



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA**

**DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE,
DELLA COOPERAZIONE INTERNAZIONALE E DI MATEMATICA**

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/20

XXXVI CICLO

**IL CONTRIBUTO DEGLI STRUMENTI DI GOVERNO DEL TERRITORIO
PER L'ADATTAMENTO DELLE CITTÀ AI CAMBIAMENTI CLIMATICI**

Dottoranda:
Ing. STEFANIA BOGLIETTI

Supervisore:
Ch.ma Prof.ssa Ing. MICHELA TIBONI, Ph.D.

Co-supervisore
Ing. ILARIA FUMAGALLI, Ph.D.

Anno Accademico 2022/2023

Indice

Abstract	7
Tabella degli acronimi.....	9
1. Introduzione	11
1.1 Individuazione del contesto e delle problematiche.....	13
1.2 Individuazione degli obiettivi.....	18
1.3 Individuazione del contributo.....	18
1.4 Schema della ricerca.....	19
2. Stato dell’Arte	21
2.1 La tematica dei cambiamenti climatici.....	23
2.1.1 Gli impatti dei cambiamenti climatici a scala urbana.....	24
2.1.2 Gli impatti dei cambiamenti climatici sulla comunità.....	30
2.2 Le strategie di adattamento e mitigazione ai cambiamenti climatici.....	37
2.2.1 Le azioni di adattamento ai cambiamenti climatici nelle strategie internazionali, nazionali, regionali e locali.....	39
2.3 Gli strumenti di analisi degli impatti dei cambiamenti climatici in ambito urbano presenti in letteratura.....	43
2.3.1 L’individuazione delle Local Climate Zone in ambito urbano.....	44
2.3.2 L’individuazione delle Land Surface Temperature in ambito urbano.....	51
2.3.3 Il concetto di rischio.....	58
2.4 Alcune lacune nella letteratura studiata sugli impatti dei cambiamenti climatici in ambito urbano.....	60
2.5 Il contributo del presente elaborato alla letteratura esistente.....	62
3. Approccio Metodologico	65
3.1 Panoramica dell’approccio metodologico proposto.....	67
3.2 Fase I – Costruzione della banca dati.....	69

3.3	Fase II – Definizione degli aspetti tecnico-oggettivi.....	70
3.3.1	Mappatura delle Local Climate Zone.....	70
3.3.2	Mappatura delle Land Surface Temperature.....	78
3.3.3	Mappatura del Rischio da ondate di calore per la salute dei residenti.....	79
3.3.4	Analisi delle criticità connesse con il sistema di drenaggio urbano.....	83
3.3.5	Analisi dell' idoneità all' infiltrazione di acqua nel suolo.....	84
3.3.6	Definizione dei livelli di priorità per interventi di depavimentazione.....	84
3.3.7	Definizione dei livelli di idoneità alla diffusione di tetti verdi.....	86
3.4	Fase III – Definizione degli aspetti strategico-decisionali.....	90
3.4.1	Mappe di Base.....	90
3.4.2	Mappa delle opportunità.....	91
4.	Applicazione al caso studio.....	95
4.1	Descrizione del caso studio.....	97
4.1.1	Contesto Climatico Generale.....	98
4.1.2	Contesto Climatico Locale.....	99
4.2	Costruzione della banca dati.....	101
4.3	Aspetti tecnici oggettivi.....	103
4.3.1	Mappatura delle Local Climate Zone.....	103
4.3.2	Mappatura delle Land Surface Temperature.....	113
4.3.3	Mappatura del Rischio da ondate di calore per la salute dei residenti.....	118
4.3.4	Analisi delle criticità connesse al sistema di drenaggio urbano.....	124
4.3.5	Analisi dell' idoneità all' infiltrazione di acqua nel suolo.....	126
4.3.6	Definizione dei livelli di priorità per interventi di depavimentazione.....	127
4.3.7	Definizione dei livelli di idoneità alla diffusione di tetti verdi.....	131
4.4	Aspetti strategici.....	138
4.4.1	Mappa di base.....	138

4.4.2	Mappa delle opportunità.....	141
5.	Considerazioni conclusive.....	145
	Bibliografia	149
	Elenco delle Figure	163
	Elenco delle Tabelle.....	167
	Appendice A.....	169

Abstract

Il presente elaborato affronta il tema del cambiamento climatico, che la comunità scientifica ritiene rappresenti una vera e propria crisi climatica a cui le città e i territori sono esposti, con l'obiettivo di affrontare alcune delle conseguenze ad esso connesse. In particolare, le conseguenze di cui l'elaborato si occupa possono essere suddivise in due categorie principali: eventi meteorologici estremi (come precipitazioni intense, ondate di calore, alluvioni, incendi) e grandi mutamenti naturali (come desertificazione, siccità, scioglimento dei ghiacci, innalzamento del livello del mare) causati principalmente dall'innalzamento delle temperature globali. Tali cambiamenti climatici influenzano la società in termini economici, sociali e di salute.

Negli ultimi dieci anni, gli eventi meteorologici estremi si sono verificati più frequentemente e intensamente nelle città, con conseguenze specifiche legate alle caratteristiche geografiche e morfologiche urbane. Le città sono considerate "hot-spot" dei cambiamenti climatici, essendo da una parte vulnerabili ed esposte a tali fenomeni, mentre dall'altro contribuiscono in modo sostanziale alle emissioni di gas serra che causano il problema.

Si analizzeranno qui due principali fattori climatici che interessano l'ambiente urbano italiano: le ondate di calore e le precipitazioni estreme. Entrambi i fenomeni hanno impatti sulla comunità, che possono essere diretti come quelli riferiti alla salute umana, con incrementi di mortalità per malattie cardiache, ictus e altri disturbi, e impatti indiretti che causano danni alle infrastrutture e all'ambiente, con la perdita di posti di lavoro e fonti di reddito.

Misure di adattamento e mitigazione rappresentano le principali opportunità per fronteggiare gli effetti generati dai cambiamenti climatici e la pianificazione urbana è considerata la disciplina decisiva per attuare queste misure su scala regionale e locale, tenendo conto delle questioni socioeconomiche, ambientali ed energetiche.

Comprendere i fattori di vulnerabilità tipici delle città, che influenzano la gravità e la frequenza dei rischi per la salute, la sicurezza e il benessere della popolazione legati ai cambiamenti climatici, è un passo fondamentale per sviluppare strategie e misure di adattamento atte a mitigare gli effetti negativi dei cambiamenti climatici. Nonostante i numerosi contributi forniti dagli studi sui fattori climatici approfonditi, analizzando la letteratura scientifica emergono alcune limitazioni sia dal punto di vista teorico che pratico. Ad esempio, si riscontrano difficoltà nell'accesso e nell'accuratezza dei dati necessari per le analisi e una mancanza nella definizione di modelli di monitoraggio degli impatti nel tempo. Inoltre, i fenomeni delle ondate di calore e delle precipitazioni estreme sono stati in genere

Abstract

studiati separatamente, senza considerare la loro interazione, che peraltro presuppone la necessità di coinvolgere le diverse discipline scientifiche nei singoli studi.

La ricerca vuole dunque porsi l'obiettivo di fornire alla pubblica amministrazione e ai decisori politici un sistema flessibile e di facile applicazione che supporti il governo del territorio e che risponda ai nuovi bisogni emersi. Più precisamente, il lavoro mira alla definizione di un Piano Attuativo di Depavimentazione urbana, per individuare le aree prioritarie su cui intervenire per rendere il suolo permeabile e gestire, in maniera sostenibile, il drenaggio delle acque meteoriche e una Strategia di Diffusione dei Tetti Verdi che identifica le aree più idonee alla realizzazione di questo tipo di infrastruttura.

La metodologia proposta per la costruzione di tali strumenti è suddivisa in tre fasi: la prima fase è la costruzione della base informativa necessaria per sviluppare le analisi, la seconda fase è quella di definizione degli aspetti tecnico-oggettivi, realizzata considerando aspetti connessi al rischio ondate di calore e criticità idrauliche, mentre la terza fase definisce tutti quegli aspetti strategico-decisionali che sono da tenere in considerazione nella individuazione puntuale delle priorità di intervento sul territorio e che si basano anche su scelte politiche.

Per valutarne l'applicabilità e l'efficacia, la metodologia proposta è stata testata sulla città di Brescia (Regione Lombardia, Italia), che rappresenta un caso di studio interessante in particolare dal punto di vista morfologico. La posizione in cui si trova la città, infatti, la rende particolarmente soggetta a ondate di calore sempre più numerose e lunghi periodi di siccità alternati da piogge intense, specialmente nella stagione estiva. I risultati evidenziano come la metodologia proposta consenta una mappatura delle aree più critiche all'interno della città, definendo dei livelli di priorità per la realizzazione di interventi di depavimentazione e realizzazione di tetti verdi. In particolare, le mappe finali mostrano il territorio suddiviso in sottobacini idraulici, ognuno con un proprio livello di priorità/idoneità allo sviluppo degli interventi precedentemente indicati. Questo dà modo ai decisori di orientare le scelte politiche in quelle aree dove le criticità sono maggiori. Inoltre, i risultati hanno evidenziato le potenzialità della metodologia proposta, la sua ampia adattabilità e facile interpretabilità.

Keywords: Cambiamenti climatici; Ondate di calore; Isole di calore urbane; Precipitazioni estreme; Valutazione del rischio; Local Climate Zone; Land Surface Temperature; Depavimentazione; Tetti verdi.

Tabella degli acronimi

AHO	Anthropogenic heat output
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
BH	Height of roughness elements
BSF	Building Surface Fraction
CMCC	Centro euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici
GIS	Sistemi Informativi Geografici
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISF	Impervious Surface Fraction
LCZ	Local Climate Zone
LST	Land Surface Temperature
MODIS	Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer
NBS	Nature Based Solution
PACC	Piano di Adattamento ai Cambiamenti Climatici
PAD	Piano Attuativo di Depavimentazione
PAESC	Piani d'Azione per l'Energia Sostenibile e il Clima
PNACC	Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici
PSF	Pervious Surface Fraction
SA	Surface admittance
SDGs	Obiettivi per lo sviluppo sostenibile
SDTV	Strategia di Diffusione di Tetti Verdi
SVF	Sky View Factor
TR	Terrain roughness class
UCL	Strato di copertura urbana
UE	Unione Europea
UHI	Urban Heat Island
UHI _{sub}	Subsurface Urban Heat Island
UHI _{surf}	Surface Urban Heat Island
UHI _{UBL}	Boundary Layer Urban Heat Island
UHI _{UCL}	Canopy Layer Urban Heat Island
UNCED	Conferenza delle Nazioni Unite su Ambiente e Sviluppo
UNFCCC	Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici
WUDAPT	World Urban Database and Access Portal Tools

1. Introduzione

1.1 Individuazione del contesto e delle problematiche

Oggi è evidente come il cambiamento climatico abbia assunto dimensioni così critiche da dover parlare di una vera e propria *crisi climatica*. Quando si parla di “conseguenze del cambiamento climatico” ci si riferisce a quei rapporti causa-effetto che alterano il clima, ponendo molteplici minacce all’ambiente, alla salute e al benessere degli individui (IPCC, 2018).

Generalmente le conseguenze possono essere raggruppate in due categorie principali: *eventi meteorologici estremi* e *grandi mutamenti naturali*.

Gli *eventi meteorologici estremi* si riferiscono, per esempio, a:

- precipitazioni estreme,
- ondate di calore e di gelo,
- alluvioni,
- esondazioni,
- incendi,
- eventi straordinari come gli uragani.

Invece, i *grandi mutamenti* possono essere visti come la rappresentazione sul lungo periodo degli eventi meteorologici a breve termine. Desertificazione, siccità, scioglimento dei ghiacci, innalzamento dei mari sono gli emblemi del cambiamento climatico, accomunati dalla causa che li genera: l’innalzamento delle temperature a livello globale (Spano et al., 2020).

Sia i cambiamenti duraturi che gli eventi meteorologici estremi hanno un impatto sulla società, che sia economico, sociale o direttamente in termini di vite umane.

Nell’ultimo decennio gli eventi meteorologici estremi si stanno manifestando nelle nostre città con più frequenza ed intensità. Sebbene i fenomeni climatici siano generati alla scala globale, i loro effetti e le loro manifestazioni sono differenti a seconda delle aree geografiche, per cui l’adattamento si esplica alla scala locale per adeguare il territorio ad un fenomeno in rapida accelerazione e con manifestazioni gradualmente amplificate.

I centri urbani sono dei veri e propri “hot-spot” per i cambiamenti climatici, ossia aree geografiche caratterizzate da vulnerabilità ed esposizione molto elevate. Se nelle città, infatti, vive oltre il 56% della popolazione italiana e se si tratta di luoghi in cui si erogano servizi sociali e culturali essenziali, è proprio qui che i cambiamenti climatici condensano i loro effetti su una elevata percentuale di soggetti e attività sensibili (Spano et al., 2020). Questi effetti sono ulteriormente accentuati dalle caratteristiche topografiche, morfologiche, demografiche e socioeconomiche dell’ambiente urbano (Oke, 1987). Inoltre, è utile ricordare che, se da una parte le città sono particolarmente vulnerabili ed

Introduzione

esposte agli effetti di un clima che cambia, dall'altra sono anche tra i principali responsabili delle emissioni di gas serra e contribuiscono in modo sostanziale alle cause del problema (Hunt, 2004). Sono molti e molto diversi i modi in cui i cambiamenti climatici interagiscono con gli ambienti urbani e sono correlati a situazioni di rischio. Tra questi, i principali fattori climatici sono:

- le precipitazioni estreme,
- le ondate di calore,
- l'aumento delle temperature medie,
- la riduzione media delle precipitazioni.

Nel presente lavoro si esamineranno in particolare le *ondate di calore* e le *precipitazioni estreme*, che risultano essere due tra i fattori che permettono di caratterizzare meglio, a livello di rischio climatico, il contesto urbano italiano.

Le *ondate di calore* hanno un impatto significativamente negativo nelle aree urbane a causa della presenza di vaste aree densamente costruite, come pure a causa dei climi locali e regionali e della mancanza di alberi e spazi verdi. Questi fattori contribuiscono a modificare le temperature dell'aria e a creare intense isole di calore urbane (Urban Heat Island, UHI) (Gál et al., 2016). Il termine "isola di calore urbana" si riferisce al fenomeno in cui le temperature nelle aree urbane sono più elevate rispetto a quelle delle aree rurali (Oke, 1982). Questo fenomeno è causato dall'accumulo di calore durante il giorno e dalla sua emissione durante la notte, portando a un aumento significativo delle temperature nelle città. Le caratteristiche della città, come la sua morfologia, la geometria degli edifici e la distribuzione delle attività umane e delle aree verdi, influenzano le condizioni microclimatiche urbane e contribuiscono all'isola di calore urbana (Gaglione, 2022). Misurare le temperature nelle isole di calore richiede un approccio complesso a causa della diversità dei tipi di UHI, ognuno dei quali reagisce a diverse scale spaziali e temporalmente. Le tipologie di UHI includono:

- Subsurface Urban Heat Island;
- Surface Urban Heat Island;
- Boundary Layer Urban Heat Island;
- Canopy Layer Urban Heat Island.

Ciascuna di queste tipologie è causata dalle differenze nel grado di raffreddamento e riscaldamento urbano e rurale in superficie, nel substrato e nell'aria e richiede metodi specifici di monitoraggio e modellizzazione.

Negli ultimi anni, i fenomeni di *precipitazioni estreme* si stanno verificando in modo più intenso e più frequente in tutta Italia. Questo aumento dei fenomeni di precipitazione intensa comporta il

rischio di esondazione dei corpi idrici superficiali nei bacini idrici e inondazioni nelle aree urbane dovute a sistemi di drenaggio insufficienti (Spano et al., 2020). Le caratteristiche geografiche e idrogeologiche del territorio, nonché la forma e la posizione delle città, contribuiscono a rendere le aree urbane particolarmente vulnerabili a questi impatti negativi (Amanti et al., 2014).

