

Local Climate Zones per la conoscenza e il progetto climate-risk oriented degli insediamenti urbani

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

RICERCA E
SPERIMENTAZIONE/
RESEARCH AND
EXPERIMENTATION

Ricerca avanzata (Under 35)

Antonio Sferratore, <https://orcid.org/0009-0009-8203-6819>

Vittorio Miraglia, <https://orcid.org/0009-0005-1817-4142>

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

antonio.sferratore@unina.it

vittorio.miraglia@unina.it

Abstract. La ricerca integra classificazioni morfometriche (LCZ) e tassonomie urbane (PNACC, progetto RETURN) per supportare l'adattamento al rischio climatico. A Napoli, la mappatura LCZ è stata affinata con dati morfometrici e approcci GIS-based, migliorandone l'accuratezza. L'integrazione con tassonomie urbane climate-oriented ha permesso di associare a ciascuna LCZ, uniforme per caratteristiche geometriche, superficiali, di copertura del suolo, termico-radiative e metaboliche, azioni mirate, valutate attraverso gli indicatori qualitativi e quantitativi del PNACC. Lo studio propone un metodo multiscale e replicabile per la definizione di azioni climate risk-oriented misurabili e calibrate sui singoli contesti urbani.

Parole chiave: Rischio climatico; Progettazione ambientale; *Local climate zones*; Tassonomie urbane; Insediamenti urbani.

Introduzione

Il cambiamento climatico rappresenta una delle sfide più critiche del nostro tempo, con implicazioni dirette sulla vivibilità e resilienza delle aree urbane. Le città, densamente popolate e infrastrutturate, sono particolarmente vulnerabili agli impatti di eventi estremi quali ondate di calore, alluvioni, siccità e innalzamento del mare. La complessità fisica e funzionale del tessuto urbano amplifica tali effetti, richiedendo strategie adattive fondate su una conoscenza approfondita del contesto morfoclimatico (IPCC, 2022; EC, 2018; Rosenzweig *et al.*, 2018). I progressi nei sistemi di osservazione della Terra e nelle tecniche di apprendimento automatico hanno prodotto set di dati ad alta risoluzione su topografia, copertura del suolo urbano e popolazione, oltre che su rischi climatici presenti e futuri. Tuttavia, tali strumenti restituiscono descrizioni autonome dei pericoli e delle componenti di rischio considerate (Mills *et al.*, 2017).

Local climate zones for
knowledge and climate-
risk-oriented design of
urban settlements

Abstract. The research integrates morphometric classifications (LCZ) and urban taxonomies (PNACC, RETURN project) to support climate risk adaptation. In Naples, LCZ mapping has been refined with morphometric data and GIS-based approaches, improving its accuracy. Integration with climate-oriented urban taxonomies has made it possible to associate each LCZ, uniform in terms of geometric, surface, land cover, thermal-radiative, and metabolic characteristics, with targeted actions, evaluated through the qualitative and quantitative indicators of the PNACC. The study proposes a multiscale and replicable method for defining measurable climate risk-oriented actions calibrated to individual urban contexts.

Keywords: Climate risk; Environmental design; Local climate zones; Urban taxonomies; Urban settlements.

In questo quadro, la gestione del rischio climatico urbano necessita di un approccio scientificamente fondato, multidisciplinare e orientato alla territorializzazione delle misure di adattamento (CMCC, 2023). Le strategie, intese come azioni di pianificazione per ridurre gli effetti negativi dei futuri impatti, devono considerare le vulnerabilità locali per inserirsi in una visione regionale, nazionale e internazionale con un approccio multiscale (Rovers *et al.*, 2014). In chiave progettuale, gli approcci dovranno saper conservare, modificare e gestire lo spazio urbano in consapevolezza degli scenari di crisi climatica (Angelucci, 2015), con strumenti capaci di andare oltre la sola dimensione morfologica o funzionale e di includere aspetti ambientali, culturali e sociali (Mussinelli *et al.*, 2022). Comprendere la complessità di tali scenari implica la necessità di semplificare i dati, facilitando il calcolo, senza perdere la variabilità che contraddistingue i tessuti urbani e le loro interazioni fisiche e socioeconomiche (D'Ambrosio *et al.* 2023).

A livello internazionale, diversi studi hanno analizzato la parametrizzazione urbana per individuare relazioni tra fattori ambientali e caratteristiche morfologiche (Oke, 1988). Dopo Chandler (Chandler, 1965), Ellefsen (Ellefsen, 1984) e Oke (Oke, 2006), la classificazione delle Local Climate Zones (LCZ) di Stewart e Oke (Stewart e Oke, 2012) è divenuta riferimento consolidato. La LCZ definisce porzioni di territorio omogenee per copertura superficiale, materiali ed attività umane; 10 classi riguardano le aree edificate (building types) e 7 l'uso dei suoli (land cover types). A ciascuna classe sono associati parametri standardizzati geometrici, superficiali, termici e metabolici. Il framework, oggi ampiamente adottato in letteratura (Demuze-

Introduction

Climate change is one of the most critical challenges of our time, with direct implications for the liveability and resilience of urban areas. Cities, being densely populated and featuring heavy infrastructure density, are particularly vulnerable to the impacts of extreme events such as heatwaves, floods, droughts, and sea level rise. The physical and functional complexity of urban fabric amplifies these effects, making adaptive strategies grounded in a profound understanding of local morphoclimatic contexts essential (IPCC, 2022; EC, 2018; Rosenzweig *et al.*, 2018).

Recent advances in Earth observation systems and machine learning techniques have generated high-resolution datasets on topography, urban land cover, and population, as well as on present and future climate risks. How-

ever, these tools provide autonomous descriptions of hazards and risk components (Mills *et al.*, 2017).

Within this framework, urban climate risk management requires a scientifically sound, multidisciplinary approach oriented towards the territorialisation of adaptation measures (CMCC, 2023). Strategies, viewed as planning actions to reduce the negative effects of future impacts, must consider local vulnerabilities in order to fit into a regional, national, and international vision with a multi-scale approach (Rovers *et al.*, 2014). In terms of design, approaches must be able to preserve, modify, and manage urban space in awareness of climate crisis scenarios (Angelucci, 2015), with tools capable of going beyond the morphological or functional dimension alone, and of including environmental, cultural, and social aspects

re, Bechtel, *et al.*, 2019; Ching, Mills, *et al.*, 2018; Mills, Bechtel, *et al.*, 2017), trova nella piattaforma open-source WUDAPT1 uno strumento globale per mappe climatiche urbane georeferenziate e comparabili. Per molte città, la classificazione è utile non solo per analisi microclimatiche a supporto dell'identificazione dei rischi climatici in ambiente urbano, ma anche come base per scenari di riqualificazione in ottica di adattamento e mitigazione (Alexander & Mills, 2014; Han *et al.*, 2024).

Bechtel ha tuttavia evidenziato la necessità di sviluppi nello schema WUDAPT, soprattutto per le città europee a causa della loro morfologia complessa (Gal *et al.*, 2015; Lopes *et al.*, 2017); tale considerazione risulta valida anche nel contesto nazionale (Zonato *et al.*, 2020; Buccolieri *et al.*, 2022; Turchetti, 2023; Vavassori *et al.*, 2024; Gerundo *et al.*, 2024). Tra le metodologie più promettenti figurano approcci GIS-based integrati con *database open-source* (Levlovics *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2018; Hidalgo *et al.*, 2019). Diversi autori hanno inoltre utilizzato la LCZ per integrare conoscenza climatica e progettazione urbana, delineando azioni di adattamento e riduzione del rischio in relazione alle caratteristiche morfologiche e ambientali (Middel *et al.*, 2014; Mills *et al.*, 2017; Nazarian *et al.*, 2019; Maharof *et al.*, 2020; Musco *et al.*, 2020; Tomasi *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2023). In Italia, il PNACC (MASE, 2023) è il principale riferimento normativo per l'adattamento, offrendo un catalogo di azioni suddivise per settori e territori e promuovendo strategie locali basate sulla conoscenza del rischio. Tuttavia, l'applicazione risulta disomogenea per la mancanza di strumenti operativi in grado di tradurre le linee generali in misure localizzate (Moraci *et al.*, 2020; Cremonini *et al.*, 2023).

(Mussinelli *et al.*, 2022). Understanding the complexity of these scenarios implies the need to simplify data, facilitating calculation without losing the variability that characterises urban fabrics and their physical and socio-economic interactions (D'Ambrosio *et al.*, 2023).

At the international level, several studies have analysed urban parameterisation to identify relationships between environmental factors and morphological characteristics (Oke, 1988). Following Chandler (Chandler, 1965), Ellefsen (Ellefsen, 1984), and Oke (Oke, 2006), the classification of Local Climate Zones (LCZ) by Stewart and Oke (Stewart and Oke, 2012) has become an established reference. The LCZ defines homogeneous portions of territory in terms of surface cover, materials, and human activities. Ten classes concern built-up areas

(building types), and seven concern land cover types. Each class is associated with standardised geometric, surface, thermal, and metabolic parameters. The framework now widely adopted (Demuzere, Bechtel, *et al.*, 2019; Ching, Mills, *et al.*, 2018; Mills, Bechtel, *et al.*, 2017) finds in the open-source platform WUDAPT1 a global tool for georeferenced and comparable urban climate maps. For many cities, the classification is useful not only for microclimatic analyses to support the identification of climate risks in urban environments, but also as a basis for redevelopment scenarios with a view to adaptation and mitigation (Alexander & Mills, 2014; Han *et al.*, 2024).

However, Bechtel highlighted the need for developments in the WUDAPT1 scheme, especially for European cities due to their complex morphology (Gal *et al.*, 2015; Lopes *et al.*, 2017).

