo e nello spazio rifletta un'interazione di molte variabili» (Wasowski *et al*., 2010, tradotto dall'autrice).

and quantitative data, as well as with the systematic collection of data in archive form. Consequently, the tool developed in this study integrates two complementary functions, namely the construction of a multi-level cartography that overlays the various pieces of information, aimed at subsequent pre-project and meta-project activities; and the study of local application cases of technological solutions already adopted as mitigation strategies to have a list of real-world examples, whose effectiveness and replicability can be evaluated.

Daunia villages and landslides. Interactions and causes

Reconstructing the state of the art on the study object – the first step of the cognitive model – had a multidisciplinary perspective, drawing on contributions from within the PRIN, and gathering together the geotechnical studies developed on the Daunia villages.
There are 25 Daunia villages listed in the PPTR (Regional Territorial Landscape Plan) of Apulia, which defines the territorial area in which they are located as the "Daunia Sub-Apennines", bordered by the Apennine chain on one side, and the Tavoliere delle Puglie on the other. The villages and their territory are effectively a system with the same "dominant landscape" (Regione Puglia, 2015) characteristics, whether settlement-related, physical, or environmental, including the widespread landslide.
A key reference is the analysis conducted in the area, also in support of the Apulia Region's Strategic Project 119[1]. They explain the phenomenon and develop a complex model, not only for the phenomenological interpretation of landslides, but also for their assessment, measurement, and monitoring, considering their impact and potential evolution (Cotecchia *et al*., 2016). These studies show that landslides have both intrinsic causes – specific to the geomorphology of the area – and those associated with external factors. The primary causes are the hydrogeological conformation and soil materials: «Clay-rich flysch formations are widespread in Daunia and make slopes susceptible to landsliding. The presence of intensely deformed geological units is another factor predisposing to instability» (Wasowski *et al*., 2010).
And, in general, in the Apennine region, «low gradient slopes (e.g., 10°-12°), formed of high plasticity tectonised clays, are recurrently found to be affected by very slow (less than 1.6 m/year) deep landslides (more than 20 m deep). These slow movements can undergo accelerations, which represent the final stage of long-lasting evolution in equilibrium. Moreover, often the rate of these movements is found to follow a seasonal trend, being lowest in summer and maximum in late winter-mid spring, when very high piezometric heads are recorded down to large depths» (Cotecchia *et al*., 2016).
Water is a crucial factor: «landslide case histories demonstrate that the most significant temporal controls are often those related to rainfall-induced processes and their influence on hydrology, groundwater pressures, and effective strength of slope materials», although it should not be overlooked that «the distribution of slope failures in time and space reflects an interaction of many variables» (Wasowski *et al*., 2010).

Tra queste, e come fattore esterno del rischio di frana, vi è la pressione antropica: dalla seconda metà del Novecento è rilevante l'alterazione dell'uso del suolo, riguardante la deforestazione e l'intensificazione delle colture ad aratura profonda (Wasowski *et al*., 2010). Altri interventi sono le modifiche apportate al profilo dei pendii; ad esempio nel caso di Lucera – uno dei borghi, collocato sul margine del Subappennino Dauno – il crollo di un corpo di frana vicino al centro abitato risulta inizialmente indotto «dalla lenta dissipazione delle pressioni interstiziali […] generata da precedenti scavi di cava al piede del versante» (Lollino *et al*., 2016, tradotto dall'autrice).
E infine, e soprattutto, lo sviluppo urbanistico risulta condizionato dalla franosità: la parte più antica dei borghi dauni si è sempre sviluppata sugli affioramenti rocciosi, anche molto estesi e stabili, che si alternano al terreno fragile. Difatti, l'osservazione delle cartografie del rischio mostra i centri storici dei borghi dauni 'contratti' sulla cima delle alture, costantemente attorniati da un "recinto" di corpi di frana distribuiti sui pendii argillosi, barriera topografica all'eventuale espansione cittadina (Cotecchia *et al*., 2016). Questa 'sapienza' insediativa risulta invece smarrita nelle espansioni urbane più recenti, prevalentemente novecentesche, poiché costruite più a ridosso delle scarpate. Con la conseguenza che molte strutture e infrastrutture interagiscono direttamente con le frane e sono oggi oggetto di danneggiamenti.

Mappe integrate del rischio. Il caso di Rocchetta Sant'Antonio

Completata la ricognizione sullo stato dell'arte, l'attività di ricerca ha proseguito la definizione del modello conoscitivo sui borghi dauni con l'elaborazione di uno strumento che facesse sintesi di quanto appreso, e che potesse essere usato come base per la discussione di piani integrati di progetto: una mappa multilivello, integrante dati qualitativi e quantitativi sulle condizioni di rischio.
La prima fase di questa elaborazione è stata l'individuazione dell'area di estensione della mappa, che si è evoluta di pari passo con l'individuazione dell'oggetto di studio.
All'interno del PRIN si è ridotta l'attenzione da tutto il territorio del Subappennino Dauno a un gruppo ristretto di borghi, posti verso il confine tra Puglia e Campania: Rocchetta Sant'Antonio, Candela, Sant'Agata di Puglia; selezionati perché vicini fra loro e disposti nel paesaggio come sistema policentrico, e non gerarchico (Regione Puglia, 2015); suggerendo la possibilità di scenari di progetto integrati, leganti fra loro più centri urbani.
Seconda fase è stata la costruzione vera e propria della mappa, sovrapponendo fra loro i livelli individuati e raccolti.
La base cartografica è data dal modello territoriale digitale della banca dati SIT Puglia[2], disponibile in ambiente GIS. Sono stati selezionati come *layer* da considerare: le curve di livello, come dato quantitativo di misurazione del suolo, e come dato qualitativo paesaggistico; l'edificato, come informazione sull'ambiente costruito; le principali strade e connessioni, come dato infrastrutturale.
Dallo studio preliminare emerge che la comprensione del fenomeno di frana passa attraverso il riconoscimento dei materiali del suolo e delle loro proprietà meccaniche. Pertanto, il secondo livello considerato è stato quello della qualità geologica del suolo, ricavato dalla lettura delle carte dell'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale)[3]; disponibili in formato cartaceo o *raster*, sono state ridisegnate in CAD per ricreare i contorni degli ambiti geologici che illustrano. Alla scala 100.000 i borghi dauni studiati risultano su suolo compo-

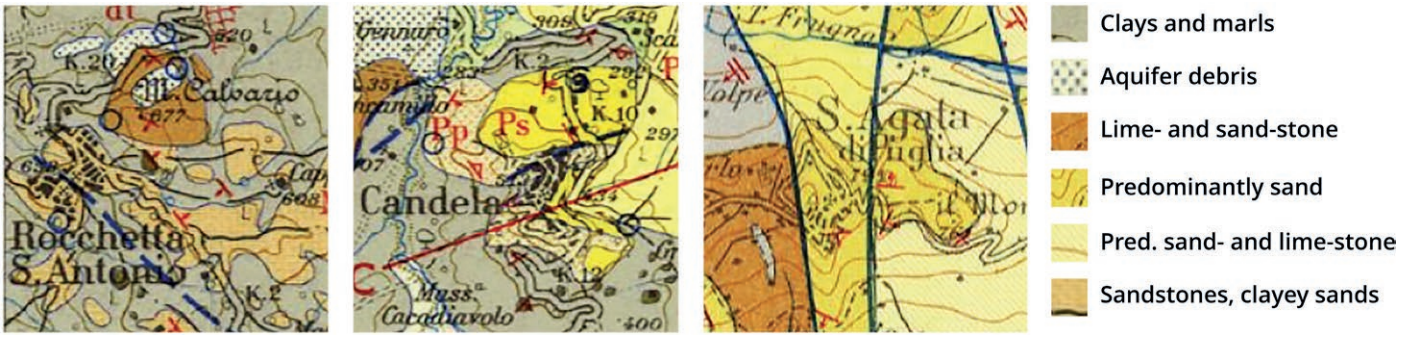
Among these, anthropogenic pressure is an external factor in landslide risk. Land use changes have been significant since the latter half of the twentieth century, involving deforestation and the intensification of deep-ploughing cultivation (Wasowski *et al*., 2010). Other interventions include modifications to the slope profile. For example, in the case of Lucera – one of the villages located on the edge of the Daunia Sub-Apennines – the collapse of a landslide near the town was initially induced «by the slow dissipation of […] pore water pressures generated by previous quarry excavations at the slope toe» (Lollino *et al*., 2016).
Finally, and most importantly, urban development is conditioned by landslide risk. The oldest parts of the Daunia villages have always developed on rocky outcrops, some of which are very large and stable, alternating with fragile terrain. Indeed, observation of risk maps shows the historic centres of the Daunia villages 'contracted' to the tops of the hills, constantly surrounded by a "fence" of landslides distributed across the clay slopes, a topographical barrier to potential urban expansion (Cotecchia *et al*., 2016). However, this wisdom has been lost in more recent urban expansions, predominantly from the twentieth century, as settlements were built closer to the slopes. As a result, many structures and infrastructure interact directly with landslides and are now subject to damage.

Integrated Risk Maps. The Case of Rocchetta Sant'Antonio

Once the state-of-the-art survey was completed, the research activity continued to define the cognitive model for the Daunia villages by developing a tool that would summarise what was learned and could be used as a basis for discussing integrated project plans, precisely a multi-level map converging qualitative and quantitative data on risk conditions.
The first phase of this development was the identification of the map's extension area, which evolved in parallel with the identification of the study object.
Within the PRIN, the focus was narrowed from the entire Daunia Sub-Apennine territory to a small group of villages located near the border between Apulia and Campania, namely Rocchetta Sant'Antonio, Candela, and Sant'Agata di Puglia. These villages were selected because close to each other and arranged in the landscape as a polycentric, non-hierarchical system (Regione Puglia, 2015). This suggested the possibility of integrated project scenarios, linking multiple urban centres.
The second phase involved the actual construction of the map, overlaying the identified and collected layers.
The cartographic basis is provided by the digital territorial model of the SIT Puglia[2] database, available in GIS. The following layers were selected, precisely contour lines, as quantitative measurement data, and as qualitative landscape data; buildings, as information on the built environment; and main roads and connections, as infrastructure data.
The preliminary study revealed that understanding the landslide phenomenon requires recognising the soil materials and their mechanical properties. Therefore, the second level considered was the geological quality of the soil, derived from ISPRA (Higher Institute for Environmental Protec-

02 | Conformazione geologica del suolo dei borghi di Rocchetta, Candela, Sant'Agata di Puglia, rielaborazione dalla Carta Geologica d'Italia ISPRA
Geological composition of the soil of the villages of Rocchetta, Candela, and Sant'Agata di Puglia, reworked from the ISPRA Geological Map of Italy

02 |



sto prevalentemente da arenarie e sabbie del Pilocene, mentre Rocchetta Sant'Antonio si distingue dalle altre, perché si edifica quasi totalmente su un'altura di arenaria quarzosa del Miocene, circondata dal cosiddetto "complesso indifferenziato", fatto di argille stratificate (Fig. 2).

Il terzo livello di mappatura integrata è stato fornito dal progetto "Geo_Puglia", fondamentale piano sui borghi dauni del 2020, risultato della collaborazione tra la Protezione Civile Regionale e l'Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica del CNR, che ha portato a un consistente avanzamento nel processo di disegno georeferenziato dei fenomeni di rischio[4]. La carta Geo_Puglia individua i corpi di frana in maniera puntuale, su tutto il territorio del Subappennino Dauno, ciascuno con proprio perimetro di estensione e direzione di scorrimento, su supporto *GeoPackage*.

È il più importante livello, dal momento che «complete e affidabili mappe di inventario delle frane [...] che mostrino la distribuzione temporale e spaziale dei movimenti di massa sono strumenti essenziali per la comprensione dell'evoluzione geomorfologica del territorio, e la principale fonte di informazione per la valutazione del pericolo e del rischio di frana» (Zumpano *et al*., 2021, tradotto dall'autrice).

I tre livelli di disegni e informazioni, definiti su supporti di natura diversa, sono stati combinati fra loro in ambiente GIS, mantenendo la georeferenziazione (Fig. 3).

La lettura della mappa così composta ha dato come risultato l'individuazione di un caso di studio specifico tra i quattro borghi già selezionati: Rocchetta Sant'Antonio, per l'immediata correlazione tra conformazione del suolo, sviluppo urbano e diffusione dei corpi di frana (Fig. 4).

La fase successiva è stata quindi il restringimento della mappa sulla sola Rocchetta. Per questa fase i livelli sono stati esportati in ambiente CAD, al fine di rendere la mappa maggiormente pratica, ed essenziale dal punto di vista rappresentativo, facendo emergere relazioni e vincoli fra gli elementi (Fig. 5).

Il risultato principale ottenuto tramite la lettura e discussione della mappa integrata del rischio su Rocchetta è la messa in evidenza del rapporto tra sviluppo urbano e franosità. La mappa conferma infatti che l'urbanizzazione si sia ampliata adattandosi nel tempo alla condizione di rischio, per poi perdere questa connessione in epoche più recenti: la cittadella altomedievale, parte più antica e storica della città, parte da Sud, disponendosi lungo una altura rocciosa lambita dai corpi di frana. Le giaciture delle costruzioni delimitano il perimetro dei gruppi di frane stesse, facendo supporre che si tratti di frane antiche per cui il rischio di scivolamento fosse conosciuto e aggirato. In seguito, a partire dal Seicento, il borgo si è espanso in due rami, lungo i pendii, ma evitando i corpi di frana. L'espansione novecentesca invece sembra ignorare le condizioni di rischio, e va sia a so-

tion and Research) maps. Available in paper or raster format, they were redrawn in CAD to recreate the contours of the geological areas they illustrate. Presented at a scale of 100,000, the Daunia villages studied are on soil composed predominantly of Pilocene sandstones and sands, while Rocchetta Sant'Antonio stands out from the others because it is built almost entirely on a Miocene quartz sandstone hill, surrounded by the so-called "undifferentiated complex", made up of stratified clays (Fig. 2).

The third level of integrated mapping was provided by "Geo_Puglia" project, an essential 2020 plan for the Daunia villages, resulting from the partnership between the Regional Civil Protection and the Research Institute for Hydrogeological Protection of the CNR. It led to significant advances in the process of georeferenced mapping of risk phenomena. The Geo_Puglia map identifies landslides precisely across the entire Daunia Sub-Apennine territory, each with its own perimeter and direction of flow, using GeoPackage support.

This is the most important level, since «complete and reliable landslide inventory maps [...] showing the spatial and temporal distribution of mass movements are essential tools to understand the geomorphological evolution of the territory, and the main source of information for landslide hazard and risk assessments» (Zumpano *et al*., 2021).

The three levels of drawings and information, defined on different media, were combined in a GIS environment, maintaining georeferencing (Fig. 3).

Reading the map this way helped to identify a specific case study among the four selected villages, precisely Rocchetta Sant'Antonio for the immediate correlation between landform, urban development, and the spread of landslides (Fig. 4).

The next step was to narrow the map to just Rocchetta. For this step, the layers were exported to a CAD environment to make the map more practical and representative, highlighting relationships and connections between the elements (Fig. 5).

The main outcome of reading and discussing the integrated risk map of Rocchetta was the highlighted relationship between urban development and landslide risk. It confirms that urbanisation expanded, adapting over time to the risk, only to lose this connection in more recent times. Indeed, the early medieval citadel, the oldest and most historic part of the city, extends from the south, along a rocky hillside bordered by landslides. The locations of the buildings delimit the perimeter of the landslide groups, suggesting that these were ancient landslides for which the risk of slipping was known and avoided. Subsequently, starting in the seventeenth century, the village expanded in two branches, along the slopes, but avoiding landslides. However, twentieth-century expansion seems to ignore risk conditions, sometimes overlapping with landslides or in areas affected by them, or extending over part of the predominantly clayey terrain. In this case, the integrated risk map suggests identifying areas requiring safety measures, or areas of action that could be part of future integrated plans (Fig. 6).

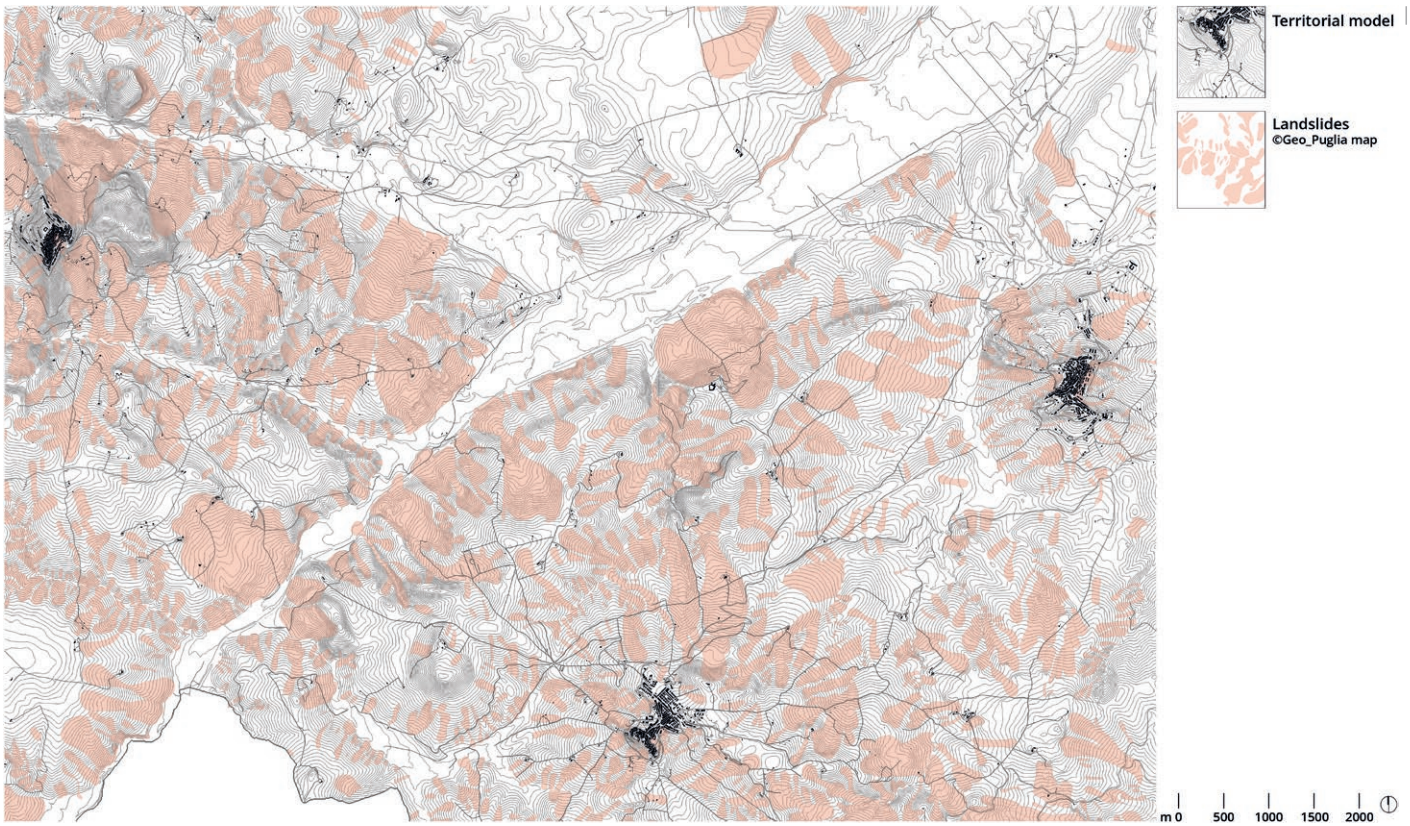
As just demonstrated, integrated maps are not merely a collection of information but an operational tool as they enable to understand the built environment in relation to the topology and