Oltre a *impatti diretti* sulla salute della popolazione, come l'incremento della mortalità causata da cardiopatie ischemiche, ictus, nefropatie e disturbi metabolici, la comunità è sottoposta anche una serie di *conseguenze indirette* molto ampie, tra cui la perdita di posti di lavoro e fonti di reddito, danni alle infrastrutture, riduzione della produttività e limitazione all'uso degli spazi pubblici.

Adattamento e mitigazione rappresentano le opportunità per fronteggiare gli effetti generati dai cambiamenti climatici. Secondo l'IPCC (2014) l'**adattamento** è il "*processo di aggiustamento del sistema naturale o antropico agli effetti del clima. Nei sistemi umani, l'adattamento al clima attuale e futuro cerca di limitare i danni degli impatti o sfruttare le opportunità favorevoli. Nei sistemi naturali, l'intervento umano può agevolare l'adattamento al clima futuro e ai suoi impatti*". Invece, per **mitigazione** si intende si intende "*qualsiasi intervento umano che riduca le fonti (sources) di rilascio, o rafforzi e potenzi le fonti di assorbimento (sinks) dei gas serra (GHG)*" (IPCC, 2014). Nell'ambito del presente lavoro, ci si vuole concentrare solo sul tema dell'adattamento, in quanto IPCC (2014) indica la scala urbana quale scala critica per sviluppare strategie di adattamento. L'adattamento può essere attuato tramite strategie comunitarie (Accordo di Parigi, Green Deal, Strategia Europea di Adattamento al Cambiamento Climatico), nazionali (Piano Nazionale di adattamento ai cambiamenti climatici), regionali (Strategia Regionale di Adattamento al Cambiamento Climatico, Documento di Azione Regionale sull'Adattamento al Cambiamento Climatico) e locali (Piano d'Azione per l'Energia Sostenibile e il Clima, Piani di adattamento).

Come detto in precedenza, la città rappresentano una scala d'azione rilevante per affrontare il problema dei cambiamenti climatici. In questo quadro d'azione, la pianificazione urbanistica viene considerata come la disciplina più adatta ad attuare misure sinergiche di mitigazione e adattamento su scala regionale e locale, abbracciando questioni socioeconomiche, ambientali ed energetiche. La pianificazione urbanistica dovrebbe porsi come fine ultimo quello di migliorare la qualità ambientale dei luoghi e il benessere delle persone che li abitano. In quest'ottica, le strategie di adattamento, impiegate per limitare gli effetti negativi dei cambiamenti climatici sull'ambiente e la società, devono andare di pari passo con il governo del territorio (Spano et al., 2020).

Comprendere i fattori di vulnerabilità tipici delle città, che influiscono sul benessere della popolazione, è essenziale per sviluppare strategie di adattamento volte a ridurre gli impatti negativi dei cambiamenti climatici.

Introduzione

Nel presente elaborato si approfondiscono le diverse metodologie di analisi per lo studio del fenomeno delle ondate di calore e del loro impatto sulla popolazione. Approfondimenti specifici in merito alle analisi delle precipitazioni estreme non sono stati portati avanti in quanto necessitano di competenze specifiche.

L'aumento delle ondate di calore ha suscitato un crescente interesse nella ricerca e nella pianificazione urbana per comprendere meglio i fenomeni microclimatici locali e urbani (Eldesoky et al., 2021). In particolare, la letteratura mostra come sia fondamentale mettere in relazione la morfologia e le caratteristiche del territorio con le temperature registrate per la valutazione del rischio da ondate di calore per la salute della popolazione.

Pertanto, è necessario ulteriore lavoro per definire una metodologia efficace per la valutazione del rischio, che includa le variabili indicate.

Le caratteristiche del territorio legate al microclima vengono individuate attraverso la mappatura delle Local Climate Zone (LCZ) definite come “regioni di superficie uniforme, struttura, materiale e attività umana che si estendono da centinaia di metri a diversi chilometri in scala orizzontale” (Stewart & Oke, 2012). In tutto il mondo, numerosi studi hanno utilizzato diverse metodologie per creare mappe delle LCZ. In letteratura esistono principalmente tre diversi approcci per la raccolta dei dati che comprendono misurazioni in sito; utilizzo di dati di Remote sensing (telerilevamento) e il Sistema di Informazione Geografica (GIS) (Aslam & Rana, 2022; Zheng et al., 2018). L'approccio maggiormente utilizzato in letteratura è quello del *remote sensing* che si basa sull'analisi di immagini satellitari per creare mappe di classificazione delle LCZ (per esempio, Bechtel & Daneke, 2012; Ren et al., 2019). Questo metodo utilizza dati e software liberamente accessibili e non richiede particolari abilità tecniche per la realizzazione di tali mappe. Alcuni studi però sostengono che l'utilizzo di immagini satellitari non consenta analisi di dettaglio del territorio, per questo preferiscono l'utilizzo di dati derivati da *misurazioni in sito* (Lelovics et al., 2014; Zhao et al., 2019), che però spesso non sono open sources.

Le LCZ vengono correlate alle Land Surface Temperature (LST), definite come le temperature percepite quando la superficie terrestre viene toccata con le mani (Rajeshwari & Mani, 2014). In questo ambito le misurazioni in sito presentano diverse limitazioni significative, tra cui una risoluzione spaziale dei dati grossolana e irregolare, e dunque viene preferito l'utilizzo di immagini satellitari derivanti da strumenti MODIS, ASTER o satelliti Landsat. Il dato più facilmente recuperabile è quello dei satelliti Landsat, disponibili gratuitamente su diverse piattaforme. Infatti, sono molti gli studi che utilizzano questo dato (tra cui García-Santos et al., 2018; Gholami & Beck, 2019; Walawender et al., 2012). I dati estratti vengono poi elaborati attraverso diverse tipologie di

algoritmi o analizzati in ambiente GIS (per esempio, Agbor & Makinde, 2018; Isaya Ndossi & Avdan, 2016).

La correlazione tra LCZ e LST è un passaggio fondamentale per analizzare correttamente il fenomeno del rischio da ondate di calore. La maggior parte degli studi presenti in letteratura assume la definizione del rischio come funzione delle tre variabili pericolosità, vulnerabilità ed esposizione (Crichton, 1999; Dai et al., 2021; Lee et al., 2020; Yin et al., 2020).

Dall'analisi della letteratura dei fenomeni dell'ondata di calore, delle precipitazioni intense e dei metodi utili per l'analisi degli impatti delle ondate di calore sul territorio, emergono però diverse limitazioni. In particolare, i dati necessari per le analisi sono molto spesso poco accessibili e poco accurati. Gli studi vengono condotti a scala locale su un singolo territorio senza prevedere un aggiornamento per monitorare gli impatti dei fenomeni studiati sul territorio. Inoltre, le ondate di calore e le precipitazioni estreme (e il loro rischio associato), vengono studiati come fenomeni separati, non influenzati l'uno dall'altro. Al contrario è necessario un approccio che li tenga in considerazione entrambi per studiare quali aree del territorio sono particolarmente propense a subire forti impatti negativi. Non per ultimo, si riscontra come spesso manchi un approccio multidisciplinare verso le tematiche trattate, che invece coinvolgono una vasta gamma di discipline scientifiche, tra cui climatologia, ecologia, medicina e ingegneria.

Ripristinare la natura nelle aree urbane, proponendo soluzioni basate sulla natura e materiali permeabili, può migliorare i servizi ecosistemici, riducendo le temperature urbane, gestendo meglio il drenaggio, aumentando la biodiversità, migliorando la qualità dell'aria e creando benessere per la popolazione.

Una possibile soluzione a queste criticità da sperimentare ampiamente nelle città è la de-impermeabilizzazione del suolo, che comporta la rimozione dello strato impermeabile superficiale per aumentare la permeabilità del suolo, ridurre le temperature superficiali e mitigare l'effetto isola di calore (Adobati & Garda, 2018).

Oltre a interventi di depavimentazione, un'ulteriore soluzione può essere l'implementazione delle infrastrutture verdi. Poiché le aree verdi in ambito urbano sono limitate, va evidenziato l'importante ruolo dei tetti verdi nell'abbassare le temperature superficiali degli edifici. I tetti verdi utilizzano la vegetazione per raffreddare gli edifici, riducendo così il consumo energetico e influenzando il microclima locale delle città. Inoltre, i tetti verdi forniscono benefici aggiuntivi, tra cui la rimozione degli inquinanti atmosferici, la riduzione del rumore, il controllo delle acque piovane e la promozione della biodiversità (Boglietti et al., 2023). Queste soluzioni contribuiscono dunque a contrastare gli impatti negativi dei cambiamenti climatici.

1.2 Individuazione degli obiettivi

Per colmare le lacune precedenti, la presente mira a creare un protocollo di analisi che stabilisca le procedure e le metodologie specifiche per l'analisi dei fenomeni, che sia però in continuo aggiornamento per monitorare gli impatti dei cambiamenti climatici sul territorio e per verificare l'efficacia degli interventi eseguiti e delle politiche adottate.

In particolare, la ricerca si concentra sulla definizione di strumenti utili a supporto del governo del territorio per l'adattamento ai cambiamenti climatici con la definizione di un Piano Attuativo di Depavimentazione urbana, per individuare le aree prioritarie su cui intervenire per rendere il suolo permeabile, e una Strategia di Diffusione dei Tetti Verdi che identifica le aree più idonee alla realizzazione di questo tipo di infrastruttura. Più precisamente, l'obiettivo della ricerca è fornire un quadro operativo efficace e ampiamente applicabile che restituisca una valutazione dell'intero territorio in merito agli impatti delle ondate di calore e delle precipitazioni estreme.

Le indagini di riferimento legate alle ondate di calore, come la mappatura delle Local Climate Zone, la mappatura delle Land Surface Temperature e la valutazione del Rischio da ondate di calore per la salute della popolazione, e le analisi che derivano dal fenomeno delle precipitazioni estreme (criticità connesse al sistema di drenaggio urbano e idoneità del suolo per l'infiltrazione di acqua), sono combinate tra loro in modo innovativo. L'identificazione delle aree della città più critiche è il principale risultato atteso, che si ottiene sviluppando mappe dei livelli di priorità per interventi di depavimentazione e mappe di livelli di idoneità alla diffusione di tetti verdi su una scala di classificazione a quattro livelli.

1.3 Individuazione del contributo

La presente ricerca mira a fornire un contributo teorico e pratico.

Dal punto di vista teorico, fa luce su un'area di ricerca che finora non è stata completamente affrontata. Più precisamente, sebbene siano stati analizzati singolarmente i rischi legati al fenomeno delle ondate di calore e il rischio correlato alle precipitazioni estreme, per la conoscenza dell'autore, non è ancora stata esplorata una metodologia di analisi che tenga in considerazione entrambi gli aspetti. Nel presente contributo viene analizzato il rischio da ondate di calore per la salute dei residenti calcolando il rischio come funzione di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione, mentre il fenomeno delle precipitazioni estreme viene analizzato solo dal punto di vista qualitativo. Dunque, il contributo integra le due diverse analisi, pur cosciente del diverso grado di approfondimento dei fenomeni.

Da un punto di vista pratico, fornisce alla pubblica amministrazione e ai decisori un efficace strumento di supporto decisionale, che può aiutarli a (i) identificare le aree della città più critiche, (ii) dare priorità agli interventi e (iii) definire la tipologia di intervento da attuare. Inoltre, i metodi selezionati per effettuare tali analisi sono tra quelli più ampiamente applicati e facili da eseguire, in modo che la loro implementazione e interpretabilità sia favorita anche tra coloro che non hanno un'ampia conoscenza delle tematiche trattate.

Per valutarne l'applicabilità e l'efficacia, la metodologia proposta sarà testata sulla città di Brescia (Regione Lombardia, Italia), che rappresenta un caso di studio interessante in particolare dal punto di vista morfologico: il territorio è costituito da una parte pianeggiante a sud e da una zona collinare e montuosa a nord. Brescia si trova al confine tra queste due frange e questo aspetto contribuisce a rendere il suo territorio caratteristico in quanto si possono trovare elementi naturalistici appartenenti a diversi ambiti. Inoltre, analisi condotte sul contesto climatico locale nell'ultimo trentennio identificano un costante aumento della temperatura media annua e delle precipitazioni medie annue.

1.4 Schema della ricerca

L'elaborato di tesi è strutturato come segue:

- nel capitolo 2 viene analizzato lo stato dell'arte, fornendo un quadro sul fenomeno dei cambiamenti climatici, con particolare riferimento ai due fattori che permettono di caratterizzare meglio il contesto urbano italiano, le *ondate di calore* e le *precipitazioni estreme*. Il primo viene analizzato in modo più approfondito, mentre per il secondo vengono riportati i principali impatti indiretti sulla popolazione. Più precisamente, partendo da una panoramica dei fenomeni stessi e dei loro impatti a scala locale e sulla comunità, viene fornito un focus sulla mappatura delle Local Climate Zone, delle Land Surface Temperature e sulla definizione del concetto di Rischio;
- nel capitolo 3, viene descritto in modo approfondito un nuovo approccio metodologico per la definizione di strumenti a supporto al governo del territorio nell'ottica dell'adattamento ai cambiamenti climatici, attraverso interventi di depavimentazione e di realizzazione di tetti verdi;
- nel capitolo 4, viene presentato il caso studio così come l'applicazione della metodologia complessiva e i risultati ottenuti;
- nel capitolo 5, vengono formulate alcune osservazioni conclusive con un focus sui limiti della ricerca e le prospettive future.

2. Stato dell'Arte

Il presente capitolo intende approfondire lo stato dell'arte nella letteratura esistente in merito agli strumenti di supporto utili alla pianificazione del territorio per contrastare i cambiamenti climatici in atto.

Inizialmente si affronta l'ampio tema dei cambiamenti climatici, un fenomeno complesso generato alla scala globale, i cui effetti sono però differenti a seconda delle aree geografiche. In particolare, i principali effetti secondari dei cambiamenti climatici, come ondate di calore ed eventi meteorici estremi, si verificano maggiormente all'interno delle aree urbanizzate. Vengono dunque analizzati in modo più specifico il fenomeno delle ondate di calore e quello delle precipitazioni estreme, andando a studiare il loro impatto negativo sulla salute della popolazione, sull'ambiente e sulla comunità più in generale. Per mitigare e adattarsi ai cambiamenti climatici, molte città in tutto il mondo stanno sviluppando strategie di adattamento e mitigazione: il capitolo illustra le principali misure messe in atto a livello internazionale, europeo, nazionale, regionale e locale.

Per comprendere al meglio i fenomeni climatici e sviluppare strategia di mitigazione e adattamento è fondamentale una analisi della letteratura di riferimento che fornisce una base scientifica mirata ad affrontare gli impatti negativi dei cambiamenti climatici. In particolare, viene analizzata nel dettaglio la letteratura relativa al fenomeno delle ondate di calore. Questo perché lo studio del fenomeno delle precipitazioni intense, comprese le sue implicazioni a livello urbano, richiederebbe una conoscenza specializzata nell'ambito del sistema di drenaggio urbano della città, nell'analisi dei suoli e nella creazione di modelli complessi, che non viene trattata nel seguente elaborato.

2.1 La tematica dei cambiamenti climatici

La questione del cambiamento climatico e dei suoi potenziali rischi fu sollevata in primo luogo da James Hansen nel suo articolo intitolato *Climate Impact of Increasing Atmospheric Carbon Dioxide* (1981), pubblicato sulla rivista *Science*. Hansen notò variazioni nell'andamento medio dell'aumento della temperatura e predisse che il riscaldamento avrebbe molto probabilmente provocato effetti sul clima nel corso del XXI secolo. Da quel momento, la comunità scientifica ha iniziato a concentrarsi sul tema del cambiamento climatico.

