

Un *framework* integrato multi-scalare per la valutazione dei rischi climatici per il patrimonio culturale

RICERCA E
SPERIMENTAZIONE/
RESEARCH AND
EXPERIMENTATION

Alessandra Battisti, <https://orcid.org/0000-0002-3288-9321>

Angelo Figliola, <https://orcid.org/0000-0001-8862-6582>

Adriano Ruggiero, <https://orcid.org/0009-0006-3269-1223>

Alberto Calenzo, <https://orcid.org/0000-0002-7522-1882>

Dipartimento di Pianificazione, Design, Tecnologia dell'Architettura, Università degli Studi di Roma La Sapienza, Italia

alessandra.battisti@uniroma1.it

angelo.figliola@uniroma1.it

adriano.ruggiero@uniroma1.it

alberto.calenzo@uniroma1.it

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

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 contri-

buto 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

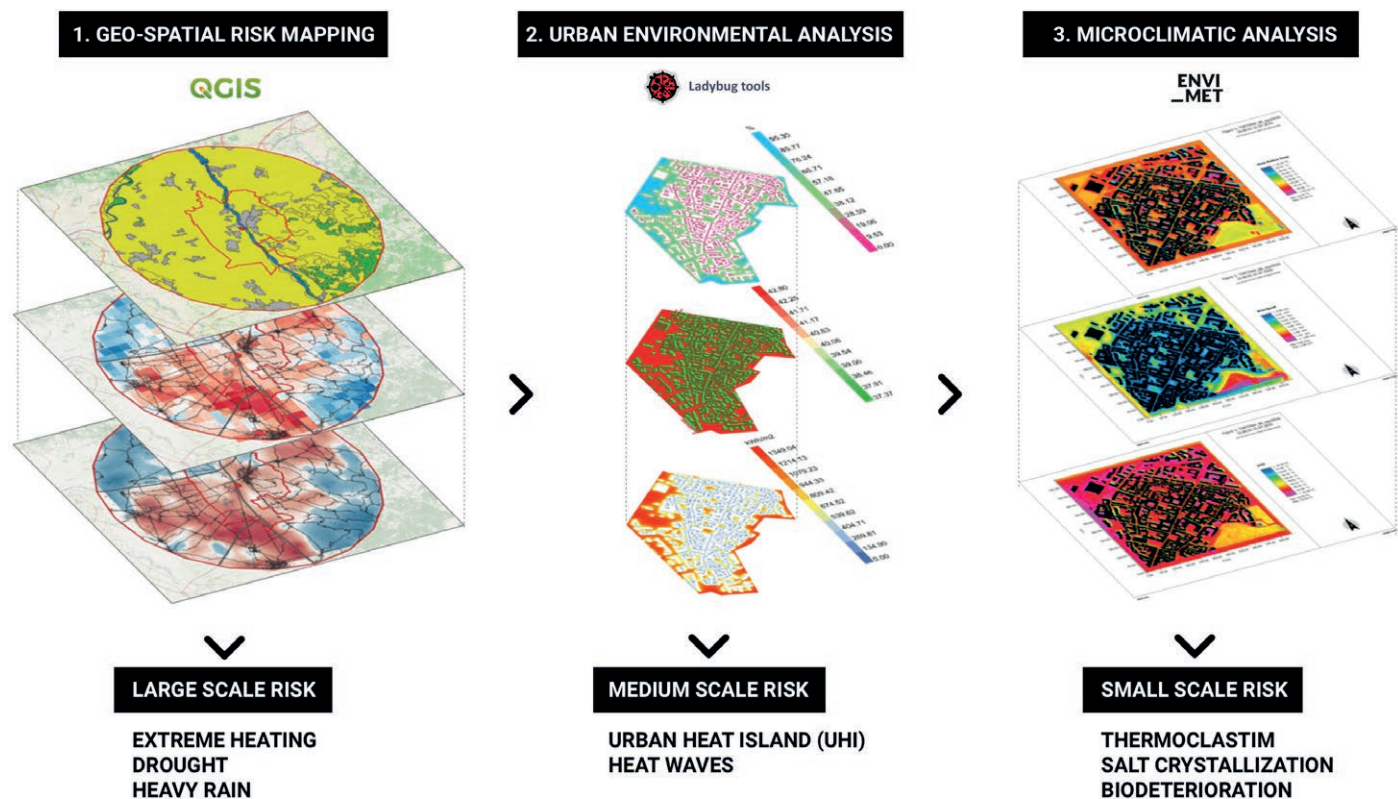
The research carried out within PE05-CHANGES-SPOKE 07 Protection and Conservation of Cultural Heritage

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 rac-

colti 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 multiscalarari, 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

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 pri-

ority 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

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

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 Univer-

sal 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 prece-

denza. 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.