03 | Mappa integrata del rischio focalizzata sulla relazione tra un gruppo di borghi dauni
Integrated risk map focusing on the relationship between a group of Daunia villages

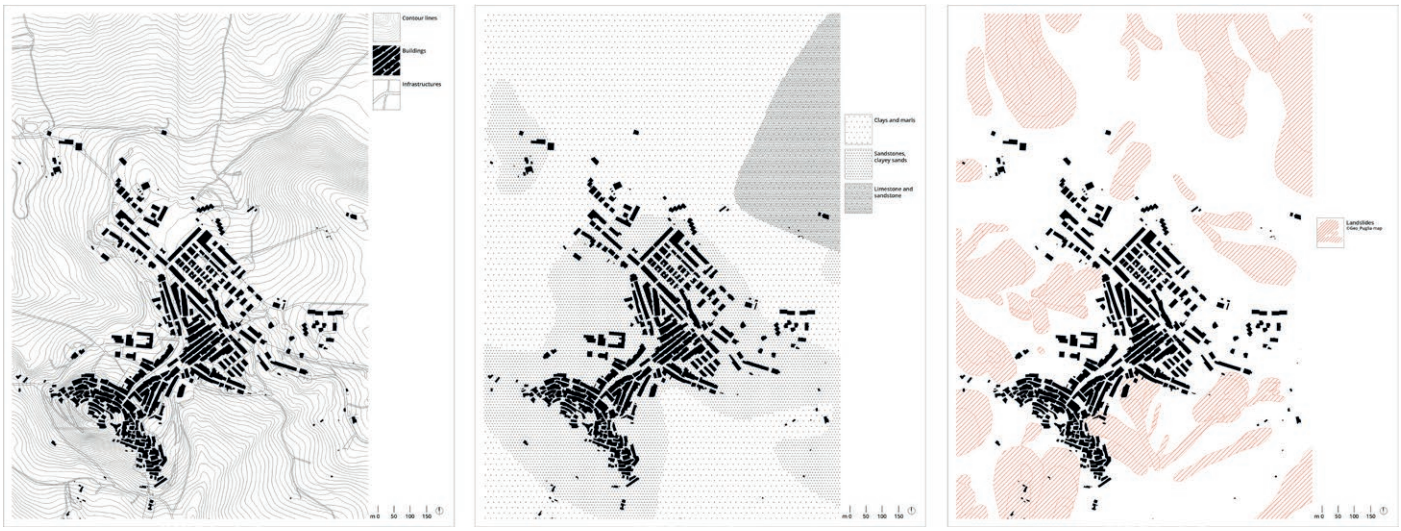
04 | Mappa integrata del rischio su Rocchetta Sant'Antonio, processo costruttivo dei livelli
Integrated risk map of Rocchetta Sant'Antonio, construction process of the levels

vrapporsi in alcuni casi alle frane, sia a zone di loro influenza, sia si stende su parte del terreno composto a prevalenza argillosa. La mappa integrata del rischio suggerisce qui l'individuazione di aree che necessitano di messa in sicurezza, o ambiti di azione che possano essere parte di futuri piani integrati (Fig. 6).

Come appena dimostrato, le mappe integrate non sono semplicemente collezione di informazioni ma strumento operativo, che consente la comprensione della realtà costruita in rapporto alla topologia e alle sue fragilità; e poiché «la sintesi critica [...] si può esplicare tramite mappe» delineando «nuove "geografie



03



04

05 | Mappa integrata del rischio su Rocchetta Sant'Antonio
Integrated risk map of Rocchetta Sant'Antonio

05 |



del rischio" che possono diventare costruttivamente traccia di progetto» (Miano, 2024), esse celano, per di più, già spunti progettuali impliciti e azioni prefigurative.

Architetture tecniche per la mitigazione del rischio: abaco operativo

Per completare l'archivio sistematico del modello conoscitivo, oltre alle mappe integrate è stato parallelamente composto un abaco schematico che rappresenta alcune tipologie note di intervento per la gestione e mitigazione del rischio, realizzati o consigliati per l'area dauna, o per ambiti territoriali limitrofi e franosi. Con l'obiettivo della «necessità di ricomporre il rapporto tra le scale del piano urbanistico e del progetto urbano e architettonico» (Mussinelli, 2022), e quindi consentire alle fasi successive di pianificazione di poter prevedere anche delle architetture tecniche, a partire dalla valutazione dell'efficacia e replicabilità delle soluzioni riassunte nell'abaco.
A titolo di esempio, ritornando al caso già citato di Lucera, il pendio collassato – protagonista di un lungo processo di scivolamento conosciuto dagli anni Ottanta, che si è generato a seguito della dismissione del sito usato precedentemente come cava – è stato trattato per essere messo in sicurezza: l'intervento ha richiesto la riprofilazione della scarpata e la costruzione di un terrapieno alto 30m al piede, così come lo scavo di trincee drenanti longitudinali profonde 12m. Un sistema di drenaggio è consigliato – non attuato – per una frana antica presso il borgo di Volturino, sempre nel Subappennino Dauno ma verso il confine con il Molise. Un esempio esterno alla Daunia, ma limitrofo, in territorio molisano, è il borgo di Petacciato, soggetto a frane a notevole movimentazione, per cui è suggerita la stabilizzazione superficiale, che si suppone possa dare vantaggio indiretto anche ai processi attivi più in profondità (gli esempi qui citati e le loro valutazioni sono da Cotecchia *et al*., 2012) – la stabilizzazione superficiale si ottiene con l'abbinamento di talee o piantine con inerti di legname, terra o rocce, disposti in maniera puntuale o lineare a formare dei rinforzi e contenimenti dei pendii soggetti a scivolamento; oltre ad avere scarso impatto ambientale, agisce su due fronti: l'arresto del movimento della frana ma anche l'impedimento di infiltrazione da acque (Ligato *et al*., 2002).
I risultati delle ricerche dimostrano come il beneficio per la messa in sicurezza delle frane si ottenga principalmente operando sulla causa scatenante del movimento o distaccamento del suolo, ovvero sull'alleggerimento del carico piezometrico, ottenibile tramite *nature based solutions* come opere di regimentazione o drenaggio delle acque, ma anche di ripiantumazione di vegetazione a radicazione profonda; le *nbs* hanno inoltre il vantaggio di poter essere efficaci in breve tempo grazie alla natura sufficientemente permeabile del suolo argilloso che caratterizza in maniera estesa le aree subappenniniche (Cotecchia *et al*., 2020). Le *nbs*, operando sulla causa e non sulle conseguenze dello scivolamento, hanno pertanto una previsione a lungo termine e risultano avere un minore impatto sull'ambiente rispetto alle più tradizionali opere di mitigazione delle frane, basate sul contenimento del terreno (come palificate, gabbionate e muri tirantati) (Cotecchia *et al*., 2020).

Conclusioni

Il modello di conoscenza sviluppato dall'attività vede quindi l'elaborazione di mappe integrate che riportino le condizioni

its fragilities. Moreover, since «critical synthesis […] can be expressed through maps, outlining new "geographies of risk" that can constructively become a blueprint for a project» (Miano, 2024, translated by the author), they also conceal implicit design cues and prefigurative actions.

Technical architectures for risk mitigation: operational abacus

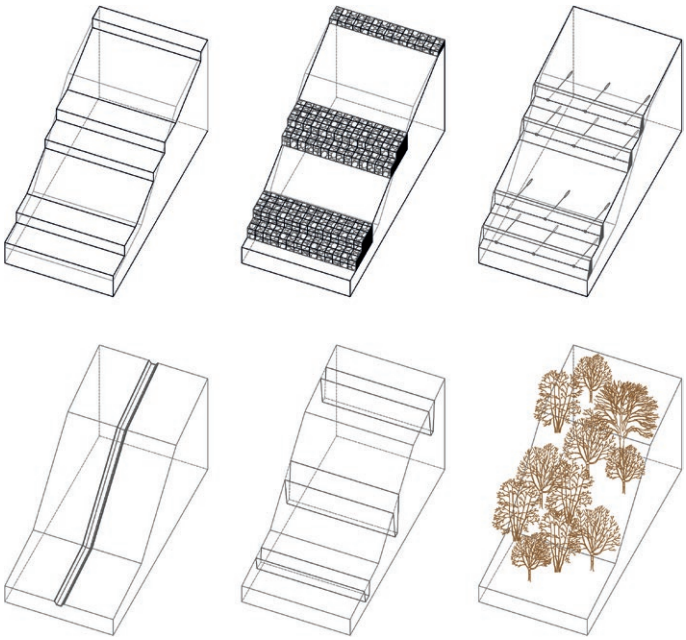
To complete the systematic archive of the knowledge model, in addition to the integrated maps, a schematic abacus was also compiled. It featured some known types of interventions for risk management and mitigation, implemented or recommended for the Daunia area, or for neighbouring and landslide-prone areas. This objective was achieved through the «need to reconstruct the relationship between the scales of the urban plan and the urban and architectural project» (Mussinelli, 2022), thus enabling subsequent planning phases to also include technical architectures, starting with an assessment of the effectiveness and replicability of the solutions summarised in the abacus.
For example, returning to the case of Lucera, the collapsed slope – the subject of a long-running landslide known since the 1980s, which arose following the decommissioning of the site previously used as a quarry – was treated to make it safe. The intervention required reprofiling the slope and building a 30-metre-high embankment at its base, as well as digging 12-metre-deep longitudinal drainage trenches. A drainage system was recommended, but not implemented, for an ancient landslide near the village of Volturino, also in the Daunia Sub-Apennines but near the border with Molise. An example in Molise, adjacent to Daunia, is the village of Petacciato, subject to highly mobile landslides. Surface stabilisation is recommended, which is believed to also indirectly benefit processes active deeper down (the examples cited here and their evaluations are from Cotecchia *et al*., 2012). Surface stabilisation is achieved by combining cuttings or seedlings with wood, soil, or rock aggregates, arranged in specific or linear patterns to form reinforcements designed to contain slopes subject to sliding. In addition to having scarce environmental impact, it acts on two fronts by both halting the movement of the landslide, and preventing water infiltration (Ligato *et al*., 2002).
Research results demonstrate that landslide safety benefits are achieved primarily by addressing the underlying cause of ground movement or detachment, thus by reducing the piezometric load. This can be achieved through nature-based solutions (NBS), such as water management or drainage, but also by replanting deep-rooted vegetation. NBS also have the advantage of being rapidly effective thanks to the sufficiently permeable nature of the clayey soil that characterises the Sub-Apennine areas (Cotecchia *et al*., 2020). Hence, by addressing the cause and not the consequences of landslides, NBS have a long-term impact, and appear to have a lower environmental impact than more traditional landslide mitigation measures, which rely on soil containment (such as pilings, gabions, and tie walls) (Cotecchia *et al*., 2020).

Conclusions

The knowledge model developed by the activity involves the development of integrated maps showing both risk

06 | Mappa integrata del rischio su Rocchetta Sant'Antonio, evidenziazione del rapporto tra sviluppo urbano e franosità
Integrated risk map of Rocchetta Sant'Antonio, highlighting the relationship between urban development and landslide risk





07 | Abaco schematico di soluzioni tecnologiche per la mitigazione del rischio di frana, in alto tre tradizionali opere di contenimento (riprofilazione della scarpata; gabbionata; muro tirantato), in basso tre *nature based solutions* (drenaggio superficiale; trincee drenanti; piantumazione di vegetazione)

Schematic abacus of technological solutions for landslide risk mitigation, top, three traditional containment structures (slope reprofiling, gabion, tie-rod wall), below, three nature-based solutions (surface drainage, drainage trenches, vegetation planting)

di rischio da un lato, e una casistica di esempi reali di caratterizzazioni architettoniche della mitigazione del rischio dall'altro.
La separazione netta tra questi due componenti costituisce un necessario limite: l'approccio descritto negli esempi di soluzioni mitigative è infatti *site specific*, basato sulla condizione e sul comportamento di ciascuna frana affrontata; pertanto, non è semplicemente trasferibile in altri casi: le attività progettuali dovranno avvalersi anche della diagnostica puntuale sui singoli corpi di frana. L'abaco di esempi è tuttavia un riferimento importante per comprendere e schematicamente confrontare fra loro le strategie di gestione e la loro eventuale combinazione, in modo da renderle base per il progetto integrato, non di meri dispositivi ma di architetture tecniche.
È il metodo sperimentato nelle mappe ad essere trasferibile anche in altri ambiti, rendendo replicabile la sintesi che fanno dei fattori attivi nelle aree studiate, che ha ricaduta pratica nella comunicazione negli accordi di consulenza scientifica previsti con le pubbliche amministrazioni, come nei borghi dauni, diventando uno strumento di agile consultazione per uffici e stakeholders.
Dalle mappe non derivano infatti nuovi dati, ma un nuovo modo di leggerli a seconda dei livelli evidenziati e messi in relazione. I loro limiti attuali aprono la strada agli ulteriori sviluppi futuri: è soprattutto l'interazione tra sviluppo urbano e franosità a dover essere ulteriormente esplorata; mettendo in relazione i danneggiamenti osservati negli edifici con le frane che li causano, e analizzando gli ammagliamenti e le risposte alle sollecitazioni del rischio. Le condizioni di fragilità e dissesto vanno affrontate infatti nella chiave di tutela del patrimonio paesaggistico e architettonico esistente, a cui tendono le mappe integrate per una lettura incrociata dei dati sulle aree a rischio, per giungere a individuare le più opportune strategie di intervento.
Il superamento della frammentarietà dei singoli ambiti di conoscenza e la connessione tra gli ambiti di scala sono risultati in questa attività fondamentali per una migliore valutazione dell'impatto del rischio sull'ambiente costruito; e le informazioni raccolte dimostrano che «l'entità degli effetti che un potenziale fattore di pericolo può generare sull'ambiente costruito è riferita da un lato alla predisposizione intrinseca del contesto a subire danni di natura antropica o naturale, dall'altro al suo grado di resilienza e alla sua capacità di adattamento» (Losasso, 2018) e pertanto la vulnerabilità può avere una migliore risposta combinando le strategie di mitigazione con la capacità di convivenza con il rischio.

conditions, and a case study of real-world examples of architectural risk mitigation characterisations.
The clear separation between these two components constitutes a necessary limitation. In fact, the approach described in the examples of mitigation solutions is site-specific, based on the condition and behaviour of each landslide encountered; therefore, it cannot simply be transferred to other cases. The design activities must also take advantage of specific diagnostics of individual landslide bodies. However, the abacus of examples is an important reference for understanding and schematically comparing management strategies and their possible combinations, so as to make them the basis for an integrated project, not of mere devices but of technical architectures.
The method tested in the maps is transferable to other fields, enabling the replication of the active factors in the studied areas. This has practical implications for communication in scientific consultancy agreements with public administrations, as in the Daunia villages, becoming a convenient consultation tool for offices and stakeholders.
The maps do not generate new data, but rather a new way of interpreting them based on the levels highlighted and correlated. Their current limitations pave the way for further future developments. Especially the interaction between urban development and landslide risk needs to be further explored, correlating the damage observed in buildings with the landslides that cause them, and analysing the entanglements and responses to risk stresses. Conditions of fragility and instability must be addressed within the framework of protecting the existing landscape and architectural heritage, which is what integrated maps aim for. This allows for a cross-referencing of data on at-risk areas, enabling the most appropriate intervention strategies to be identified.
Overcoming the fragmentation of individual areas of knowledge and connecting scales has proven crucial in this activity for better assessing the impact of risk on the built environment. The information collected demonstrates that «the extent of the effects a potential danger factor can generate on the built environment refers to the intrinsic predisposition of the context to suffering anthropogenic or natural damage, and to its degree of resilience, as well as to its capacity for adaptation» (Losasso, 2018).
Therefore, vulnerability can be better addressed by combining mitigation strategies with the ability to coexist with risk.

ATTRIBUTION, ACKNOWLEDGMENTS, COPYRIGHT
The activity was conducted within the PRIN-PNRR 2022 "Towards an Earthling Architecture. Strategies of Coexistence and Care for Landscapes at Risk in Southern Italy" (TEArch), University of Naples Federico II (scientific coordinator Pasquale Miano), with University of Catania-Syracuse (Marco Navarra), University of Cagliari (Giorgio Peghin), and Polytechnic University of Bari (Marco Mannino). The mapping of the landslide bodies of the Daunia Sub-Apennines is part of the Geo_Puglia project.

NOTES
[1] Progetto Strategico PS_119 "Valutazione del rischio da frana per la pianificazione di centri urbani minori in zone di catena: il caso della Daunia",

08 | Nature based solutions, esempi reali di drenaggio e regimentazione delle acque, rielaborazione da Ligato *et al.*, 2002
Nature-based solutions, real-world examples of drainage and water management, adapted from Ligato et al., 2002

08 |







ATTRIBUZIONE, RICONOSCIMENTI, DIRITTI D'AUTORE

L'attività è stata condotta all'interno del PRIN-PNRR 2022 Towards an Earthling Architecture. Strategies of Coexistence and Care for Landscapes at Risk in Southern Italy (TEArch), Università Federico II di Napoli (coordinatore scientifico Pasquale Miano), con Università di Catania-Siracusa (Marco Navarra), Università di Cagliari (Giorgio Peghin), Politecnico di Bari (Marco Mannino). La mappatura dei corpi di frana del Subappennino Dauno appartiene al progetto Geo_Puglia.

NOTE

[1] Progetto Strategico PS_119 "Valutazione del rischio da frana per la pianificazione di centri urbani minori in zone di catena: il caso della Daunia", Regione Puglia, coordinatore scientifico: Federica Cotecchia.

[2] Available at: https://pugliacon.regione.puglia.it/web/sit-puglia-sit.

[3] Available at: https://www.isprambiente.gov.it/it/banche-dati/banche-dati-folder/suolo-e-territorio/cartografia-geologica-e-geotematica.

[4] Available at: "Valutazione integrata di dissesti geo-idrologici nel territorio della regione Puglia, modelli interpretativi dei fenomeni e definizione di soglie di pioggia per il possibile innesco di frane superficiali". P.O.R. PUGLIA 2014-2020, Asse V-Azione 5.1 (Geo_Puglia). Referente CNR: Piernicola Lollino. Scheda del progetto: https://www.irpi.cnr.it/project/geopuglia/.

REFERENCES

Cotecchia, F., Petti, R., Milella, D., Lollino, P. (2020), "Design of medium depth drainage trench systems for the mitigation of deep landsliding", *Geosciences*, Vol. 10, n.5, pp. 174-198. Available at: https://doi.org/10.3390/geosciences10050174

Cotecchia, F., Santaloia, F., Lollino, P. (2012), "Slow landsliding as effect of hydro-mechanical coupled processes: examples of resulting damages and mitigation strategies", Large slow active slope movements and risk management, *Proceedings of the 2nd Italian Workshop on Landslides, Napoli, Italy, September 27-30, 2011*, CUES, Salerno, pp. 71-79. Available at: http://dx.doi.org/20.500.14243/222532

Cotecchia, F., Vitone, C., Petti, R., Soriano, I., Santaloia, F., Lollino, P. (2016), "Slow landslides in urbanised clayey slopes: an emblematic case from the south of Italy", Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice, *Proceedings of the 12th International Symposium on Landslides, Napoli, Italy, June 12-19, 2016*, CRC Press, Leiden, NL, pp. 691-698. Available at: http://dx.doi.org/10.1201/9781315375007-69

Ligato, D., Serva, L., Marasciulo, T., Pascarella, F., Guerra, M., Sassanelli, V., Comedini, M., Silvestri, S. (2002), *Atlante delle opere di sistemazione dei versanti*, APAT Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici, Roma. Available at: https://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/manuali-e-linee-guida/atlante-delle-opere-di-sistemazione-dei-versanti-2 (Accessed on 01/09/2025).