Tuttavia, è fondamentale stabilire una definizione chiara del concetto di cambiamenti climatici per poter valutare il fenomeno e sviluppare possibili strategie di contrasto. Non esiste una definizione universale del termine, ma per questa tesi, adotteremo le definizioni fornite dalla Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UNFCCC) e dall'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

L'UNFCCC, all'articolo 1, definisce i cambiamenti climatici come "qualsiasi variazione del clima direttamente o indirettamente attribuibile all'attività umana, che alteri la composizione dell'atmosfera ed è quindi aggiuntiva rispetto alla variabilità climatica naturale osservata su un periodo di tempo comparabile" (United Nations, 1992). Invece, l'IPCC utilizza il termine per definire "qualsiasi modifica del clima che può essere identificata (ad esempio, attraverso test statistici) osservando cambiamenti nella media e/o nella variabilità delle sue proprietà e che persiste per un periodo prolungato, di solito per alcuni decenni o più. Questi cambiamenti climatici possono essere causati da processi naturali interni, forzature esterne o da alterazioni antropogeniche persistenti nella composizione dell'atmosfera o nell'uso del suolo" (IPCC, 2014). Tali definizioni sono prevalentemente condivise dalla comunità scientifica che ritiene che i cambiamenti climatici siano determinati principalmente dalle emissioni in atmosfera dei cosiddetti gas serra prodotti dalle attività dell'uomo. Si evidenzia che le attività umane hanno causato un riscaldamento globale di circa 1,0°C rispetto ai livelli preindustriali ed è probabile che il riscaldamento globale raggiungerà 1,5°C tra il 2030 e il 2052 se il tasso attuale continuerà ad aumentare (Gaglione, 2022). L'intervento dell'uomo ha causato modifiche significative negli ecosistemi, come la riduzione della diversità biologica e il degrado del terreno. Queste trasformazioni hanno comportato notevoli perdite in termini economici, sociali e culturali. Gli investimenti per la protezione e il miglioramento dell'ambiente (Balletto et al., 2021), unitamente all'adozione di infrastrutture ecologiche nelle aree urbane e suburbane, possono contribuire al conseguimento degli obiettivi di sviluppo sostenibile (Ladu & Sulis, 2022).

Il riscaldamento globale del pianeta porta principalmente a tre conseguenze principali:

Stato dell'arte

- l'aumento della temperatura media globale;
- l'aumento del livello medio globale del mare;
- modifiche nella frequenza e nell'intensità delle precipitazioni.

Queste variazioni si manifestano nelle città sotto forma di effetti secondari (come ondate di calore, piogge intense, siccità, mareggiate, ecc.), che negli ultimi dieci anni si sono verificate più spesso e con maggiore intensità. Ridurre gli impatti del cambiamento climatico richiede radicali cambiamenti sociali e del modello economico (Estrada et al., 2017), in particolare nelle nostre città (Van Leeuwen et al., 2016). Una volta compreso che gli impatti del cambiamento climatico sarebbero aumentati a causa dei ritardi per la riduzione delle emissioni di gas serra, la comunità scientifica ha iniziato a studiare le relazioni tra le caratteristiche delle città e gli effetti climatici con l'obiettivo di adattarsi a tali cambiamenti (Da Silva et al., 2012). Nelle città, l'adattamento ai cambiamenti climatici è diventato una priorità: le azioni in merito non possono essere più ignorate, poiché l'incremento delle temperature nelle città metropolitane italiane, è accompagnato dal crescente invecchiamento della popolazione. Questo invecchiamento comporta un aumento progressivo della fragilità delle comunità urbane (Balletto et al., 2022).

2.1.1 Gli impatti dei cambiamenti climatici a scala urbana

Negli ultimi dieci anni, si è osservato un aumento della frequenza e dell'intensità degli eventi meteorologici estremi nelle città. Sebbene questi fenomeni climatici abbiano origine a livello globale, le loro conseguenze variano notevolmente in base alle regioni geografiche. Di conseguenza, l'adattamento ai cambiamenti climatici deve avvenire su scala locale per adeguare il territorio alle rapide e crescenti manifestazioni di tali fenomeni.

I centri urbani rappresentano veri e propri "punti critici" per i cambiamenti climatici, cioè zone caratterizzate da una elevata vulnerabilità ed esposizione. Poiché più del 50% della popolazione vive nelle città, e queste sono luoghi in cui si forniscono servizi sociali e culturali essenziali, è qui che gli effetti dei cambiamenti climatici colpiscono una grande percentuale di individui e attività sensibili. Questi effetti sono ulteriormente accentuati dalle caratteristiche topografiche, morfologiche, demografiche ed economiche dell'ambiente urbano. Inoltre, è importante ricordare che, se da un lato le città sono particolarmente vulnerabili agli impatti del cambiamento climatico, dall'altro sono tra i principali responsabili delle emissioni di gas serra e contribuiscono in modo significativo al problema.

Esistono molteplici e diversi modi in cui i cambiamenti climatici interagiscono con gli ambienti urbani e generano situazioni di rischio (Spano et al., 2020). Tra questi, i principali fattori climatici sono:

- le precipitazioni estreme;
- le ondate di calore;
- l'aumento delle temperature medie;
- la riduzione media delle precipitazioni.

2.1.1.1 Ondate di calore e isole di calore

L'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ha classificato le ondate di calore come uno degli eventi meteorologici estremi associati ai cambiamenti climatici (Field et al., 2012). Le ondate di calore hanno un forte impatto negativo nelle aree urbane a causa delle grandi aree densamente edificate, dei climi locali e regionali e della mancanza di alberi e spazi verdi che portano alla modifica delle temperature dell'aria e alla creazione di intense isole di calore urbane (UHI) (Gál et al., 2016; Lelovics et al., 2016). Si prevede che il riscaldamento globale intensifichi gli eventi di ondate di calore, quantificati da molteplici descrittori, tra cui la frequenza, la durata e l'intensità (Mazdiyasn et al., 2019). L'aumento della temperatura non solo aumenta il numero di giorni con ondate di calore e di notti di calore e di notti tropicali, ma accelera anche la siccità, aumenta il consumo di energia e ostacola la produzione e l'approvvigionamento di cibo (Solomon et al., 2007).

Gli effetti negativi delle UHI comportano livelli di temperature notturne poco tollerabili per la popolazione evidenziando la più alta incidenza di decessi proprio nei contesti urbani, sebbene naturalmente non tutta la popolazione sia esposta allo stesso modo al pericolo: l'età avanzata è ad esempio un elemento di vulnerabilità, così come contribuiscono le condizioni di salute pregresse e lo status socioeconomico (European Environment Agency, 2022).

Il termine *isola di calore urbana* (Urban Heat Island, UHI) si riferisce al fenomeno in cui le temperature nelle aree urbane sono alterate rispetto a quelle delle aree rurali (Figura 1) (Oke, 1982).

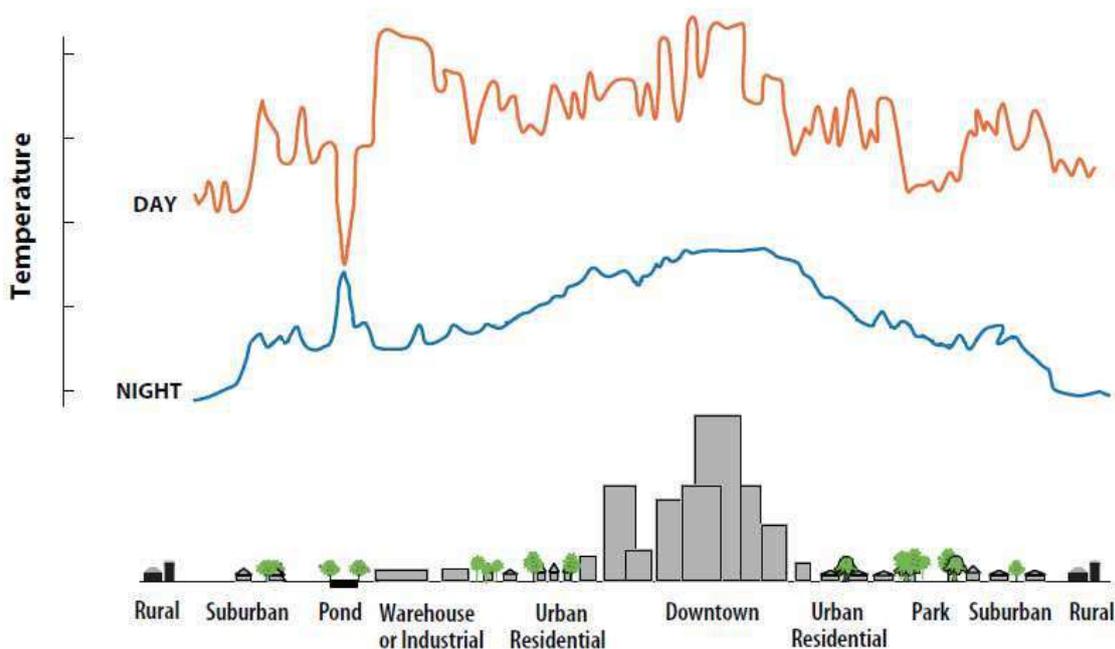


Figura 1 - Temperature superficiali diurne e notturne in aree con diverso uso del suolo
(Fonte: Voogt, 2000)

Gli studi hanno dimostrato che tale fenomeno è dovuto a un immagazzinamento diurno ed il rilascio notturno di calore, conducendo ad un significativo aumento della temperatura nelle aree urbane (Kolokotroni & Giridharan, 2008; Stone & Rodgers, 2001). In accordo con tali studi, le caratteristiche morfologiche della città, la geometria e le dimensioni dell'edificato, e la distribuzione spaziale delle attività antropiche e delle aree verdi, sono strettamente connesse alle condizioni microclimatiche urbane, gravando sugli effetti della radiazione solare e inasprando fenomeni quali l'isola di calore urbana, UHI (Gaglione, 2022). L'intensità delle isole di calore viene definita in base alla differenza di temperatura tra le zone urbane e rurali, in un determinato intervallo temporale, con vari indicatori utilizzati per quantificare questa differenza (Schwarz et al., 2012).

Il termine *isola di calore* è stato coniato a causa della somiglianza tra l'andamento spaziale delle isoterme della temperatura dell'aria nello strato di copertura urbana (UCL) e i contorni di altezza di un'isola oceanica (Oke et al., 2017). Il primo a dimostrare il fenomeno delle UHI fu lo studioso Luke Howard nel suo studio *The Climate of London* (1833). Il nome isola di calore, però, compare in letteratura per la prima volta in un articolo di Gordon Manley nel *Quarterly Journal of the Royal Meteorology Society* (1958), sebbene sia plausibile che sia stato coniato prima (Erell et al., 2011).

L'effetto UHI è proporzionale alla morfologia ed alla geometria delle aree urbane (Oke, 1976, 1987) e si è avvertito maggiormente col tempo nelle grandi metropoli. Dagli anni Novanta del secolo scorso gli studi si sono concentrati sulle cause del fenomeno cercando di comprendere le relazioni tra

i materiali impiegati nella costruzione di tessuti urbani (strade, edifici, piazze ecc..), morfologia del tessuto urbano e attività urbane al fine di comprendere gli effetti che le stesse provocano sul clima (Figura 2).

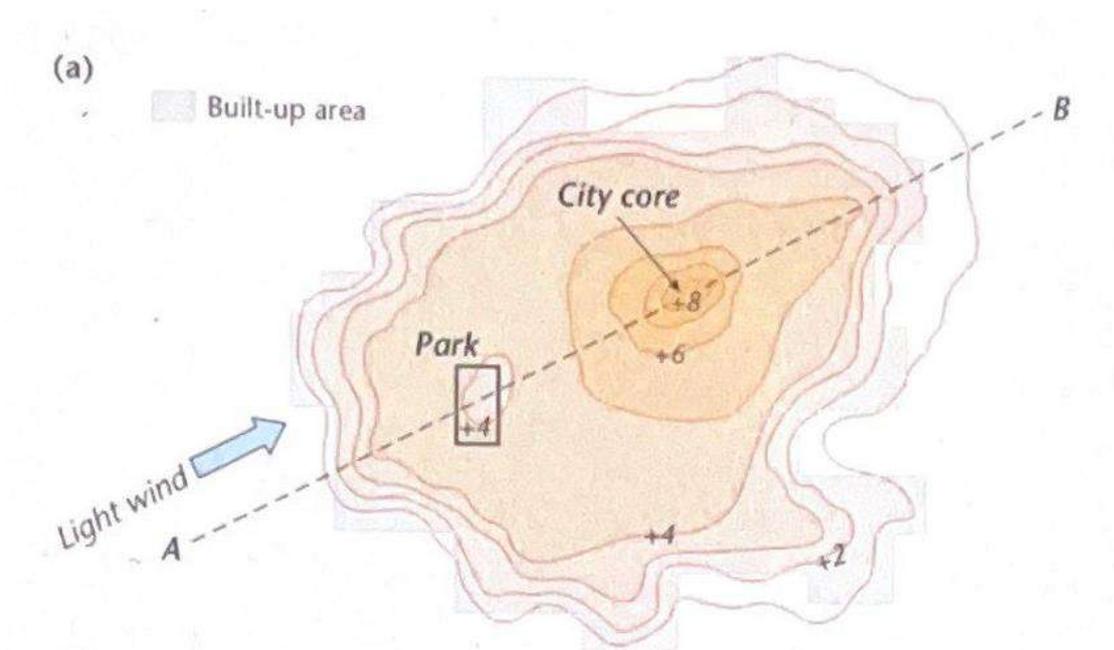


Figura 2 - Mappa delle isoterme che illustra le caratteristiche tipiche dell'UHI e la loro corrispondenza con il grado di sviluppo urbano (Fonte: Oke et al., 2017)

Misurare le temperature di un'isola di calore è un processo relativamente semplice, ma il tema delle UHI richiede un approccio metodologicamente complesso a causa della loro diversità. Le UHI possono essere classificate in vari tipi, ciascuno dei quali varia nel tempo e nello spazio. Ognuno di questi tipi reagisce a diverse scale e deriva da diverse combinazioni di processi. Inoltre, il monitoraggio e la modellazione delle UHI richiedono schemi specifici per ciascun tipo. Pertanto, è inappropriato trattare le UHI in modo generico come un unico fenomeno; è fondamentale identificare la tipologia oggetto di misurazione, descrizione, interpretazione o modellazione (Oke et al., 2017).

Più in dettaglio, si identificano le tipologie di isole di calore urbane (UHI) a seconda della temperatura dell'aria e della temperatura della superficie terrestre (Oke, 1995):

- *Subsurface Urban Heat Island* (UHI_{sub}) è la differenza tra i modelli di temperatura nel terreno sotto la città, compresi i suoli urbani e il tessuto costruito sotterraneo, e quelli nel terreno rurale circostante;

Stato dell'arte

- *Surface Urban Heat Island* (UHI_{surf}) è la differenza di temperatura all'interfaccia dell'atmosfera esterna con i materiali solidi della città e l'equivalente interfaccia aria-terra rurale;
- *Boundary Layer Urban Heat Island* (UHI_{UBL}) misura la temperatura dello strato limite urbano (UBL), situato al di sopra dell'altezza media degli edifici (Stewart, 2011a);
- *Canopy Layer Urban Heat Island* (UHI_{UCL}) stima la temperatura dello strato di copertura urbana (UCL) che va dal suolo all'altezza massima degli edifici.

Questi quattro tipi di UHI (Figura 3) derivano da differenze nei tassi di raffreddamento e riscaldamento urbano e rurale in superficie, nel substrato e nell'aria. Le alterazioni di questi tassi sono causate da cambiamenti nel bilancio energetico superficiale.