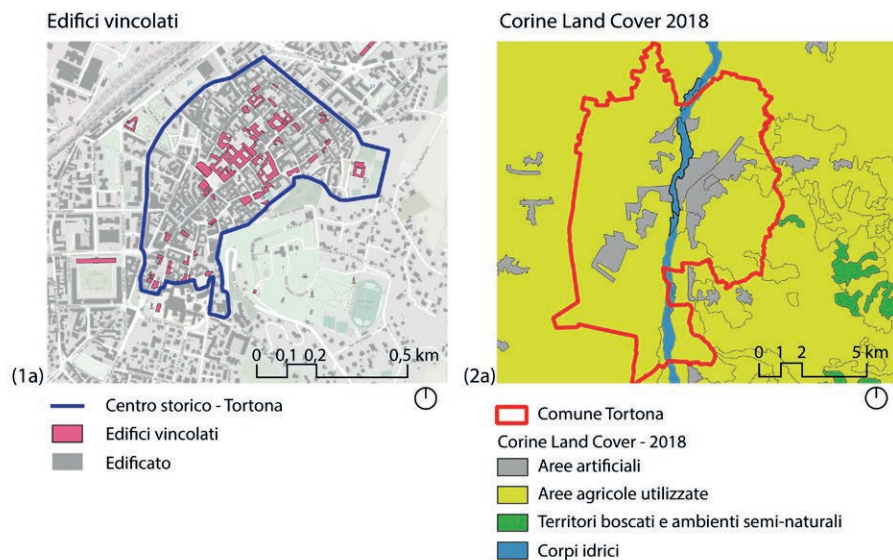
Results and discussion

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

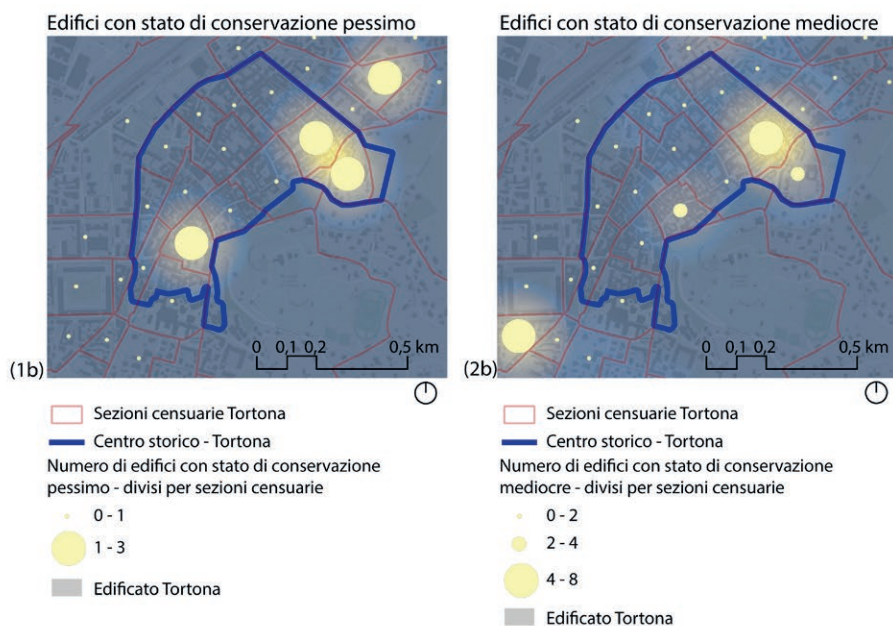
to define heatwaves, with expected repercussions on both the usability of outdoor spaces and the thermo-hygrometric balance of exposed material surfaces. Cooling Degree Days, which nearly triple under the RCP 8.5 scenario, confirm a marked trend toward summer thermal stress, and provide an indirect indicator 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 |

