

Strumenti digitali *knowledge-based* per un approccio proattivo alla gestione del rischio climatico nel progetto urbano

RICERCA E
SPERIMENTAZIONE/
RESEARCH AND
EXPERIMENTATION

Martina Di Palma, <https://orcid.org/0000-0002-8094-2158>

Marina Rigillo, <https://orcid.org/0000-0003-4865-0961>

Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II, Italia

martina.dipalma@unina.it

mrigillo@unina.it

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

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 ur-

ban 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, en-

hancing 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.

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

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. Riconoscizione estensiva della letteratura (*WHAT*).
2. Contestualizzazione dei risultati, con un focus tematico relativo agli approcci metodologici effettivamente orientati all'operationalizzazione¹ 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.

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

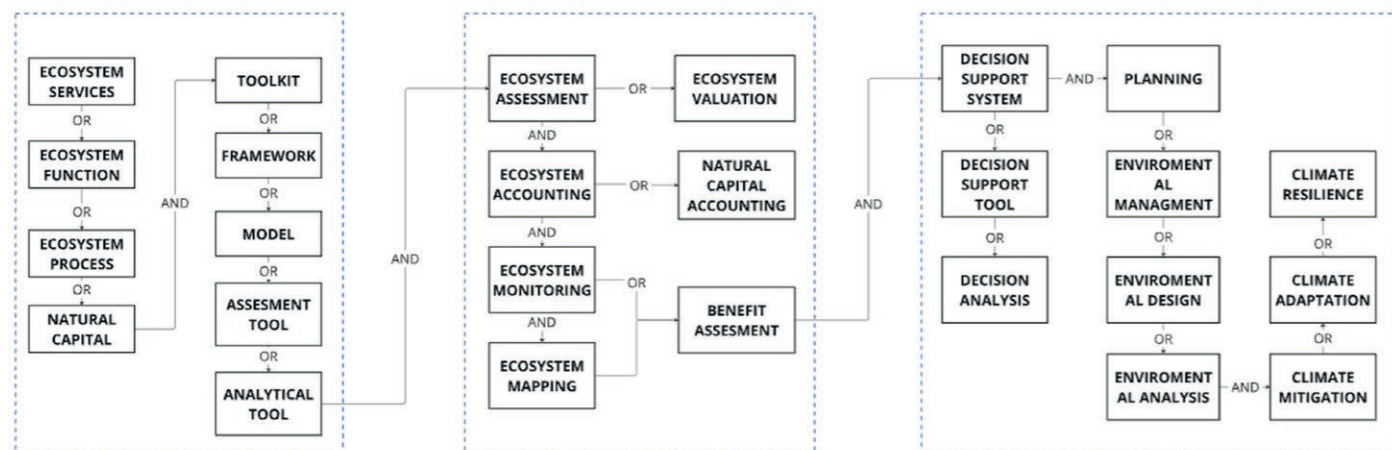
The scoping review analyses the scientific literature on digital tools for mapping and evaluating ecosystem services, with particular attention to their contribution to preventing and managing climate risks. The method responds to the need to explore a rapidly evolving and heterogeneous research field 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 operationalization¹ 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 |



WHAT

Phase 1 – Construction of the general corpus. Identify studies addressing information tools that support the generation of knowledge, management, and evaluation of ecosystem services and/or natural capital.

HOW

Phase 2 – Functional and methodological framing. Focus the analysis on studies presenting tools aimed at the assessment, valuation, accounting, monitoring, and mapping of ecosystem services and/or natural capital. This phase distinguishes the different application domains and clarifies the methodological contribution of the tools to knowledge processes and to identifying opportunities in terms of benefits.

WHY

Phase 3 – Decision-making and strategic orientation. Narrow the scope to tools actually employed for supporting decisions, planning, and environmental design. This phase considers tools capable of translating the knowledge of ecosystem services into operational practices and applied strategies, including actions for adaptation, mitigation, and the strengthening of climate resilience.

TITLE-ABS-KEY ("ecosystem services" OR "ecosystem function" OR "ecosystem process" OR "natural capital") AND ("toolkit" OR "framework" OR "model" OR "assessment tool" OR "analytical tool")...

...AND ("ecosystem assessment" OR "ecosystem valuation" OR "ecosystem accounting" OR "natural capital accounting" OR "ecosystem monitoring" OR "ecosystem mapping" OR "benefit assessment") AND ("tool" OR "framework" OR "model" OR "decision support")...

[...]AND ("decision support system" OR "decision support tool" OR "decision analysis") AND ("planning" OR "environmental management" OR "environmental design" OR "environmental analysis") AND ("climate resilience" OR "climate adaptation" OR "climate mitigation")...

34,975 results

8,092 results

68 results

20 tool

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.