Lollino, P., Cotecchia, F., Elia, G., Mitaritonna, G., Santaloia, F. (2016), "Interpretation of landslide mechanisms based on numerical modelling: two case-histories", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Vol. 20, n.9, pp. 1032–1053. Available at: http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2014.985851

Losasso, M. (2018), "Progetto, Ambiente, Resilienza", *Techne*, n. 15, pp. 16-20. Available at: http://dx.doi.org/10.13128/Techne-23195

Miano, P. (2024), "Il progetto dei paesaggi a rischio", in Miano, P., Di Palma, B. (Eds.), *Paesaggi a rischio. Fragilità, vulnerabilità e progetto*, LetteraVentidue, Siracusa, pp. 18-37.

Mussinelli, E., Schiaffonati, F., Torricelli, M.C. (2022), "Per un cambiamento necessario", *Techne*, n. 23, pp. 15-20. Available at: http://dx.doi.org/10.36253/techne-12915

Regione Puglia - Assessorato all'Assetto del Territorio (2015), *Elaborato n. 5 del PPTR. Ambito 2/Monti Dauni*, Available at: https://pugliacon.regione.puglia.it/web/sit-puglia-sit/pptr-piano-paesaggistico-territoriale-regionale (Accessed on 01/09/2025).

Wasowski, J., Lamanna, C., Casarano, D. (2010), "Influence of land-use change and precipitation patterns on landslide activity in the Daunia Apennine, Italy", *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, Vol. 43, n.4, pp. 387-401. Available at: http://dx.doi.org/10.1144/1470-9236/08-101

Zumpano, V., Ardizzone, F., Bucci, F., Cardinali, M., Fiorucci, F., Parise, M., Pisano, L., Reichenbach, P., Santaloia, F., Santangelo, M., Wasowski, J., Lollino, P. (2021), "The relation of spatio-temporal distribution of landslides to urban development (a case study from the Apulia region, Southern Italy)", *Journal of Maps*, Vol. 17, n. 4, pp. 133-140. Available at: http://dx.doi.org/10.1080/17445647.2020.1746417

Regione Puglia, scientific coordinator: Federica Cotecchia.
[2] https://pugliacon.regione.puglia.it/web/sit-puglia-sit.
[3] https://www.isprambiente.gov.it/it/banche-dati/banche-dati-folder/suolo-e-territorio/cartografia-geologica-e-geotematica.
[4] "Valutazione integrata di dissesti geo-idrologici nel territorio della regione Puglia, modelli interpretativi dei fenomeni e definizione di soglie di pioggia per il possibile innesco di frane superficiali". P.O.R. PUGLIA 2014-2020, Asse V-Azione 5.1 (Geo_Puglia). CNR contact: Piernicola Lollino. Scheda del progetto: https://www.irpi.cnr.it/project/geopuglia/.

Ri-Costruire. Il principio di "esposizione intollerabile" nel Piano di Ricostruzione d'Ischia

Alessandro Sgobbo, https://orcid.org/0000-0001-9147-5877
Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II, Italia
alessandro.sgobbo@unina.it

Abstract. La pianificazione post-disastro svolge una complessa mediazione tra memoria territoriale e sicurezza collettiva. Quando né mitigazione né riduzione di vulnerabilità risultano efficaci o sostenibili, l'opzione ragionevole è la delocalizzazione selettiva degli insediamenti. Tale strategia presuppone la consapevolezza che molte permanenze antropiche in aree ad alto rischio sono frutto di scelte insediative storicamente determinate ma oggi non più accettabili. Caso emblematico di innovazione in questo campo è il Piano di Ricostruzione dell'Isola d'Ischia (PdRI). Ischia è un contesto fragile in uno scenario multi-rischio sotto il profilo idrogeologico, sismico e climatico ma anche un territorio di eccezionali valori. Il PdRI, elaborato con il supporto dell'Università Federico II di Napoli, ha proposto un modello di pianificazione resiliente, fondato sul principio di "esposizione intollerabile" e supera l'idea del mero ripristino in favore della rigenerazione territoriale.

Parole chiave: Decompressione insediativa; Rigenerazione territoriale; Resilienza; Ricostruzione; Rischio.

Pianificare il post disastro

La ricostruzione post-catastrofe costituisce un ambito di studio di grande rilevanza (Hidayat and Egbu, 2010) in quanto consente di cogliere il rapporto tra memoria collettiva, identità territoriale e pratiche di pianificazione urbanistica (Montanari, 2020). Una caratteristica costante che emerge dall'analisi dei casi italiani più significativi è la tendenza a orientare gli sforzi ricostruttivi verso la restituzione dei centri urbani e dei paesaggi insediativi nella forma preesistente (Clementi and Di Venosa, 2012). Tale approccio, sintetizzabile nella formula "com'era, dov'era", ha costituito il paradigma dominante, privilegiando la continuità storica e culturale rispetto a soluzioni innovative. Questa impostazione ha contribuito a preservare l'identità dei luoghi, ma ha limitato le opportunità di introdurre moderni principi di sostenibilità e sicurezza.

Si confrontano due approcci, accomunati dall'intento conservativo ma divergenti in relazione al contesto socio-economico su cui agisce la catastrofe. Esempi emblematici sono stati il terremoto del Friuli del 1976 e il sisma campano del 1980. Nel primo caso la comunità locale rivendicò con forza il diritto a mantenere i borghi e le città nei luoghi originari, opponendosi a delocalizzazioni e riconfigurazioni. La ricostruzione fu accompagnata da un forte protagonismo degli enti locali e dei cittadini, con il risultato di rafforzare la coesione sociale e la continuità territoriale. Ciò permise di recuperare in tempi rapidi il tessuto insediativo e produttivo ma limitò le innovazioni che avrebbero potuto migliorare la resilienza delle comunità (Fabbro, 2012).
Nel caso campano la catastrofe investì aree tra le più fragili del Paese e i piani conseguenti furono concepiti anche come occasione per dotare questi territori di servizi, infrastrutture e condizioni di vita attese da lungo tempo (Corsi, 1991). A Napoli, il sisma si innestò in una fase di vivace dibattito urbanistico, successivo al PRG del 1972 e all'avvio di interventi di riqualificazione delle periferie. Pertanto, come osservato da diversi autori (Benevolo, 1982), la ricostruzione agì da acceleratore di tali processi. Infine, nelle aree interne dell'Irpinia, la ricostruzione si accompagnò a programmi di sviluppo industriale che, pur con limiti e criticità ampiamente riconosciuti, produssero una trasformazione significativa del tessuto sociale ed economico (Moccia, 2012).
Un avanzamento significativo nella pianificazione post-disastro si registra con il Piano di Ricostruzione dell'Isola d'Ischia (PdRI). Il PdRI si fonda sul concetto di "esposizione intollerabile", mutuato dal campo degli studi sul rischio sanitario, che diventa criterio guida per orientare la riorganizzazione inse-

Reconstruction: The principle of 'Intolerable Exposure' in the Ischia Reconstruction Plan

Abstract. Post-disaster planning involves mediating between territorial memory and collective safety. When mitigation or vulnerability reduction are neither effective nor sustainable, selective relocation emerges as a rational strategy, recognizing that many settlements in high-risk zones derive from historically determined but now unacceptable choices. The Ischia Island Reconstruction Plan (PdRI) constitutes an emblematic case. Framed within a multi-hazard context – hydrogeological, seismic, and climatic – yet of exceptional environmental and cultural value, the PdRI, developed with the University of Naples Federico II, advances a resilient planning model. Grounded in the principle of 'intolerable exposure,' it shifts the focus from restoration to territorial regeneration, offering broader implications for disaster risk governance.

Keywords: De-densification; Spatial Regeneration; Resilience; Reconstruction; Risks.

Post-disaster planning

Post-disaster reconstruction represents a highly relevant field of study (Hidayat and Egbu, 2010), as it enables the exploration of the relationship between collective memory, territorial identity, and urban planning practices (Montanari, 2020). A recurring feature emerging from the analysis of the most significant Italian cases is the prevailing orientation of reconstruction efforts toward restoring urban centers and settlement landscapes to their pre-existing form (Clementi and Di Venosa, 2012). This approach, epitomized by the formula "as it was, where it was," has long constituted the dominant paradigm, privileging historical and cultural continuity over innovative solutions. While this orientation preserved local identity, it limited opportunities to introduce modern principles of sustainability and safety.

Two approaches can be compared, both sharing a conservative intent yet diverging according to the socio-economic contexts affected by disaster. The 1976 Friuli earthquake and the 1980 Campania earthquake offer emblematic examples. In Friuli, local communities strongly defended their right to retain villages and towns in their original locations, resisting relocation and reconfiguration. Reconstruction was marked by strong protagonism of local authorities and citizens, which reinforced social cohesion and territorial continuity. This enabled a rapid recovery of the settlement and productive fabric, but constrained the adoption of innovations that could have enhanced community resilience (Fabbro, 2012). In Campania, by contrast, the catastrophe struck some of the most fragile areas of the country, and subsequent plans were also con-

ISSN online: 2239-0243 | © 2025 Author(s) | http://www.fupress.com/techne | DOI: 10.36253/techne-18614
Open access, peer-reviewed article published by Firenze University Press (https://www.fupress.com) and distributed, except where otherwise noted, under the terms of the CC BY 4.0 License for content and CC0 1.0 Universal for metadata

diativa verso condizioni di maggiore sicurezza (Blaikie *et al*., 2003; Saunders *et al*., 2013). L'isola costituisce infatti un contesto territoriale di straordinaria complessità: fortemente esposto a rischi di natura sismica, idrogeologica e climatica ma anche contraddistinto da un patrimonio ambientale e paesaggistico di valore eccezionale, perciò soggetto a stringente tutela.
Il Piano è stato sviluppato con il supporto scientifico dell'Università degli Studi di Napoli Federico II. In particolare il Dipartimento di Architettura ha proposto un impianto metodologico capace di integrare dimensioni urbanistiche, ecologiche e sociali in un'unica strategia di intervento. Ne è derivato un approccio che non si è limitato al mero ripristino fisico degli insediamenti, ma ha promosso il ripensamento complessivo della relazione tra abitato, memoria, paesaggio e rischio.

Indirizzi e metodologia per la ricostruzione sull'isola d'Ischia

Il terremoto che ha colpito l'isola d'Ischia il 21 agosto 2017, con magnitudo di circa 4.0, ha prodotto effetti sproporzionati rispetto all'energia liberata: due vittime, 40 feriti e il 20% della popolazione di Casamicciola Terme e Lacco Ameno sfollata. Tale anomalia è stata attribuita alla presenza di faglie superficiali attive responsabili di elevata concentrazione e marcata disomogeneità territoriale degli effetti (Nappi et al., 2021).
Le prime risposte istituzionali sono state improntate a una retorica emergenziale, orientata alla ricostruzione tal quale. Tuttavia, il contesto isolano era più complesso di quanto inizialmente immaginato: accanto a rilevanti valori paesaggistici e culturali sussiste una diffusa condizione di abusivismo edilizio, radicata in pratiche di condono inevase e difficilmente sanabili, soprattutto in aree vincolate o pericolose (Formato *et al*., 2020). Nel contempo, la sismicità del luogo è storicamente documentata, con eventi ricorrenti, tra cui i devastanti terremoti di Casamicciola del 1881 e 1883.
Nonostante questa memoria storica, la pianificazione ha a lungo privilegiato il ritorno alla condizione preesistente e anche la legge speciale successiva al terremoto del 2017 ha confermato tale indirizzo.
La frana del novembre 2022 ha profondamente inciso sul percorso di ricostruzione, imponendo la necessità di riconsiderare l'impianto metodologico del Piano. Anche questo evento si colloca in una lunga sequenza storica di dissesti registrati sul versante settentrionale del Monte Epomeo legata alla natura geomorfologica del luogo ed aggravata da processi antropici di lunga durata (Vingiani *et al*., 2015).
Diversamente dai sismi, per i quali il consolidamento strutturale degli edifici rappresenta una risposta efficace in termini di riduzione della vulnerabilità, per i fenomeni franosi intervenire unicamente sul patrimonio edilizio non può garantire la sicurezza a lungo termine. L'evento del 2022 ha dunque reso evidente l'esigenza di affiancare alla ricostruzione edilizia una riflessione più ampia, che includa strategie di gestione integrata del rischio, misure di delocalizzazione selettiva ed azioni di mitigazione ambientale.
Le modifiche a tal fine introdotte alla legge speciale per la ricostruzione, pur ampliando i poteri dell'organo commissariale straordinario e della Regione, ne vincolano l'azione a criteri innovativi. Il Piano di Ricostruzione si trasforma in uno strumento di pianificazione territoriale capace di tenere insieme sicurezza, sostenibilità e tutela dei valori paesaggistici; assume

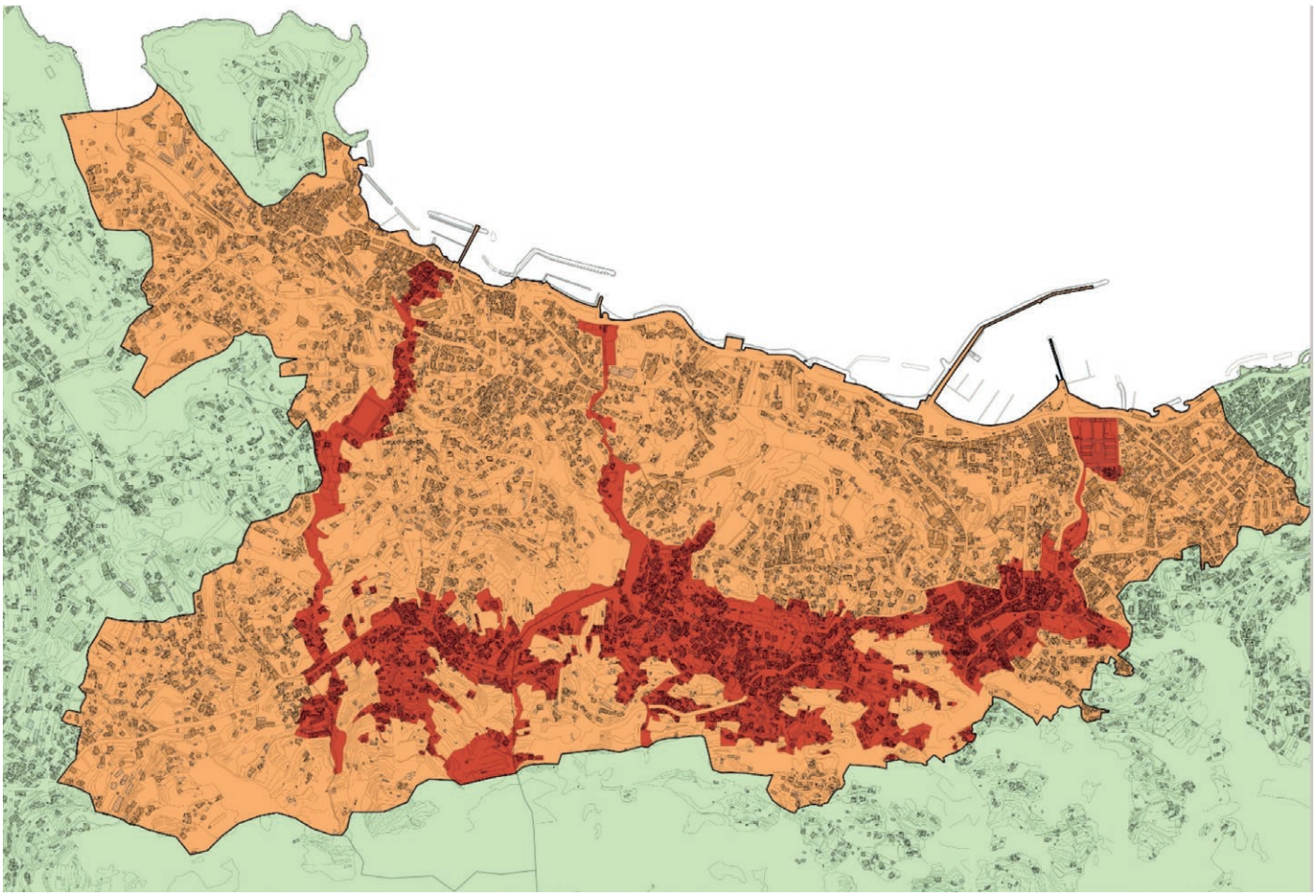
ceived as an opportunity to provide long-awaited services, infrastructure, and living conditions (Corsi, 1991). In Naples, the earthquake coincided with a vibrant urban debate following the 1972 Master Plan and the initiation of peripheral regeneration projects. As several authors observed (Benevolo, 1982), reconstruction acted as a catalyst for these processes. In the inland areas of Irpinia, reconstruction was coupled with industrial development programs that, despite widely acknowledged limitations and criticalities, produced a significant transformation of the social and economic fabric (Moccia, 2012).
A significant advancement in post-disaster planning can be observed with the Ischia Island Reconstruction Plan (PdRI). The PdRI is grounded in the concept of "intolerable exposure," borrowed from health risk studies, which becomes the guiding criterion for steering settlement reorganization toward safer conditions (Blaikie *et al*., 2003; Saunders *et al*., 2013). The island constitutes a territorial context of extraordinary complexity: highly exposed to seismic, hydrogeological, and climatic risks, yet also characterized by exceptional environmental and landscape values subject to strict protection. The Plan was developed with the scientific support of the University of Naples Federico II. In particular, the Department of Architecture proposed a methodological framework capable of integrating urban, ecological, and social dimensions into a unified strategy. This resulted in an approach that went beyond the mere physical restoration of settlements, promoting instead a comprehensive rethinking of the relationship between habitation, memory, landscape, and risk.

Guidelines and methodology for reconstruction on the Island of Ischia

The earthquake that struck the Island of Ischia on 21 August 2017, with a magnitude of approximately 4.0, generated disproportionate effects compared to the energy released: two fatalities, 40 injured, and 20% of the population of Casamicciola Terme and Lacco Ameno displaced. This anomaly has been attributed to the presence of active shallow faults responsible for the high concentration and marked territorial heterogeneity of the impacts (Nappi *et al*., 2021).
The first institutional responses were framed within an emergency rhetoric, oriented toward "as it was, where it was" reconstruction. However, the island context proved more complex than initially assumed: alongside significant landscape and cultural values, there exists widespread illegal construction, rooted in unresolved amnesty practices and often impossible to regularize, especially in protected or hazardous areas (Formato *et al*., 2020). At the same time, seismicity on the island is historically documented, with recurrent events including the devastating Casamicciola earthquakes of 1881 and 1883. Despite this historical memory, planning efforts long prioritized restoring pre-existing conditions, and the special law enacted after the 2017 earthquake confirmed such an orientation.
The landslide of November 2022 profoundly affected the reconstruction trajectory, requiring a reconsideration of the methodological framework of the Plan. This event, too, belongs to a long historical sequence of slope instabilities on the northern flank of Mount Epomeo, linked to the geomorphological nature of the area and

01 | Proposta di PdRI redatta precedente alla frana: nella zona in rosso si concentravano i maggiori danni da sisma e le condizioni di rischio, con conseguenti stringenti prescrizioni per la ricostruzione; in arancio il restante territorio soggetto al Piano in cui minori apparivano i rischi per la popolazione (Fonte: Regione Campania)

Pre-landslide draft of the Reconstruction Plan: the red zone identifies the areas with the highest concentration of seismic damage and hazard exposure, requiring stringent regulatory prescriptions for reconstruction; the orange zone encompasses the remaining territory included within the Plan, where the levels of risk for the population were assessed as comparatively lower. (Source: Campania Region)



| 01

exacerbated by long-standing anthropogenic processes (Vingiani *et al*., 2015). Unlike earthquakes, where structural consolidation of buildings provides an effective means of reducing vulnerability, landslides cannot be addressed solely through building interventions to guarantee long-term safety. The 2022 event thus highlighted the need to complement reconstruction with broader strategies, including integrated risk management, selective relocation, and environmental mitigation measures.