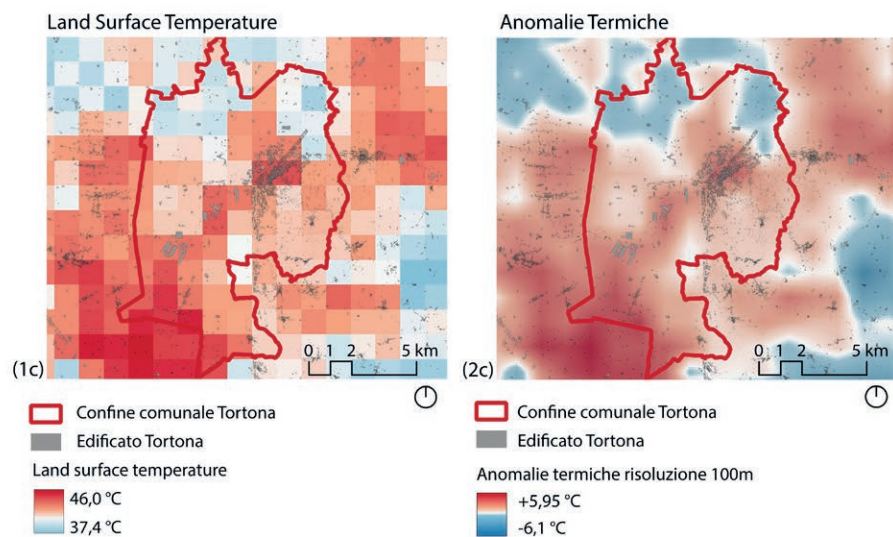
A) Esposizione



B) Vulnerabilità



C) Rischio



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 edifici; 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

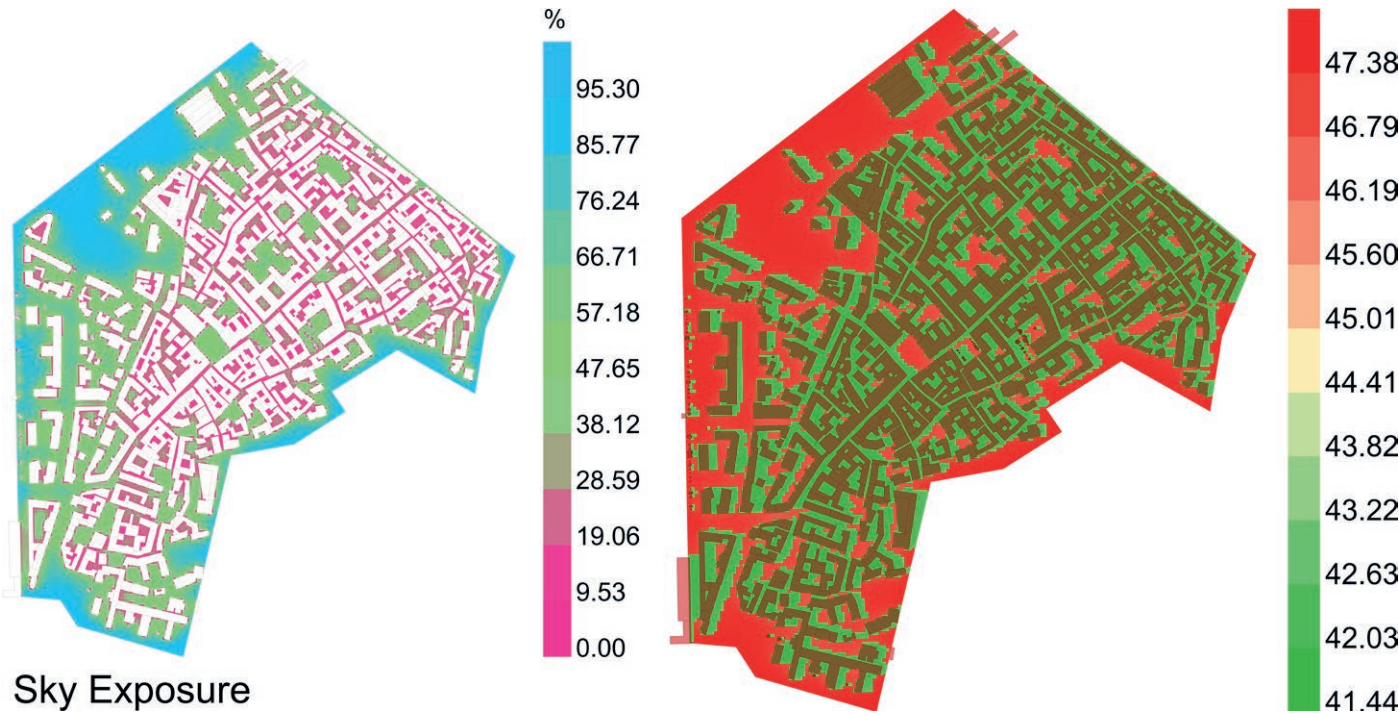
Scenari	Avg Temp (°C)	Min Temp (°C)	Max Temp (°C)	Cooling Degree Days	Heating Degree Days	Avg Wind Speed (m/s)	Avg Wind Direction (°)	Heat Stress (%)	Neutral (%)	Cold Stress (%)	Indoor Comfort (%)
EPW 2005	15.33	-3.8	35.0	129	2080	1.4	178	11	61	28	38
RCP 4.5 - 2030s	16.3	-3.0	36.7	194	1915	1.4	178	17	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