Tra le esperienze nazionali, in coerenza con il quadro delineato si segnalano il Piano Territoriale Metropolitano (PTM) elaborato dalla Città Metropolitana di Milano nell'ambito di Life MASTER ADAPT 2016-2020 e l'Abaco per la transizione climatica (Maragno *et al.*, 2022) sviluppato dall'Università Iuav di Venezia e finanziato da Fondazione Cariplo (2018). Nel primo caso, il PTM associa le LCZ a strategie di adattamento, verificandone gli effetti su caratteristiche geometriche, superficiali e termiche, e consentendo di testarne l'applicabilità in contesti urbani simili. Nel secondo, l'Abaco supporta le Pubbliche Amministrazioni nell'individuazione di misure atte a compensare vulnerabilità locali e potenziare servizi ecosistemici, adottando la logica del transetto per tipizzare il territorio dell'Alto Adriatico e orientare le misure in base alla tipologia territoriale (Maragno *et al.*, 2022). Questi modelli semplificano la scelta delle misure per ciascun tessuto urbano, favorendo l'integrazione disciplinare come requisito essenziale nell'adattamento (Losasso e Rigillo, 2024).

Il presente lavoro si colloca in questo filone, proponendo un approccio che integra l'analisi morfometrica delle LCZ con una lettura tassonomica del sistema urbano derivata dal PNACC. L'approccio è stato sperimentato nel progetto di ricerca RETURN con l'obiettivo di offrire uno strumento conoscitivo e operativo a supporto delle decisioni locali. La ricerca integra le LCZ con una tassonomia, coerente con la suddivisione del PNACC negli ambiti Grey e Green, per costruire una matrice conoscitiva capace di rappresentare per ciascuna LCZ criticità climatiche, caratteristiche tipologiche e possibili strategie. Il caso studio del distretto di Soccavo, nella Città Metropolitana

This consideration is also valid in the national context (Zonato *et al.*, 2020; Buccolieri *et al.*, 2022; Turchetti, 2023; Vavassori *et al.*, 2024; Gerundo *et al.*, 2024;). The most promising methodologies include GIS-based approaches integrated with open-source databases (Levlovics *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2018; Hidalgo *et al.*, 2019). Several authors have also used LCZ to integrate climate knowledge and urban design, outlining adaptation and risk reduction actions in relation to morphological and environmental characteristics (Middel *et al.*, 2014; Mills *et al.*, 2017; Nazarian *et al.*, 2019; Maharof *et al.*, 2020; Musco *et al.*, 2020; Tomasi *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2023).

In Italy, the PNACC (MASE, 2023) is the main regulatory reference for adaptation, offering a catalogue of actions divided by sector and territory, and promoting local strategies based

on risk awareness. However, its application is uneven due to the lack of operational tools capable of translating general guidelines into localised measures (Moraci *et al.*, 2020; Cremonini *et al.*, 2023).

Among national experiences, we would like to mention the Metropolitan Territorial Plan (PTM) developed by the Metropolitan City of Milan as part of Life MASTER ADAPT 2016-2020, and the Abacus for Climate Transition² (Maragno *et al.*, 2022) developed by the IUAV University of Venice, and funded by Fondazione Cariplo (2018). In the first case, the PTM associates LCZs with adaptation strategies, verifying their effects on geometric, surface, and thermal characteristics, and allowing their applicability to be tested in similar urban contexts. In the second case, the Abacus supports public administrations in

di Napoli, ha consentito di testare la validità del modello in un contesto complesso e vulnerabile.

Metodologia e sperimentazione

La metodologia adottata si basa su un approccio integrato finalizzato alla definizione di un modello conoscitivo che coniughi classificazioni climatiche e tassonomie urbane per migliorare la gestione del rischio climatico. L'iter sperimentale è articolato in tre fasi principali (Fig. 1):

- raccolta dei dati, mappatura e ottimizzazione delle Local Climate Zones,
- integrazione delle LCZ con tassonomie urbane e analisi spaziale,
- selezione delle strategie e azioni di adattamento in relazione agli elementi delle tassonomie e ai cataloghi esistenti.

Raccolta dei dati

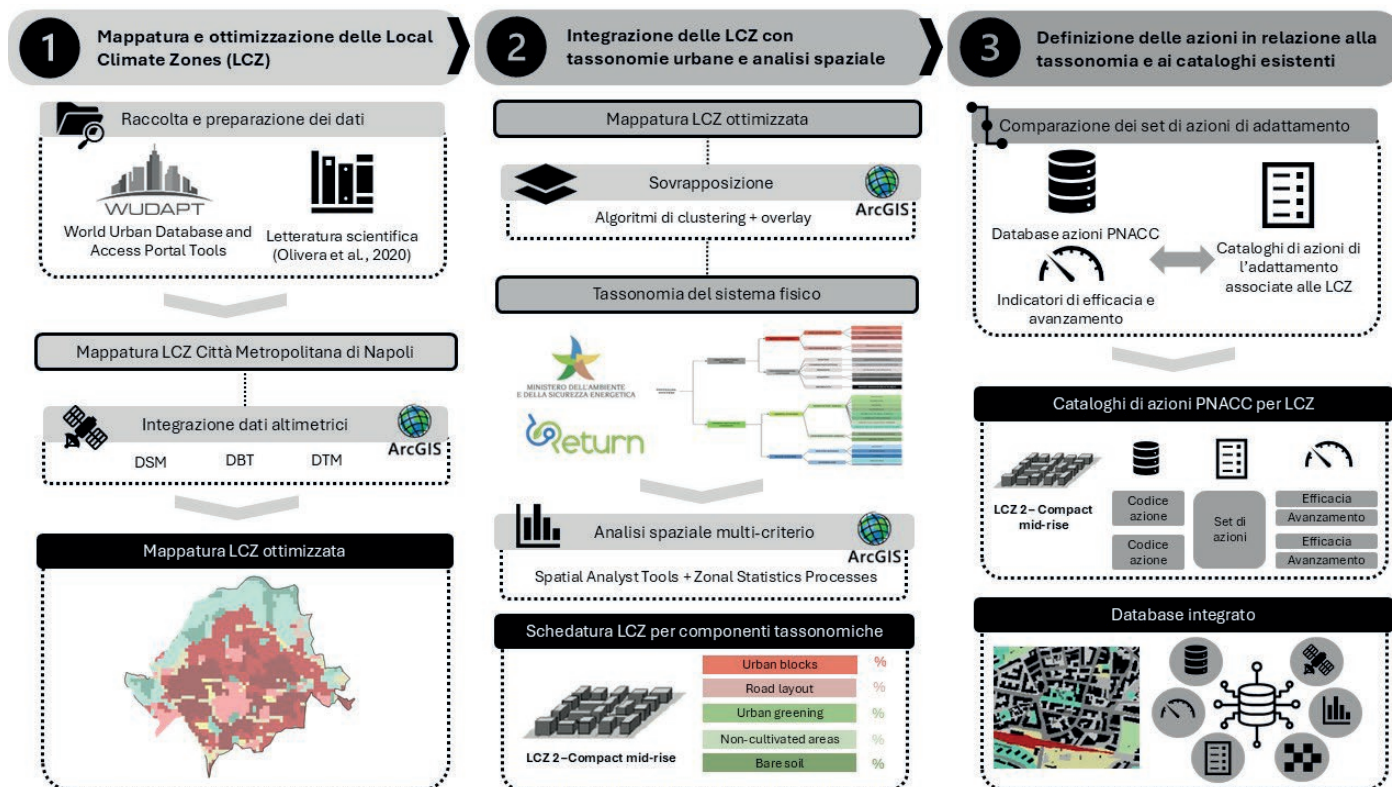
Il primo passo ha riguardato la raccolta di dataset topografici e morfometrici specifici per la città di Napoli. Sono stati utilizzati dati open-source e istituzionali: il database topografico comunale (DBT), i modelli digitali di terreno (DTM) e di superficie (DSM) forniti dalla Regione Campania, e dati catastali e cen-

suari relativi al sistema edificato. Questi dati sono stati normalizzati e georeferenziati in ambiente GIS per garantire coerenza e interoperabilità.