Amendments introduced into the special reconstruction law, while extending the powers of the extraordinary commissioner and the Region, bind their actions to innovative criteria. The Reconstruction Plan is thereby transformed into a territorial planning instrument capable of integrating safety, sustainability, and landscape protection. It assumes the form of a structural requalification project, designed to address in an integrated manner the criticalities arising from regulatory, urban, and conservation-related fragmentation. It also requires the relocation of buildings located in areas of non-mitigable hazard, where risk reduction is neither technically nor financially feasible. This principle, consistent with international experiences of managed retreat and Building Back Better (Kates *et al*., 2006; Safapour *et al*., 2021), marks a shift toward adaptive planning, grounded in the recognition that not all territories can be restored to their original conditions without a critical revision of settlement strategies.

The reconstruction plan

In December 2024, the Campania Region adopted the Reconstruction Plan (PdRI), developed through a participatory process involving the Extraordinary Commissioner for Reconstruction, the River Basin Authority of the Southern Apennines, and the administrations of the affected municipalities. The Plan is characterised by an integrated knowledge-based framework that combines geomorphological, landscape, ecological, and settlement analyses (Forman, 1995). The interpretive approach employed in reading the territorial context does not merely provide a static description of environmental and settlement features; rather, it constructs an interpretative system capable of interrelating physical, environmental, and infrastructural factors together with long-term latent risks (Cutter *et al*., 2010; Sgobbo, 2025). This methodological choice - marking a clear departure from conventional Italian reconstruction practices - is explicitly aimed at rethinking existing settlement patterns.

In this sense, the Ischia Plan functions as a hybrid strategic device that reconceptualizes reconstruction as a complex socio-ecological process, oriented not only towards restoring pre-disaster conditions but towards transforming the territorial structures that produced vulnerability in the first place. Reconstruction is therefore reframed as a multiscale field of intervention, in which ecological regeneration, community recomposition, and structural risk mitigation are integrated within a single framework of transformative governance (Davoudi *et al*., 2012; Fernandez & Ahmed, 2019).

Consequently, the document simultaneously performs functions of intermunicipal urban coordination, landscape regulation, and guidance for

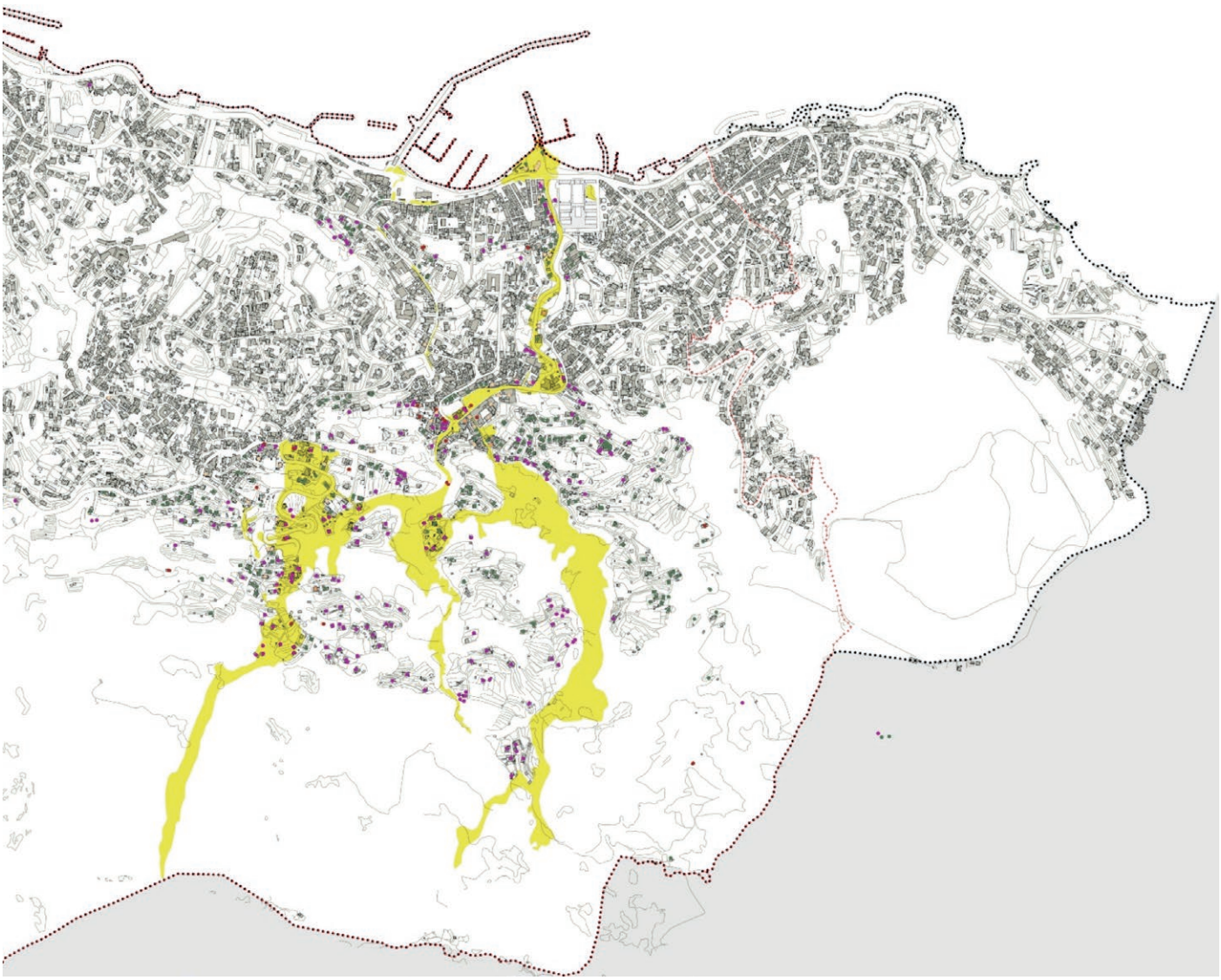
02 | PdRI adottato: stralcio della tavola QC.11. In giallo i principali flussi della frana. Per gli edifici coinvolti: in verde sono indicati quelli danneggiati ma utilizzabili; con gli altri colori, in funzione del tipo di danno ed esposizione, quelli non agibili (Fonte: Regione Campania)

Adopted Reconstruction Plan: excerpt from map QC.11. The yellow areas delineate the sectors affected by the primary flow paths. As for the impacted buildings, those classified as damaged but structurally usable are highlighted in green; the remaining ones, categorized with color according to the type of damage and of hazard exposure, are unsuitable for occupancy. (Source: Campania Region)

la forma di un progetto di riqualificazione strutturale del territorio, capace di affrontare, in maniera integrata, le criticità generate dalla frammentazione normativa, urbanistica e vincolistica; deve prevedere la delocalizzazione degli immobili situati in aree a pericolosità non mitigabile, qualora non risulti tecnicamente o finanziariamente praticabile una riduzione del rischio. Tale principio, in linea con le esperienze internazionali di *managed retreat* e *Building Back Better* (Kates *et al*., 2006; Safapour *et al*., 2021), segna un passaggio verso una pianificazione adattiva, fondata sulla consapevolezza che non tutti i territori possono essere ripristinati nelle condizioni originarie senza una revisione critica delle strategie insediative.

Il Piano di Ricostruzione Nel dicembre 2024 la Regione Campania ha adottato il PdRI sviluppato attraverso un processo partecipativo che ha coinvolto il Commissario straordinario per la ricostruzione, l'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Meridionale e le amministrazioni dei comuni colpiti. Il Piano si distingue per un'impostazione conoscitiva di tipo integrato, che combina analisi geomorfologiche, paesaggistiche, ecologiche e insediative (Forman, 1995). L'approccio adottato nella lettura del contesto non si limita a una descrizione statica dei caratteri territoriali, ma costruisce un sistema interpretativo capace di mettere in relazione fattori fisici, ambientali e infrastrutturali, insieme ai ri-

20 |



03 | Ischia dicembre 2023: in alto il percorso principale della frana; in basso immagini del centro storico di Casamicciola Terme (Fonte: fotografie dell'autore)
Ischia, December 2023: above, the main landslide trajectory; below, views of the historic center of Casamicciola Terme. (Source: own photos)



schi latenti di lungo periodo (Cutter et al., 2010; Sgobbo, 2025). È una scelta metodologica che, in discontinuità rispetto alle tradizionali pratiche italiane di ricostruzione, è preordinata al ripensamento delle forme insediative esistenti. Infatti il Piano ischitano si configura come un dispositivo strategico-ibrido che riconcettualizza la ricostruzione come processo socio-ecologico complesso, orientato non solo al ripristino delle condizioni pre-disastro ma alla trasformazione delle strutture territoriali che ne hanno determinato la vulnerabilità. In tale prospettiva, la ricostruzione diviene un campo di intervento multiscalare in cui pratiche di rigenerazione ecologica, ricomposizione comunitaria e mitigazione strutturale del rischio sono integrate entro un'unica cornice di governance trasformativa (Davoudi et al., 2012; Fernandez & Ahmed, 2019).
Pertanto il documento svolge al tempo stesso funzioni di coordinamento urbanistico intercomunale, di regolazione paesaggistica e di indirizzo per le azioni sia emergenziali che di lungo periodo.
Dal punto di vista operativo, il Piano si articola su due livelli: l'impianto strategico generale e la disciplina attuativa.
Il primo, lo *schema direttore*, organizza il territorio in Ambiti Territoriali Omogenei (ATO) per adattare le strategie ai differenti gradi di antropizzazione e di vulnerabilità ambientale: l'ATO 1 introduce politiche di decompressione insediativa; l'ATO 2 orienta gli interventi verso la riqualificazione delle aree danneggiate ma recuperabili; l'ATO 3 concentra le opportunità di rigenerazione territoriale e valorizzazione paesaggistica.
Il secondo livello fonda sulla definizione delle Unità Minime di Intervento (UMI), che comprendono sia elementi edificati che spazi aperti e pertinenziali e rappresentano le unità urbane elementari e inscindibili del processo di rigenerazione. Le ATO 1 e 3 sono coinvolte dal dispositivo più innovativo: la delocalizzazione delle volumetrie presenti in aree a rischio, verso contesti sicuri e già infrastrutturati. La singolarità dello strumento emerge dal quadro di tutela paesaggistica particolarmente stringente cui è soggetto il territorio coinvolto, con il divieto generalizzato di ogni forma di nuova edificazione e ampi limiti alle modifiche del patrimonio edilizio esistente. Questa condizione, che caratterizza l'Isola ormai da alcuni decenni, non solo

both emergency actions and long-term strategies.
From an operational perspective, the Plan is articulated across two levels: the overarching strategic framework and the implementing regulations.
The first level, the master framework, organizes the territory into Homogeneous Territorial Areas (*Ambiti Territoriali Omogenei*, ATO) in order to tailor strategies to varying degrees of anthropization and environmental vulnerability: ATO 1 introduces policies of settlement decompression; ATO 2 directs interventions towards the rehabilitation of damaged yet recoverable areas; ATO 3 concentrates opportunities for territorial regeneration and landscape enhancement.
The second level is based on the definition of Minimum Intervention Units (*Unità Minime di Intervento*, UMI), which include both built elements and open or accessory spaces and represent the elementary and indivisible urban units of the regeneration process. ATOs 1 and 3 are subject to the Plan's most innovative instrument: the relocation of existing volumes from areas exposed to non-mitigable risk to safe and already-serviced contexts. The singularity of this tool derives from the particularly stringent landscape-protection framework governing the territory, which imposes a general prohibition on any new construction and extensive limits on modifications to the existing building stock. This condition - characterizing the island for several decades - has proven ineffective in achieving real territorial protection and is now considered inadequate in light of the overriding need to safeguard public safety.
The Plan therefore adopts selective relocation, implemented through two mechanisms: mandatory transfer, applied to all built volumes located in areas exposed to non-mitigable risk; and voluntary transfer for the remaining buildings within ATO 1. In both cases, the operation is accompanied by stringent constraints on land consumption: new constructions may not exceed the pre-existing volume, and the original surface areas and vacated plots must be allocated to rewilding or collective functions.
Relocation may occur through extensions of existing buildings - supported by incentive measures - or through new construction. Both modalities are subject to elevated seismic-safety standards, height restrictions, and coverage ratios designed to ensure contextual harmony and to maintain at least 70% surface permeability, thereby enhancing the overall resilience of the settlement (Sgobbo, 2018). These provisions align with European recommendations on sustainable regeneration and with several SDGs of the 2030 Agenda, including Goal 3 (Good Health and Well-being), Goal 9 (Industry, Innovation and Infrastructure), and Goal 11 (Sustainable Cities and Communities).
Finally, the selection of receiving areas is carried out by identifying, within the zones for which the new Regional Landscape Plan prescribes the lowest degree of protection, those that are free from hydrogeological risk, situated outside coastal buffer zones, and already partially serviced by existing infrastructure.

Conclusions
The material and symbolic proximity to environmental risk conditions today requires a radical reconsideration of settlement practices and planning

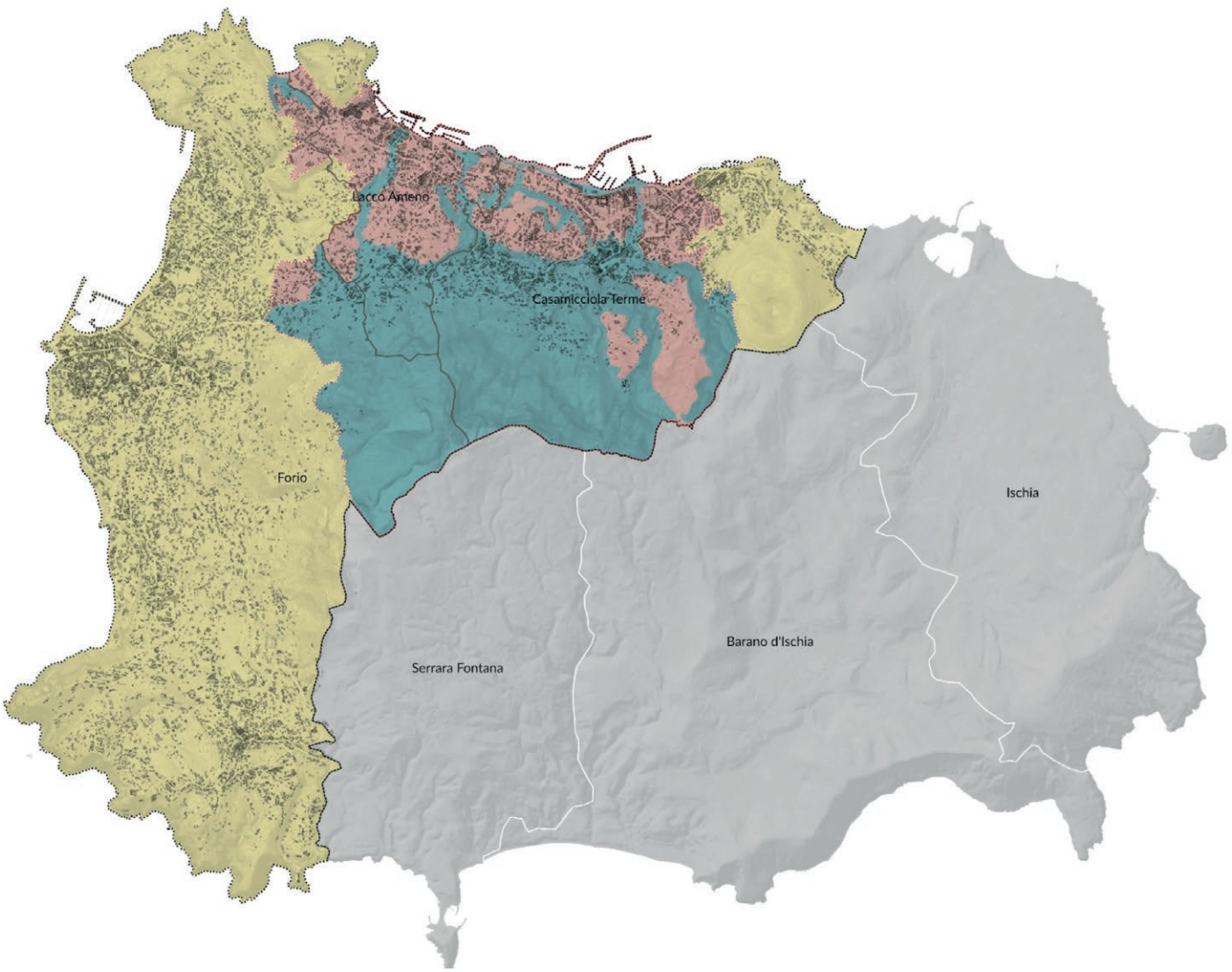
04 | PdRI adottato: stralcio della tavola DO.02. In azzurro l'ATO 1 – decompressione insediativa; in rosso l'ATO 2 – Riqualificazione insediativa; in giallo l'ATO 3 – Valorizzazione ambientale (Fonte: Regione Campania)

Adopted Reconstruction Plan: excerpt from map DO.02. In light blue, ATO 1 – Area of De-densification; in red, ATO 2 – Area of Regeneration; in yellow, ATO 3 – Area of Environmental Enhancement. (Source: Campania Region)

è risultata inefficace rispetto all'esigenza di reale protezione del territorio ma appare oggi inappropriata in rapporto alla prevalente esigenza di salvaguardia dell'incolumità dei cittadini. Si è quindi optato per la delocalizzazione selettiva, attuata secondo due strumenti: il trasferimento obbligatorio che coinvolge tutti i volumi edilizi esistenti in aree soggette a rischio non mitigabile; il trasferimento volontario per gli altri edifici dell'ATO 1. In entrambi i casi l'operazione è accompagnata da limiti stringenti in tema di consumo di suolo: le nuove edificazioni non possono eccedere la volumetria preesistente; la superficie originaria ed i lotti liberati devono essere destinati a rinaturalizzazione o a funzioni collettive.

Il trasferimento avviene per ampliamento di edifici esistenti, incentivato con misure premianti, oppure mediante nuova edificazione. Per entrambe le modalità sono imposti standard elevati di sicurezza antisismica, limiti di altezza e rapporti di copertura volti a garantire armonia con il contesto, il mantenimento della permeabilità per almeno il 70% della superficie impegnata, incrementando così la resilienza complessiva dell'insediamento (Sgobbo, 2018). Ciò in linea con le raccomandazioni europee sulla rigenerazione sostenibile e, in particolare, di alcuni dei SDGs dell'Agenda 2030, tra cui: 3 – Salute e benessere, 9 – Imprese, innovazione e infrastrutture e 11 – Città e comunità sostenibili.

04 |



Infine la scelta delle aree riceventi è operata selezionando, nell'ambito delle zone per le quali il nuovo Piano Paesaggistico Regionale esprime minor esigenza di tutela, quelle prive di rischio idrogeologico, esterne alle fasce costiere e già parzialmente infrastrutturate.