| Tab. 03

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 approfondi-

ta 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

Sky Exposure

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 com-

binata 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 reveals 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 heat waves 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

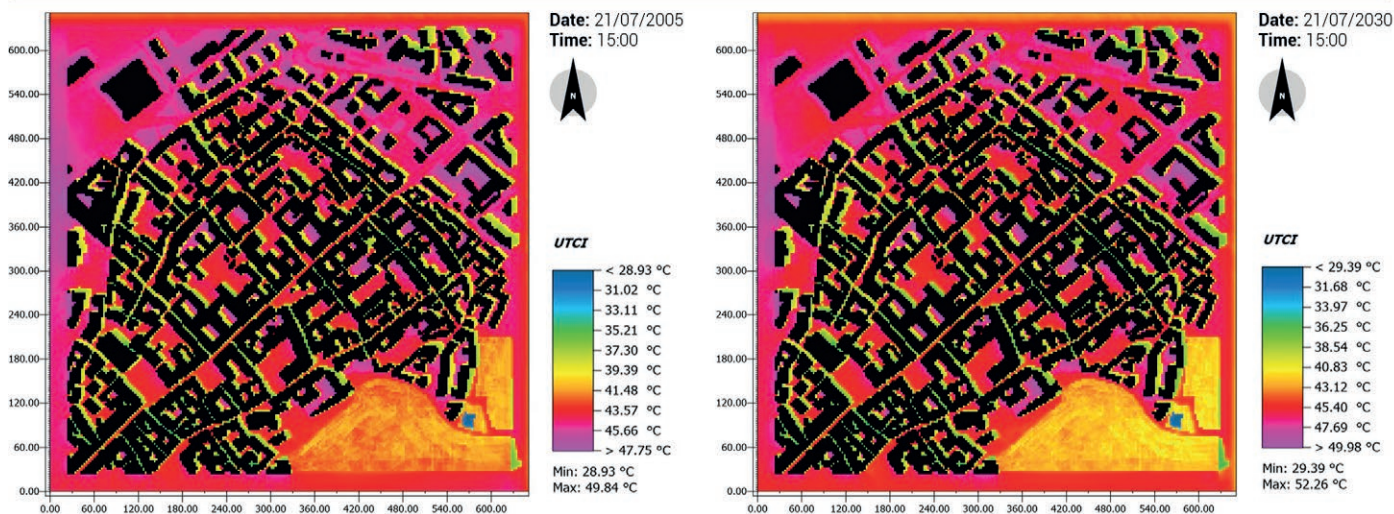
marcati, intensificando fenomeni di degrado quali termoclastismo, cristallizzazione salina e *shock* igrotermici. Ne consegue che la vulnerabilità dei centri storici deve essere interpretata come un fenomeno sistemico e affrontata mediante un approccio integrato, olistico e multi-scalare, così da definire strategie di adattamento e conservazione efficaci a medio-lungo termine.