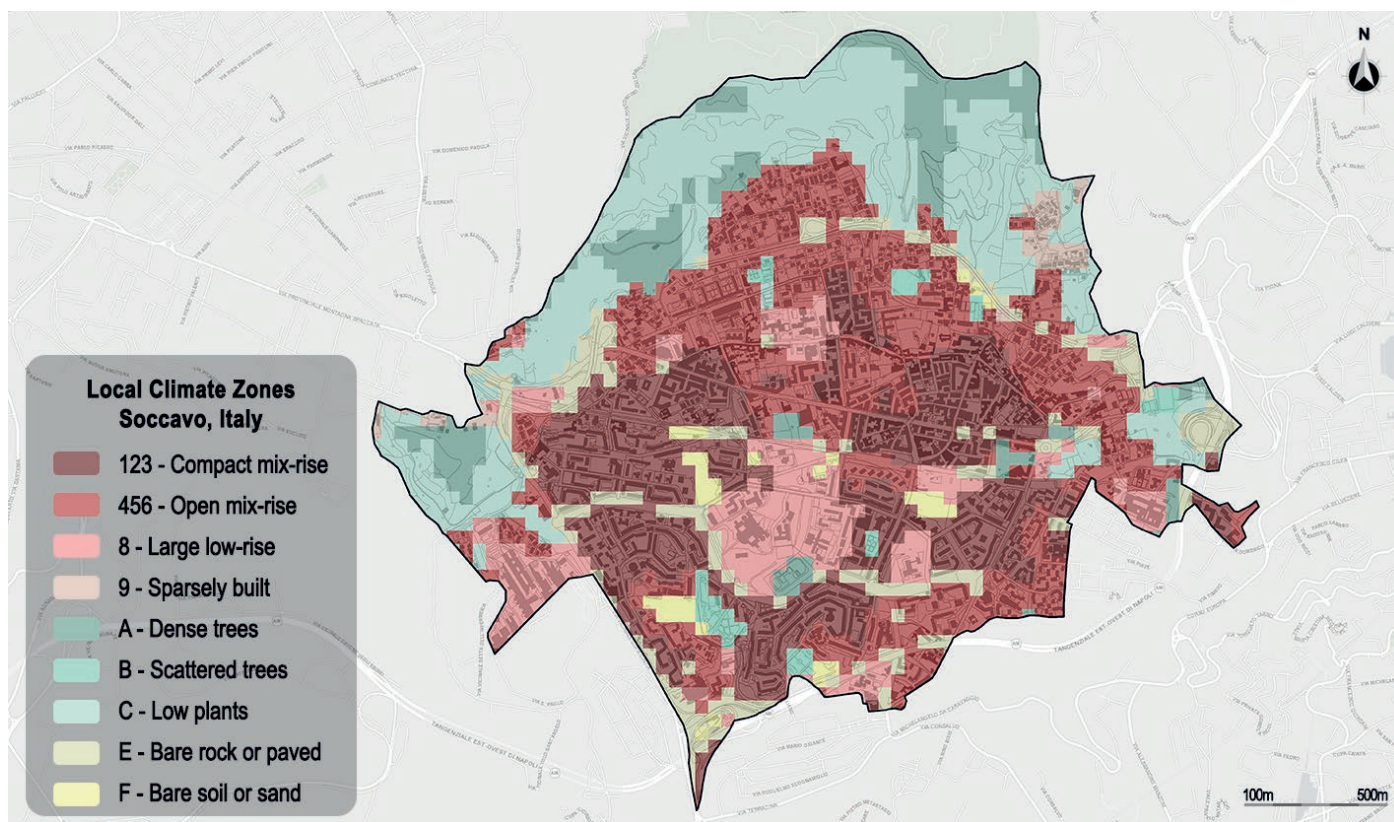
Parallelamente, è stato acquisito il layer LCZ open-source sviluppato da Olivera *et al.* (Olivera *et al.*, 2020) per la Città Metropolitana di Napoli dalla piattaforma WUDAPT e ottenuto tramite classificazione automatizzata su immagini satellitari Landsat (Fig. 2). Poiché la risoluzione e la qualità del layer iniziale non erano sufficienti a descrivere dettagliatamente le variabili morfologiche di un contesto urbano complesso come Napoli, si è proceduto a un'ottimizzazione mediante integrazione con i dati morfometrici locali.

Ottimizzazione delle Local Climate Zones

L'ottimizzazione delle LCZ è stata effettuata mediante l'integrazione di parametri fisici come l'altezza degli edifici, la densità edilizia, la percentuale di superfici impermeabili, la presenza di spazi verdi e la tipologia degli usi del suolo. L'analisi spaziale in ambiente GIS è stata condotta utilizzando moduli specifici per la sovrapposizione, la segmentazione e la classificazione morfologica. I modelli DTM e DSM sono stati utilizzati per estrarre informazioni sulle variazioni altimetriche per la definizione



02 |



della tridimensionalità degli ambienti urbani, in combinazione con dati catastali e ortofoto ad alta risoluzione.

Integrazione delle LCZ con tassonomie urbane

La seconda fase ha riguardato l'integrazione delle LCZ con la tassonomia del sistema urbano fisico sviluppata nell'ambito del

progetto RETURN in relazione alle disposizioni del PNACC, per il quale si adotta una scomposizione dell'insediamento urbano in ambiti settoriali (Grey, Green e Soft). L'integrazione si rende necessaria in quanto da un lato le LCZ permettono di verificare l'efficacia delle strategie in termini di adattamento attraverso la potenziale variazione dei parametri associati alla

identifying measures to compensate for local vulnerabilities and enhance ecosystem services, adopting the transect rationale to typify the Upper Adriatic territory and orient measures according to territorial type (Maragno *et al.*, 2022). These models simplify the choice of measures for each urban fabric, promoting disciplinary integration as an essential requirement for adaptation (Losasso and Rigillo, 2024). This study follows the rational trend described by proposing an approach that integrates the morphometric analysis of LCZs with a taxonomic interpretation of the urban system derived from the PNACC. The approach was tested in the RETURN research project with the aim of offering a cognitive and operational tool to support local decision-making. The research integrates LCZs with a taxonomy consistent with the PNACC's

division into Grey and Green areas to construct a knowledge matrix capable of representing climate criticalities, typological characteristics, and possible strategies for each LCZ. The case study of the Soccavo district in the Metropolitan City of Naples allowed the validity of the model to be tested in a complex and vulnerable context.

Methodology and Experimentation

The methodology adopted is based on an integrated approach aimed at defining a knowledge model that combines climate classifications and urban taxonomies to improve climate risk management. The experimental process is divided into three main phases (Fig. 1):

- data collection, mapping, and optimisation of Local Climate Zones (LCZs);

- integration of LCZs with urban taxonomies and spatial analysis;
- selection of adaptation strategies and actions in relation to taxonomic elements and existing catalogues.

Data Collection

The first step involved collecting specific topographic and morphometric datasets for the city of Naples. Open-source and institutional data were used, including the municipal topographic database (DBT), digital terrain models (DTM), and digital surface models (DSM) provided by the Campania Region, besides cadastral and census data relating to the built environment. This data was normalised and georeferenced in a GIS environment to ensure consistency and interoperability.

The open-source LCZ layer developed by Olivera *et al.* (Olivera *et al.*, 2020)

for the Metropolitan City of Naples was concomitantly acquired from the WUDAPT platform, and obtained through automated classification on Landsat satellite images (Fig. 2). Since the resolution and quality of the initial layer were not sufficient to describe in detail the morphological variables of a complex urban context such as Naples, optimisation was carried out by integrating local morphometric data.

Optimisation of Local Climate Zones

LCZ optimisation was carried out by integrating physical parameters such as building height, building density, percentage of impervious surfaces, presence of green spaces, and land use types. Spatial analysis in a GIS environment was conducted using specific modules for overlaying, segmentation, and morphological classification.

classificazione; dall'altro, la tassonomia approfondisce nel dettaglio la composizione fisica degli insediamenti urbani e perfeziona la schematizzazione dei tessuti a scala più ampia operata dalle LCZ, individuando gli elementi più idonei a recepire gli indirizzi di pianificazione disposti dal PNACC.

Nello specifico, la tassonomia prevede la scomposizione dell'ambito settoriale *Grey* nel sistema delle *Built-up areas*, di cui fanno parte i *Building blocks* (*Urban blocks*, *Residential units* e *Building aggregates*) e gli spazi aperti pavimentati (*Road layout*, *Urban voids*), e dei Sistemi Tecnologici (*Water*, *Communication*, *Sewage*, *Energy*, *Mobility*). Il sistema *Green* è costituito da *Vegetated areas* (*Woods*, *Forests*, *Parks*, *Gardens*, *Agricultural areas*, *Urban greening*, *non-cultivated areas*) e *Unvegetated areas* (*Dunes*, *Bare soil*); il sistema *Blue*, da *Water bodies* (*Rivers*, *Riverside*, *Lakes*) e *Shoreline* (*Beaches* e *Dunes*). L'area di studio del distretto urbano di Soccavo è riportata di seguito in Fig. 3. Per ottenere la mappatura degli elementi tassonomici, è stato necessario partire dal DBT dell'area di studio e associare ogni elemento ai relativi sistemi e sottosistemi della tassonomia (Tab. 1).

Successivamente, attraverso l'uso di strumenti GIS di analisi spaziali e statistica zonale sono stati identificati gli elementi

fisici prevalenti in ciascuna LCZ e associati agli specifici sottosistemi della tassonomia. Ciò ha permesso di restituire un quadro integrato delle caratteristiche dell'area, evidenziando le potenzialità e le criticità climatiche di ciascun tessuto urbano. A valle del processo sono state realizzate delle schede sintetiche per ciascuna LCZ, delle quali si riporta un esempio per la LCZ-123 in Fig. 4.

Dai risultati si evince che la prevalenza dei tessuti appartiene al livello *Grey* (85,26%), in linea con i parametri di caratterizzazione della LCZ-123. Scendendo nel dettaglio del quinto livello di classificazione tassonomica, si evince che la prevalenza dei *Building blocks* è legata ai *Residential units*. L'integrazione dell'altezza degli edifici, determinante per la distinzione delle singole LCZ 1, 2 e 3, chiarisce che la maggioranza degli edifici appartenenti alla classe delle *Residential units* ha un'altezza compresa tra i 3 e i 10 metri. Questo risultato ha permesso di definire, con un elevato grado di precisione, che la LCZ-123 può considerarsi quasi esclusivamente una LCZ-2. In Fig. 4 è illustrato il dettaglio delle misurazioni, sia in termini assoluti (in km²) sia in termini relativi (%).

Dalla tabella si evince che le *Residential Units*, che risultano costituire la tipologia edilizia prevalente nell'intera area di stu-



dio (77,04%), sono connotate da caratteristiche dell'edificato che per 84,91% in termini superficiali appartengo alla LCZ-2. La medesima analisi è stata effettuata sulla LCZ-456. Come nel caso precedente, l'analisi tassonomica risulta coerente con i parametri della LCZ-456; tuttavia, l'analisi di dettaglio dei tessuti integrando il parametro relativo all'altezza degli edifici non ha desunto una prevalenza assoluta di un tessuto edilizio specifico. Per migliorare il livello di dettaglio, è stata sviluppata un'ulteriore analisi sulle similitudini delle aree urbane espresse in termini di valori dei parametri geometrici e fisici utilizzati ai fini dell'individuazione delle singole LCZ. Attraverso dei processi di analisi spaziale e statistica zonale è stata individuata un'errata attribuzione della LCZ-465 in alcune aree urbane. Di seguito in Fig. 5 è illustrato, a titolo esemplificativo, un isolato campione. Come si desume dalle rappresentazioni, risulta necessario integrare un'analisi del tessuto urbano di maggior dettaglio per poter distinguere in maniera più efficace i caratteri che determinano l'appartenenza alle singole LCZ.