Conclusioni

La prossimità materiale e simbolica con le condizioni di rischio ambientale impone oggi una riconsiderazione radicale delle pratiche insediative e delle strategie di pianificazione, soprattutto nei contesti segnati da eventi catastrofici. Tali territori, colpiti da sismi, frane o fenomeni climatici estremi, si configurano come laboratori di innovazione per l'elaborazione di nuove forme urbane e territoriali. In questa prospettiva, l'esperienza del PdRI si distingue per la capacità di andare oltre la ricomposizione materiale, ponendo al centro il tema della rigenerazione adattiva. L'intensificarsi degli eventi estremi, ormai costituenti una condizione strutturale, impone infatti che i processi di ricostruzione assumano un carattere sistemico, in grado di integrare sostenibilità ecologica, continuità sociale e resilienza intergenerazionale.
La nozione di "abitabilità" necessita dunque di essere reinterpretata come infrastruttura ambientale e culturale, capace di consolidare relazioni di appartenenza e di orientare nuove forme di convivenza con l'incertezza. Ciò comporta che l'urbanistica, tradizionalmente ancorata alla stabilità, si confronti con il carattere transitorio e vulnerabile dei territori, sviluppando modelli progettuali flessibili e aperti. In questo quadro, il paesaggio non è più inteso come sfondo estetico, ma come dispositivo operativo di mitigazione del rischio e di riconfigurazione identitaria, in linea con gli approcci del *landscape urbanism* (Corner, 2006).
Il PdRI ha messo in evidenza l'importanza di una governance inclusiva, basata sulla cooperazione tra amministrazioni pubbliche, comunità locali e mondo accademico, capace di superare rigidità normative e di promuovere scenari condivisi. Tra i risultati più significativi si annoverano la revisione di modelli costruttivi inadeguati, il ricollocamento di insediamenti in aree più sicure e l'affermazione del principio, non negoziabile, del diritto alla vita e alla sicurezza, coniugato con la qualità dell'abitare.
Persistono tuttavia criticità legate alla questione dell'edilizia abusiva. L'assenza di soluzioni efficaci mantiene in stallo sia le ipotesi di demolizione, per i costi sociali e politici che comporterebbero, sia quelle di sanatoria, ostacolate da vincoli paesaggistici, preconcetti ideologici e condizioni di rischio. Ne deriva un territorio disseminato di manufatti inamovibili che ostacolano percorsi di rigenerazione e di concreta riduzione della vulnerabilità.

ATTRIBUZIONE, RICONOSCIMENTI, DIRITTI D'AUTORE

Il presente articolo è il risultato di un'attività di ricerca e terza missione svolta dal Dipartimento di Architettura dell'Università Federico II di Napoli e finanziata dalla Regione Campania e dal Commissariato Straordinario del Governo ai fini della ricostruzione nei territori di Ischia. Responsabile scientifico Michelangelo Russo, Coordinatori scientifici Alessandro Sgobbo e Enrico Formato.

strategies, particularly in contexts affected by catastrophic events. Such territories, struck by earthquakes, landslides, or extreme climatic phenomena, constitute laboratories of innovation for the elaboration of new urban and territorial forms. In this perspective, the experience of the Ischia Island Reconstruction Plan (PdRI) stands out for its capacity to go beyond material reconstitution, placing adaptive regeneration at the center. The intensification of extreme events, now a structural condition, demands that reconstruction processes acquire a systemic character, integrating ecological sustainability, social continuity, and intergenerational resilience.
The notion of "habitability" must therefore be reinterpreted as an environmental and cultural infrastructure, capable of consolidating bonds of belonging and guiding new forms of coexistence with uncertainty. This requires urban planning, traditionally anchored to stability, to engage with the transitory and vulnerable nature of territories by developing flexible and open design models. Within this framework, the landscape is no longer conceived as a mere aesthetic backdrop, but as an operative device for risk mitigation and identity reconfiguration, in line with the approaches of landscape urbanism (Corner, 2006).
The PdRI has highlighted the importance of inclusive governance, based on cooperation among public administrations, local communities, and the academic sector, able to overcome regulatory rigidity and promote shared scenarios. Among its most significant outcomes are the revision of inadequate construction models, the relocation of settlements to safer areas, and the affirmation of the non-negotiable principle of the right to life and safety, combined with the quality of dwelling. Nonetheless, significant criticalities persist with regard to the issue of illegal construction. The absence of effective and widely accepted solutions keeps both demolition - burdened by considerable social and political costs - and regularization - hampered by landscape constraints, ideological preconceptions, and prevailing risk conditions - at a prolonged stalemate. Consequently, the territory remains dotted with de facto immovable structures whose permanence obstructs meaningful pathways of regeneration and the concrete reduction of territorial vulnerability.

ATTRIBUTION, ACKNOWLEDGMENTS, COPYRIGHT RIGHTS
This article is the result of a research and third mission activity carried out by the Department of Architecture of the University of Naples Federico II, funded by the Campania Region and the Extraordinary Government Commissioner for the reconstruction of the territories of Ischia. Scientific supervisor: Michelangelo Russo; Scientific coordinators: Alessandro Sgobbo and Enrico Formato.

REFERENCES

Benevolo, L. (1982), "Il terremoto? Come acceleratore dei processi in atto", *Edilizia Popolare*, Vol. 166, pp. 3-5.

Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I. and Wisner, B. (2003), *At risk. Natural hazards, people's vulnerability and disasters*, Routledge, London.

Clementi, A. and Di Venosa, M. (2012), *Pianificare la ricostruzione. Sette esperienze dall'Abruzzo*, Marsilio, Venezia.

Corner, J. (1999), *Recovering Landscape: Essays in Contemporary Landscape Architecture*, Princeton Architectural Press, New York.

Corner, J. (2006), "Terra Fluxus", in Waldheim C. (Ed.), *The Landscape Urbanism Reader,* Princeton Architectural Press, New York, pp. 21-33.

Corsi, E. (1991), "La Ricostruzione in Parlamento", in Corsi E. and Franco C. (Eds.), *Dal terremoto al futuro. La ricostruzione a Napoli. Il Titolo VIII della Legge 219/81*, Electa, Napoli, pp. 223-231.

Cutter, S. L., Burton, C. G. and Emrich, C. T. (2010), "Disaster resilience indicators for benchmarking baseline conditions", *Journal of homeland security and emergency management*, Vol. 7, n. 1. Available at: http://dx.doi.org/10.2202/1547-7355.1732.

Davoudi, S., Shaw, K., Haider, L. J., Quinlan, A. E., Peterson, G. D., Wilkinson, C. … and Porter, L. (2012), "Resilience: A bridging concept or a dead end?", *Planning Theory & Practice*, Vol. 13, n. 2, pp. 299-333. Available at: https://doi.org/10.1080/14649357.2012.677124.

Fabbro, S. (2012), "La ricostruzione del Friuli a confronto con gli interventi post-terremoto a L'Aquila", in Gerundo R. (Ed.), *Terremoto 80 Ricostruzione e sviluppo*, ESI, Napoli, pp. 85-105.

Fernandez, G., & Ahmed, I. (2019). "Build back better" approach to disaster recovery: Research trends since 2006. *Progress in Disaster Science*, *1*, 100003. Available at: https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2019.100003.

Forman, R. T. T. (1995), *Land Mosaics: The Ecology of Landscapes and Regions*, Cambridge University Press, Cambridge.

Formato, E., Miano, M., Vingelli, F. and Russo, M. (2020), "Il progetto nei territori dell'abusivismo. Trasformare per mettere in sicurezza: il caso della ricostruzione di Ischia", *PLANUM*, pp.698-704.

Hidayat, B. and Egbu, C. (2010), "A literature review of the role of project management in post-disaster reconstruction", In Procs 26th Annual ARCOM Conference, pp. 1269-1278. Available at: https://www.researchgate.net/profile/Benny_Hidayat/publication/46395691_A_literature_review_of_the_role_of_project_management_in_post-disaster_reconstruction/links/561613ce08ae4ce3cc6584a6/A-literature-review-of-the-role-of-project-management-in-post-disaster-reconstruction.pdf.

Kates, R. W., Colten, C. E., Laska, S. and Leatherman, S. P. (2006), "Reconstruction of New Orleans after Hurricane Katrina: A research perspective", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 103, n. 40, pp.14653–14660. Available at: https://doi.org/10.1073/pnas.0605726103.

Moccia, F.D. (2012), "La ricostruzione in Campania. Alcuni nodi urbanistici alla prova del programma straordinario", in Gerundo R. (Ed.), *Terremoto 80 Ricostruzione e sviluppo*, ESI, Napoli, pp. 125-159.

Nappi, R., Porfido, S., Paganini, E., Vezzoli, L. … and Michetti, A. M. (2021), "The 2017, MD= 4.0, Casamicciola earthquake: ESI-07 scale evaluation and implications for the source model", *Geosciences*, Vol. 11, n. 2, 44. Available at: https://doi.org/10.3390/geosciences11020044.

Saunders, W., Beban, J. G. and Kilvington, M. (2013), "Risk-based land use planning for natural hazard risk reduction", *GNS Science Miscellaneous*, Vol. 67.

Safapour, E., Kermanshachi, S., & Pamidimukkala, A. (2021). Post-disaster recovery in urban and rural communities: Challenges and strategies. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *64*, 102535. Available at: https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102535.

Sgobbo, A. (2018), *Water Sensitive Urban Planning. Approach and opportunities in Mediterranean metropolitan areas*, INU Edizioni, Roma.

Sgobbo, A. (2025). Healthy Cities and post-disaster reconstruction in multi-hazard areas: the case of Ischia. *VALORI E VALUTAZIONI*, (38), 105-118. Available at: https://doi.org/10.48264/VVSIEV-20253808.

Vingiani, S., Mele, G., De Mascellis, R., Terribile, F. and Basile, A. (2015), "Volcanic soils and landslides: a case study of the island of Ischia (southern Italy) and its relationship with other Campania events", *Solid Earth*, Vol. 6m n. 2, pp.783-797. Available at: https://doi.org/10.5194/se-6-783-2015.

DALL'INTEGRAZIONE DEI SAPERI ALLE RICADUTE SUI TERRITORI: PER UNA INNOVATIVA "CULTURA DEL RISCHIO"

a cura di/*edited by* **Mario Losasso,** https://orcid.org/0000-0003-3251-8747

Un Dialogo di/*A Dialogue of* **Mario Losasso**[1] con/*with* **Andrea Prota**[2]
[1] Presidente SITdA, Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II, Italia
[2] Presidente della Fondazione RETURN

La Fondazione RETURN nasce con il Partenariato Esteso PE3 – Multi-Risk sciEnce for resilienT commUnities undeR a changiNg climate (RETURN), finanziato con fondi PNRR ed ha l'obiettivo di rafforzare le filiere della ricerca sui rischi naturali, ambientali e antropici. Presidente della Fondazione è il prof. Andrea Prota, Università degli Studi di Napoli Federico II.

Eventi estremi

Mario Losasso. *I recenti eventi estremi – dalla frana di Niscemi all'impatto devastante del ciclone mediterraneo Harry – hanno ancora una volta messo in evidenza la fragilità del territorio italiano, ma anche il manifestarsi, ormai con frequenze e intensità amplificate, di fenomeni naturali e ambientali rispetto ai quali rischiamo di essere impreparati e impotenti nella capacità reattiva. Cosa è accaduto in questi ultimi anni e quanto siamo preparati a questi cambiamenti di scenario?*

Andrea Prota. Direi che soprattutto nel nostro Paese abbiamo oramai strumenti e prassi che ci consentono di gestire in maniera molto efficace le conseguenze di importanti eventi naturali. Mancano invece azioni di lungo termine che siano rivolte allo sviluppo di progettualità tese a prevenire gli impatti di tali eventi che oggi si verificano spesso con intensità e modalità fortemente collegate al cambiamento climatico. Questa non è una critica ma una riflessione su quanto vediamo intorno a noi ogni giorno; d'altra parte, in molti casi anche quando la politica si focalizza su importanti azioni di prevenzione, le contingenze non consentono di dare continuità amministrativa e finanziaria perché le necessarie risorse si rendono indispensabili per risolvere i problemi "dell'oggi" che anche i cittadini percepiscono come più importanti rispetto a quelli che potrebbero verificarsi "domani".

Scenari multirischio e sviluppo urbano

M.L. *Le città si configurano sempre più come contesti esposti a scenari multirischio e questa nuova condizione richiede una revisione dei modelli di pianificazione e di progettazione: la mitigazione dei rischi dovrebbe diventare un fattore-guida nel concepire e adattare sistemi urbani ad essi resilienti. Quali possono essere gli elementi capaci di determinare un'inversione di tendenza rispetto agli approcci convenzionali?*

A.P. Gli esiti di recenti e importanti ricerche nazionali – quali quelle condotte nell'ambito del progetto di Partenariato Esteso PNRR RETURN – ci confermano che la ricchezza di conoscenze, competenze e strumenti tecnico-scientifici non si può tradurre in efficaci azioni di pianificazione e progettazione di interventi di mitigazione e adattamento senza il ruolo centrale delle comunità. È davvero prioritario aumentare il livello di percezione che i cittadini devono avere rispetto al verificarsi di diversi pericoli e alla rilevanza dei loro impatti affinché si mettano in moto naturali meccanismi di condivisione e coprogettazione in cui sia il cittadino stesso il primo motore delle politiche di prevenzione.

From the integration of knowledge to territorial impacts: towards an innovative "risk culture"

The RETURN Foundation was established as part of the Extended Partnership PE3 – Multi-Risk Science for Resilient Communities under a Changing Climate (RETURN), financed with PNRR funds, and aims to strengthen research networks focusing on natural, environmental and anthropogenic risks. The Foundation's President is Prof. Andrea Prota of the University of Naples Federico II.

Extreme events

Mario Losasso. *Recent extreme events – from the landslide in Niscemi to the devastating impact of the Mediterranean Cyclone Harry – have once again highlighted the fragility of the Italian territory, as well as the increasing frequency and intensity of natural and environmental phenomena, to which we risk being unprepared and ineffective in our response capacity. What has happened in recent years, and how prepared are we for these changing scenarios?*

Andrea Prota. I would say that, particularly in our country, we now have the tools and practices that allow us to manage the consequences of major natural events quite effectively. What is lacking, however, are long-term actions aimed at developing strategies focused on preventing the impacts of such events, which today often occur with intensities and patterns strongly linked to climate change. This is not a criticism, but rather a reflection on what we observe daily around us. Moreover, even when policymakers focus on significant preventive actions, contingent circumstances often prevent administrative and financial continuity, as the necessary resources are deemed essential for resolving the problems of "today," which citizens also perceive as more urgent than those that might occur "tomorrow."

Multi-risk scenarios and urban development

M.L. *Cities are increasingly configured as contexts exposed to multi-risk scenarios, and this new condition calls for a revision of planning and design models: risk mitigation should become a guiding factor in conceiving and adapting resilient urban systems. What factors might drive a shift away from conventional approaches?*

A.P. The findings of recent major national research – such as those conducted as part of the PNRR Extended Partnership project RETURN – confirm that the wealth of knowledge, expertise, and technical-scientific tools cannot be translated into effective

ISSN online: 2239-0243 | © 2025 Author(s) | http://www.fupress.com/techne | DOI: 10.36253/techne-20474
Open access, peer-reviewed article published by Firenze University Press (https://www.fupress.com) and distributed, except where otherwise noted, under the terms of the CC BY 4.0 License for content and CC0 1.0 Universal for metadata

Mondo della ricerca e stakeholder

M.L. *Negli ultimi anni il mondo della ricerca nel campo della gestione del multirischio ha sempre sofferto di sistemi di finanziamento poco diretti a farlo evolvere verso orizzonti comuni e soprattutto orientati a chiari valori etici, culturali, sociali. Il mondo della ricerca si è sentito spesso poco ascoltato e con scarsa capacità di mettere al servizio del paese e delle comunità l'avanzamento dei propri saperi. Allo stato attuale come inquadri il rapporto fra mondo della ricerca e stakeholder nelle loro diverse composizioni: ministeri, enti, pubblica amministrazione, mondo del lavoro, comunità? Quale potrebbe essere un rapporto auspicabile e quali potrebbero essere alcune nuove possibilità?*

A.P. Uno dei grandi problemi è la frammentazione delle diverse azioni promosse dalle amministrazioni; ciò è quasi sempre dovuto al fatto che diverse azioni sono possibili perché sostenute da specifiche linee di finanziamento. Si tende così molto spesso a produrre ricerche parallele che, seppure di elevato valore, non sono tra loro correlate e dunque diventano poco utili per affrontare i problemi reali nella loro complessità. Il PNRR ha spinto l'Italia verso un modello nuovo in cui il mondo della ricerca ha dovuto imparare a creare e a gestire comunità molto più ampie e multidisciplinari che sono diventate una risorsa importante per provare a cambiare il trend. È auspicabile che, a partire da questa esperienza che ormai è giunta al termine, il Paese continui su questa traccia e metta a frutto tale disponibilità multidisciplinare e trasversale, ponendola a servizio degli enti locali e delle imprese come supporto allo sviluppo di progettualità innovative e sistemiche tese a una sistematica riduzione degli impatti dei rischi.

Processi durevoli per la gestione dei rischi

M.L. *L'approccio Disaster Risk Reduction (DDR) non può essere più relegato alle occasionalità ma deve diventare un fattore di prevenzione e di cambio di mentalità nel mondo delle professioni, dell'imprenditorialità, dei policy makers. Trovandoci ormai alla sua conclusione, quanto ritieni che il PNRR abbia contribuito a orientare diversamente le comunità per confrontarsi, secondo nuove consapevolezze, con gli scenari multirischio?*

A.P. Il PNRR ha favorito innanzitutto il dialogo e la contaminazione di competenze e discipline che fino ad ora non si erano molto parlate. Questo ha prodotto avanzamenti importanti nelle ricerche, ma ha iniziato anche a dare frutti importanti su percorsi sperimentali di formazione. Auspico che nel prossimo futuro tali esperienze si estendano in maniera ancora più ampia per favorire una formazione continua di coloro che operano nel settore pubblico o privato; una maggiore consapevolezza dei rischi, della loro occorrenza multirischio e delle strategie di adattamento e mitigazione potrà essere di grande beneficio al Paese anche se gli interessati non si occupano direttamente di rischi.

La ricerca e le nuove complessità

M.L. *Alla complessità dei fenomeni, all'imprevista combinazione fra più eventi pericolosi in termini di compound o di cascade, occorre rispondere con approcci anch'essi complessi perché fattori di eccessiva semplifica-*

planning and design actions for mitigation and adaptation without the central role of communities. It is indeed a priority to raise citizens' awareness of the occurrence of various hazards and the significance of their impacts, to activate natural processes of sharing and co-design, in which the citizen is the primary driver of prevention policies.

The research community and stakeholders

M.L. *In recent years, the research community in the field of multi-risk management has suffered from funding systems that have not sufficiently supported its evolution toward shared goals, particularly towards clear ethical, cultural, and social values. The research community has often felt unheard and insufficiently able to place the advancement of its knowledge at the service of the country and its communities. At present, how would you frame the relationship between the research community and stakeholders in their various forms: ministries, institutions, public administration, the world of work, and communities? What would a desirable relationship look like, and what new opportunities might emerge?*

A.P. One of the major issues is the fragmentation of actions promoted by administrations; this is almost always because different initiatives are made possible by specific funding lines. As a result, parallel research efforts are often produced which, although of high quality, are not interconnected and therefore prove of limited usefulness in addressing real problems in their complexity. The PNRR has pushed Italy toward a new model in which the research community has had to learn to create and manage much broader and multidisciplinary communities, which have become an important resource in attempting to reverse this trend. It is hoped that, building on this experience – which is now nearing its conclusion – the country will continue along this path and capitalise on this multidisciplinary and cross-cutting capacity, placing it at the service of local authorities and enterprises as support for the development of innovative and systemic projects aimed at a systematic reduction of risk impacts.