Conclusioni e sviluppi futuri

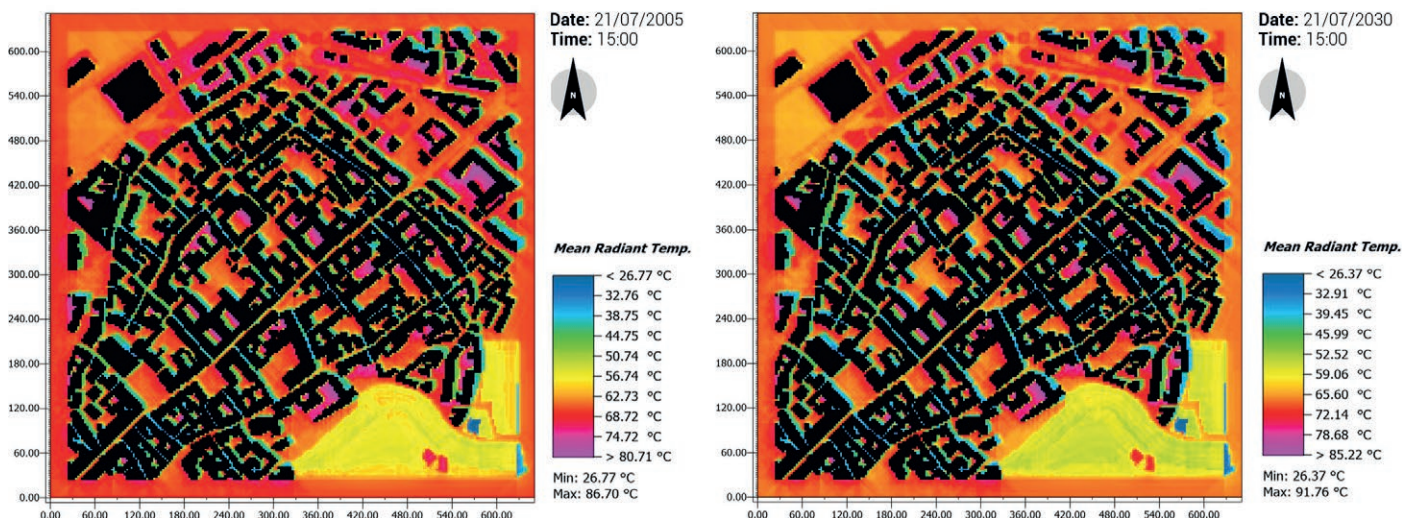
La ricerca, condotta all'interno del PE05-CHANGES-SPOKE 07, ha dimostrato come un approccio multi-scalare consenta non solo di descrivere gli impat-

ti 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-

UTCI ANALISYS



MEAN RADIANT TEMPERATURE ANALISYS



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.	Anthropogenic and natural features	Number of buildings and monuments that have recognized artistic or historical significance
		Vegetation Healt Index (VHI)* Vegetation health indicator. Raster image % 0–100	Cultural landscape
		Imperviousness Density (IMD). Level of sealed soil. Raster image % 0–100	
	Tx90p Extremely warm days. Percentage of days in a year when the daily maximum temperature is greater than the 90 th percentile. A threshold based on the 90th percentile selects only 10% of the warmest days over a 30-year-long reference period.	Digital Terrain Model (DTM)** Digital map of land elevation distribution Raster image Altimetry expressed in cm 100 - +200	
	Su30 Strong summer days. Seasonal count when TX (daily maximum) > 35 C.	European Settlement Map (ESM). Map of human settlements Raster image. Dichotomous spatial information [0,1]	
Natural risk – Drought	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.		
	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.	Anthropogenic and natural features	Number of buildings and monuments that have recognized artistic or historical significance
		Vegetation Healt Index (VHI)* Vegetation health indicator. Raster image % 0–100	Cultural landscape
Anthropic risk-Air Pollution		Imperviousness Density (IMD). Level of sealed soil. Raster image % 0–100	
	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.	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]	
	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 adapta-

tion 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

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.

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.

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.