L'edificato selezionato (in azzurro) risulta appartenente alla LCZ-456 nonostante abbia una distribuzione degli elementi tassonomici e parametri geometrici e superficiali (*aspect ratio*, altezza degli edifici, percentuali di superficie coperta, superficie permeabile e impermeabile) coincidenti con la classificazione della LCZ2. Tale condizione si registra in numerose aree urbane, per le quali è stato necessario riattribuire la corretta LCZ. A valle del processo si verifica una variazione delle percentuali dei tessuti riscontrati nella LCZ-456, come illustrato in Fig. 4.

Si registra una prevalenza del tessuto di *Building aggregates* (67,77%) con una preponderanza del 78,26% di edifici appartenenti alla LCZ6, a discapito di una riduzione della copertura del tessuto di tipo Residential units, ricollocato nella corretta LCZ (2).

Quest'analisi di dettaglio ha permesso di incrementare l'accuratezza della classificazione LCZ e di poter stimare in termini quantitativi il potenziale patrimonio edilizio interessato da interventi di adattamento.

Selezione e confronto delle strategie e azioni di adattamento

La fase conclusiva ha previsto la selezione di strategie di adattamento climatiche dal Database di azioni del PNACC in relazione agli elementi della tassonomia individuati per ogni LCZ. Il database fornisce una panoramica delle misure proposte specificando, per ogni azione,

- la categoria di appartenenza;
- l'ambito settoriale (Soft, Green o Grey);
- gli indicatori per monitorare sia i progressi che l'efficacia dell'azione;
- le fonti normative di riferimento;
- una stima dei costi;
- gli enti coinvolti nell'attuazione.

La selezione delle azioni da attuare è stata effettuata sulla base di analisi condotte a scala distrettuale, privilegiando quelle più coerenti con le caratteristiche ambientali, sociali e infrastrutturali del contesto di riferimento. A ciascuna azione è stata

Tab. 01 |

DBT LABEL	RETURN TAXONOMY LABEL				
	1° LEVEL	2° LEVEL	3° LEVEL	4° LEVEL	5° LEVEL
Area attrezzata del suolo	Physical system	Grey sectoral areas	Built up areas	Outdoor spaces	Urban voids
Area di circolazione pedonale	Physical system	Grey sectoral areas	Built up areas	Outdoor spaces	Road layout
Area di circolazione veicolare	Physical system	Grey sectoral areas	Built up areas	Outdoor spaces	Road layout
Area priva di vegetazione	Physical system	Green sectoral areas	Green system	Vegetated areas	Non-cultivated areas
Area stradale	Physical system	Grey sectoral areas	Built up areas	Outdoor spaces	Road layout
Area verde	Physical system	Green sectoral areas	Green system	Vegetated areas	Urban greening
Attrezzatura sportiva	Physical system	Grey sectoral areas	Built up areas	Outdoor spaces	Urban voids
Bosco	Physical system	Green sectoral areas	Green system	Vegetated areas	Woods
Coltura agricola	Physical system	Green sectoral areas	Green system	Vegetated areas	Agricultural areas
Edificio	Physical system	Grey sectoral areas	Built up areas	Building blocks	Urban blocks / Residential units / Building aggregates
Forma naturale del terreno	Physical system	Green sectoral areas	Green system	Unvegetated areas	Dunes
Formazione particolare	Physical system	Green sectoral areas	Green system	Vegetated areas	Forests
Opera portuale e di difesa delle coste	Physical system	Grey sectoral areas	Technological system	Water	Water network
Pascolo o Incolto	Physical system	Green sectoral areas	Green system	Vegetated areas	Non-cultivated areas
Sede di trasporto su ferro	Physical system	Grey sectoral areas	Technological system	Mobility	Mobility Infrastructures
Viabilità mista secondaria	Physical system	Grey sectoral areas	Built up areas	Outdoor spaces	Road layout

LCZ1 - Compact high-rise	LCZ	LCZ AREA	LCZ COVER RATIO	2L PNACC	2L AREA	2L COVER RATIO	3L PNACC	3L AREA	3L COVER RATIO	4L PNACC	4L AREA	4L COVER RATIO	5L PNACC	5L AREA	5L COVER RATIO
LCZ2 - Compact midrise	LCZ 123 - Compact mixed rise	1,19044	23,26%	Green sectoral areas	0,17548	14,74%	Green system	0,17548	14,74%	Vegetated areas	0,17548	14,74%	Agricultural areas	0,01325	1,11%
LCZ2 - Compact low-rise				Grey sectoral areas	1,01494	85,26%	Built up areas	1,01064	84,90%	Building blocks	0,34452	28,94%	Non-cultivated areas	0,06426	5,40%
							Technological system	0,00430	0,36%	Outdoor spaces	0,66612	55,96%	Urban greening	0,09797	8,23%
										Mobility	0,00430	0,36%	?	0,02206	1,85%
													Building aggregates	0,05360	4,50%
													Residential units	0,24843	20,87%
													Urban blocks	0,02043	1,72%
													Road layout	0,47722	40,09%
													Urban voids	0,18890	15,87%
													Mobility infrastructures	0,00430	0,36%

dunque associata la relativa classe di elementi della tassonomia del sistema fisico quale ipotetico ambito di applicazione. Pur rappresentando un passaggio chiave della ricerca, il processo di associazione opera una semplificazione in relazione alla specificità locale e dunque risulta suscettibile di variazioni rispetto alle esigenze dei singoli contesti. La validità dell'operazione sta nell'obiettivo di fornire al progettista un criterio orientativo di selezione delle azioni in relazione agli obiettivi e che consenta una iniziale valutazione sul processo da intraprendere in termini di efficacia e avanzamento.

Per collegare obiettivi e azioni del Database PNACC con interventi specifici di adattamento e riduzione del rischio climatico, le azioni sono state confrontate con diversi set di interventi e review di letteratura (Akhbari *et al.*, 2015; Aminipour *et al.*, 2019; Musco *et al.*, 2020; Rahmani&Sharifi, 2021; Li *et al.*, 2024; Friesen&Taubenbock, 2025) che hanno indagato l'efficacia di strategie a scala locale in relazione a ciascuna LCZ. Tra questi, il set di Musco² emerge come repertorio aggiornato di interventi in relazione al contesto italiano. La scomposizione in categorie di azioni proposta dal contributo include: forestazione urbana, tetti verdi, SuDS (canali e scoli), pavimentazioni permeabili, superfici fredde, urban shading, pareti verdi, raccolta acque meteoriche, sistemi di allarme rapido, fontane per il microclima. Conoscendone la localizzazione in termini di LCZ, a ciascun elemento tassonomico del distretto di Soccavo è stata associata

la relativa categoria di azione, adottando la scomposizione in categorie di interventi proposta da Musco *et al.*, e in coerenza con la configurazione morfo-tipologica e le vulnerabilità climatiche dell'area. L'output è un set di interventi misurabili per efficacia e avanzamento, come previsto dal PNACC, in relazione alle caratteristiche dei singoli contesti classificati tramite LCZ (Fig. 5). Come riportato sinteticamente in Fig. 5, ogni azione e i relativi indicatori possono essere legati a uno o più obiettivi del PNACC. Ad esempio, per i "Tetti verdi", gli obiettivi variano se applicati in centri storici (tipicamente associati alle LCZ 2, 3) o in tessuti consolidati a maglia larga (LCZ 6, 8, 10). Nel primo caso emergono interventi sperimentali di adattamento nello spazio pubblico e privato; nel secondo, con minori vincoli e più verde urbano, prevale la costituzione di infrastrutture verdi e supporto ai servizi ecosistemici. Dall'analisi emerge che alle LCZ con edifici compatti e alti (LCZ2), si associano interventi combinati di urban shading, vegetazione verticale e superfici fredde; mentre le zone residenziali a bassa densità (LCZ4-6) richiedono NbS, SuDS e de-impermeabilizzazione, per creare infrastrutture verdi e potenziare i servizi ecosistemici dei sistemi green e blue. Il processo ha evidenziato un'omogeneità delle proposte per ciascun LCZ in rapporto agli obiettivi del PNACC, con risultati favorevoli in termini di riproducibilità e come base per linee guida di adattamento climatico locale a partire dalle Local Climate Zones.

DTM and DSM models were used to extract information on elevation variations for the definition of the three-dimensionality of urban environments, in combination with cadastral data and high-resolution orthophotos.

Integration of LCZs with Urban Taxonomies

The second phase involved integrating LCZs with the physical urban system taxonomy developed as part of the RETURN project³ in relation to the provisions of the PNACC, which breaks down urban settlements into sectoral areas (Grey, Green, and Soft). This integration is necessary because LCZs allow to verify the effectiveness of adaptation strategies through the potential variation of parameters associated with the classification. The taxonomy, instead, provides a detailed analysis of the physical composition of urban set-

tlements, and refines the larger-scale schematisation of urban fabrics carried out by the LCZs, identifying the elements most suitable for implementing the planning guidelines set out in the PNACC.

Specifically, the taxonomy provides for the breakdown of the Grey sector into the system of Built-up areas, which includes Building blocks (Urban blocks, Residential units, and Building aggregates), and paved open spaces (Road layout, Urban voids), and Technological Systems (Water, Communication, Sewage, Energy, Mobility). The Green system consists of Vegetated areas (Woods, Forests, Parks, Gardens, Agricultural areas, Urban greening, non-cultivated areas), and Unvegetated areas (Dunes, Bare soil). The Blue system consists of Water bodies (Rivers, Riverside, Lakes), and Shoreline (Beaches and Dunes). The study area

of the Soccavo urban district is shown below in Fig. 3.

For mapping the taxonomic elements, the DBT of the study area was used to associate each feature with the relevant systems and subsystems of the taxonomy (Fig. 1).