Long-term processes for risk management

M.L. *The Disaster Risk Reduction (DRR) approach can no longer be confined to occasional interventions; it must become a preventive factor and a shift in mindset across professions, entrepreneurship, and policymaking. Now that it is nearing completion, to what extent do you think the PNRR has helped steer communities in a different direction, enabling them to address multi-risk scenarios, considering new forms of awareness?*

A.P. The PNRR has primarily fostered dialogue and the exchange of expertise and disciplines that previously had little interaction. This has led to significant advancements in research and has also begun to yield important results in experimental training programmes. I hope that soon, such experiences will expand further, promoting continuous education for those working in both the public and private sectors. Greater awareness of risks, their multi-risk occurrence, and strategies for adaptation and mitigation could significantly benefit the country, even among those not directly engaged in risk-related fields.

zione possono condurre a un inefficace riduzionismo. Negli scenari multirischio occorre acquisire dati, incrociarli, gestirli, verificare le ipotesi di lavoro e gli scenari di intervento. Quanto la ricerca RETURN, finanziata con il PNRR, ha rappresentato un'innovazione di approccio e di metodo?

A.P. La ricerca RETURN si è caratterizzata per una forte contaminazione tra scienze dure e competenze delle scienze socio-economiche e sociali. Questo ha consentito di guardare alle varie fasi del percorso di ricerca tenendo sempre al centro le persone, la loro percezione, la loro volontà di coinvolgimento e la loro partecipazione alla selezione delle scelte. Una prospettiva che avvicina la ricerca ad un piano applicativo molto concreto e la rende più utile per i cosiddetti stakeholder. Analogamente, un'ampia comunità delle scienze socio-economiche e sociali ha potuto arricchire il proprio punto di vista comprendendo che per avere una reale conoscenza dell'opinione e delle preferenze dei cittadini, e della loro disponibilità a collaborare per ridurre gli impatti dei rischi, è indispensabile inquadrare le analisi nel contesto fisico dove il singolo pericolo (*hazard*) si attiva, a volte combinandosi in diverso modo con altri, determinando conseguenze che dipendono dalle caratteristiche del territorio e di quanto è su di esso costruito.

Il ruolo delle Fondazioni dopo il PNRR: la Fondazione RETURN

M.L. *Se la ricerca finanziata con il PNRR ha costituito per il nostro paese un rilevante punto di innesco per nuovi approcci al tema del multirischio confrontato con il nuovo regime climatico, la rilevante attività di ricerca, disseminazione e formazione che è stata prodotta con il finanziamento del PNRR alle Università e ai Centri di Ricerca come può trovare uno spazio di prospettiva attraverso l'istituzione di Fondazioni e, nel caso del multirischio, con la Fondazione RETURN?*

A.P. Costruire nuovi soggetti giuridici quali le Fondazioni create per gestire il PNRR è stato un enorme sforzo amministrativo-giuridico ma anche di ricerca di preziosi punti di equilibrio tra diverse realtà della ricerca e dell'industria distribuite in varie aree del Paese. Non sarebbe logico se questo sforzo si esaurisse progressivamente negli anni successivi perché queste realtà possono rappresentare strumenti utili al Paese per supportare Enti pubblici e privati di diverso livello nella pianificazione di azioni di mitigazione e adattamento al cambiamento climatico, nonché nell'identificazione di quelle linee strategiche su cui investire per combinare l'obiettivo di ridurre gli impatti dei rischi con quello di dare valore sociale ed economico alle conoscenze ed alle tecnologie più avanzate.

Research and emerging complexities

M.L. *The complexity of phenomena, including the unexpected combination of multiple hazardous events in compound or cascading forms, requires equally complex approaches; excessive simplification risks leading to ineffective reductionism. In multi-risk scenarios, it is necessary to acquire, cross-reference, and manage data, as well as to test working hypotheses and intervention scenarios. To what extent has the RETURN research project, funded through the PNRR, represented an innovation in approach and methodology?*

A.P. RETURN research has been characterized by strong interplay between hard sciences and socio-economic and social science expertise. This has made it possible to address the various phases of the research process while consistently placing people at the centre – their perceptions, their willingness to engage, and their participation in decision-making processes. This perspective brings research closer to a concrete application level and enhances its usefulness for stakeholders. Similarly, a broad community of socio-economic and social sciences has been able to enriched its own perspective by recognizing that, to truly understand citizens' opinions and preferences – and their willingness to collaborate in reducing risk impacts – it is essential to frame analyses within the physical context where a given hazard is activated, sometimes in combination with others, producing consequences that depend on the characteristics of the territory and of the built environment.

The role of Foundations after the PNRR: the RETURN Foundation

M.L. *If research funded through the PNRR has represented a significant catalyst for new approaches to multi-risk in the context of a changing climate regime, how can the substantial research, dissemination, and training activities carried out through PNRR funding to universities and research centres find long-term continuity through the establishment of Foundations, and specifically in the case of multi-risk, through the RETURN Foundation?*

A.P. Establishing new legal entities, such as the Foundations created to manage the PNRR has required an enormous administrative and legal effort, as well as the identification of delicate balances among diverse research and industrial entities distributed across the country. It would not be logical for this effort to gradually dissipate in the coming years. These entities can represent valuable instruments for supporting public and private bodies at different levels in planning mitigation and adaptation actions to climate change, as well as in identifying strategic investment lines that combine the objective of reducing risk impacts with that of adding social and economic value to the most advanced knowledge and technologies.

Letture critiche su clima, crisi e società per la progettazione tecnologica e ambientale

Roberto Bologna, https://orcid.org/0000-0001-9728-3956
Maria Vittoria Arnetoli, https://orcid.org/0000-0002-9200-9621
Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Firenze, Italia

Recensione dei volumi / *Books reviewed*:
Buizza R., *Il meteo e il clima. Conoscerli per prevederli*, Carocci 2025, ISBN: 9788829030415.
Pasini A., *La sfida climatica. Dalla scienza alla politica: ragioni per il cambiamento*, CodiceEdizioni 2025, ISBN-13: 979-1254501313.
Divertito S., *Uccidere la natura*, Il Saggiatore 2025, ISBN: 9788842835479.
Lucifredi A., *Troppi. Conversazioni sulla sovrappopolazione umana e sul futuro del pianeta*, CodiceEdizioni 2024, ISBN: 9791254501146.
Bandoli F., Butera F.M., Iannillo S.K., Calzolaio V. and Serafini M., *Per una critica ecologica del neocapitalismo*, IBS 2025, ISBN: 9791281761216.

Il meteo e il clima. Conoscerli per prevederli" di Roberto Buizza affronta il tema della conoscenza dei fenomeni meteorologici e della scienza del clima con gli occhi dello specialista (l'autore ha infatti lavorato per ventisette anni presso il Centro Europeo per le Previsioni Meteorologiche a Medio Termine, è leader mondiale nel settore della modellistica globale del sistema Terra e della scienza del clima e Professore Ordinario di Fisica dell'Atmosfera e della Scienza del Clima alla Scuola Superiore Sant'Anna di Pisa), ma con un taglio argomentativo e un linguaggio commisurati a un pubblico non esperto e agli studenti universitari ai primi anni. I contenuti sono resi più comprensibili sia in termini generali dalla sequenza degli argomenti dei capitoli, sia nell'articolazione specifica; ciascuno di essi, infatti, presenta una introduzione, che riporta gli argomenti trattati precedentemente e descrive sinteticamente l'oggetto della trattazione, e da una conclusione che riassume i concetti presentati. Un apparato di grafici, schemi e tabelle corredano il testo e dei 'riquadri' fungono da complemento per specifici approfondimenti. L'obiettivo del libro è di colmare la lacuna di conoscenze su ciò che sta accadendo al clima. Nella parte iniziale Buizza tratta dei fenomeni meteorologici e del clima, dei modelli numerici e previsionali, delle emissioni di gas serra e della loro riduzione, mentre nella seconda parte argomenta in forma di risposta alcuni specifici temi sollecitati da domande chiave che spesso sorgono dai media, cercando di indicare le scelte che ognuno può prendere per imboccare la strada di un futuro sostenibile.

Antonello Pasini costruisce il libro "La sfida climatica" attorno al concetto di sfida climatica declinata nelle sue dimensioni scientifica, filosofica, comunicativa, politica e di azione concreta. L'autore affronta il tema del cambiamento climatico con approccio scientifico (Pasini è fisico climatologo al CNR e docente di Fisica del Clima all'Università di Roma Tre), in particolare nel primo capitolo, ma in una forma divulgativa che consente di portare al grande pubblico la conoscenza di un fenomeno così complesso. L'obiettivo del libro non è solo diffondere una conoscenza oggettiva dei cambiamenti climatici ma anche di esaminare le problematiche che la sfida climatica comporta in ambito culturale e di visione complessiva del mondo, nel modo di comunicare correttamente e

Critical readings on climate, crisis, and society for technological and environmental design

"Il meteo e il clima. Conoscerli per prevederli" by Roberto Buizza addresses the topic of meteorological phenomena and climate science from a specialist's perspective (the author in fact worked for twenty-seven years at the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, is a world leader in global Earth system modelling and climate science, and Full Professor of Atmospheric Physics and Climate Science at the Sant'Anna School of Advanced Studies in Pisa), but with an argumentative approach and language calibrated for a non-expert audience and early-year university students. The contents are made more comprehensible both in general terms by the sequence of the chapters' topics and their specific breakdown; each of them has an introduction, which reports the topics previously addressed and briefly describes the subject of the discussion, and a conclusion summarizing the concepts presented. A set of graphs, diagrams and tables accompanies the text, and "boxes" serve as complements for specific in-depth analyses. The aim of the book is to fill the gap in knowledge about what is happening to the climate. In the initial part, Buizza deals with meteorological phenomena and climate, numerical and forecasting models, and greenhouse gas emissions and their reduction, while in the second part he discusses, in the form of answers, some specific topics prompted by key questions that often arise in the media, seeking to indicate the choices that each individual can make in order to tread the path towards a sustainable future.

Antonello Pasini builds the book "La sfida climatica" around the concept of climate challenge from a scientific, philosophical, communicative, political and practical perspective. The author addresses the issue of climate change with a scientific approach (Pasini is a physicist and climatologist at the CNR and lecturer in Climate Physics at the University of Roma Tre), particularly in the first chapter, popularizing it so as to bring knowledge of such a complex phenomenon to a wide audience. The aim of the book is not only to disseminate objective knowledge of climate change but also to examine the issues raised by the climate challenge in the cultural sphere and

ISSN online: 2239-0243 | © 2025 Author(s) | http://www.fupress.com/techne | DOI: 10.36253/techne-20473
Open access, peer-reviewed article published by Firenze University Press (https://www.fupress.com) and distributed, except where otherwise noted, under the terms of the CC BY 4.0 License for content and CC0 1.0 Universal for metadata

sensibilizzare le persone, nell'affrontare il ruolo della politica e il dialogo tra decisori e scienziati, nell'operatività reale e nelle azioni concrete da intraprendere, e, in definitiva, di delineare prospettive future e soluzioni in grado di rispondere alle sfide emergenti.

Stefania Divertito, giornalista d'inchiesta specializzata in tematiche ambientali, in "Uccidere la natura" focalizza l'attenzione sul concetto di "ecocidio" a cui la comunità giuridica internazionale ha concordemente attribuito una definizione: «l'ecocidio è costituito dagli atti illeciti, o arbitrari, commessi con la consapevolezza che vi sia un'elevata probabilità di causare danni gravi, estesi o duraturi, agli ecosistemi». Nello 'spirito' di Norimberga, il riconoscimento del reato internazionale di ecocidio può, dunque, diventare lo strumento normativo per ristabilire giustizia, rivolto questa volta a tutelare i diritti non solo dell'umanità ma della biosfera. L'obiettivo del libro è dare evidenza delle misure che l'uomo può mettere in atto per tentare di "cicatrizzare la frattura tra i *sapiens* e l'ambiente" e ristabilire un "umanesimo relazionale" con la natura. In stile giornalistico, dopo un primo capitolo che illustra l'evoluzione giuridica del concetto di ecocidio, l'autrice descrive gli impatti di alcuni disastri ambientali prodotti dalle attività umane sugli ecosistemi, assumendo i quattro elementi naturali – acqua, aria, terra, fuoco – come "matrici ambientali" in cui riscontrare la rottura tra essere umano e natura e le possibili azioni di ricucitura.

Il libro "Troppi. Conversazioni sulla sovrappopolazione umana e sul futuro del pianeta" di Alfonso Lucifredi, naturalista e giornalista scientifico, identifica i trend demografici come l'"elefante nella stanza", ovvero il fattore che seppur determinante per il futuro della specie umana viene oggi sottaciuto vari motivi, sia culturali che politici. Il testo si articola in capitoli tematici in cui l'autore intervista esperti afferenti a diverse discipline, tracciando un ampio quadro di riflessioni in cui, per citarne alcuni, clima, cibo, giustizia sociale, economia, malattie, politica, migrazioni, biodiversità, vengono osservati a partire dalla – scomoda – domanda: «Siamo troppi su questo pianeta?». Sebbene alcuni esperti ritengano che la flessione della curva si verificherà ben prima della fine del secolo, garantire accesso alle risorse e ai servizi essenziali per tutta la popolazione mondiale e farlo compatibilmente alla tutela ambientale rappresenta già oggi una sfida epocale. Rinnegando conclusioni allarmistiche o distopiche, l'autore invita ad inquadrare la questione demografica rispetto al *come* verranno raggiunti i 10 miliardi entro il 2100, ovvero considerando il fenomeno alla sua scala e ponendolo in relazione innanzitutto all'impatto dell'uomo sulla biosfera nonché alla capacità dei progressi medici e tecnologici di rispondere ai futuri squilibri geografici e generazionali.

Il libro "Per una critica ecologica al neocapitalismo" raccoglie cinque contributi di esponenti politici, studiosi e attivisti, accomunati dalla denuncia delle strette relazioni tra il modello economico vigente e le condizioni di (in)giustizia sociale e (in)giustizia ambientale che caratterizzano le società contemporanee, con differenti connotati nelle diverse aree geopolitiche. Alla denuncia consegue da par-

in the overall vision of the world. It covers communicating correctly and raising awareness, addressing the role of politics, and dialogue between decision-makers and scientists in real operational practice and in the concrete actions to be undertaken, and, ultimately, seeks to outline future perspectives and solutions capable of responding to emerging challenges.

In "Uccidere la natura" Stefania Divertito, an investigative journalist specialized in environmental issues, focuses on the concept of "ecocide," to which the international legal community has unanimously attributed a definition: "ecocide consists of unlawful or arbitrary acts committed with the awareness that there is a high probability of causing serious, widespread or long-term damage to ecosystems." In the "spirit" of the Nuremberg Trials, recognition of the international crime of ecocide can become the normative instrument to restore justice, this time aimed at protecting not only the rights of humanity but also those of the biosphere. The book aims to highlight the actions that humans can take to try to "heal the fracture between sapiens and the environment" and restore a "relational humanism" with nature. In a journalistic style, after a first chapter that illustrates the legal evolution of the concept of ecocide, the author describes the impacts of some environmental disasters caused by human activities on ecosystems, taking the four natural elements – water, air, earth, fire – as "environmental matrices" in which to identify the rupture between human beings and nature and possible repair actions.

"Troppi. Conversazioni sulla sovrappopolazione umana e sul futuro del pianeta" by Alfonso Lucifredi, a naturalist and science journalist, identifies demographic trends as the "elephant in the room," the factor which, although decisive for the future of the human species, is today left unspoken for cultural and political reasons. The text is structured into thematic chapters in which the author interviews experts from different disciplines, outlining a broad framework of reflections in which, to cite just a few, climate, food, social justice, economics, diseases, politics, migrations, and biodiversity are observed starting from the – uncomfortable – question: "Are we too many on this planet?" Although some experts believe that the decline in the curve will occur well before the end of the century, ensuring access to resources and essential services for the entire world population, and doing so in a way compatible with environmental protection, already represents an epochal challenge. Rejecting alarmist or dystopian conclusions, the author invites us to frame the demographic issue with respect to how 10 billion will be reached by 2100, that is, by considering the phenomenon at its global scale, rather than with respect to individual national contexts, and by relating it above all to the impact of humans on the biosphere as well as the capacity of medical and technological progress to respond

te degli autori l'esortazione a una transizione – o meglio rivoluzione – ecologica fondata innanzitutto su un rinnovamento dei paradigmi politici, e dunque etici e culturali. Nei cinque saggi di Massimo Serafini, tra i fondatori di Legambiente e parlamentare, Fulvia Bandoli, esponente della sinistra italiana e dell'ambientalismo europeo, Federico M. Butera, Professore Emerito del Politecnico di Milano in Fisica Tecnica Ambientale, Stefano K. Iannillo, Dottorando in Geografia Economica presso l'Università degli Studi "Federico II" di Napoli, e Valerio Calzolaio, dirigente politico progressista e parlamentare, ricorre la sottolineatura delle responsabilità del capitalismo rispetto all'attuale condizione di policrisi, in cui l'economia e i suoi interessi governano le interazioni tra clima, società, energia, conflitti e biodiversità. A partire da prospettive differenti, gli autori discutono dell'attuale incapacità delle forze progressiste di costruire un'alternativa di stampo socialista e ambientalista, che assuma la riappacificazione tra uomo e natura come priorità politica.

Il tema dei rischi e degli impatti sull'ambiente pervade sempre più spesso la cronaca quotidiana per la persistente condizione di emergenza a cui il nostro pianeta è sottoposto, soprattutto a causa del cambiamento climatico. Si tratta tuttavia di un'emergenza determinata da una combinazione di differenti crisi: una "policrisi", come definita da Morin e Kern già negli anni Novanta (1993) connotata da un carattere di cronicità (Gammeltoft *et al*., 2022), una "permacrisi" per Ingold (2021). I dati pubblicati e periodicamente aggiornati da differenti agenzie internazionali (IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*, UNDRR – *United Nations Office on Disaster Risk Reduction*, CRED – *Centre for Research on the Epidemiology of Disasters*) danno conto della crescente frequenza e dell'aggravamento del carattere degli eventi a cui gli insediamenti umani e gli ecosistemi sono esposti. Sul tema esiste un'ampia letteratura scientifica alimentata da studi e ricerche elaborate dai molti ambiti disciplinari coinvolti. I volumi scelti per questo saggio bibliografico rappresentano un corpus significativo sul tema dei rischi antropici e ambientali e delle crisi socio-ecologiche e pongono la questione al centro delle riflessioni sulle ricadute sull'ambiente e sulle società.

I testi rispondono, inoltre, ai seguenti criteri:

- forniscono una rappresentazione aggiornata e recente di una condizione in costante evoluzione;
- riflettono i molteplici punti di vista sul tema da parte delle figure di scienziati, giornalisti, politici, naturalisti e divulgatori scientifici;
- descrivono le conoscenze e i concetti utili a comprendere i fenomeni collegati ai rischi e agli impatti sull'ambiente e a orientare la ricerca e lo sviluppo.

Questo saggio si propone di leggere tali opere in modo comparato, non come una semplice rassegna tematica, ma come un dispositivo critico in grado di evidenziare le implicazioni che la costante trasformazione del paesaggio globale dei rischi produce sul progetto tecnologico e ambientale. Segnaliamo alcune tematiche a nostro avviso ricorrenti su cui i vari autori, in base ai propri ruoli sociali e alle proprie competenze professionali, hanno indagato e espresso le loro opinioni.

to future geographical and generational imbalances.