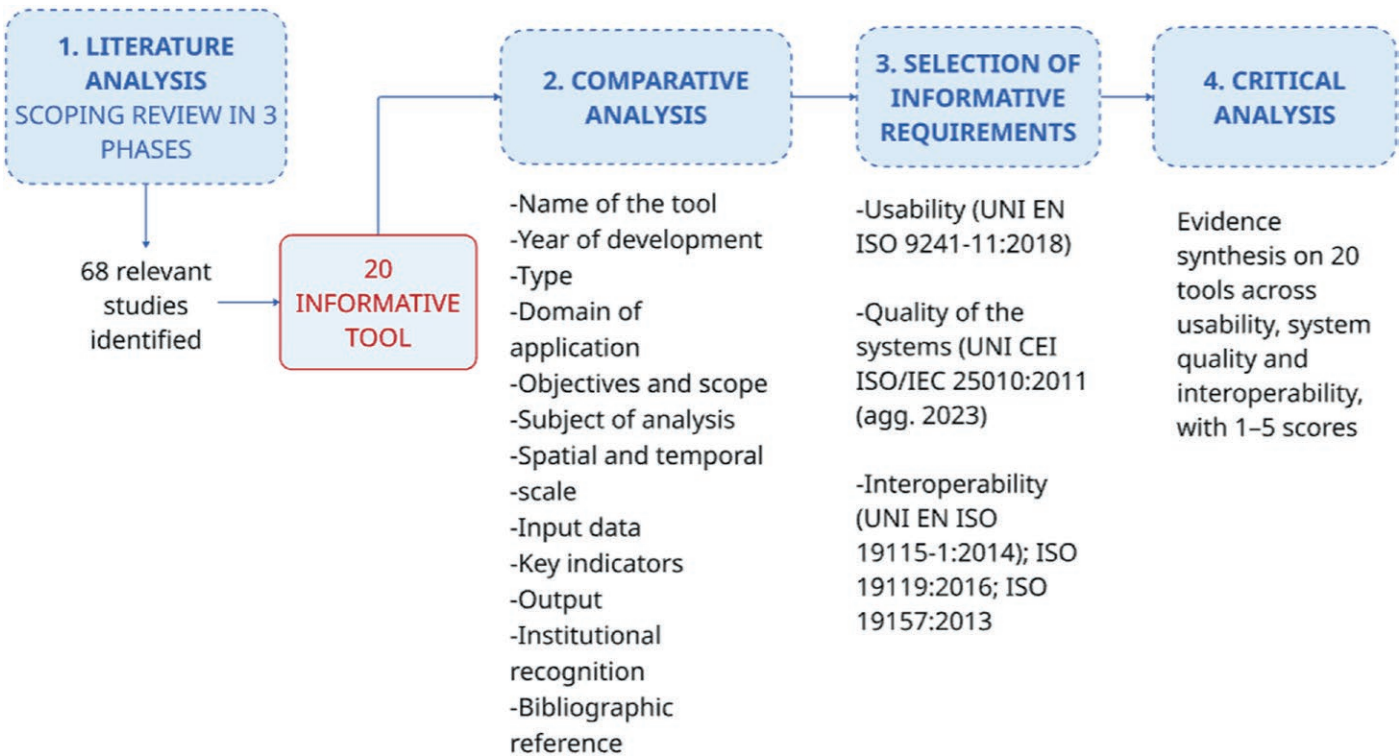
La Tabella 2 indica i criteri di descrizione utilizzati per selezionare i requisiti informativi derivanti dall'analisi delle norme:

- 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.
SoVES (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), SoVES 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); Hulsey 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-based; 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); Bouquin et al. (2018).
BEST (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.

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 sce-

narios 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

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

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 judgments (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 – <i>Ergonomics of human–system interaction – Part 11: Usability – Definitions and concepts</i>	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) – <i>Systems and software engineering – System and software quality models</i>	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
SoIVES	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
BeST	Hybrid (Knowledge + Data-based)	2	3	4
GI-Val	Knowledge-based	2	3	4
NAIS	Hybrid (Data + Knowledge-based)	2	3	3

| Tab. 04

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	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
SoIVES	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
EcoMetrix / ESII	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Envision (scenario platform)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ESTIMAP (JRC)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
MESH	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
RIOS	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ROOT	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ESR (Corporate Ecosystem Services Review)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
RBI (Rapid Benefit Indicators)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
BEST / BeST (Benefits of SuDS Tool)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
GI-Val	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
NAIS (Natural Assets Information System)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

| Tab. 05

- 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&EST, fondati su input geospaziali strutturati, che restituiscono mappe o scenari di ottimizzazione dei servizi ecosistemici. La letteratura indica questi tool come

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&EST, 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 eco-

logical 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.

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 socio-economici. 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&EST, GI-Val, RBI, EcoMetrix, TESSA, SolVES, ESR) mostrano un'elevata immediatezza applicativa e una struttura orientata alla quan-

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, B&EST, 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 de-

grees 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 calibrizioni 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, diversamente 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

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 self-learning), 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

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 auto-apprendimento, 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

ties 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 multiscale 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 multiscalarari, 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-sociotechnical 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.

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 Multi-scale 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>

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>