Subsequently, through the use of GIS spatial analysis and zonal statistics tools, the prevailing physical elements in each LCZ were identified and associated with specific subsystems of the taxonomy. This made it possible to provide an integrated picture of the area's characteristics, highlighting the potential and critical climate issues of each urban fabric. Following the process, summary sheets were created for each LCZ, an example of which is shown for LCZ-123 in Fig. 4.

The results show that the majority of fabrics belong to the Grey level (85.26%), in line with the characteri-

sation parameters of LCZ-123. Going into detail on the fifth level of taxonomic classification, it can be seen that the prevalence of building blocks is linked to residential units.

The integration of building height, which is decisive for the distinction between individual LCZ 1, 2, and 3, clarifies that the majority of buildings belonging to the residential unit class have a height between 3 and 10 metres. This result has made it possible to define, with a high degree of precision, that LCZ-123 can be considered almost exclusively an LCZ-2. Fig. 4 shows the details of the measurements, both in absolute terms (in km²) and in relative terms (%).

The table shows that residential units, which are the most common type of building in the entire study area (77.04%), are characterised by building features that, in terms of surface

Tab. 02 | Azioni di adattamento (PNACC) con associazione diretta con gli elementi della tassonomia relativi al sistema fisico
Adaptation actions (PNACC) with direct association with taxonomy elements related to the physical system

Tab. 02 |

CODE	OBJECTIVE	ACTIONS	INDICATORS	TAXONOMY ELEMENT CLASS
IU008	Support ecosystem services-based solutions	Increased territorial connectivity – green infrastructure	Effectiveness: Absolute (sqm) and relative (%) increase in public green area Progress: surface area (ha) redeveloped as urban green	Outdoor spaces (road layout, urban voids); Vegetated areas (parks, woods, forests, gardens, agricultural areas, urban greening, non-cultivated areas); Unvegetated areas (dunes, bare soil)
IU015	Reduce impacts through green infrastructure	Reforestation of urban area and creation of green spaces within cities	Effectiveness: Absolute (sqm) and relative (%) increase in public green area Progress: surface area (ha) redeveloped as urban green	Outdoor spaces (road layout, urban voids); Vegetated areas (parks, woods, forests, gardens, agricultural areas, urban greening, non-cultivated areas); Unvegetated areas (dunes, bare soil)
FO005	Increasing resilience in the forest sector and the maintenance of ecosystem services by promoting sustainable forest planning and management	Planting and maintenance of agroforestry systems	Effectiveness: absolute (ha) and relative (%) increase in the land covered by the protected regime (Natura 2000) Progress: number of interventions in the field of green infrastructure, territorial area (ha) falling under the protected areas regime (Natura 2000)	Vegetated areas (woods, forests, agricultural areas, non-cultivated areas); Water bodies (rivers, riverside, lakes); Shoreline (beaches, dunes)
RI004	Increase or change the speed and volume of water runoff	Redevelopment of watercourses in consideration of the maintenance of vital flows and ecological quality in situations of changes in future thermos-pluviometric regimes	Effectiveness: improvement of the ecological status of the waters Progress: Surface area (ha or sq km) subjected to interventions	Outdoor spaces (road layout, urban voids); Vegetated areas (parks, gardens, agricultural areas, urban greening, non-cultivated areas); Unvegetated areas (bare soil) Water (water network); Water bodies (rivers, riverside, lakes); Shoreline (beaches, dunes)
RI006	Preventing and mitigating the effects of extreme events with non-invasive interventions, mitigating environmental impacts, and increasing the resilience of hazardous activities	Adaptation measures through non-invasive interventions on watercourses, also based on the principles of naturalistic engineering and sustainable land use practice, aimed at preventing and mitigating the effects of extreme events due to climate change	Effectiveness: improvement of the ecological status of the waters Progress: surface area (ha or sqkm) subjected to interventions: mapping of flood/ flood forecasting and warning systems	Vegetated areas (parks, woods, forests, gardens, agricultural areas, urban greening, non-cultivated areas); Water (water network); Water bodies (rivers, riverside, lakes); Shoreline (beaches, dunes)
RI001	Improving the efficiency of water infrastructure	Increased connectivity of water infrastructure Maintenance of the multi-function water network	Effectiveness: increased availability of water resources Progress: extension of interconnected networks; overall length of the network	Vegetated areas (agricultural areas, non-cultivated areas); Water (water network); Sewage (sewage network)
TR003		Evaluate synergy and co-benefits of sustainable mobility (mitigation and adaptation)	Effectiveness: decreased transport delays Progress: number of products recognized as typical in response to climate change	Outdoor spaces (road layout); Mobility (mobility infrastructures);
EN001	Promote and increase better managements of energy demand for heating and cooling	Adaptation of existing buildings	Effectiveness: decrease in the number of days the systems are open Progress: number of plants with low environmental impact techniques; number of structures and or km of support infrastructures and fire protections	Building blocks (urban blocks, residential units, building aggregates); Energy (electricity network, gas network);
EN008	Promote experimental adaptation interventions in peri-urban areas and public spaces (improvement of the efficiency of the water supply system; improvement of thermal comfort and quality of living)	Experimental interventions of adaptation at building scale	Effectiveness: reduction of the number of buildings in energy class F and G Progress: extension of municipalities, suburbs, historic centers involved in projects.	Building blocks (urban blocks, residential units, building aggregates); Outdoor spaces (road layout, urban voids); Vegetated areas (parks, woods, forests, gardens, agricultural areas, urban greening, non-cultivated areas); Water (water network).

area, belong to LCZ-2 in 84.91% of cases. The same analysis was carried out on LCZ-456. As in the previous case, the taxonomic analysis is consistent with the parameters of LCZ-456; however, the detailed analysis of the fabric by integrating the parameter relating to the height of the buildings did not reveal an absolute prevalence of a specific building fabric. To further improve the level of detail, an additional analysis was developed on the similarities of urban areas expressed in terms of the values of geometric and physical parameters used

to identify individual LCZs. Through spatial and zonal statistical analysis processes, an incorrect attribution of LCZ-465 was identified in some urban areas. Fig. 5 below shows a sample block as an example. As can be seen from the representations, it is necessary to integrate a more detailed analysis of the urban fabric in order to effectively distinguish the characteristics that determine membership of individual LCZs. The selected building (in blue) belongs to LCZ-456 despite having a distribution of taxonomic elements, and

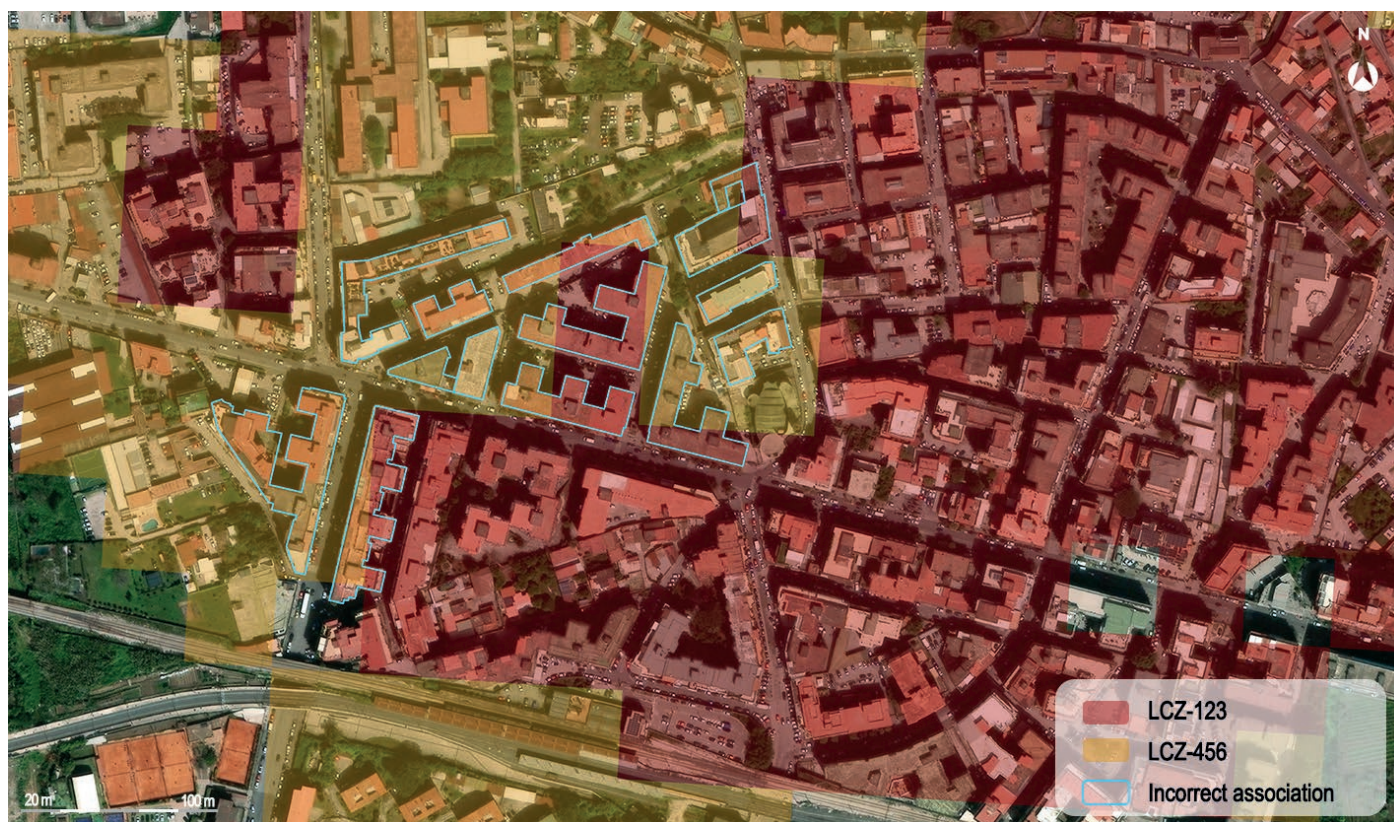
of geometric and surface parameters (aspect ratio, building height, percentage of covered surface, permeable and impermeable surface) that coincide with the classification of LCZ2. This condition is found in numerous urban areas. Hence the need to reassign the correct LCZ. Following the process, there is a variation in the percentages of fabrics found in LCZ-456, as shown in Fig. 4. There is a prevalence of Building aggregates (67.77%) with a preponderance of 78.26% of buildings belonging to LCZ6 at the expense of a reduction

in the coverage of Residential units, which have been relocated to the correct LCZ (2). This detailed analysis has made it possible to increase the accuracy of the LCZ classification, and to estimate, in quantitative terms, the potential building stock affected by adaptation measures.