The book "Per una critica ecologica del neocapitalismo" contains five contributions by political figures, scholars and activists, united by the denunciation of the close relationships between the prevailing economic model and the conditions of social (in)justice and environmental (in)justice that characterize contemporary societies, with different features in different geopolitical areas. The authors follow this denunciation with an exhortation to an ecological transition – or rather revolution – founded primarily in the renewal of political paradigms, and therefore ethical and cultural ones. The five essays by Massimo Serafini, Fulvia Bandoli, Federico M. Butera, Stefano K. Iannillo, and Valerio Calzolaio all emphasise the responsibilities of capitalism with respect to the current polycrisis in which the economy and its interests govern interactions between the climate, society, energy, conflicts and biodiversity. Starting from different perspectives, the authors discuss the current inability of progressive forces to construct an alternative to a socialist and environmentalist nature, which would make reconciliation between humans and nature a political priority.

Risks and environmental impacts increasingly permeate daily news reporting due to the persistent state of emergency to which our planet is subjected, primarily as a result of climate change. However, this emergency is determined by a combination of different crises: a "polycrisis", as defined by Edgar Morin and Anne Brigitte Kern as early as the 1990s (1993), marked by chronicity (Gammeltoft *et al*., 2022), and a "permacrisis" according to Tim Ingold (2021). Data published and periodically updated by various international agencies (IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, UNDRR - United Nations Office for Disaster Risk Reduction, CRED - Centre for Research on the Epidemiology of Disasters) attest to the increasing frequency and severity of events to which human settlements and ecosystems are exposed. On this topic, there is extensive scientific literature supported by studies and research developed across the many disciplinary fields involved. The volumes selected for this bibliographic essay represent a significant body of work on the subject of risks and place the issue of anthropogenic and environmental risks, as well as socio-ecological crises, at the center of reflections on their impacts on the environment and societies.

The texts also meet the following criteria:

- they provide an up-to-date and recent representation of a constantly evolving situation;
- they reflect multiple perspectives on the topic from scientists, journalists, politicians, naturalists, and science communicators;
- they describe knowledge and concepts useful to understand phenomena related to risks and environmental impacts and to guide research and development.

This essay aims to examine these works comparatively, not as a simple thematic review, but as a critical framework capable of highlighting the

Complessità e approccio sistemico

I fenomeni meteorologici e climatici sono il risultato di una serie di fattori concomitanti, già di per sé complessi, le cui interazioni a loro volta generano un sistema ancora più complesso. Capire come si evolve il "sistema clima" vuol dire conoscere le principali variabili fisiche (Buizza), ma anche i sottosistemi che lo compongono – atmosfera, idrosfera, criosfera e biosfera – oltre ai processi che descrivono le relazioni reciproche e le catene chiuse di causa-effetto (Pasini). Al sistema clima si attribuisce una complessità caratterizzata, tra l'altro, dall'esistenza di *feedback*, ovvero dalla presenza di causalità circolari che danno risposte non lineari alle cause. Ciò è fondamentale per comprendere che le azioni di contrasto devono avvenire su più fronti e non isolatamente dal punto di vista geografico. La dimensione della complessità si estende poi, nei testi di Lucifredi e in "Per una critica ecologica al neocapitalismo", all'intrecciarsi di questioni economiche, sociali e demografiche. L'"antroposfera", e più nello specifico la "tecnosfera", vengono indicate come quei sottosistemi in cui si sviluppano le interazioni tra il clima e quelli che sono gli attuali modelli di produzione e consumo, i trend di de/crescita della popolazione, i divari nell'accessibilità ai servizi e i conflitti armati. Rispetto alla necessaria e urgente definizione di un'agenda globale condivisa, complessa è inoltre la gestione dei rapporti – e dei diversi interessi – tra paesi a capitalismo maturo ed economie emergenti, che richiede il potenziamento dei consessi di cooperazione internazionale a fronte di un attuale riarmo. Se il raffronto tra l'incremento costante delle emissioni e la stipula degli accordi internazionali evidenzia la difficoltà di costruire una visione collegiale su scala globale, questa resta l'unica strada percorribile per scongiurare conflitti estesi.

Cultura scientifica e consapevolezza

A fronte di una comprovata ciclicità naturale che alterna nel corso di milioni di anni periodi di surriscaldamento a fasi di glaciazione, ciò che caratterizza la situazione attuale è ben descritto dall'aggettivo inglese *unprecedented* (Pasini). Onde evitare fraintendimenti o peggio ancora visioni distorte o addirittura negazioniste delle tendenze climatiche, la fiducia nella cultura scientifica è alla base di una corretta valutazione dei fenomeni in atto. Se Buizza fa ampio uso di dati scientifici che possono spiegare l'evoluzione climatica e dimostrarne inconfutabilmente le conseguenze, Pasini insiste sull'accreditamento dell'approccio scientifico che si avvale di attività di ricerca e validazione dei risultati attraverso la revisione e il confronto con altri scienziati. Il messaggio scientifico deve però avvalersi di modalità di informazione adeguate, più frequenti e trasversali, che possano raggiungere non solo il mondo politico, a cui affidiamo le scelte strategiche generali per la gestione della cosa pubblica, ma anche il singolo individuo, i cui comportamenti devono diventare più consapevoli e dunque responsabili. Il concetto di "responsabilità", che Pasini caratterizza come "comune ma differenziata", sia rispetto alle scale individuale e sovranazionale che ai diversi Stati, è fondativo per una nuova etica in cui ogni azione viene ricondotta ad un equilibrio globale, come affermato da Ulrich Beck in "La società del rischio" (2013). Elaborare soluzioni eque dal punto di vista della giustizia ambientale per Divertito significa partire dai dati scientifici e prendere decisioni politiche *science based* piuttosto che ricorrere a un semplice idealismo. In "Per una critica ecologica al neocapitalismo" viene inoltre chiaramente denunciata la tendenza di alcuni schieramenti politici a mettere in discussio-

implications of the continuous transformation of the global risk landscape for technological and environmental design. We highlight some recurring themes that, in our view, run across the contributions, on which the various authors, on the basis of their social roles and professional expertise, have conducted their analyses and expressed their positions.

Complexity and systemic approach

Meteorological and climatic phenomena are the result of a series of concurrent factors, already complex in themselves, whose interactions in turn generate an even more complex system. Understanding how the "climate system" evolves means knowing the main physical variables (Buizza) and the subsystems it is composed of – atmosphere, hydrosphere, cryosphere and biosphere – as well as the processes that describe their mutual relationships and closed cause-effect chains (Pasini). The climate system is attributed a form of complexity characterized, among other aspects, by the existence of feedback, that is, the presence of circular causalities that produce non-linear responses to causes. This is fundamental for understanding that mitigation must occur on multiple fronts and not in isolation from a geographical perspective.

The dimension of complexity is further extended, in the works of Lucifredi and in "Per una critica ecologica del neocapitalismo", to the intertwining of economic, social and demographic issues. The anthroposphere, or technosphere, is identified as the subsystem in which interactions develop between the climate and current models of production and consumption, population de/growth trends, inequalities in access to services, and armed conflicts. With regard to the necessary and urgent definition of a shared global agenda, the management of relationships – and of differing interests – between countries with mature capitalist systems and emerging economies is also complex, requiring the strengthening of international cooperation forums in the face of current rearmament. While the comparison between the constant increase in emissions and the signing of international agreements highlights the difficulty of constructing a collective vision on a global scale, it is the only viable path to prevent widespread conflicts.

Scientific culture and awareness

In the face of a well-established natural cyclicity that, over millions of years, has alternated periods of warming with phases of glaciation, the current situation is effectively described by the word "unprecedented" (Pasini). In order to avoid misunderstandings or, even worse, distorted or outright denialist interpretations of climate trends, trust in scientific culture is the basis for a correct assessment of ongoing phenomena. While Buizza makes extensive use of scientific data that can explain climate evolution and incontrovertibly demonstrate its consequences, Pasini emphasizes the validation of the scientific approach, which relies on research and the verification of results through peer review and comparison with other scientists.

However, the scientific message must rely on appropriate modes of communication – more frequent and transversal – capable of reaching not only the political sphere, to which we entrust general strategic decisions for the management of public affairs, but

ne la scientificità, e dunque l'inequivocabilità, delle evidenze sul clima al fine di tutelare interessi economici e gruppi di potere, mentre è responsabilità della politica orientare e sostenere le transizioni necessarie senza lasciare nessuno indietro.

Cause e effetti del cambiamento climatico

Gli scienziati del clima definiscono incontrovertibilmente la prima causa dei cambiamenti climatici, ovverosia le emissioni di gas serra, fornendo poi le indicazioni necessarie a limitare i conseguenti rischi ambientali sia in termini di mitigazione che di adattamento. Solo riducendo l'immissione dei gas serra nell'atmosfera sarà infatti possibile contenere l'innalzamento della temperatura entro i limiti sanciti dagli accordi internazionali per contrastare il cambiamento climatico. Dunque gli stessi autori affermano che risulta del tutto evidente, secondo gli stessi autori, che il cambiamento climatico è da attribuire non a cause naturali ma alle attività umane, definite da Pasini "forzanti antropiche" che alterano dall'interno il sistema clima, con particolare riferimento all'utilizzo dei combustibili fossili a partire dalla prima rivoluzione industriale. Anche i disastri ambientali di cui scrive Divertito e passibili del reato di ecocidio sono da attribuire alla responsabilità umana. Oltre all'innalzamento del livello dei mari e allo scioglimento dei ghiacci, gli effetti dell'aumento della temperatura media sono l'aumento della frequenza e dell'intensità di eventi estremi, come piogge e alluvioni, ondate di calore e siccità. Inoltre, impatti del cambiamento climatico innescano e aggravano una pluralità di rischi antropici, tra cui l'allargamento delle aree del pianeta ormai inabitabili e l'innescarsi di conflitti armati per l'accesso alle risorse. Serafini evidenzia appunto la stretta connessione tra guerre, aggravarsi della crisi climatica e migrazioni. Le scorie delle guerre (Divertito analizza in particolare la guerra in Ucraina) producono sull'ambiente conseguenze devastanti, come peraltro dimostrato dalle aggressioni in corso in Ucraina e Medio Oriente, che impattano sulla salute del pianeta e sulla vita dei suoi abitanti, umani e non, per lunghi periodi di tempo.

Mitigazione e adattamento

Gli effetti del cambiamento climatico si combattono attraverso le azioni di adattamento e mitigazione. Entrambe sono ritenute indispensabili per correggere i trend attuali, specialmente considerando l'inerzia del sistema clima. Se Buizza ritiene prioritario l'intervento di mitigazione perché agisce sull'immissione di gas serra, la prima causa del cambiamento climatico, Pasini, nell'analizzare le criticità del cambiamento climatico e l'inesorabile china negativa, arriva a formulare una sorta di slogan che dovrebbe ispirare le azioni correttive: gestire l'inevitabile con l'adattamento e evitare l'ingestibile con la mitigazione. Alla riduzione delle emissioni di gas serra possono contribuire azioni di assorbimento e immagazzinamento (CSS – *Carbon Capture and Storage*), che però si limitano a piccole percentuali, e sistemi naturali di assorbimento (NbS – *Nature-based Solutions*), come la forestazione, che possono arrivare al 10-15% delle emissioni globali (Buizza). A soluzioni tecnologiche di tipo additivo, che aggiungono un'ulteriore influenza umana al clima, dovrebbero invece contrapporsi secondo Pasini, o comunque combinarsi, soluzioni di riduzione dei condizionamenti che le attività umane hanno già provocato. Prendendo ad esempio la regimentazione idrica dei corsi d'acqua, in

also the individual, whose behavior must become more aware and therefore more responsible. The concept of responsibility, which Pasini defines as "common but differentiated," both with respect to individual and supranational scales and among different States, is foundational for a new ethics in which every action is related to a global balance, as stated by Ulrich Beck in "La società del rischio" (2013). For Divertito, developing fair solutions from an environmental justice perspective means starting from scientific data and making science-based political decisions rather than resorting to mere idealism. In "Per una critica ecologica del neocapitalismo", the tendency of certain political factions to question the scientific validity – and therefore the unequivocal nature – of climate evidence in order to protect economic interests and power groups is also clearly denounced, whereas it is the responsibility of politics to guide and support the necessary transitions without leaving anyone behind.

Causes and Effects of Climate Change

Climate scientists unequivocally identify the primary driver of climate change, namely greenhouse gas emissions, and provide the necessary indications to limit the resulting environmental risks in terms of both mitigation and adaptation. Indeed, only by reducing the release of greenhouse gases into the atmosphere will it be possible to contain the rise in temperature within the limits established by international agreements to counter climate change. Likewise, according to the same authors, it is entirely evident that climate change is not attributable to natural causes but to human activities, defined by Pasini as "anthropogenic forcings" that alter the climate system from within, with particular reference to the use of fossil fuels starting from the first Industrial Revolution. The environmental disasters described by Divertito and potentially qualifying as ecocide are also attributable to human behaviour. In addition to rising sea-levels and the melting of ice, the effects of the increase in average temperature include a rise in the frequency and intensity of extreme events, such as heavy rainfall and floods, heatwaves, and droughts. The impacts of climate change trigger and exacerbate a plurality of anthropogenic risks, including the expansion of areas of the planet that are becoming uninhabitable and the onset of armed conflicts over access to resources. Serafini highlights specifically the close connection between wars, the worsening of the climate crisis, and migration. The remnants of wars (in particular, Divertito analyzes the war in Ukraine) produce devastating consequences for the environment, as also demonstrated by the ongoing aggressions in Ukraine and the Middle East, which affect the health of the planet and the lives of its inhabitants, human and non-human, for long periods of time.

Mitigation and adaptation

The effects of climate change are addressed through adaptation and mitigation. Both are considered indispensable to correct current trends, especially in light of the inertia of the climate system. While Buizza considers mitigation to be the priority, as it acts on the emission of greenhouse gases – the primary cause of climate change – Pasini, in analyzing the criticalities of climate change and its inexorable downward trajectory, for-

una prospettiva futura secondo Pasini il ricorso alle NbS è da preferirsi a soluzioni di tipo ingegneristico che risultano molto impattanti e dagli esiti incerti rispetto a eventuali maladattamenti prodotti. Buizza evidenzia che la decarbonizzazione produrrebbe azioni di contrasto alla diffusione di guerre perché, oltre a ridurre le migrazioni, agirebbe sulla volontà di controllare l'accesso alle fonti di energia convenzionale. Per di più, a fronte di un diffuso indebolimento dei sistemi democratici, le politiche di mitigazione e adattamento dovranno essere guidate da un'alleanza globale tra sfere geopolitiche diverse e non delegate all'esclusiva iniziativa degli operatori economici privati, trasferimento che potrebbe determinare interventi in cui non vengono rispettati i diritti umani e i principi di solidarietà ed equità sociale.

Natura e essere umano

Tra le sfide poste dalla crisi climatica, cruciale è quella che investe il rapporto tra l'essere umano e la natura: solo (ri) considerando il ruolo dell'essere umano come "nodo della rete" (Pasini) di relazioni che strutturano il sistema del clima si può ristabilire un rapporto di equilibrio con la natura e, per estensione, con le risorse naturali. Per tale ragione occorre superare la visione dualistica e di separazione, se non contrapposizione, tra essere umano e natura e concentrarsi su una visione sistemica. Non è un caso il ricorrente riferimento alla enciclica "Laudato si'" di Papa Francesco che esorta a considerare l'essere umano come parte integrante della natura. Porre il benessere umano al pari di quello naturale porta al concetto di "*large-scale sustainability*" richiamato da Pasini, visione che esorta il superamento del primato ontologico dell'essenza e della sostanza a favore della relazione e del processo. La visione giuridica delineata da Divertito con il concetto di ecocidio invita a guardare all'ambiente non come una risorsa da estrarre e consumare ma come un essere vivente dotato di diritti al pari dell'essere umano. La conversione ecologica degli esseri umani passa attraverso la sfida di tenere insieme la giustizia ambientale con la giustizia sociale (Iannillo) e la presa di coscienza che non si può risanare l'ambiente senza risanare la società e viceversa (Butera). In "Per una critica ecologica al neocapitalismo" si evidenzia come solo una parte minoritaria della popolazione mondiale goda di una condizione di benessere, dato che addossa all'Occidente una responsabilità storica imponendo una riflessione sul concetto stesso di Antropocene. A questo ben si associano gli *Earth Overshoot Day*, che danno una chiara rappresentazione su scala temporale della disparità tra le impronte ecologiche delle diverse popolazioni umane. Per valutare l'impatto di 10 miliardi di individui sul pianeta, Gianluca Lentini, intervistato da Lucifredi, richiama il concetto di "individuo esteso" introdotto dallo scienziato tedesco Manfred Laubichler nel 2022, per cui se il metabolismo naturale dell'individuo è di 90 watt, il tasso socio-metabolico dell'essere umano raggiunge oggi gli 11.000 watt. Alla luce del rapporto tra azione individuale e collettiva, ridimensionare l'impronta ecologica di una porzione minoritaria dell'umanità contribuirebbe a riequilibrarne il rapporto complessivo con la biocapacità del pianeta. Sforzo a cui deve affiancarsi una nuova concezione del benessere, come sottolineato da Iannillo, da non misurarsi come possesso di beni materiali o crescita economica ma come qualità delle relazioni sociali e naturali.

mulates a sort of slogan that should guide corrective actions: manage the inevitable through adaptation and avoid the unmanageable through mitigation. The reduction of greenhouse gas emissions can be supported by absorption and storage (CCS – Carbon Capture and Storage), which, however, are limited to small percentages, and by natural absorption systems (NbS – Nature-based Solutions), such as afforestation, which can account for up to 10–15% of global emissions (Buizza). Additive technological solutions, which introduce an additional human influence on the climate, should, according to Pasini, be counterbalanced – or at least combined – with solutions aimed at reducing the pressures that human activities have already exerted. Taking the regulation of watercourses as an example, from a future-oriented perspective Pasini suggests that recourse to NbS should be preferred over engineering-based solutions, which are highly impactful and have uncertain outcomes, particularly in terms of potential maladaptation. Buizza points out that decarbonization would help to counter the spread of wars because, in addition to reducing migration flows, it would affect the drive to control access to conventional energy sources. Moreover, in the context of a widespread weakening of democratic systems, mitigation and adaptation policies should be guided by a global alliance among different geopolitical spheres and not delegated exclusively to private economic actors, as such a shift could result in interventions that fail to respect human rights and the principles of solidarity and social equity.