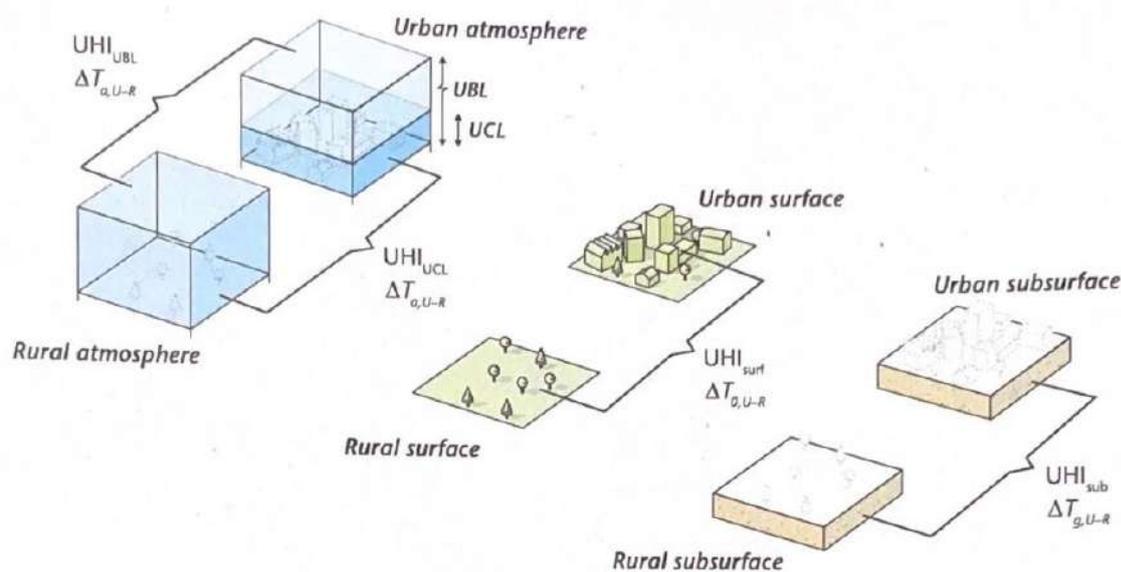


Figura 3 - Tipologie di isole di calore
(Fonte: Oke et al., 2017)

I dati sulla temperatura superficiale per le quantificazioni UHI provengono da sensori aerei o satellitari (Voogt & Oke, 2003).

Per quanto riguarda le UHI_{UBL} si manifestano nelle aree urbane come una “cupola” di aria calda di uno spessore di circa un chilometro durante il giorno e si riduce di alcune centinaia di metri durante la notte. Invece, l’alterazione media annuale tipica dell’ UHI_{UCL} di una grande città è di 1-3 °C, ma in presenza di condizioni favorevoli può raggiungere un’intensità di 12 °C (Oke, 1997)). Durante la stagione estiva, l’assenza di vento e di nubi sono le condizioni definite in letteratura “ideali” (Oke, 1982), che contribuiscono a massimizzare l’effetto durante il periodo notturno, contrariamente a quanto avviene per le UHI_{surf} . Le UHI_{surf} si verificano quando le città sono circondate da terreni umidi

ed aree vegetate che sono superfici più fredde rispetto alle superfici urbane (Yow, 2007). In città si osservano generalmente temperature maggiori delle superfici sia di giorno che di notte; tuttavia, l'intensità del UHI_{surf} non è costante durante la giornata e si modifica al variare della radiazione solare: in media è di 10-15 °C durante le ore diurne, mentre assume valori di circa 5-10 °C durante quelle notturne.

Le diverse tipologie di isole di calore, anche se correlate tra di loro, differiscono per origine, tecniche di misurazione e dinamiche temporali.

La Boundary Layer Urban Heat Island (UHI_{UBL}) è possibile misurarla attraverso uno strumento meteorologico in grado di valutare il profilo di temperatura verticale a diverse quote sopra il livello del suolo tramite l'utilizzo di onde sonore. Le Canopy Layer Urban Heat Island (UHI_{surf}) possono essere rilevate mediante autovetture o una rete di sensori posizionati nelle aree urbane. Le Surface UHI possono essere misurate sia con metodi diretti e indiretti: la misurazione con tecniche dirette, utilizza termocoppie o termoresistenze utili a reperire dati sulle temperature in aree urbane limitate, mentre come misurazioni indirette, per l'analisi di zone più ampie, vengono spesso utilizzate le tecniche di telerilevamento che stimano la temperatura delle superficie attraverso le radiazioni infrarosse.

2.1.1.2 Precipitazioni estreme

In Italia, negli ultimi anni si osserva una tendenza generale all'aumento in frequenza e intensità dei fenomeni di precipitazione estrema su tutto il territorio nazionale. Questo fenomeno comporta principalmente due rischi principali legati agli eventi di precipitazione intensa nelle città (Spano et al., 2020):

- esondazione dei corpi idrici superficiali nei bacini idrici a monte delle aree urbane;
- inondazione delle aree urbane dovuta a una capacità insufficiente dei sistemi di drenaggio nel gestire grandi quantità d'acqua in tempi brevi.

In queste situazioni, l'acqua in eccesso viene principalmente smaltita attraverso il deflusso superficiale, causando accumuli d'acqua nelle strade, nelle zone più basse come sottopassi, stazioni della metropolitana e infrastrutture, nonché nei piani inferiori degli edifici. Oltre agli eventi di precipitazione intensa, le caratteristiche geografiche e idrogeologiche del territorio, compresa la forma e la posizione delle città, rendono questi ambienti particolarmente vulnerabili a tali impatti negativi (Amanti et al., 2014). Il consumo di suolo, con la trasformazione di suoli permeabili in superfici impermeabili, come strade, parcheggi, piazze e edifici, ha aumentato frequenza e intensità

Stato dell'arte

delle onde di piena nei centri abitati. Le superfici artificiali aggiunte dall'urbanizzazione contribuiscono a un aumento della frequenza delle inondazioni a causa della minore infiltrazione del suolo e della riduzione della resistenza al flusso dovuta a tempi di concentrazione più brevi. Si stanno inoltre accertando alcuni cambiamenti idrometeorologici guidati dall'urbanizzazione, e i conseguenti impatti sulle precipitazioni estreme. Alcuni studi hanno rilevato un aumento delle precipitazioni nelle regioni sottovento rispetto alle aree urbane, con aumenti fino al 25% in alcuni casi (Mote et al., 2007; Shepherd et al., 2002). È preoccupante notare che, nonostante una tendenza decrescente della crescita demografica, il consumo di suolo in Italia continua ad aumentare. Gli insediamenti urbani sono altamente eterogenei per forma e disposizione di zone residenziali, servizi, aree produttive e infrastrutture, il che influisce sulla vulnerabilità delle diverse aree urbane agli eventi climatici estremi (Huong & Pathirana, 2013).

L'urbanizzazione aumenta inevitabilmente il rischio di inondazioni a causa della maggiore vulnerabilità dovuta alla concentrazione della popolazione, della ricchezza e delle infrastrutture in aree più ristrette. Nelle zone urbane, grandi quantità di calore prodotto dall'attività umana vengono rilasciate nell'ambiente, causando problemi ambientali come l'aumento delle temperature atmosferiche (Aikawa et al., 2009). La mancanza di alberi riduce l'evaporazione e il rilascio di calore latente. Inoltre, l'ambiente urbano ha proprietà radiative diverse che comportano un maggiore assorbimento di radiazioni a causa della sua struttura (Pathirana et al., 2013; Shepherd et al., 2002). Questi cambiamenti nel bilancio termico superficiale creano condizioni atmosferiche uniche nelle aree urbane, diverse da quelle delle aree non urbanizzate o rurali. Tali modifiche possono influenzare significativamente la circolazione locale, i parametri meteorologici e la loro relazione con le precipitazioni (Aikawa et al., 2009).

L'aumento delle precipitazioni estreme è attribuito al cambiamento climatico, rendendo le inondazioni più frequenti. Il riscaldamento globale rende il tempo meno prevedibile e le piogge tempestose più probabili (IPCC, 2007). Il cambiamento climatico sta rendendo il tempo meno prevedibile, le piogge più incerte e le forti piogge tempestose più probabili. La frequenza dei forti temporali è aumentata (Mendel, 2006).

2.1.2 Gli impatti dei cambiamenti climatici sulla comunità

Oltre agli impatti dei cambiamenti climatici sull'ambiente, questi fenomeni hanno impatti negativi anche sulla comunità che possono avere conseguenze molto ampie, da problemi di salute causati dal calore, a danni alle costruzioni e alle infrastrutture dovuti ad alluvioni. Ad esempio, le **inondazioni**

possono causare la distruzione di abitazioni, attività commerciali e infrastrutture, contribuendo in modo indiretto alla perdita di posti di lavoro e fonti di reddito. Le **ondate di calore** possono compromettere la salute pubblica, ridurre la capacità lavorativa e portare a una minore produttività, ritardando la consegna di beni e servizi ai clienti sia in città che altrove. Possono anche limitare l'uso degli spazi pubblici, riducendo così le interazioni sociali. Le elevate temperature possono danneggiare le infrastrutture, ad esempio causando la deformazione delle strade e dei binari, che ostacola il trasporto di merci e il pendolarismo. Inoltre, in combinazione con la siccità, le centrali elettriche potrebbero non ricevere abbastanza acqua per il raffreddamento, mettendo a rischio l'approvvigionamento energetico (Giordano et al., 2013). La **scarsità d'acqua** mette le città in competizione con altri settori, come l'agricoltura e il turismo, aumentando la pressione economica sulla città e sui suoi abitanti per accedere a quantità sufficienti di acqua. Questo mette a rischio l'equità sociale (European Environment Agency, 2012).

Gli effetti degli eventi meteorologici estremi possono differire notevolmente a seconda del grado di preparazione di una città e della sua risposta. Inoltre, gli impatti dei cambiamenti climatici sulle comunità comprendono, e con ogni probabilità continueranno a includere nei prossimi decenni, molti degli impatti indicati in Tabella 1. Pertanto, i cambiamenti climatici hanno impatti sulla comunità che possono essere suddivisi in diretti e indiretti: gli impatti diretti sono quelli legati alla salute della popolazione che possono causare direttamente lesioni o morte o portare a malattie fisiche e disturbi di salute mentale (Weilhammer et al., 2021), mentre gli impatti indiretti sono quelli che si riferiscono ai danni riportati alle proprietà e alle infrastrutture, alla contaminazione dell'acqua, nonché la recrudescenza e la redistribuzione di malattie infettive (European Environment Agency, 2017; Forzieri et al., 2017). Infatti, l'insorgere di condizioni di rischio dovute a eventi meteorologici estremi, come ondate di calore e fenomeni meteorologici avversi come alluvioni, piogge intense, e inondazioni, comporta ulteriori rischi rilevanti per la salute. Questi rischi sono associati agli impatti negativi dei cambiamenti climatici sugli ecosistemi, la biodiversità, la qualità delle acque potabili e balneabili, la qualità dell'aria sia all'aperto che negli ambienti interni, nonché agli effetti sui servizi essenziali come ospedali, trasporti, fornitura di acqua potabile ed energia, oltre alle economie principali delle città e dei territori, tra cui il turismo e le attività culturali (De Maio et al., 2014).

2.1.2.1 Tipologie di impatti diretti

Gli effetti negativi delle UHI comportano livelli di temperature notturne poco tollerabili per i cittadini, evidenziando la più alta incidenza di decessi proprio nei contesti urbani.

Stato dell'arte

La vulnerabilità di una popolazione alla morbilità e alla mortalità legate al caldo è influenzata da fattori individuali e caratteristiche socioeconomiche. Gli anziani, i bambini, le donne in gravidanza, i lavoratori all'aperto, le persone con condizioni di salute preesistenti (come malattie cardiovascolari, malattie respiratorie, diabete e disturbi di salute mentale) e le persone emarginate o con risorse economiche insufficienti sono tra i più vulnerabili a condizioni estreme calore (World Health Organization. Regional Office for Europe, 2021).

Tabella 1 - Principali fattori climatici ed impatti che influiscono sull'ambiente urbano e sui servizi erogati
(Fonte: Spano et al., 2020)

CLIMA	EVENTO INDOTTO	IMPATTI
Eventi estremi di precipitazione	Alluvioni urbane	Distruzione di case, luoghi di lavoro e infrastrutture
		Degradazione del verde pubblico
		Perdita di biodiversità
		Perdita del patrimonio immobiliare e delle comunità private
		Perdita di posti di lavoro e fonti di reddito
		Danni al patrimonio culturale
		Incertezza nella pianificazione dell'uso del suolo a lungo termine e nella progettazione di infrastrutture
		Interruzione servizi pubblici e non
		Costi per l'installazione di sistemi e incremento dei costi assicurativi
		Costi per periodi improduttivi
Eventi estremi di temperatura	Ondate di calore esacerbate da effetti di isola di calore urbana e diminuzione qualità dell'aria	Problemi di salute pubblica
		Danni al patrimonio culturale
		Aumento domanda energetica degli edifici
		Aumento del fenomeno dell'isola di calore
		Aumento di aree geografiche e stagionalità per la diffusione di malattie trasmesse da vettori
		Aumento rischio incendi
		Perdita di biodiversità
		Ridotta capacità di lavorare, ridotta produttività, ritardate consegne di prodotti e servizi ai clienti
		Riduzione nell'uso degli spazi pubblici e quindi della vita sociale
		Ostacoli nella fornitura di beni e nel trasporto di pendolari per danni a infrastrutture (strade/binari deformati dalle alte temperature)
Problemi di raffreddamento delle centrali energetiche e mancata erogazione di energia		
Costi per periodi improduttivi		
Aumento delle temperature medie	Riscaldamento area urbana	Anticipo e aumento della durata di periodi di pollinazione
		Problemi di salute pubblica

Tuttavia, non è solo il calore diretto a incidere negativamente sulla salute degli abitanti. In condizioni atmosferiche anticicloniche e di eccessivo calore, si genera un maggior livello di

inquinanti come ozono e polveri sottili, i quali possono causare infiammazioni alle vie respiratorie. Le alte temperature possono causare stress da calore, che aumenta il rischio di morte per esaurimento da calore e colpo di calore. Inoltre, gli impatti indiretti del calore sui sistemi cardiovascolare e respiratorio e l'esacerbazione delle condizioni di salute esistenti a causa del calore sono un'altra causa di aumento della mortalità durante la stagione calda (World Health Organization. Regional Office for Europe, 2021) (Figura 4).