Selection and Comparison of Adaptation Strategies
The final phase focused on selecting climate adaptation strategies from the PNACC Action Database linked to the

Database structure. Each element of the Database is associated with the relevant LCZ, the taxonomic element classes (from 1L_5L), and the code relating to the potential adaptation objectives from PNACC (ACT_PNACC)

06 |



Ciò comporta la l'introduzione di capacità reattive agli impatti climatici sia per i sistemi *Grey* che per i sistemi *Green* tramite ulteriori elementi *Grey* o *Green*, suggerendo una "contaminazione" della compartimentazione netta proposta dal PNACC in favore di una lettura della complessità degli insediamenti urbani attraverso sottosistemi composti *Grey-Green*, che apre

ad ulteriori approfondimenti. Allo stesso modo, le schede sintetiche riportate in Fig. 5 e riferite alla catalogazione delle azioni in relazione agli obiettivi di adattamento per ciascuna LCZ rappresentano un output innovativo e replicabile a supporto della definizione di strumenti operativi e linee guida capaci di tradurre le indicazioni della pianificazione nazionale in misure

sation to create green infrastructure and enhance the ecosystem services of green and blue systems. The process highlighted the homogeneity of the proposals for each LCZ in relation to the PNACC objectives, with favourable results in terms of reproducibility, and as a basis for local climate adaptation guidelines starting from the Local Climate Zones.

Discussion of Results

The analysis primarily provided a more accurate mapping of Local Climate Zones for the urban area of Soccavo, in the Metropolitan City of Naples. The heterogeneous distribution of LCZs that emerges is consistent with the complexity of urban morphology, building density factors, and topography of the area. Integration with the urban taxonomy proposed in the RETURN research

provided a picture of the physical and functional characteristics of urban settlements, consistently with the LCZ classification guidelines, and available both in a GIS environment (Fig. 6) and in the form of a summary file. This shows that the composition of each LCZ in terms of physical elements corresponds to the description provided by Stewart and Oke. It provides a positive outcome in terms of the linearity of the methodology adopted in scalar terms, supported by a degree of accuracy of the reclassification process considered sufficient (greater than 80% for LCZ123 and 78% for LCZ456), and validated through the characteristic indicators of the LCZ (aspect ratio, building height, permeable/impermeable surfaces). However, considering the generally different characterisation factors of LCZs for European cities, and the need to improve input

data through specific checks, additional tests on the robustness of the methodology would require further verification of the compliance of each class with specific values for the case study, according to the methodology proposed by Olivera *et al.* and referred to in the Lisbon case study.

The association between the elements of the DBT and the taxonomy is, instead, a relevant factor of replicability that opens up further experimentation, as the DBT classification is homogeneous on a national scale. The homogeneity of the classification by DBT elements at the national level is a strategic factor for the replicability of the approach in different urban contexts, allowing for systematic comparisons and the development of consistent local climate maps. The integration of the LCZ framework with the RETURN taxonomy also paves the

way for the construction of climate-oriented operational tools. This results from the selectivity of the taxonomy in recognising the elements of the physical system most suitable for promoting adaptation through ecosystem solutions to combat climate risks, and from the creation of conditions for the development of new innovative structures. In this sense, it should be noted that the potential transformations refer, for example, to the application of NBS or green solutions, the improvement of technological performance or energy efficiency, or the design of green areas that counteract climate impacts, improving the organisation and quality of green spaces. This involves introducing the capacity to respond to climate impacts for both Grey and Green systems through additional Grey or Green elements, suggesting 'contamination' of the clear

localizzate e misurabili. Un ulteriore sviluppo potrebbe riguardare l'integrazione delle LCZ con indicatori climatici osservati in situ (temperatura, umidità, ventilazione), al fine di calibrare il modello di conoscenza e migliorarne la capacità predittiva rispetto ai fenomeni legati all'isola di calore urbana nei contesti mediterranei⁴.

La ricerca propone un approccio innovativo alla gestione del rischio climatico urbano, basato sull'integrazione delle Local Climate Zones con la tassonomia urbana del PNACC. Utilizzando conoscenze trasversali su insediamenti urbani e impatti dei rischi climatici, si integrano set di dati open-source per offrire un primo supporto operativo alla valutazione dell'efficacia di strategie e azioni di adattamento. L'originalità del framework metodologico proposto risiede nella convergenza tra strumenti di conoscenza riconosciuti nel contesto internazionale e tassonomie orientate al progetto locale coerenti con il quadro normativo nazionale. Ne deriva un sistema sinergico di conoscenza e intervento volto ad interfacciarsi con i gap rilevati in letteratura rispetto all'applicazione di strategie tramite strumenti capaci di tradurre obiettivi nazionali e regionali in misure localizzate e misurabili (Cortekar, 2016), basati su approcci di conoscenza non deterministici e sensibili alla complessità degli insediamenti urbani.

Conclusioni

Tali strumenti facilitano una lettura comparata tra aspetti morfologici e ambientali, individuando punti critici per indagini di dettaglio e fornendo indirizzi progettuali che integrano logiche di riduzione del rischio nelle prime fasi di programmazione gestione. Nel contesto italiano, nonostante l'adozione su

larga scala di strategie basate sulla combinazione di LCZ ed interventi di adattamento a scala locale risulti limitata, il crescente interesse scientifico e tecnico riscontrato suggerisce orizzonti applicativi promettenti, quali, ad esempio, l'integrazione con l'indagine dei rapporti tra morfologia urbana, consumi energetici ed efficacia delle strategie di raffrescamento in termini di mitigazione alla base della struttura dei PAESC (Piano d'Azione per l'Energia Sostenibile e il Clima), quale strumento principale attraverso cui gli enti locali possono contribuire agli obiettivi europei di neutralità climatica e adattamento.

La ricerca riconosce tuttavia la necessità di sviluppi futuri, soprattutto nella validazione empirica del modello, nell'analisi delle potenziali variazioni della classificazione LCZ in relazione alle azioni applicate e nell'estensione a contesti territoriali più ampi e complessi dal punto di vista morfologico e topografico, rispetto ai quali le applicazioni rivolte alle LCZ potrebbero rivelarsi inadeguate. L'efficacia dell'associazione tra azioni e obiettivi di adattamento del PNACC dovrà essere verificata per ciascun intervento in rapporto al miglioramento del comfort termico e microclimatico urbano attraverso la variazione dei parametri LCZ e monitorata tramite indicatori di avanzamento ed efficacia previsti dal Database PNACC.

Il contributo si rivolge dunque a ricercatori, progettisti e policy maker impegnati nella gestione del rischio climatico, mirando a integrare sperimentazioni internazionali e ricerche nazionali per lo sviluppo di misure di adattamento efficaci e localizzate, coerenti con le specificità dei contesti urbani come terreno di confronto essenziale per affrontare le sfide presenti e future.

compartmentalisation proposed by the PNACC in favour of an interpretation of the complexity of urban settlements through Grey-Green composite subsystems, thus opening further avenues for exploration. Similarly, the summary sheets shown in Fig. 5, which catalogue actions in relation to the adaptation objectives for each LCZ, are an innovative and replicable output to support the definition of operational tools and guidelines capable of translating national planning guidelines into localised and measurable measures. Further development could concern the integration of LCZs with climate indicators observed in situ (temperature, humidity, ventilation), in order to calibrate the model, and to improve its predictive capacity with respect to phenomena related to the urban heat island in Mediterranean contexts⁴.

Conclusions

The research proposes an innovative approach to urban climate risk management, based on the integration of Local Climate Zones with the PNACC urban taxonomy. Using cross-cutting knowledge on urban settlements and climate risk impacts, open-source datasets are integrated to provide initial operational support for assessing the effectiveness of adaptation strategies and actions. The originality of the proposed methodological framework lies in the convergence between internationally recognised knowledge tools and local project-oriented taxonomies that are consistent with the national regulatory framework. The result is a synergistic system of knowledge and intervention aimed at addressing the gaps identified in the literature with regard to the application of strategies through tools capable of translating

national and regional objectives into localised and measurable measures (Cortekar, 2016), based on non-deterministic knowledge approaches that are sensitive to the complexity of urban settlements.

These tools facilitate a comparative reading of both morphological and environmental aspects, identifying critical points for detailed investigation, and providing design guidelines that integrate a risk reduction rationale in the preliminary stages of planning and management. In the Italian context, despite the limited large-scale adoption of strategies based on a combination of LCZ and local-scale adaptation measures, growing scientific and technical interest suggests promising applications, such as integration with the investigation of relationships between urban morphology, energy consumption, and the effectiveness of cooling strate-

gies in terms of mitigation at the basis of the SEAP (Sustainable Energy and Climate Action Plan) structure as the main tool through which local authorities can contribute to European climate neutrality and adaptation objectives.

However, the research acknowledges the need for future developments, especially in the empirical validation of the model, in the analysis of potential variations in the LCZ classification in relation to the actions applied, and in the extension to larger and more complex territorial contexts from a morphological and topographical point of view, for which LCZ applications may prove inadequate. The effectiveness of the association between actions and adaptation objectives of the PNACC will have to be verified for each intervention in relation to the improvement of urban thermal and microclimatic comfort by varying LCZ parameters,

ATTRIBUZIONE, RICONOSCIMENTI, DIRITTI D'AUTORE

"Introduzione", "Selezione e confronto delle strategie e azioni di adattamento" A.S.; "Raccolta dei dati"; "Ottimizzazione delle Local Climate Zones" V.M. "Integrazione delle LCZ con tassonomie urbane", "Discussione dei risultati", "Conclusioni" A.S., V.M.