Nature and the human being

Among the challenges posed by the climate crisis, a crucial one concerns the relationship between human beings and nature: only by (re)considering the role of human beings as a "node in the network" (Pasini) of relationships interacting within the climate system is it possible to engage properly with nature and, by extension, with natural resources. For this reason, it is necessary to overcome the dualistic vision and separation – if not opposition – between human beings and nature and focus instead on a systemic perspective. It is no coincidence that there are recurring references to the encyclical "Laudato si'" by Pope Francis, which urges us to consider human beings as an integral part of nature. Placing human well-being on a par with that of nature leads to the concept of "large-scale sustainability" referred to by Pasini, a vision that calls for us to overcome the ontological primacy of essence and substance in favor of relation and process. The legal perspective outlined by Divertito through the concept of ecocide invites us to regard the environment not as a resource to be extracted and consumed but as a living entity endowed with rights equal to those of human beings. The ecological conversion of humanity requires us to address the challenge of reconciling environmental justice with social justice (Iannillo) and acknowledge that the environment cannot be restored without restoring society, and vice versa (Butera). In "Per una critica ecologica del meocapitalismo", it is highlighted that only a minority of the global population enjoys conditions of well-being, a fact that places a historical responsibility on Western countries and calls for a reconsideration of the very

Modelli di sviluppo, economia e politica

Da un'analisi delle emissioni per settore (produzione di elettricità e calore, trasporti, industria e costruzioni, edifici, agricoltura e uso della terra, rifiuti e altri contributi), secondo Buizza occorre trasformare tutte le maggiori attività umane che concorrono alle emissioni di gas serra, compreso anche l'ambiente costruito. Un'analisi comparativa tra alcuni paesi europei sul rapporto tra crescita economica, intensità energetica dei processi produttivi e intensità di carbonio della produzione di energia, dimostra che è possibile disaccoppiare la crescita economica da quella di emissione di gas serra, rendendo i processi produttivi più efficienti e utilizzando in misura sempre maggiore le fonti alternative per la produzione di energia. Tuttavia, adottare strategie di mitigazione e adattamento potrebbe non essere sufficiente: occorre modificare radicalmente il modello di sviluppo che al momento è basato sulla crescita infinita. In "Per una critica ecologica al neocapitalismo" gli autori sottolineano infatti l'incompatibilità tra la salvaguardia dell'ambiente e i meccanismi dello schema economico corrente. Il nesso tra crescita del PIL e crescita delle emissioni di gas serra, ovvero il contrasto insanabile tra un modello economico lineare, basato sulla crescita illimitata di produzione e consumi, e un pianeta dalle risorse finite, un'"astronave" nella metafora di Kenneth Boulding, richiede una discontinuità radicale dai paradigmi socio-economici e politici del passato. Contro la crescita continua Serafini cita i limiti imposti dagli ecosistemi naturali, l'insufficienza delle risorse energetiche fossili e nucleari, l'aumento della popolazione (come ben messo in luce da Lucifredi). Già nel 1972 il Club di Roma nel celebre rapporto "I limiti dello sviluppo" discuteva della crescita economica e demografica esponenziale a fronte di risorse limitate. Avviare la transizione verso una decrescita economicamente valida, ovvero socialmente "desiderabile" (come definita da Alex Langer negli anni '90), modificare radicalmente i nostri stili di vita, ridurre i divari tra la piccola minoranza di ricchi inquinanti e la stragrande maggioranza di poveri inquinati, riaffermare i valori della cultura collettiva e solidaristica, sono tra i principi che gli autori di "Per una critica ecologica al neocapitalismo" indicano per la costruzione di un'alternativa politica ambientalista, quella che Luciano Canova, intervistato da Lucifredi, definisce un'"economia ecologica".

Tecnologia e innovazione

L'aggravarsi della crisi ambientale per molti autori è da ricondurre al rapporto tra industria e consumi. Il salto tecnologico compiutosi con la rivoluzione industriale ha sì prodotto indubbi benefici all'essere umano ma ha anche provocato un maggior consumo delle risorse. La coincidenza tra rivoluzione industriale e crisi climatica è evidenziata anche da Lucifredi che riporta l'opinione dell'ecologo Guido Chelazzi, secondo cui gli effetti dell'uomo sull'ambiente (le "impronte antropiche") sono riconducibili, tra le altre cause, anche allo sviluppo di attività umane e a progressi tecnologici. Se da una parte, come afferma Lucifredi, sono in molti a sostenere che i problemi attuali potranno essere risolti con il progresso tecnologico, da un'altra, Serafini ci mette in guardia dalle innovazioni tecnologiche quando sono usate come «merci e strumenti di manipolazione e controllo». In questo senso, il principio della "neutralità tecnologica", introdotto nel Green Deal europeo dalle lobby del fossile e del nucleare, lascia le scelte delle opzioni tecnologiche

concept of the Anthropocene. This is closely related to the concept of Earth Overshoot Day, which provides a clear temporal representation of disparities in the ecological footprints of different human populations. To assess the impact of 10 billion individuals on the planet, Gianluca Lentini, interviewed by Lucifredi, refers to the concept of the "extended individual," introduced by the German scientist Manfred Laubichler in 2022, according to which, while the natural metabolism of an individual is about 90 watts, the socio-metabolic rate of human beings today reaches approximately 11,000 watts.
In light of the relationship between individual and collective action, reducing the ecological footprint of a minority portion of humanity would help rebalance the overall relationship with the planet's biocapacity. This effort must be accompanied by a new conception of well-being, as emphasized by Iannillo, not to be measured in terms of the possession of material goods or economic growth, but rather in the quality of social and natural relationships.

Development models, economics and politics

Based on an analysis of emissions by sector (electricity and heat production, transport, industry and construction, buildings, agriculture and land use, waste, and other contributions), according to Buizza it is necessary to transform all major human activities that contribute to greenhouse gas emissions, including the built environment. A comparative analysis among several European countries on the relationship between economic growth, the energy intensity of production processes, and the carbon intensity of energy production demonstrates that it is possible to decouple economic growth from the growth of greenhouse gas emissions by making production processes more efficient and increasingly using alternative energy sources. However, adopting mitigation and adaptation strategies may not be sufficient: it is necessary to radically transform the current development model, which is based on infinite growth. In "Per una critica ecologica del neocapitalismo", the authors emphasize the incompatibility between environmental protection and the principles of the current economic system. The link between GDP growth and the increase in greenhouse gas emissions – namely, the irreconcilable conflict between a linear economic model based on unlimited growth in production and consumption and a planet with finite resources, a "spaceship" in the metaphor proposed by Kenneth Boulding – requires a radical break from past socio-economic and political paradigms. Against continuous growth, Serafini points to the limits imposed by natural ecosystems, the insufficiency of fossil and nuclear energy resources, and population growth (as clearly highlighted by Lucifredi). As early as 1972, the Club of Rome, in its well-known report "The Limits to Growth", discussed exponential economic and demographic growth in the face of limited resources. Initiating the transition toward an economically viable degrowth, that is, socially "desirable" (as defined by Alexander Langer in the 1990s), radically changing our lifestyles, reducing inequalities between the small minority of wealthy polluters and the vast majority of poor populations affected by pollution, and reaffirming the values of a collective

al mercato invece che basarsi su quanto sarebbe meglio per persone e territori. Su questa posizione si allinea Iannillo quando ribadisce che non è possibile rendere più sostenibile il capitalismo – ancorato a logiche estrattive – affidandosi al progresso tecnologico (Butera).
Riaffiora in questi atteggiamenti critici il pensiero del filosofo Umberto Galimberti, secondo cui la tecnica che ormai pervade l'ambiente in cui viviamo plasma le nostre vite secondo regole dettate da razionalità, funzionalità ed efficienza, che sacrificano le esigenze profonde dell'essere umano: «Ma la tecnica non tende a uno scopo, non promuove un senso, non apre scenari di salvezza, non redime, non svela verità: la tecnica funziona» (Galimberti, 2016). Sul fronte dell'innovazione tecnologica, i climatologi concordano che la profonda conoscenza della fisica dei fenomeni meteorologici e climatici è alla base di qualsiasi risposta connessa alla prevenzione e che questa, per i caratteri di complessità e globalità sopra richiamati, potrà essere sviluppata non più in laboratori reali ma virtuali. La svolta modellistica nel modo di considerare la scienza del clima si affiderà in maniera crescente al ricorso ad ambienti digitali con la creazione di gemelli virtuali, modelli che consentono elaborazioni sempre più precise e di previsioni sempre più attendibili.

Prospettive per il progetto Al tentativo di ricomporre all'interno di una lettura organica le diverse e molteplici riflessioni rintracciabili nei testi proposti consegue un secondo stimolante esercizio, che è quello di ricondurre le riflessioni emerse all'ambito del progetto.
Nella disamina del rapporto tra essere umano, rischi e natura, l'ambiente costruito rappresenta il luogo in cui questo rapporto prende corpo, proponendone, sotto diverse forme, una sintesi fisica. Fisicità che non va intesa come fissità, anzi sono specialmente i processi trasformativi che vengono operati sui sistemi urbani a sostanziare la visione che in quel momento storico l'essere umano ha di sé. Visione che nell'epoca umana è determinata innanzitutto dalla relazione che l'essere umano, o meglio gli interessi economici dominanti, decide di instaurare con la natura. Abbandonare, come auspica Latour (2022), un atteggiamento estrattivo nei confronti della natura, che la assimila a bene di consumo senza dignità e senza diritti, significa, per le discipline progettuali, stabilire nuove regole secondo cui abitare la Terra, o meglio co-abitare in armonia con il resto della biosfera. Se il settore delle costruzioni è oggi responsabile di circa il 35-40% delle emissioni, il 50% del consumo di materie vergini e la produzione del 25-30% dei rifiuti (Circle Economy, 2025), a queste nuove regole di co-abitazione devono corrispondere orientamenti progettuali precisi, rivolti alla riduzione della pressione antropica sul pianeta.
Progettare in maniera responsabile e consapevole presuppone, nella contemporaneità, progettare in una dimensione globale, ovvero complessa. Ciò si traduce innanzitutto nella necessità per il progettista di conoscere fenomeni altri rispetto al proprio mestiere tradizionale. Fenomeni climatici e socio-economici le cui relazioni determinano il punto di partenza del progetto e, se vogliamo, i confini ecologici entro cui operare. Considerare le evidenze scientifiche sul clima e sulla natura come layer informativi imprescindibili per poter agire sull'habitat umano e non, richiede al progettista la capacità di leggere e interpretare dati e previsioni, ovvero formarsi per agire in una dimensione globale e dunque complessa, come dal pensiero di Morin (1999).

and solidaristic culture are among the principles that the authors of "Per una critica ecologica del neocapitalismo" identify as necessary to construct an environmentalist political alternative – what Luciano Canova, interviewed by Lucifredi, defines as an ecological economy.

Technology and innovation
For many authors, the worsening of the environmental crisis can be traced back to the relationship between industry and consumption. The technological leap brought about by the Industrial Revolution has undoubtedly produced significant benefits for human beings, but it has also led to increased resource consumption. The coincidence between the Industrial Revolution and the climate crisis is also highlighted by Lucifredi, who reports the opinion of the ecologist Guido Chelazzi, according to whom human impacts on the environment (so-called "anthropic footprints") can be attributed, among other causes, to the development of human activities and technological progress.
On the one hand, as Lucifredi notes, many argue that current problems can be solved through technological progress; on the other, Serafini warns against technological innovations when they are used as «commodities and instruments of manipulation and control». In this sense, the principle of "technological neutrality," introduced into the European Green Deal by fossil fuel and nuclear lobbies, leaves decisions regarding technological options to the market rather than grounding them in what would be most beneficial for people and territories. Iannillo aligns with this position, emphasizing that it is not possible to make capitalism – rooted in extractive logics – more sustainable by relying on technological progress (Butera).
These critical perspectives echo the thought of the philosopher Umberto Galimberti, according to whom technology, which now pervades the environment in which we live, shapes our lives according to rules dictated by rationality, functionality, and efficiency, often at the expense of deeper human needs: «Technology does not aim at a purpose, does not promote meaning, does not open scenarios of salvation, does not redeem, does not reveal truth: technology functions» (Galimberti, 2016).
On the front of technological innovation, climatologists agree that a deep understanding of the physics of meteorological and climatic phenomena is the basis of any response related to prevention and that this, given the aforementioned characteristics of complexity and globality, will increasingly be developed not in physical laboratories but in virtual ones. The shift towards a modelling-based approach in climate science will increasingly rely on digital environments through the creation of virtual twin-models that progressively enable more precise analyses and increasingly reliable forecasts.

Perspectives for design
The attempt to recombine, within an organic reading, the diverse and multiple reflections found in the selected texts leads to a second stimulating exercise, namely bringing the emerging reflections back to the field of design.
In examining the relationship between human beings, risks, and nature, the built environment represents the place where this relationship takes shape, offering, in various forms, a physical

Mai come oggi progettare significa fare una scelta di campo, tanto alla scala tecnologica e architettonica quanto a quella urbana e territoriale: nel definire le geometrie relazionali tra clima, risorse e comunità, il progetto può indirizzarsi verso la riduzione della pressione antropica o il perpetuamento del modello *business as usual*. Nello schierarsi, è forse necessario recedere da quell'atto di fede incondizionata nei confronti della tecnologia quando è impiegata come fine piuttosto che come mezzo o, per meglio dire, risorsa per raggiungere il vero senso dell'atto progettuale e il soddisfacimento delle reali esigenze. È ragionevole chiedersi quanto oggi politiche culturali prive di senso o di immaginazione abbiano allontanato la tecnologia dalla scienza, trasformandola in una fede (Valerio, 2023). La tecnologia come esito dell'inevitabile corsa all'innovazione sotto la spinta di logiche di mercato e di crescita non fa altro che autoalimentarsi e l'eccessiva sofisticazione e complessità tecnologica non sempre conducono a una maggiore resilienza come oggi auspicabile.

Ridisegnare la casa comune non può più essere prerogativa di una cerchia di professionisti ma, come evidenziato da Carlo Ratti (2025), deve aprirsi ad un processo di democratizzazione che ha già attraversato molti altri campi del sapere, compreso quello prettamente scientifico che si sta orientando verso l'orizzonte dell'*Open Science* e della *Citizen Science*.

In un contesto come quello italiano, con il 94,5% del territorio esposto a rischio idrogeologico (ISPRA, 2024) e un trend di crescita del numero di eventi climatici estremi che rendono il paese un hotspot climatico (Legambiente, 2025), la conoscenza dei (multi-)rischi dovrebbe costituire uno dei saperi fondamentali per la didattica, la ricerca e la pratica progettuale. Non solo gli scenari futuri impongono un rinnovamento del modo di progettare, ce lo chiede la nostra memoria storica. Nel 2026, a 10 anni dal terremoto del Centro Italia e a 50 anni da quello del Friuli e a 60 dall'alluvione di Firenze, i disastri ancora faticano ad ottenere «cittadinanza nella memoria collettiva», come denuncia Armiero (2023). Eppure, di fronte alle crisi socio-ecologica che plasmano le nostre società, la rigenerazione delle nostre città può essere un manifesto di cura della casa comune, un processo educante basato sulla collaborazione tra progetto, ricerca, cittadini e istituzioni, in cui una rinnovata cultura del progetto si fa – finalmente – costruttrice della cultura del rischio.

REFERENCES

Armiero, M. (2023), *La tragedia del Vajont. Ecologia politica di un disastro*. Einaudi, Torino.

Beck, U. (1986), *La società del rischio*. Versione italiana del 2000 per Carocci Editore, Roma.

Circle Economy (2025), *The circularity gap report 2025*. Accessibile a: https://pdf.circularity-gap.world/?report=CGR_Global_2025_Report_0c90048033&page=1 (Accesso: 31/01/2026).

Galimberti, U. (2016), *Psiche e techne. L'uomo nell'età della tecnica*. Feltrinelli, Milano.

Gammeltoft-Hansen, T., Rydstrom, H., Hamza, M., and Berggren, V. (2022), "Crisis: critical and interdisciplinary perspectives". *Global Discourse*, 12(3-4), pp. 456-459. DOI: https://doi.org/10.1332/204378921X16391801343500.

Ingold, T. (2021), *Correspondences: A Philosophy of Correspondence*. John Wiley and Sons Ltd, Chichester, UK.

ISPRA (2024), *Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio*. Accessibile a: https://www.isprambiente.gov.it/files2025/pubblica-

synthesis. This physicality should not be understood as fixity; on the contrary, it is precisely the transformative processes enacted on urban systems that substantiate the vision that human beings, in a given historical moment, have of themselves. A vision that, in the human epoch, is determined above all by the relationship that human beings – or rather the dominant economic interests – choose to establish with nature.

Abandoning, as advocated by Bruno Latour (2022), an extractive attitude toward nature, which assimilates it to a consumable good devoid of dignity and rights, means, for design disciplines, establishing new rules according to which to inhabit the Earth – or rather to co-inhabit it in harmony with the rest of the biosphere. If the construction sector is currently responsible for approximately 35-40% of emissions, 50% of virgin material consumption, and 25-30% of waste production (Circle Economy, 2025), these new rules of cohabitation must correspond to precise design orientations aimed at reducing anthropogenic pressure on the planet.

Designing responsibly and consciously today implies designing within a global – therefore complex – dimension. This translates, first of all, into the need for designers to acquire knowledge of phenomena beyond their traditional field, namely climatic and socio-economic phenomena, whose interrelations determine the starting point of the design process and, one might say, the ecological boundaries within which to operate. Considering scientific evidence on climate and nature as indispensable informational layers for intervening in both human and non-human habitats requires designers to be able to read and interpret data and forecasts, that is, to be trained to operate within a global and therefore complex dimension, in line with the thinking of Edgar Morin (1999).

More than ever, designing today means taking a position, both at the technological and architectural scale and at urban and territorial level: in defining the relational geometries between climate, resources, and communities, design can orient itself either towards reducing anthropogenic pressure or perpetuating the business-as-usual model. In taking sides, it may be necessary to step back from an unconditional act of faith in technology when it is used as an end rather than as a means – or, more precisely, as a resource to achieve the true purpose of the design act and satisfy real needs. It is reasonable to ask to what extent cultural policies lacking meaning or imagination have distanced technology from science, transforming it into a form of belief (Valerio, 2023). Technology, as the outcome of the inevitable race for innovation driven by market logics and growth imperatives, tends to become self-perpetuating, and excessive technological sophistication and complexity do not always lead to greater resilience, as would be desirable in the contemporary context.

Redesigning the common home can no longer be the prerogative of a restricted group of professionals but, as highlighted by Carlo Ratti (2025), must open up to a process of democratization that has already affected many other fields of knowledge, including the strictly scientific domain, which is increasingly oriented towards the horizon of Open Science and Citizen Science.

zioni/rapporti/rapporto_ispra_dissesto_idrogeologico_ed2024_web.pdf (Accesso: 31/01/2026).

Latour, B. (2022), *Dove sono? Lezioni di filosofia per un pianeta che cambia*. Einaudi, Torino.

Legambiente (2025), *Rapporto CittàClima*. Accessibile a: https://www.legambiente.it/wp-content/uploads/2025/11/report-cittaclima-2025.pdf (Accesso: 31/01/2026).

Morin, E. (1999), *La testa ben fatta. Riforma dell'insegnamento e riforma del pensiero*. Raffaello Cortina Editore, Milano.

Morin E. and Kern A. B. (1993), *Terre-patrie*. Seouil, Paris. Italian edition by Raffaello Cortina Editore (1996), Milano.

Ratti, C. (2025), *Architettura Opensource reloaded*. Einaudi, Torino.

Valerio, C. (2023), *La tecnologia è religione*. Einaudi, Torino.

In a context such as the Italian one, where 94.5% of the territory is exposed to hydrogeological risk (ISPRA, 2024) and where there is a growing trend in the number of extreme climate events that make the country a climate hotspot (Legambiente, 2025), knowledge of (multi-)risks should constitute one of the fundamental areas of knowledge for education, research, and design practice. Not only do future scenarios require renewed design approaches – our historical memory demands it as well. In 2026, ten years after the Central Italy earthquake and fifty years after the Friuli earthquake, disasters still struggle to gain «citizenship in collective memory», as denounced by Marco Armiero (2023).
Yet, in the face of the socio-ecological crises shaping our societies, the regeneration of our cities can become a manifesto for the care of our common home: an educational process based on collaboration among design, research, citizens, and institutions, in which a renewed culture of design finally becomes the builder of a risk culture.