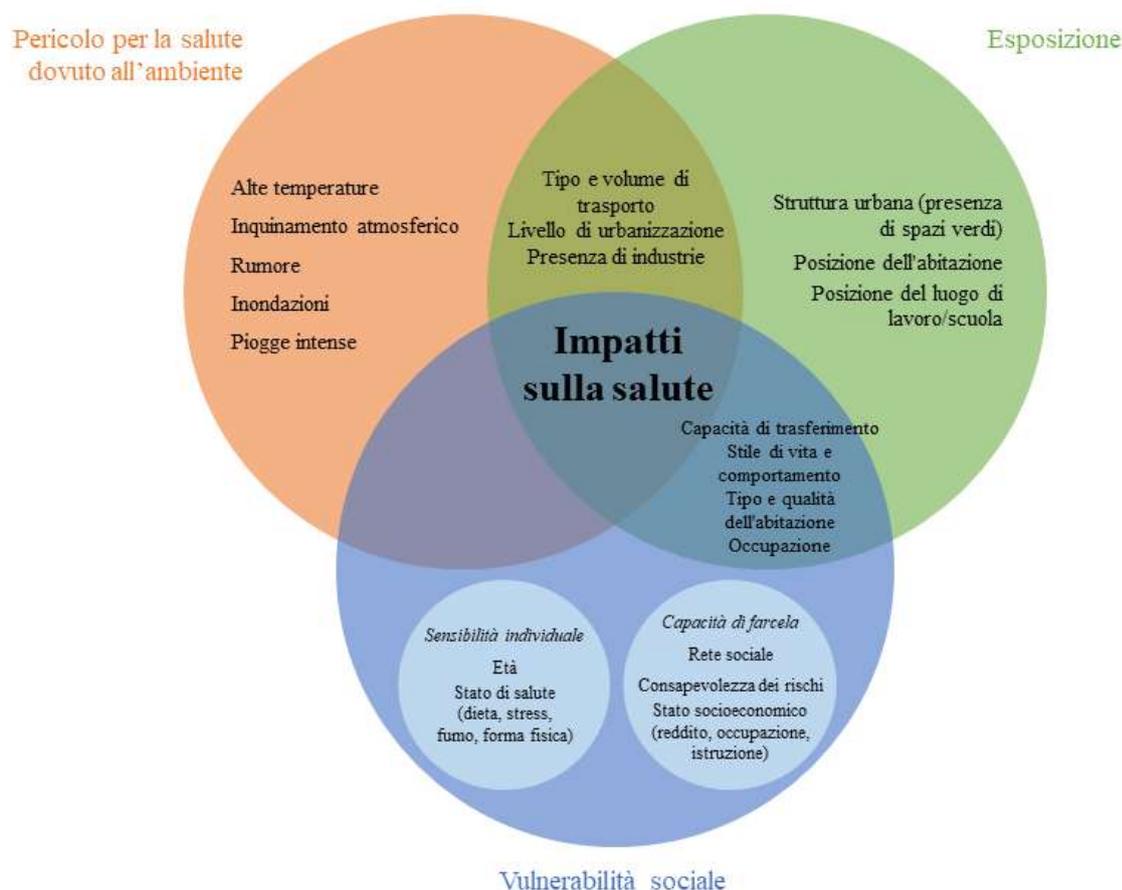


Figura 4 - Impatti sulla salute derivanti dalla combinazione di vulnerabilità ed esposizione a rischi ambientali e sanitari (Fonte: European Environment Agency, 2018)

Le alte temperature e le ondate di caldo sono associate a disturbi dell'umore e del comportamento, compreso l'aumento del comportamento aggressivo e della criminalità. Inoltre, il caldo è associato a disagio psicologico, peggioramento della salute mentale, aumento dei ricoveri psichiatrici, aumento dei tassi di suicidio e più alto tasso di mortalità. Anche lo stress che provano le vittime delle alluvioni può influenzare la loro salute mentale per molto tempo dopo l'evento (Fernandez et al., 2015; Stanke et al., 2012). Fino a tre quarti delle persone colpite da un'alluvione hanno sperimentato effetti sulla salute mentale (Menne & Murra, 2013).

Stato dell'arte

L'Europa meridionale emerge costantemente come la regione con il rischio maggiore e in più rapido aumento di alte temperature per la salute umana (European Environment Agency, 2021). Il numero crescente di persone di età superiore ai 65 anni in Europa, combinato con le temperature più elevate in estate, ha portato a un aumento sostanziale dell'esposizione complessiva degli anziani alle ondate di calore dal 1980 (European Climate and Health Observatory, 2021). Data la scarsità di dati di mortalità registrati in modo costante durante le ondate di calore, la modellizzazione dei dati settimanali suggerisce un aumento della mortalità dovuta alle ondate di calore tra il 2000 e il 2020 nel 94% delle 990 regioni europee valutate (Figura 5).

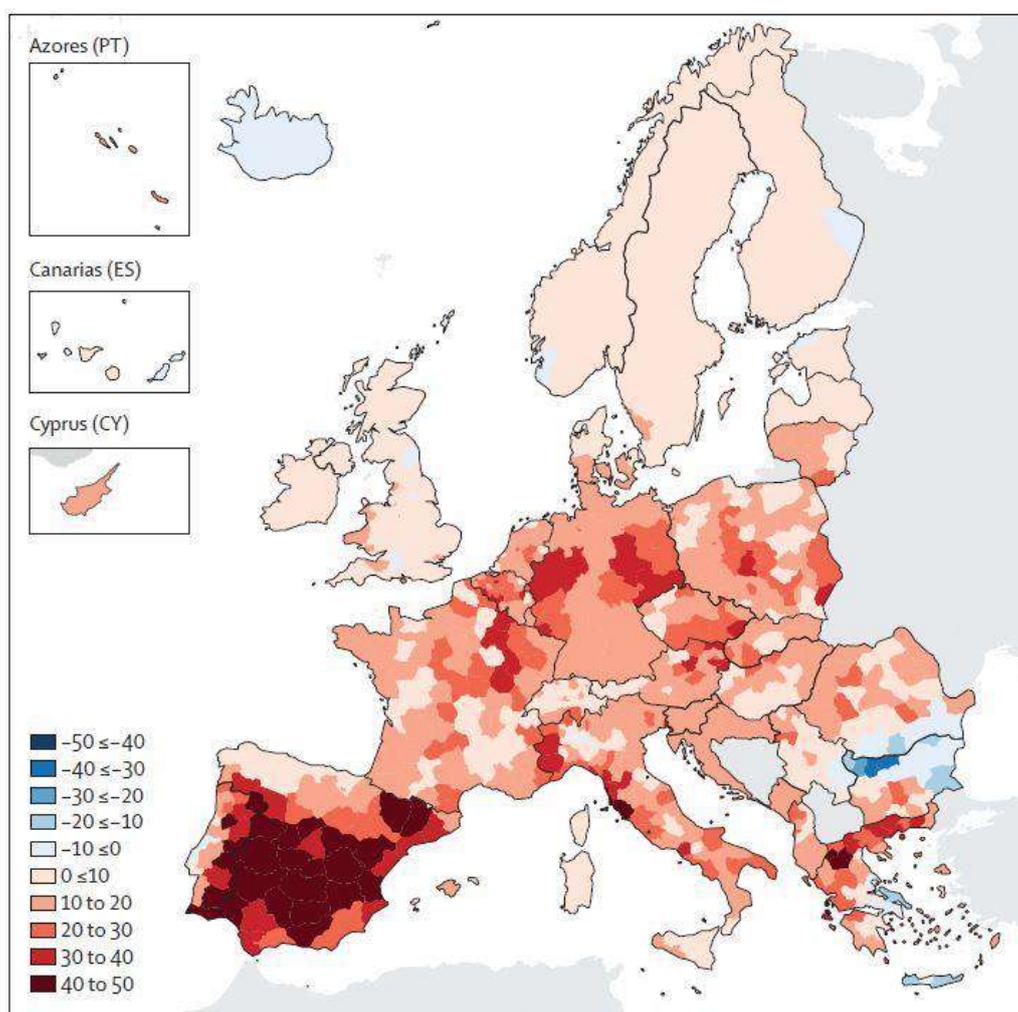


Figura 5 - Andamento dell'incidenza della mortalità correlata al caldo (morte annuale per milione di persone per decennio) in Europa per la popolazione generale (2000-2020)
Fonte (Van Daalen et al., 2022)

La vulnerabilità della popolazione, oltre ai già citati impatti sulla salute fisica e psicologica, fa riferimento anche alle caratteristiche socioeconomiche. In particolare, la qualità dell'ambiente edificato, che influisce in modo sostanziale sul comfort termico interno, tende a essere più bassa tra i

gruppi di basso livello socioeconomico, che potrebbero anche non essere in grado di permettersi il raffrescamento meccanico delle proprie abitazioni (European Environment Agency, 2018). Di conseguenza, le famiglie a più basso reddito hanno meno possibilità di rinfrescarsi durante l'estate rispetto a famiglie più abbienti. Ciò richiede interventi urgenti di adattamento mirati agli edifici abitati da persone a basso reddito, anche per combattere la povertà energetica.

Un esempio è il progetto francese *Rénovation énergétique et réhabilitation lourde des logements sociaux* (Riqualficazione energetica e riqualficazione importante dell'edilizia sociale)¹ che finanzia la ristrutturazione di edilizia sociale combinata con una ristrutturazione termica completa, con una maggiore attenzione alle prestazioni energetiche. Nel contesto attuale caratterizzato dal tema della sostenibilità, è indispensabile adottare strategie di conservazione per fronteggiare le sfide legate al cambiamento climatico (Ladu, 2023).

Tra le caratteristiche socioeconomiche anche la tipologia di lavoro svolto è rilevante per l'effetto delle UHI. Le persone che svolgono lavori fisici utilizzano dispositivi o indumenti protettivi, lavorano all'aperto esposti al sole o lavorano in edifici scarsamente raffreddati con macchinari che generano calore sono sproporzionatamente esposte a temperature elevate (Pogačar et al., 2018; World Health Organization. Regional Office for Europe, 2021). I lavoratori a basso reddito esposti allo stress da caldo durante il lavoro tendono ad essere più esposti anche sulla strada per andare al lavoro (ad esempio a piedi o in viaggio nei veicoli senza aria condizionata), nelle loro case (a causa dello scarso isolamento, della mancanza di aria condizionata e dell'impossibilità di permettersi il raffreddamento meccanico) e nei loro quartieri (ad esempio, le aree urbane sono altamente suscettibili all'effetto isola di calore) (Narocki, 2021). Inoltre, lo stress da calore nell'ambiente di lavoro può causare disidratazione, che a sua volta può ridurre la concentrazione e la velocità dei riflessi, aumentando il rischio di infortuni sul lavoro. Per gli impiegati, l'aumento delle temperature influisce sulle capacità cognitive, influenzando negativamente la concentrazione e la capacità decisionale.

Valutazioni sull'impatto dell'ondata di calore del 2003 in Europa hanno stimato più di 70.000 morti in eccesso in 12 Paesi europei, con effetti maggiori in Francia, Germania, Spagna e Italia. Le vittime erano principalmente persone anziane, spesso sole, con età superiore ai 75 anni, affette da malattie croniche e disabilità funzionali, che vivevano in zone urbane caratterizzate da bassi livelli socioeconomici. Un dato incoraggiante è che, nonostante l'estate del 2012 sia stata la seconda più calda dal 1800 dopo il 2003, l'eccesso di mortalità legato alle ondate di calore in Italia è diminuito.

¹ <https://www.economie.gouv.fr/plan-de-relance/mesures/renovation-energetique-rehabilitation-lourde-logements-sociaux>

Questo risultato positivo è attribuito all'attuazione di politiche di allarme, sorveglianza, prevenzione e comunicazione più efficaci. Di contro non si registra un diffuso uso di materiali e tecnologie nell'edilizia e nelle infrastrutture stradali urbane per la mitigazione dell'effetto da isole di calore urbano (in media da +2 a +6°C rispetto alle aree rurali) (De Maio et al., 2014).

2.1.2.2 Tipologie di impatti indiretti

Oltre ai danni diretti a persone e beni, la sicurezza della popolazione urbana è fortemente correlata all'efficace erogazione dei servizi, come la distribuzione di acqua potabile ed energia, anche in situazioni di emergenza. Inoltre, le infrastrutture e i sistemi di trasporto per persone e merci, i sistemi di comunicazione, le fognature e i servizi di rimozione dei rifiuti svolgono un ruolo cruciale nella vita urbana. Questi servizi, a loro volta, possono subire impatti da eventi climatici estremi. Tali impatti possono avere rilevanti conseguenze sul benessere socioeconomico, soprattutto nelle aree urbane il cui sistema economico è strettamente legato alla stabilità degli ecosistemi locali e alle variabili climatiche. Inoltre, gli impianti sanitari, come ospedali e ambulatori territoriali, possono subire danni che compromettono la capacità di fornire assistenza sanitaria efficace (European Environment Agency, 2020).

È previsto che nel corso del XXI secolo si verificheranno significativi aumenti nella frequenza, durata e gravità delle siccità meteorologiche e idrologiche in gran parte dell'Europa, con l'eccezione delle regioni settentrionali europee. Dunque, ci si aspetta un significativo aumento dei decessi attribuibili ai cambiamenti climatici in Europa, con un divario geografico evidente tra le regioni settentrionali e meridionali. Le regioni dell'Europa meridionale saranno più colpite dal riscaldamento globale, con un aumento dei decessi correlati a eventi di calore, stress idrico, perdita di habitat, domanda di energia per il raffreddamento e incendi boschivi. L'area mediterranea sembra essere particolarmente vulnerabile ai cambiamenti climatici (Ciscar et al., 2018).

Tra gli effetti indiretti degli eventi climatici estremi, particolare attenzione va dedicata alla prevenzione delle malattie trasmesse dall'acqua, il cui rischio è amplificato da anomalie termiche ed eventi meteorologici avversi (Funari et al., 2012). Anche se non esiste un sistema di sorveglianza nazionale specifico, numerosi studi hanno evidenziato il ruolo di eventi estremi, elevate temperature e danni alle infrastrutture di distribuzione e trattamento dell'acqua nella qualità delle acque destinate alla balneazione e all'approvvigionamento idrico. Inoltre, le variabili meteorologiche e climatiche contribuiscono al rischio di sviluppo di organismi patogeni come le alghe tossiche e i cianobatteri. Negli ultimi anni, molte regioni italiane hanno riportato problematiche legate allo sviluppo di

cianobatteri produttori di tossine neurotossiche ed epatotossiche in invasi d'acqua naturali e artificiali utilizzate per l'approvvigionamento di acqua potabile (Lucentini & Ottaviani, 2011b, 2011a).

Un altro rischio meno evidente associato all'aumento delle temperature è il rilascio di sostanze chimiche tossiche, come il mercurio, dovuto allo scioglimento del permafrost (Schuster et al., 2018). L'innalzamento della temperatura dell'acqua superficiale può accelerare la generazione e l'accumulo di metilmercurio e inquinanti organici persistenti nei pesci, con potenziali conseguenze sulla salute delle persone che li consumano (Dijkstra et al., 2013).

Il progressivo scioglimento dei ghiacci e l'aumento della temperatura della superficie del mare hanno portato all'innalzamento del livello del mare, e si prevede che precipitazioni intense sempre più frequenti contribuiranno all'aumento delle inondazioni superficiali e fluviali. Queste inondazioni hanno un impatto duraturo sulle persone attraverso sfollamenti, danni e perdite finanziarie, oltre a interrompere la fornitura di servizi essenziali come l'assistenza sanitaria, l'approvvigionamento idrico e i servizi igienico-sanitari, generando ulteriori rischi per la salute. Ad esempio, le persone che vivono in abitazioni allagate sono più esposte al rischio di infezioni, poiché l'umidità favorisce la crescita di microrganismi (Menne & Murra, 2013). Le inondazioni possono anche avere effetti inaspettati, liberando sostanze chimiche nell'ambiente attraverso il rilascio da discariche o rimobilizzando inquinanti presenti nel suolo e nel limo. Un esempio è l'aumento dell'esposizione umana al mercurio a causa dell'erosione del suolo dovuta alle inondazioni (Krabbenhoft & Sunderland, 2013).

2.2 Le strategie di adattamento e mitigazione ai cambiamenti climatici

Nel corso dell'ultimo ventennio sono state portate avanti diverse strategie per l'adattamento e la mitigazione ai cambiamenti climatici. Queste strategie coinvolgono intere comunità al fine di ridurre la vulnerabilità e affrontare gli impatti dei cambiamenti climatici: mirano a proteggere le persone, le risorse e l'ambiente locale. Dunque, politiche volte a favorire l'adattamento e la mitigazione degli impatti negativi dei cambiamenti climatici a livello locale, proteggono le persone e le risorse locali e contribuiscono alla sostenibilità a lungo termine delle comunità.