Il contributo si colloca nel contesto della ricerca PNRR RETURN - multi-risk science for resilient communities under a changing climate. Spoke 5 - TS1: Urban and metropolitan settlement, responsabili scientifici: prof. Domenico Calcaterra, prof. Andrea Prota. Coordinatori nazionali Spoke 5 - TS1: prof. M. Losasso, prof. A. Prota, dott. M. Pittore; progetto finanziato con il bando nazionale Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza Partenariato Esteso PE3.

I soggetti coinvolti per lo Spoke TS1 sono gli Atenei di Bologna, Milano, Firenze, Cà Foscari, Cagliari, Napoli Federico II (capofila), Palermo, Torino e altri partners (Alma Viva, Autostrade, FS, Dipartimento Protezione Civile, OBS).

Ruolo degli Autori nella ricerca: componenti unità di ricerca UNINA in qualità di massa critica e massa aggregata.

NOTE

¹ La piattaforma online WUDAPT è accessibile al seguente link: <https://www.wudapt.org/>

² Per ulteriori approfondimenti in merito al set di azioni è possibile fare riferimento al link di seguito: <https://www.comune.milano.it/aree-tematiche/ambiente/resilienza/adattamento-ai-cambiamenti-climatici>.

³ La tassonomia è stata sviluppata nell'ambito delle attività del Task 5.2.2 ed applicata al caso studio di Soccavo nel Task 5.4.3. Il lavoro, in fase di pubblicazione, fa riferimento ai Deliverable ad essi associati, rispettivamente il DV2.2 e il DV4.4.

⁴ A questo proposito si segnala l'iniziativa LCZ-ODC, proposta da ASI (Agenzia Spaziale Italiana) e Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale del Politecnico di Milano (POLIMI-DICA) del programma "I4DP_

and monitored through progress and effectiveness indicators provided by the PNACC Database. The contribution is, therefore, aimed at researchers, designers, and policy makers involved in climate risk management. The aim is to integrate international experiments and national research for the development of effective and localised adaptation measures that are consistent with the specificities of urban contexts as an essential arena for addressing present and future challenges.

ATTRIBUTION, ACKNOWLEDGMENTS, COPYRIGHT

"Introduction", "Selection and comparison of adaptation strategies and actions" A.S.; "Data collection"; "Optimisation of Local Climate Zones" V.M. "Integration of LCZs with urban taxonomies", "Discussion of results", "Conclusions" A.S., V.M.

The experimental work is part of the PNRR RETURN Project - Multi-Risk Science for Resilient Communities under a Changing Climate, Spoke 5 - TS1: Urban and Metropolitan Settlement. Scientific supervisors: Prof. Domenico Calcaterra, Prof. Andrea Prota. National coordinators of Spoke 5 - TS1: Prof. M. Losasso, Prof. A. Prota, Dr. M. Pittore. The project is funded under the national call of the Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza - Extended Partnership PE3.

Institutions involved in Spoke TS1 include the Universities of Bologna, Milan, Florence, Cà Foscari, Cagliari, Naples Federico II (lead), Palermo, Turin, and other partners (Alma Viva, Autostrade, FS, Department of Civil Protection, OBS).

Role of the Authors in the Research: Members of the UNINA research unit

SCIENCE" (Innovation for Downstream Preparation for Science). L'iniziativa, rivolta sia ad architetti, ingegneri, osservatori meteorologici che uffici tecnici di pubbliche amministrazioni (ad es. ARPA, città metropolitane) si prefigge l'"identificazione delle Local Climate Zones e studio della loro correlazione con la temperatura dell'aria nella Città Metropolitana di Milano tramite l'integrazione di dati geospaziali e tecnologie di Osservazione della Terra in ambiente Open Data Cube". L'evento rappresenta una testimonianza dell'interesse multidisciplinare e trasversale nel contesto nazionale all'integrazione dei dati e delle immagini satellitari a supporto delle analisi ambientali e microclimatiche in ambito urbano e alla correlazione in termini progettuali degli strumenti di lettura forniti dalle LCZ a supporto delle amministrazioni locali.

REFERENCES

Akbari, H., Cartalis, C., Kolokotsa, D., Muscio, A., Pisello, A. L., Rossi, F., ... Zinzi, M. (2016), "Local climate change and urban heat island mitigation techniques—the state of the art. Journal of Civil Engineering and Management", Vol. 22, n.1, pp. 1-16. Available at: <https://doi.org/10.3846/13923730.2015.1111934>.

Alexander, P.J., Mills, G. (2014). "Local Climate Classification and Dublin's Urban Heat Island", *Atmosphere*, Vol. 5, n. 4, pp. 755-774. Available at: <https://doi.org/10.3390/atmos5040755>.

Angelucci, F., Rui Braz, A., di Sivio, M., Ladiana, D. (2015), *The Technological design of Resilient Landscape. Il progetto tecnologico del paesaggio resiliente*, FrancoAngeli, Milano. ISBN 9788891741264

Chandler, T.J. (1965), *The Climate of London*, Hutchinson, Londra.

Ching, J., Mills, G., Bechtel, B., et al. (2018), "WUDAPT: An Urban Weather, Climate, and Environmental Modeling Infrastructure for the Anthropocene", *Bulletin of American Meteorological Society*, vol. 99, n. 9, pp. 1907-1924.

Cortekar, J., Bender, S., Brune, M., Groth, M. (2016), "Why climate change adaptation in cities needs customised and flexible climate services", *Climate Services*, Vol. 4, pp. 42-51.

acting as critical mass and aggregated team.

NOTES

¹ The WUDAPT online platform can be accessed at the following link: <https://www.wudapt.org/>

² For further information on the set of actions, please refer to the following link: <https://www.comune.milano.it/aree-tematiche/ambiente/resilienza/adattamento-ai-cambiamenti-climatici>.

³ The taxonomy was developed as part of Task 5.2.2 and applied to the Soccavo case study in Task 5.4.3. The work, currently being published, refers to the associated Deliverables, DV2.2 and DV4.4, respectively.

⁴ In this regard, we would like to highlight the LCZ-ODC initiative, proposed by ASI (Italian Space Agency), and by the Department of Civil and

Environmental Engineering of the Politecnico di Milano (POLIMI-DICA) as part of the "I4DP_SCIENCE" (Innovation for Downstream Preparation for Science) programme. The initiative, aimed at architects, engineers, meteorological observers, and technical offices of public administrations (e.g., ARPA, metropolitan cities), aims to "identify Local Climate Zones and study their correlation with air temperature in the Metropolitan City of Milan through the integration of geospatial data and Earth Observation technologies in an Open Data Cube environment." The event is a testament to the multidisciplinary interest in Italy in integrating satellite data and images to support environmental and microclimatic analysis in urban areas, and in correlating the reading tools provided by LCZs in terms of design.

- Cremonini, L., Georgiadis, T., Nardino M., Rossi, F., Rossi, A., Pinca, G., Fazzini, M. (2023), "Tools for Urban Climate Adaptation Plans: A Case Study on Bologna and Outcomes for Heat Wave Impact Reduction", *Challenges*, Vol. 14, n. 4, pp. 48. Available at: <https://doi.org/10.3390/challe14040048>.
- D'Ambrosio, V., Di Martino, F., Tersigni, E. (2023), "Towards Climate Resilience of the Built Environment: A GIS-Based Framework for the Assessment of Climate-Proof Design Solutions for Buildings", *Buildings*, Vol. 13, n.7, pp. 1658. Available at: <https://doi.org/10.3390/buildings13071658>.
- D'Onofrio, D., Vaccaro, F., Mazzocchi M. (2020), "Urban heat island assessment and mitigation strategies: an overview", *Sustainability*, Vol. 12, n. 12, pp. 4913. Available at: <https://doi.org/10.3390/su12124913>
- Demuzere, M., Bechtel, B., Middel, A., Mills, G. (2019), "Mapping Europe into local climate zones", *PLOS ONE*, Vol. 14, n.4. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0214474>
- Ellefsen, R., (1991), "Mapping and measuring buildings in the urban canopy boundary layer in ten US cities", *Energy and Buildings*, Vol. 15–16, pp. 1025–1049. Available at: [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(91\)90097-M](https://doi.org/10.1016/0378-7788(91)90097-M).
- European Commission (EC) (2018), *Commission staff working document – Adaptation preparedness scoreboard Country fiches, accompanying the document Report from the Commission to the European Parliament and the Council on the implementation of the EU Strategy on adaptation to climate change*, SWD (2018) 460 final.
- European Environment Agency (2020), *Urban Adaptation to Climate Change in Europe*. EEA Report No 09/2020. Available at: <https://doi.org/10.2800/649947>
- Fondazione CMCC (2023), *Annual report 2023*. Available at: https://files.cmcc.it/Annual_Report/AR_2023_cmcc.pdf
- Friesen, J., & Taubenböck, H. (2025), "The world's largest cities under climate change and their adaptive capacity to rising heat", *Scientific Reports*, Vol. 15, n.1, 32671. Available at: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5579273/v1>
- Gál, T., Bechtel, B., Unger, J. (2015), "Comparison of two different Local Climate Zone mapping methods", presented at ICUC9 - 9th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment.
- Gerundo, C., Stanganelli, M. (2024), "A Methodological Approach to Improve the Definition of Local Climate Zones in Complex Morphological Contexts. Application to the Case Study of Naples Metropolitan Area", 12th International Conference on Innovation in Urban and Regional Planning (INPUT2023) L'Aquila (IT), 6-8 settembre 2023, pp. 610-620. ISBN 978-3-031-54096-7.
- Han, J., Mo, N., Cai, J. *et al.* (2024), "Advancing the local climate zones framework: a critical review of methodological progress, persisting challenges, and future research prospects", *Humanit. Soc. Sci. Commun.*, Vol. 11, pp. 538. Available at: <https://doi.org/10.1057/s41599-024-03072-8>.
- Hidalgo, J., Dumas, G., Masson, V., Petit, G., Bechtel, B., Bocher, E., Foley, M., Schoetter, R., Mills, G. (2019), "Comparison between local climate zones maps derived from administrative datasets and satellite observations", *Urban Climate*, Vol. 27, pp. 64-89. Available at: [10.1016/j.uclim.2018.10.004](https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.10.004).
- IPCC (2022), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. Available at: <https://doi.org/10.1017/9781009325844>.
- Levlovics, E., Gál, T., Unger, J. (2013), *Mapping local climate zones with a vector-based GIS method*. Aerul și Apa: Componente ale Mediului, pp. 423-430.
- Li, H., Zhao, Y., Wang, C., Ürges-Vorsatz, D., Carmeliet, J., Bardhan, R. (2024), "Cooling efficacy of trees across cities is determined by background climate, urban morphology, and tree trait", *Communications earth & environment*, Vol. 5, n.1, pp. 754. Available at: <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01908-4>.
- Liu, A., Ma, X., Du, M., Su, M., Hong, B. (2023), "The cooling intensity of green infrastructure in local climate zones: A comparative study in China's cold region", *Urban Climate*, Vol. 51, pp. 101631. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101631>.
- Lopes, P., Fonte, C., See, L., Bechtel, B. (2017), "Using OpenStreetMap data to assist in the creation of LCZ maps", in 2017 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE) (1-4), IEEE. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7924630/>.
- Losasso, M., Rigillo, M., (2024), "L'adattamento climatico alla scala territoriale e urbana: acqua, suolo e vegetazione", in *Ambiente Rischio Comunicazione*, n.19. L'acqua. È un problema?, pp. 76-79. ISSN 2240-1520.
- Maharroof, N., Emmanuel, R., Thomson, C., (2020), "Compatibility of local climate zone parameters for climate sensitive street design: Influence of openness and surface properties on local climate", *Urban Climate*, Vol. 33, 100642. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100642>.
- Maragno, D., Litt, G., Ferretto, L., Gerla, F. (2022). *Abaco per la transizione climatica. Primo catalogo per pianificare l'adattamento nell'Alto Adriatico*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/363055875_ABA_CO_PER_LA_TRANSIZIONE_CLIMATICA_Primo_catalogo_per_pianificare_ladattamento_nellAlto_Adriatico#fullTextFileContent.
- Middel, A., Häb, K., Brazel, A. J., Martin, C.A., Guhathakurta, S. (2014), "Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix Local Climate Zones", *Landscape and urban planning*, Vol. 122, pp. 16-28. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.11.004>.
- Mills, G., Bechtel, B., Alexander, P., Theeuwes, N., Foley, M., Ching, J., Ren, C., Yong, X., (2017), "Using WUDAPT to explore urban exposure to climate risks in selected cities", in Brotas L., Roaf S., Nicol F. (eds.), *Proceedings of 33rd PLEA International Conference: Design to Thrive - PLEA 2017*, vol. 2, pp. 1797-1804, NCEUB 2017, Network for Comfort and Energy Use in Buildings, Edinburgo, ISBN 978-099289575-4.
- Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE) (2023), *PNACC – Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici. Allegato II: Metodologie per la definizione di strategie e piani locali di adattamento ai cambiamenti climatici*. Available at: https://www.mase.gov.it/sites/default/files/archivio/allegati/clima/PNACC_AllegatoII_metodologie_definizione_strategie_piani_locali_adattamento.pdf (accessed on 17 May 2025).
- Moraci, F., Errigo, M. F., Fazia, C., Campisi, T., Castelli, F. (2020), "Cities under Pressure: Strategies and Tools to Face Climate Change and Pandemic" *Sustainability*, vol. 12, n.18, pp. 7743. Available at: <https://doi.org/10.3390/su12187743>.
- Musco, F., Maragno, D., Litt, G. (2020), *Abaco di azioni di adattamento ai cambiamenti climatici*. Available at: https://air.iuav.it/bitstream/11578/306140/1/Abaco_LAST_low.pdf.

- Mussinelli E., Tartaglia, A. (2021). "Organizzare la conoscenza secondo criteri site-specific / Organising knowledge according to site-specific criteria", in Bologna, R., Losasso, M., Mussinelli, E., Tucci, F. (Eds.) (2021). *Dai distretti urbani agli eco-distretti. Metodologie di conoscenza, programmi strategici, progetti pilota per l'adattamento climatico/ From Urban Districts to Eco-districts. Knowledge Methodologies, Strategic Programmes, Pilot Projects for Climate Adaptation*, Maggioli, Santarcangelo di Romagna, IT.
- Mussinelli, E., Schiaffonati, F., Torricelli, M. C. (2022), "For a necessary change", *TECHNE: Journal of Technology for Architecture and Environment*, Vol. 23, pp. 15–20. Available at: <https://doi.org/10.36253/techne-12915>.
- Nazarian, N., Dumas, N., Kleissl, J., Norford, L. (2019), "Effectiveness of cool walls on cooling load and urban temperature in a tropical climate", *Energy and Buildings*, Vol. 187, pp. 144-162. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.01.022>.
- Oke T.R., Mills, G., Christen, A., Voogt, J.A. (2017), *Urban Climates*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Oke, T. R. (2006), "Towards better communication in urban climate", *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 84, pp. 179-190.
- Oke, T.R. (1988), "Street Design and Urban Canopy Layer Climate", *Energy and Buildings*, Vol. 11, pp. 103-113.
- Oliveira, A., Lopes, A., Niza, S. (2020), "Local climate zones datasets from five Southern European cities: Copernicus based classification maps of Athens, Barcelona, Lisbon, Marseille and Naples", *Data in Brief*, Vol. 31, p. 105802. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105802>.
- Rahmani, N., Sharifi, A. (2025), "Urban heat dynamics in Local Climate Zones (LCZs): A systematic review", *Building and Environment*, Vol. 267, p. 112225. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112225>.
- Rosenzweig, C., Solecki, W., Romero-Lankao, P., Mehrotra, S., Dhakal, S., Ali Ibrahim, S. (2018), "Pathways to urban transformation", in *Climate Change and Cities: Second Assessment Report of the Urban Climate Change Research Network (ARC3.2)*, C. Rosenzweig, W. Solecki, P. Romero-Lankao, S. Mehrotra, S. Dhakal, and S. Ali Ibrahim, Eds., Cambridge University Press.
- Rovers, V., Bosch, P., Albers, R., Hove, B., Blocken, B., Dobbela, A., Spit, T.J.M., Dikmans, M., Boonstra, B., Brolsma, R.J. et al. (2014), *Climate Proof Cities - Final Report*.
- Santamouris, M. (2015), "Regulating the damaged thermostat of the cities—status, impacts and mitigation challenges". *Energy and Buildings*, Vol. 91, pp. 43–56. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.052>.
- Schiaffonati, F., Mussinelli, E., Gambaro, M. (2011), "Tecnologia dell'Architettura per la progettazione ambientale | Architectural Technology for Architecture and Environment", *TECHNE: Journal of Technology for Architecture and Environment*, Vol. 1, pp. 48-53. Available at: <https://doi.org/10.13128/Techne-9434>.
- Spano, D., Mereu, V., Bacciu, V., Barbato, G., Buonocore, M., Casartelli, V., Ellena, M., Lamesso, E., Ledda, A., Marras, S., Mercogliano, P., Monteleone, L., Mysiak, J., Padulano, R., Raffa, M., Rui, M.G.G., Serra, V., Villani, V. (2021), *Analisi del rischio. I cambiamenti climatici in sei città italiane*. Lecce, Italia: Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici – CMCC. Available at: https://www.doi.org/10.25424/cmcc/analisi_del_rischio_2021.
- Stewart, I. D., Oke, T.R. (2012), "Local climate zones for urban temperature studies", *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 93, n. 12, pp. 1879–1900. Available at: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>.
- Tomasi, M., Favargiotti, S., van Lierop, M., Giovannini, L., Zonato, A. (2021), "Verona Adapt. Modelling as a Planning Instrument: Applying a Climate-Responsive Approach in Verona, Italy", *Sustainability*, Vol. 13, n. 12, pp. 6851. Available at: <https://doi.org/10.3390/su13126851>.
- Turchetti, G. (2023), "Rome Local Climate Zone (RLCZ): decision-making support tool for the historical city", *TECHNE: Journal of Technology for Architecture and Environment*, Vol. 25, pp. 173-181. Available at: <https://doi.org/10.36253/techne-13715>.
- Vavassori, A., Oxoli, D., Venuti, G., Brovelli, M. A., Siciliani de Cumis, M., Sacco, P., Tapete, D. (2024), "A combined Remote Sensing and GIS-based method for Local Climate Zone mapping using PRISMA and Sentinel-2 imagery", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 131, 103944, ISSN 1569-8432. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.103944>.
- Wang, R., Ren, C., Xu, Y., Ka-Lun, Lau, K., Shi, Y. (2018), "Mapping the local climate zones of urban areas by GIS-based and WUDAPT methods: A case study of Hong Kong", *Urban Climate*, Vol. 24, pp. 567-576. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.10.001>.
- Zeidler, J., Renaud, F.G., Diallo, A.M. (2018), "Climate change adaptation in urban areas: reflections on the role of spatial planning", *Sustainability*, Vol. 10, n.12, pp. 4482. Available at: <https://doi.org/10.3390/su10124482>.
- Zonato, A., Martilli, A., Di Sabatino, S., Zardi, D., Giovannini, L. (2020), "Evaluating the performance of a novel WUDAPT averaging technique to define urban morphology with mesoscale models", *Urban Climate*, Vol. 31, p. 100584. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100584>.