La mitigazione e l'adattamento sono approcci complementari che interagiscono l'uno con l'altro e riducono i rischi su scale temporali diverse. Secondo l'IPCC (2014) l'**adattamento** è il "*processo di aggiustamento del sistema naturale o antropico agli effetti del clima. Nei sistemi umani, l'adattamento al clima attuale e futuro cerca di limitare i danni degli impatti o sfruttare le opportunità*

Stato dell'arte

favorevoli. In alcuni sistemi naturali, l'intervento umano può agevolare l'adattamento al clima futuro e ai suoi impatti". Invece, per **mitigazione** si intende "qualsiasi intervento umano che riduca le fonti (*sources*) di rilascio, o rafforzi e potenzi le fonti di assorbimento (*sinks*) dei gas serra (*GHG*)" (IPCC, 2014).

Nel presente elaborato ci si occuperà di adattamento. I benefici derivanti dall'adattamento possono essere realizzati per affrontare rischi attuali e possono essere realizzati in un secondo momento per affrontare i rischi emergenti. Proprio per questo motivo, nell'ambito del presente lavoro ci si concentrerà in modo particolare sul tema dell'adattamento.

Secondo l'IPCC (2014) esistono due principali tipi di adattamento:

- **incrementale:** si concentra sulla conservazione dell'essenza e dell'integrità di un sistema o di un processo a una scala specifica. Le azioni di adattamento incrementale sono a breve e medio termine e mirano a ridurre gli impatti in contesti vulnerabili. Possono includere interventi mirati per migliorare le prestazioni termiche e il comfort indoor, nonché trasformazioni localizzate delle aree aperte in risposta a emergenze climatiche. Questi interventi sono spesso parte di processi di riqualificazione urbana e vengono attuati in aree considerate particolarmente critiche.
- **trasformativo:** comporta una modifica sostanziale degli attributi di un sistema in risposta al cambiamento climatico. Comprende l'innovazione tecnologica e la sua introduzione attraverso progetti pilota, che influenzano il comportamento microclimatico ed ambientale di distretti ed elementi urbani. Questo tipo di adattamento richiede spesso la modifica della morfologia degli elementi urbani e delle parti dei tessuti urbani per favorire la ventilazione naturale, l'apporto diretto di luce solare e migliorare il comfort all'aperto.

Inoltre, l'adattamento può avvenire attraverso vari approcci (IPCC, 2014; Wilson & Piper, 2010):

- **preventivo:** si tratta di azioni di adattamento intraprese prima che gli impatti dei cambiamenti climatici diventino evidenti o si manifestino. Questo tipo di adattamento è anche chiamato "adattamento proattivo".
- **reattivo:** coinvolge azioni di adattamento in risposta ai cambiamenti climatici che si stanno già verificando, ad esempio, la preparazione di sistemi di emergenza e protezione civile.
- **autonomo:** questo tipo di adattamento non è una risposta cosciente ai cambiamenti climatici, ma è innescato da modifiche ecologiche nei sistemi naturali o da cambiamenti nei mercati o nel benessere delle comunità umane. È anche noto come "adattamento spontaneo".

- **pianificato:** è il risultato di decisioni politiche deliberate basate sulla consapevolezza dei cambiamenti climatici o dei cambiamenti imminenti e la necessità di agire per mantenere o raggiungere lo stato desiderato.

2.2.1 Le azioni di adattamento ai cambiamenti climatici nelle strategie internazionali, nazionali, regionali e locali

Le azioni di adattamento possono essere attuate tramite strategie comunitarie, nazionali, regionali e locali.

Nonostante l'attenzione per le questioni ambientali fosse già presente presso le Nazioni Unite fin dai primi anni '70, un momento significativo nella loro evoluzione è segnato dalla definizione del concetto di "*sviluppo sostenibile*". Questa definizione è stata introdotta nel 1987 nel Rapporto Brundtland, che la descrive come "processo di cambiamento nel quale lo sfruttamento delle risorse, l'andamento degli investimenti, l'orientamento dello sviluppo tecnologico e i mutamenti istituzionali sono in reciproca armonia e incrementano il potenziale attuale e futuro di soddisfazione dei bisogni e delle aspirazioni umane" (United Nations, 1987).

Un punto di svolta nella lotta ai cambiamenti climatici è stato rappresentato dalla Conferenza delle Nazioni Unite su Ambiente e Sviluppo (UNCED) tenutasi a Rio de Janeiro nel giugno 1992. Durante questa conferenza, sono state firmate diverse convenzioni e dichiarazioni di principi cruciali, tra le quali l'Agenda 21, che promuove il perseguimento del concetto di sviluppo sostenibile per tutti i popoli del mondo (Ministero della Transizione Ecologica, 2017).

L'Agenda 21 è un documento sottoscritto da oltre 170 Paesi e stabilisce obiettivi condivisi relativi all'ambiente, all'economia e alla società da raggiungere entro il XXI secolo. In particolare, il capitolo 28 riconosce il ruolo cruciale delle comunità locali nell'attuazione delle politiche di sviluppo sostenibile (United Nations Sustainable Development, 1992).

Un altro passo importante è stato il Protocollo di Kyoto, firmato il 11 dicembre 1997, ma diventato operativo solo il 16 febbraio 2005. Questo accordo internazionale, basato su base volontaria, aveva l'obiettivo di ridurre le emissioni di gas serra dei singoli Paesi rispetto ai livelli del 1990.

Anche il 2015 è stato un anno fondamentale: i governi dei 193 Paesi membri delle Nazioni Unite hanno sottoscritto l'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile ed hanno firmato l'Accordo di Parigi. L'Agenda 2030 d'azione mira a migliorare la vita delle persone, a preservare il pianeta e a promuovere la prosperità, attraverso 17 Obiettivi per lo Sviluppo Sostenibile (SDGs) (Figura 6) che si suddividono ulteriormente in 169 traguardi da raggiungere entro il 2030. In particolare, l'obiettivo 11, a sua volta

Stato dell'arte

diviso in ulteriori 10 traguardi, chiede di “rendere le città e gli insediamenti umani inclusivi, sicuri, resilienti e sostenibili” (United Nations, 2015).



*Figura 6 - I 17 obiettivi per lo sviluppo sostenibile
(Fonte: United Nations, 2015)*

L'Accordo di Parigi (COP21), sottoscritto il 12 dicembre 2015 durante la 21^a Conferenza delle Parti firmatarie della Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (UNFCCC), ed entrato in vigore il 4 novembre 2016, presenta un piano d'azione volto a mitigare il riscaldamento globale. Il suo obiettivo principale è di stabilizzare le concentrazioni di gas serra nell'atmosfera a un livello che prevenga interferenze dannose dell'attività umana sul sistema climatico. In particolare, mira a limitare l'aumento della temperatura media globale al di sotto del limite di 2 °C rispetto ai livelli preindustriali, con un ulteriore obiettivo di limitare tale aumento a 1,5 °C, poiché ciò contribuirebbe a ridurre i rischi e gli impatti dei cambiamenti climatici. L'Accordo non stabilisce obiettivi specifici di riduzione delle emissioni di gas serra per ciascun Paese, ma fornisce un'indicazione più generale, affermando che " al fine di conseguire l'obiettivo di lungo termine di limitazione della temperatura, le Parti mirano a raggiungere il picco globale di emissioni di gas serra il più presto possibile" (Caminiti & La Motta, 2016).

Nel novembre 2016, la Commissione europea ha delineato la sua strategia per mettere in atto l'Agenda2030, focalizzandosi sull'integrazione degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDGs) nelle politiche dell'UE e rendendo il concetto di sviluppo sostenibile il faro delle strategie politiche della Commissione.

Nel dicembre 2019, il Consiglio europeo ha adottato l'obiettivo ambizioso di raggiungere la neutralità climatica dell'Unione Europea entro il 2050. In questo contesto, la Commissione europea

ha presentato il *Green Deal*, un pacchetto di iniziative politiche volte a raggiungere proprio la neutralità climatica in Europa entro il 2050. Il Green Deal è parte integrante della strategia dell'UE per implementare l'Agenda 2030 e gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile delle Nazioni Unite, che coprono una vasta gamma di settori, tra cui edilizia, biodiversità, energia, trasporti e alimentazione (Commissione Europea, 2019). La Commissione ha identificato sette punti chiave all'interno del Green Deal: promuovere fonti di energia rinnovabile, sostenere un'industria più ecocompatibile, favorire la costruzione sostenibile, promuovere la mobilità ecologica, preservare la biodiversità, garantire un'agricoltura sostenibile ed eliminare l'inquinamento (Figura 7).



Figura 7 - European Green Deal
(Fonte: <https://idea-re.net/articoli/bandi-europei/eic-green-deal>)

Il 24 febbraio 2021, la Commissione europea ha adottato la comunicazione "La nuova strategia dell'UE sull'adattamento ai cambiamenti climatici: costruire un'Europa resiliente". Questa strategia mira a plasmare una visione a lungo termine, con l'obiettivo di rendere l'Unione Europea una società completamente preparata per affrontare gli impatti inevitabili dei cambiamenti climatici entro il 2050, in linea con gli impegni dell'Accordo di Parigi e la proposta di legge europea sul clima. La strategia ha come obiettivo principale di rafforzare la capacità di adattamento dell'UE e contribuire a ridurre al minimo la vulnerabilità ai cambiamenti climatici. A tal fine, l'adattamento deve essere più *intelligente*, per comprendere al meglio gli impatti climatici e le possibili soluzioni, più *sistemico*, per sostenere lo sviluppo di politiche di adattamento a tutti i livelli e in tutti i settori pertinenti, e infine più *rapido*, per accelerare l'attuazione delle misure di adattamento in tutti i settori e a tutti i livelli.

Stato dell'arte

Anche in Italia, negli ultimi anni, sono state adottate strategie per affrontare i cambiamenti climatici con la redazione di nuovi Piani Nazionali. Un importante passo in questo senso è stato l'elaborazione del Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (PNACC), finanziato dal Ministero dell'Ambiente e coordinato dal Centro euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC). Il PNACC si propone di fornire un supporto alle istituzioni a livello nazionale, regionale e locale per individuare e selezionare le azioni più efficaci al fine di affrontare le sfide legate ai cambiamenti climatici e per integrare criteri di adattamento negli strumenti esistenti. Questo obiettivo si declina in quattro finalità specifiche:

- ridurre la vulnerabilità dei sistemi naturali, sociali ed economici agli impatti dei cambiamenti climatici;
- migliorare la capacità di adattamento;
- individuare opportunità;
- promuovere la coordinazione tra le azioni.

Il PNACC fornisce inoltre un quadro aggiornato delle tendenze climatiche a livello nazionale, scenari futuri e azioni di adattamento, nonché strumenti per il monitoraggio e la valutazione dell'efficacia. Esamina anche gli impatti e le vulnerabilità territoriali, evidenziando le aree a rischio (Ministero dell'Ambiente, 2017).

A livello regionale, nel 2012 Regione Lombardia ha completato la redazione delle Linee Guida per un Piano di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (PACC) necessarie per sviluppare la *Strategia Regionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici* tra il 2013 e il 2014. La strategia ha aggiornato e approfondito le basi di conoscenza climatica, considerando i cambiamenti climatici passati e in atto, la variabilità climatica e i cambiamenti climatici futuri a livello regionale.

A partire dalla Strategia, nel 2015 sono iniziati i lavori per sviluppare il *Documento di Azione Regionale sull'Adattamento al Cambiamento Climatico*. Questo documento ha lo scopo di identificare le aree prioritarie in cui intervenire, in risposta alle esigenze della pianificazione settoriale. Il Documento di Azione rappresenta un importante strumento di governance, in quanto identifica le aree prioritarie in cui il clima produce impatti sul territorio e individua misure per ridurre al minimo i rischi e gli impatti sulla popolazione, sulle risorse naturali e sulle infrastrutture, nonché per aumentare la resilienza della società, dell'economia e dell'ambiente.

L'Unione Europea ha riconosciuto che le città rappresentano il contesto più adatto per affrontare la sfida della riduzione delle emissioni. Nel 2008 viene istituito il "Patto dei Sindaci" per coinvolgere le comunità locali nell'obiettivo di ridurre le emissioni del 20% rispetto al 1990. Questo impegno

richiede la creazione di Piani d'Azione che includano scadenze, risorse umane dedicate e attività di monitoraggio, informazione e educazione ambientale. Nel 2015 è stato introdotto un nuovo Patto che mira a ridurre le emissioni del 40% entro il 2030, affrontando sia la mitigazione che l'adattamento ai cambiamenti climatici. Le autorità locali si impegnano a creare Piani d'Azione per l'Energia Sostenibile e il Clima (PAESC) entro il 2030, adottando un approccio congiunto per ridurre le emissioni di CO₂ e mitigare i rischi legati ai cambiamenti climatici. Il PAESC è basato su due elementi centrali: la mitigazione, mirata a ridurre le emissioni di CO₂, e l'adattamento, che si concentra sulla riduzione dei rischi associati ai cambiamenti climatici.

Nel caso del Comune di Brescia, il Consiglio Comunale ha aderito al Patto nel 2020 e ha approvato il PAESC nel 2021.

2.3 Gli strumenti di analisi degli impatti dei cambiamenti climatici in ambito urbano presenti in letteratura

Comprendere i fattori di vulnerabilità tipici delle città, che influenzano la gravità e la frequenza dei rischi per la salute, la sicurezza e il benessere della popolazione legati ai cambiamenti climatici, è un passo fondamentale per sviluppare strategie e misure di adattamento atte a mitigare i loro effetti negativi. Con le ondate di calore sempre più gravi e frequenti in molte parti del mondo, l'interesse per una migliore comprensione dei fenomeni microclimatici urbani e locali è cresciuto sia nella ricerca che nella pratica della pianificazione e progettazione urbana (Eldesoky et al., 2021).

Ne è un esempio la Città di Milano che ha inserito all'interno del proprio Piano Aria e Clima² (in fase di Attuazione) l'obiettivo "4.2 Raffrescamento urbano e riduzione del fenomeno "isola di calore"" che prevede, come una delle principali misure di adattamento per aumentare la vivibilità, la salubrità e il comfort degli spazi urbani, di trasformare Milano in una città verde e ombreggiata nello spazio pubblico e privato. Considerata l'elevata urbanizzazione della città e la presenza diffusa di sottoservizi, risulta cruciale il contributo di tetti e pareti verdi che riducono il fabbisogno energetico degli edifici e l'afflusso di acqua piovana alla rete di drenaggio, migliorando la qualità dell'aria e la biodiversità locale. Non da meno risultano essere prioritari anche interventi di de-pavimentazione per convertire aree ad ogni impermeabilizzate in aree verdi. Già nel 2019 il Comune di Milano ha

² <https://www.comune.milano.it/aree-tematiche/ambiente/aria-e-clima/piano-aria-clima>

partecipato al progetto Europeo CLEVER Cities³ per sperimentare infrastrutture verdi e soluzioni naturalistiche innovative in città.

Ad una scala più vasta, la Città Metropolitana di Milano ha partecipato al progetto LifeMetroAdapt⁴ si pone l'obiettivo di promuovere la creazione di una solida governance relativa al cambiamento climatico che sia comune a tutte le autorità locali e a produrre gli strumenti che permettano loro di implementare efficienti misure di adattamento. METRO ADAPT si focalizza su alcuni dei problemi climatici affrontati nelle aree metropolitane, in particolare le ondate di calore, le isole di calore urbane e le alluvioni locali. Il progetto ha sviluppato interessanti linee guida e schede tecniche sulle misure di adattamento a supporto della pianificazione urbana.

2.3.1 L'individuazione delle Local Climate Zone in ambito urbano

Nei contesti urbani, le ondate di calore estreme e l'effetto isola di calore urbana (UHI) sono manifestazioni evidenti degli effetti negativi dei cambiamenti climatici, con conseguenze gravi per il benessere e la salute delle persone, nonché per la richiesta energetica e la resilienza complessiva delle città. L'idea delle *Local Climate Zones* (LCZ), inizialmente introdotta da Stewart e Oke (2012) e descritta come “regioni di superficie uniforme, struttura, materiale e attività umana che si estendono da centinaia di metri a diversi chilometri in scala orizzontale”, offre opportunità promettenti per una valutazione più precisa dell'UHI a livello locale, anziché affidarsi esclusivamente alla tradizionale distinzione tra zone urbane e rurali. In particolare, il sistema di classificazione LCZ mette in relazione le caratteristiche fisiche e morfologiche dell'ambiente urbano con le condizioni climatiche a livello micro-locale (Eldesoky et al., 2019). Il termine Local Climate Zone indica che le analisi sono svolte a scala locale, di natura climatica e di rappresentazione zonale (Stewart, 2011b). Grazie a questa classificazione standardizzata, il concetto di LCZ può essere applicato al paesaggio in diverse regioni del mondo per confrontare il clima urbano (Zhao et al., 2019).

Il paesaggio è composto da 17 classi di LCZ standard, di cui 15 sono definite in base alla struttura e alla copertura superficiale, mentre le restanti 2 sono identificate in base ai materiali da costruzione e alle emissioni di calore di origine antropogenica. Questo insieme è suddiviso in due categorie principali: i "tipi costruiti" da 1 a 10 e i "tipi di copertura del suolo" identificati con le lettere da A a G (come mostrato in Figura 8).

³ <https://milanoclever.net/>

⁴ <https://www.lifemetroadapt.eu/it/il-progetto/>

I tipi costruiti consistono in elementi costruiti situati su una copertura del suolo predominante, che può essere pavimentata nelle zone compatte o ricoperta da piante basse e alberi sparsi nelle zone aperte (Stewart & Oke, 2012). Ogni LCZ è denominata individualmente e ordinate in base a una (o più) proprietà distintive della superficie (Tabella 2). I parametri individuati sono suddivisi in valori delle proprietà geometriche e di copertura della superficie (1 - 7) e valori delle proprietà termiche, radiative e metaboliche (8 - 10) (Stewart & Oke, 2012):

1. **Sky View Factor (SVF)**: rapporto tra la quantità di cielo visibile dal livello del suolo rispetto a quella di un emisfero non ostruito;
2. **Aspect ratio (λ_s)**: rapporto medio altezza/larghezza dei canyon stradali (LCZ 1-7), distanza tra gli edifici (LCZ 8-10) e distanza tra gli alberi (LCZ A-G);
3. **Building Surface Fraction (BSF)**: rapporto tra l'area in pianta dell'edificio e l'area dell'unità territoriale considerata (%);
4. **Impervious Surface Fraction (ISF)**: rapporto tra l'area del piano impermeabile (pavimentata, roccia) e l'area dell'unità territoriale considerata (%);
5. **Pervious Surface Fraction (PSF)**: rapporto tra l'area del piano permeabile (suolo nudo, vegetazione, acqua) e l'area dell'unità territoriale considerata (%);
6. **Height of roughness elements (BH)**: media geometrica delle altezze degli edifici (LCZ 1-10) e delle altezze di alberi/piante (LCZ A-F) (m);
7. **Terrain roughness class (TR)**: classificazione di Davenport et al. (2000) della rugosità effettiva del terreno (z_0) per paesaggi urbani e di campagna;
8. **Surface admittance (SA)**: capacità della superficie di accettare o rilasciare calore ($Jm^{-2}s^{-1/2}K^{-1}$). Varia con l'umidità del suolo e la densità del materiale. In letteratura esistono poche stime dell'ammettenza su scala locale; i valori qui riportati sono quindi soggettivi e vanno usati con cautela. Si noti che la "superficie" nella LCZ A è indefinita e la sua ammettenza non è nota.

Stato dell'arte

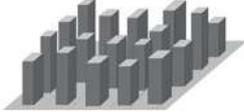
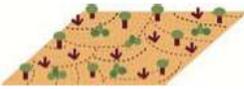
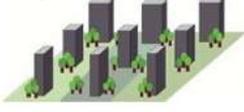
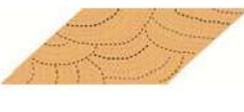
Built types	Definition	Land cover types	Definition
1. Compact high-rise 	Dense mix of tall buildings to tens of stories. Few or no trees. Land cover mostly paved. Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	A. Dense trees 	Heavily wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
2. Compact midrise 	Dense mix of midrise buildings (3–9 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.	B. Scattered trees 	Lightly wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
3. Compact low-rise 	Dense mix of low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.	C. Bush, scrub 	Open arrangement of bushes, shrubs, and short, woody trees. Land cover mostly pervious (bare soil or sand). Zone function is natural scrubland or agriculture.
4. Open high-rise 	Open arrangement of tall buildings to tens of stories. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	D. Low plants 	Featureless landscape of grass or herbaceous plants/crops. Few or no trees. Zone function is natural grassland, agriculture, or urban park.
5. Open midrise 	Open arrangement of midrise buildings (3–9 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	E. Bare rock or paved 	Featureless landscape of rock or paved cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert (rock) or urban transportation.
6. Open low-rise 	Open arrangement of low-rise buildings (1–3 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Wood, brick, stone, tile, and concrete construction materials.	F. Bare soil or sand 	Featureless landscape of soil or sand cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert or agriculture.
7. Lightweight low-rise 	Dense mix of single-story buildings. Few or no trees. Land cover mostly hard-packed. Lightweight construction materials (e.g., wood, thatch, corrugated metal).	G. Water 	Large, open water bodies such as seas and lakes, or small bodies such as rivers, reservoirs, and lagoons.
8. Large low-rise 	Open arrangement of large low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Steel, concrete, metal, and stone construction materials.	VARIABLE LAND COVER PROPERTIES	
9. Sparsely built 	Sparse arrangement of small or medium-sized buildings in a natural setting. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees).	b. bare trees	Leafless deciduous trees (e.g., winter). Increased sky view factor. Reduced albedo.
10. Heavy industry 	Low-rise and midrise industrial structures (towers, tanks, stacks). Few or no trees. Land cover mostly paved or hard-packed. Metal, steel, and concrete construction materials.	s. snow cover	Snow cover >10 cm in depth. Low admittance. High albedo.
		d. dry ground	Parched soil. Low admittance. Large Bowen ratio. Increased albedo.
		w. wet ground	Waterlogged soil. High admittance. Small Bowen ratio. Reduced albedo.

Figura 8 - Tipi di Local Climate Zone
(Fonte: Stewart & Oke, 2012)

Tabella 2 - Proprietà fisiche per ogni classe di LCZ
(Fonte: Stewart & Oke, 2012)

Local climate zone (LCZ)	Sky view factor	Aspect ratio	Building surface fraction	Impervious surface fraction	Pervious surface fraction	Height of roughness elements	Terrain roughness class	Surface admittance	Surface albedo	Anthropogenic heat output
LCZ 1 Compact high-rise	0,2 - 0,4	> 2	40 - 60	40 - 60	< 10	> 25	8	1,500 - 1,800	0,10 - 0,20	50 - 300
LCZ 2 Compact midrise	0,3 - 0,6	0,75 - 2	40 - 70	30 - 50	< 20	10 - 25	6 - 7	1,500 - 2,200	0,10 - 0,20	< 75
LCZ 3 Compact Low-rise	0,2 - 0,6	0,75 - 1,5	40 - 70	20 - 50	< 30	3 - 10	6	1,200 - 1,800	0,10 - 0,20	< 75
LCZ 4 Open high-rise	0,5 - 0,7	0,75 - 1,25	20 - 40	30 - 40	30 - 40	> 25	7 - 8	1,400 - 1,800	0,12 - 0,25	< 50
LCZ 5 Open midrise	0,5 - 0,8	0,3 - 0,75	20 - 40	30 - 50	20 - 40	10 - 25	5 - 6	1,400 - 2,000	0,12 - 0,25	< 25
LCZ 6 Open low-rise	0,6 - 0,9	0,3 - 0,75	20 - 40	20 - 50	30 - 60	3 - 10	5 - 6	1,200 - 1,800	0,12 - 0,25	< 25
LCZ 7 Lightweight low-rise	0,2 - 0,5	1 - 2	60 - 90	< 20	< 30	2 - 4	4 - 5	800 - 1,500	0,15 - 0,35	< 35
LCZ 8 Large low-rise	> 0,7	0,1 - 0,3	30 - 50	40 - 50	< 20	3 - 10	5	1,200 - 1,800	0,15 - 0,25	< 50
LCZ 9 Sparsely built	> 0,8	0,1 - 0,25	10 - 20	< 20	60 - 80	3 - 10	5 - 6	1,000 - 1,800	0,15 - 0,25	< 10
LCZ 10 Heavy industry	0,6 - 0,9	0,2 - 0,5	20 - 30	20 - 40	40 - 50	5 - 15	5 - 6	1,000 - 2,500	0,12 - 0,20	> 300
LCZ A Dense trees	< 0,4	> 1	< 10	< 10	> 90	3 - 30	8	unknown	0,10 - 0,20	0
LCZ B Scattered trees	0,5 - 0,8	0,25 - 0,75	< 10	< 10	> 90	3 - 15	5 - 6	1,000 - 1,800	0,15 - 0,25	0
LCZ C Bush, scrub	0,7 - 0,9	0,25 - 1,0	< 10	< 10	> 90	< 2	4 - 5	700 - 1,500	0,15 - 0,30	0
LCZ D Low plants	> 0,9	< 0,1	< 10	< 10	> 90	< 1	3 - 4	1,200 - 1,600	0,15 - 0,25	0
LCZ E Bare rock or paved	> 0,9	< 0,1	< 10	> 90	< 10	< 0,25	1 - 2	1,200 - 2,500	0,15 - 0,30	0
LCZ F Bare soil or sand	> 0,9	< 0,1	< 10	< 10	> 90	< 0,25	1 - 2	600 - 1,400	0,20 - 0,35	0
LCZ G Water	> 0,9	< 0,1	< 10	< 10	> 90	-	1	1,500	0,02 - 0,10	0

9. **Surface albedo (Albedo):** Rapporto tra la quantità di radiazione solare riflessa da una superficie e quella ricevuta. Varia in base al colore, all'umidità e alla rugosità della superficie.

10. **Anthropogenic heat output (AHO):** Densità media annuale del flusso di calore ($W m^{-2}$) derivante dalla combustione di combustibili e dall'attività umana (trasporti, raffreddamento/riscaldamento degli ambienti, processi industriali, metabolismo umano). Varia significativamente con la latitudine, la stagione e la densità di popolazione.

Combinazioni uniche di queste proprietà forniscono un regime termico distintivo per ogni LCZ (Geletič et al., 2016).

La mappatura delle LCZ si è rivelato un approccio efficace per esaminare le configurazioni e i climi delle aree urbane a livello locale. Questo approccio offre molteplici vantaggi, tra cui il supporto per l'analisi dell'effetto dell'isola di calore urbano (UHI), nonché il sostegno alla pianificazione e allo sviluppo delle aree urbane. Le LCZ hanno acquisito importanza come concetto con notevoli implicazioni per la pianificazione e lo sviluppo resiliente ai cambiamenti climatici. Di conseguenza, il loro utilizzo trova numerose applicazioni nei settori della pianificazione urbana, del telerilevamento, dell'adattamento ai cambiamenti climatici, della gestione del rischio di catastrofi, delle scienze meteorologiche e ambientali (Aslam & Rana, 2022).

In tutto il mondo, vari studi hanno utilizzato diverse metodologie per creare mappe delle LCZ. Secondo Zheng et al. (2018) e Aslam & Rana (2022), esistono principalmente tre diversi approcci per la **raccolta dei dati**:

- *Misurazioni in sito*;
- *Remote sensing (telerilevamento)*;
- *Sistema di Informazione Geografica (GIS)*.

L'approccio delle **misurazioni in sito** si basa sull'utilizzo di dati ottenuti da stazioni meteorologiche, misurazioni mobili e dati amministrativi. I dataset ottenuti dalle *stazioni meteorologiche* vengono utilizzati per analizzare la temperatura dell'aria, l'umidità e le condizioni del vento nelle specifiche zone climatiche. I dati temporali provenienti dalle stazioni meteorologiche sono stati impiegati con successo anche per condurre simulazioni dei modelli climatici urbani e convalidare i relativi risultati. Un esempio di ciò è rappresentato da uno studio condotto nella città di Brno, nella Repubblica Ceca, in cui tali dati sono stati utilizzati nel modello MUKLUMO_3 per simulare le reazioni di diverse Zone Climatiche Locali (LCZ) ai futuri cambiamenti climatici (Geletič et al., 2019). Diversi studi hanno sfruttato *misurazioni mobili* al fine di acquisire dati sulla temperatura

dell'aria in diverse zone, per comprenderne le condizioni termiche. Un esempio di questo approccio è rappresentato da uno studio condotto a Hong Kong, Cina (Shi et al., 2018), che ha utilizzato misurazioni mobili per ottenere letture della temperatura dell'aria in varie aree. In modo analogo, uno studio condotto a Szeged, in Ungheria, ha impiegato misurazioni mobili per determinare la temperatura dell'aria utilizzando automobili su percorsi di attraversamento stabiliti (Lelovics et al., 2014). In aggiunta a queste metodologie, sono stati impiegati anche *dati amministrativi* dettagliati per creare le mappe delle LCZ. Ad esempio, nella zona di Dallas-Fort Worth, Austin e San Antonio, nello stato del Texas, USA, i dati governativi sono stati utilizzati per determinare la densità della popolazione e l'uso del suolo, che sono stati successivamente integrati nella generazione delle mappe LCZ (Zhao et al., 2019).

Il **Remote sensing** (o *telerilevamento*) si basa sull'analisi di *immagini satellitari* per creare mappe di classificazione delle LCZ. Un esempio di questa metodologia è stato descritto nello studio condotto da Bechtel & Daneke (2012). Gli autori hanno utilizzato immagini Landsat (5 e 7) per proporre un metodo di estrazione automatizzata della struttura urbana nell'ambito della climatologia urbana. Ancora, immagini derivate da satelliti Landsat hanno permesso di ricavare per la città di Amburgo (Germania) modelli per il calcolo medio delle UHI (Bechtel et al., 2012), mentre a Madrid (Spagna) sono state utilizzate per estrarre le classi urbane e integrarle nel file di uso del suolo (Brousse et al., 2016). In generale le immagini satellitari di tipo Landsat, Sentinel e ASTER vengono principalmente utilizzate per lo sviluppo delle LCZ nelle aree urbane. La *fotografia* è un'ulteriore risorsa che può essere impiegata per identificare correttamente le LCZ. Alcuni studi hanno sfruttato la cartografia fotogrammetrica per determinare l'altezza delle infrastrutture. Ad esempio, dati fotogrammetrici preesistenti sono stati utilizzati per calcolare l'altezza degli edifici nelle zone di Brno e Hradec Kralove, nella Repubblica Ceca (Geletič & Lehnert, 2016).

Molti studi hanno fatto uso di dati **GIS (Sistemi Informativi Geografici)** o mappe esistenti per supportare la creazione di mappe delle Zone Climatiche Locali (LCZ). Uno dei set di dati più comunemente utilizzati consiste nelle aree estratte utilizzando la piattaforma Google Earth. Queste risorse sono state ampiamente impiegate per arricchire la mappatura delle LCZ in vari contesti di ricerca. I dati di Google Earth sono stati utilizzati per la mappatura delle LCZ nelle città di Heraklion (Grecia) (Mitraka et al., 2015), Colombo (Sri Lanka) (Perera & Emmanuel, 2018), e Oslo (Norvegia) (Sigler et al., 2022). L'utilizzo combinato di Open Street Map con dati di Remote Sensing sono stati utilizzati da Oliveira et al. (2020) per sviluppare e convalidare un metodo basato sul GIS che traduca le informazioni open source in una classificazione precisa di LCZ per cinque città europee (Atene, Barcellona, Lisbona, Marsiglia e Napoli).

Il **metodo** più ampiamente adottato per la mappatura delle Local Climate Zone (LCZ) è la procedura *World Urban Database and Access Portal Tools (WUDAPT)*⁵. Circa il 33,6% dei circa 68 studi considerati da Aslam & Rana (2022) ha integrato questo metodo nella loro ricerca empirica sulle LCZ. La metodologia proposta si basa sull'uso di dati e software liberamente disponibili ed è utilizzata per generare mappe delle LCZ all'interno di aree urbane. È importante notare che questo metodo non richiede dati estremamente dettagliati o competenze eccezionali per creare tali mappe. Tuttavia, questa semplicità potrebbe influire sulla qualità dei risultati e potrebbe essere necessaria una calibrazione supplementare utilizzando metodi più precisi per ottenere risultati ottimali. Gli studi hanno utilizzato la procedura WUDAPT per mappare le LCZ in Hong Kong (Cina) (R. Wang et al., 2018), a Phoenix e Las Vegas (USA) (C. Wang et al., 2018) e a Oslo (Norvegia) (Sigler et al., 2022).

I metodi e le strutture basati sui *Sistemi Informativi Geografici (GIS)* possono sfruttare sia dati vettoriali che dati raster per la mappatura delle LCZ, consentendo così di ottenere risultati più precisi. I metodi basati su dati raster possono essere utilizzati per identificare le caratteristiche urbane e le informazioni sugli edifici (Zheng et al., 2018). In aggiunta, il telerilevamento può essere incorporato per l'analisi basata su immagini, impiegando tecniche di classificazione sia supervisionate che non supervisionate (Bechtel et al., 2016). D'altra parte, i metodi basati su dati vettoriali catturano i confini con maggiore precisione e generano mappe LCZ più dettagliate (Perera & Emmanuel, 2018).

Oltre alla procedura WUDAPT e alle strutture GIS diversi *algoritmi* di classificazione hanno generato mappe delle LCZ. Ne sono un esempio gli studi di Bechtel et al. (2012), Yoo et al. (2020) e Huang et al. (2021) che, con un dataset basato sul Remote Sensing, hanno utilizzato diversi algoritmi per la classificazione delle LCZ nei diversi casi studio.

Al contrario, vari studi hanno utilizzato esclusivamente *parametri* definiti dalla copertura urbana per classificare il territorio analizzato. I parametri e gli intervalli dei valori sono stati forniti da Stewart & Oke (2012). Uno studio sulla capitale della Cina, Pechino, ha utilizzato i parametri dello Sky View Factor, Height of roughness elements, Building surface fraction, Pervious surface fraction e Impervious surface fraction (Quan, 2019). Sono stati utilizzati quattro passaggi gerarchici per cercare la corrispondenza tra i parametri indicati in letteratura e quelli ottenuti. Non è stata tentata alcuna modifica dello schema standard LCZ data la frequenza delle tipologie supplementari, ma piuttosto queste sono state incluse per ridurre al minimo le lacune nello schema. Altri studi, come quello condotto sulla città di Heraklion in Grecia, hanno estratto i valori dei parametri (sky view factor, building surface fraction, pervious e impervious surface fraction, height of roughness elements,

⁵ <https://www.wudapt.org/>

surface albedo) da Google Earth, dalle immagini satellitari Landsat e con l'utilizzo di dati amministrativi (Mitraka et al., 2015).

Alcuni studi hanno incluso nell'ambito delle loro ricerche modelli meteorologici e climatici avanzati. Un esempio è il Weather Research and Forecasting (WRF), sviluppato in collaborazione tra diverse organizzazioni e università. Questo modello è stato creato per investigare l'impatto dell'urbanizzazione sulle condizioni meteorologiche e stabilire connessioni tra le LCZ e i modelli di previsione meteorologica. Brousse et al. (2016) lo utilizza per il caso studio della città di Madrid, in Spagna, durante l'inverno e l'estate. I risultati dell'utilizzo dei dati derivati da LCZ vengono confrontati con quelli utilizzando i dati CORINE sulla copertura del suolo e mostrano che lo schema LCZ migliora le prestazioni del modello.

Anche se non esaustiva, la Tabella 3 offre un riepilogo rappresentativo delle varie alternative di dataset e metodi di analisi presenti in letteratura per mappare le Local Climate Zone su un territorio.

2.3.2 L'individuazione delle Land Surface Temperature in ambito urbano

Solitamente vengono utilizzati tre metodi per misurare l'UHI: metodo della differenza della temperatura urbano-rurale, metodo dei sensori e metodo del telerilevamento (Goldreich, 1995). Sebbene il confronto tra il clima urbano e quello rurale sia l'approccio più comune per analizzare l'effetto UHI, i ricercatori hanno studiato il fenomeno anche sulla base delle misurazioni comparative della temperatura di superfici vegetate e non vegetate (Wong et al., 2007; Wong & Yu, 2005). Gli altri metodi vengono utilizzati per le misurazioni della temperatura dell'aria in prossimità della superficie terrestre e della temperatura della superficie terrestre (LST), ampiamente impiegate per ottenere l'intensità della UHI (Sun et al., 2020). I progressi nei metodi basati su sensori, in particolare nei sensori mobili, stanno aprendo nuove opportunità per la quantificazione della temperatura dell'aria su scala urbana utilizzando un numero limitato di dati (Advisory Committee for Environmental Research and Education, 2018). Sebbene le reti di sensori stazionari siano eccellenti per caratterizzare modelli ampi e dinamiche temporali dell'Isola di Calore Urbano (Y.-C. Chen et al., 2018; Smoliak et al., 2015), i sensori mobili (installati su veicoli, biciclette, droni) agevolano l'accesso a zone altrimenti difficili da campionare e consentono misurazioni continue della copertura del suolo. (Ziter et al., 2019). Per esempio, Rajkovich & Larsen (2016), Brandsma & Wolters (2012) e Borbora & Das (2014) hanno utilizzato sensori applicati sulle biciclette per studiare l'intensità delle UHI.

Tabella 3 - Sintesi dei metodi di raccolta dei dati e di analisi per le LCZ

Autori, anno	Caso Studio	Raccolta dei dati	Fonte	Metodo di analisi
<i>Bechtel & Daneke, 2012</i>	#NA	Remote sensing	Landsat Landsat	GIS
<i>Bechtel et al., 2012</i>	Amburgo (Germania)	Remote sensing	Landsat	Algoritmi
<i>Lelovics et al., 2014</i>	Szeged (Ungheria)	Misurazioni in sito	Misurazioni mobili	GIS
<i>Mitraka et al., 2015</i>	Heraklion (Grecia)	GIS Remote Sensing Misurazioni in sito	Google Earth Landsat Dati amministrativi	Parametri e indicatori
<i>Bechtel et al., 2015</i>	#NA	Remote sensing GIS	Landsat Google Earth	GIS
<i>Geletič & Lehnert, 2016</i>	Brno, Hradec Králové Olomouc (Repubblica Ceca)	Remote sensing	Dati fotogrammetrici	Algoritmi
<i>Brousse et al., 2016</i>	Madrid (Spagna)	Remote sensing	Landsat	Modelli climatici
<i>Bechtel et al., 2016</i>	Khartoum (Sudan)	Remote sensing	Landsat	GIS
<i>Xu et al., 2017</i>	Guangzhou Wuhan (Cina)	Remote sensing	Landsat ASTER	Parametri e indicatori
<i>Y.C. Chen et al., 2017</i>	Tapei (Taiwan)	Remote sensing	Landsat	WUDAPT
<i>Perera & Emmanuel, 2018</i>	Colombo (Sri Lanka)	Misurazioni in sito GIS	Dati amministrativi Google Earth	GIS
<i>Zheng et al., 2018</i>	Hong Kong (Cina)	Misurazioni in sito Remote sensing	Dati amministrativi Landsat	GIS
<i>Hu & Zhu, 2018</i>	Berlino (Germania) Hong Kong (Cina) Parigi (Francia) Roma (Italia) Sao Paulo (Brasile)	Remote sensing GIS	Landsat 8 Sentinel 1 Open Street Map	Algoritmi
<i>C. Wang et al., 2018</i>	Phoenix (Arizona) Las Vegas (Nevada)	Remote sensing	Landsat	WUDAPT
<i>R. Wang et al., 2018</i>	Hong Kong (Cina)	Remote Sensing Misurazioni in sito	Landsat Dati amministrativi	WUDAPT GIS

Autori, anno	Caso Studio	Raccolta dei dati	Fonte	Metodo di analisi
<i>Zhao et al., 2019</i>	Dallas Fort Worth Austin San Antonio (Texas)	Misurazioni in sito	Dati amministrativi	GIS
<i>Ren et al., 2019</i>	20 città e 3 regioni in Cina	Remote sensing	Landsat	WUDAPT
<i>Quan, 2019</i>	Pechino (Cina)	Remote Sensing Misurazioni in sito	Landsat Dati amministrativi	Parametri e indicatori
<i>Geletič et al., 2019</i>	Praga Brno Novi Sad (Repubblica Ceca)	Remote sensing	Dati fotogrammetrici	Algoritmi
<i>Yoo et al., 2020</i>	Berlino (Germania) Seoul (Corea del Sud)	Remote sensing	Sentinel	Algoritmi
<i>Oliveira et al., 2020</i>	Atene (Grecia) Barcellona (Spagna) Lisbona (Portogallo) Marsiglia (Francia) Napoli (Italia)	GIS Remote sensing	Corine Land Cover OSM Landsat	GIS
<i>Huang et al., 2021</i>	32 città in Cina	Remote sensing	Landsat	Algoritmi
<i>Sigler et al., 2022</i>	Oslo (Norvegia)	Remote sensing GIS	Landsat Ortofoto Google Earth	WUDAPT GIS Algoritmi

#NA: Informazione non disponibile

Questi approcci però presentano diverse limitazioni significative, tra cui una risoluzione spaziale dei dati provenienti dalle stazioni meteorologiche grossolana e irregolare. A causa dei limiti associati ai metodi tradizionali, è emerso un crescente interesse per l'utilizzo dei dati di telerilevamento per stimare la temperatura della superficie terrestre (LST). Questo approccio consente di acquisire dati su vaste aree in modo rapido e regolare, offrendo una densità di campionamento spaziale molto superiore rispetto ai dati provenienti dalle stazioni meteorologiche (Feng et al., 2015). Nel presente elaborato, per la agevole accessibilità ai dati, si è scelto di utilizzare le LST per il calcolo delle UHI.

La temperatura della superficie terrestre (LST) è definita come la temperatura percepita quando la superficie terrestre viene toccata con le mani o la temperatura cutanea del suolo (Rajeshwari & Mani, 2014).

Stato dell'arte

Nel corso degli anni, i metodi di telerilevamento termico si sono affermati come strumenti affidabili, grazie allo sviluppo di nuovi sensori e tecniche. Gli approcci di telerilevamento (Sobrino et al., 2004) sfruttano l'inerzia termica dei materiali presenti sulla superficie terrestre e applicano modelli fisici per generare le LST. Ogni sistema satellitare dispone dei propri parametri di calibrazione per la misurazione del calore, associati alle bande termiche.

I metodi basati su dati satellitari nella mappatura della LST offrono il potenziale per fornire dati completi, essenziali per rilevare e monitorare l'effetto dell'Isola di Calore Urbano (UHI) (Aduah et al., 2012).

Esistono tre principali fonti di dati satellitari per recuperare l'LST:

1. MODIS⁶;
2. ASTER⁷;
3. Landsat⁸.

Il **Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)** è uno strumento scientifico presente a bordo dei satelliti Terra e Aqua della NASA. L'orbita attorno al nostro pianeta è pianificata in modo tale che il satellite Terra passi dal nord al sud attraverso l'equatore al mattino, mentre Aqua passi da sud a nord sopra l'equatore nel pomeriggio. Terra MODIS e Aqua MODIS osservano l'intera superficie terrestre ogni 1 o 2 giorni, acquisendo dati su 36 bande spettrali o gruppi di lunghezze d'onda.

L'**Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)** è uno dei cinque strumenti di telerilevamento presenti a bordo del satellite Terra, messo in orbita geostazionaria dalla NASA nel 1999. ASTER svolge un ruolo fondamentale nel fornire immagini ad alta risoluzione della Terra in quattordici diverse lunghezze d'onda. La risoluzione angolare delle immagini catturate varia da 15 a 90 metri.

Il programma **Landsat** offre la più lunga registrazione globale continua della superficie terrestre: dall'inizio degli anni '70, Landsat ha raccolto continuamente e costantemente informazioni spettrali dalla superficie terrestre. Il primo satellite Landsat 1 venne lanciato nel 1972, ma solo a partire dal 1982 (Landsat 4 e successivi) i satelliti iniziarono a trasportare radiometri infrarossi termici i cui dati sono adatti per la stima delle LST (Figura 9).

⁶ <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>

⁷ <https://asterweb.jpl.nasa.gov/>

⁸ <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>

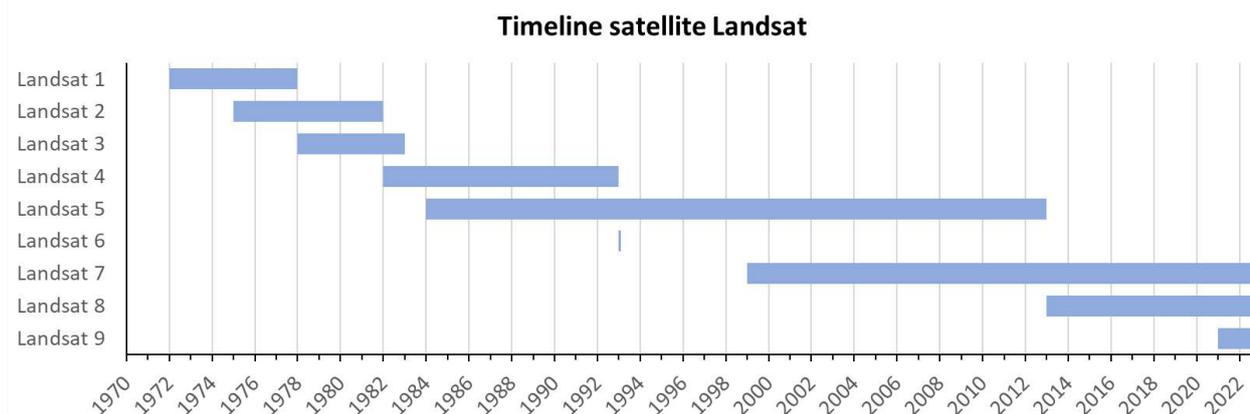


Figura 9 - Timeline del satellite Landsat

La mappatura delle LST tramite immagini satellitari si basa sull'utilizzo di sensori infrarossi termici a bordo dei satelliti. Questi sensori possono rilevare la radiazione termica emessa dalla Terra e convertirla in dati digitali. L'utilizzo di sensori **MODIS** è particolarmente adatto per studi a larga scala in quanto, essendo montato su diversi satelliti, fornisce immagini multiple della Terra ogni giorno. Infatti, Hellings & Rienow (2021) lo utilizzano per la mappatura delle tendenze delle LST e dell'uso del suolo da una prospettiva continentale. Infatti, il loro studio si propone di analizzare le temperature superficiali in nove città diverse in diversi stati europei. Al contrario, Chen (2021) utilizza la banca dati MODIS per mappare le LST a Taiwan, ma in particolare per esplorare i cambiamenti delle temperature e dell'uso del suolo che si sono verificati tra il 2008 e il 2014.

Lo strumento scientifico **ASTER** offre una combinazione di alta risoluzione spaziale e spettrale, che è adatta per applicazioni che richiedono una visione dettagliata delle superfici terrestri e la caratterizzazione spettrale. È noto per la sua capacità di misurare l'altimetria e la topografia del terreno, il che lo rende prezioso per applicazioni di cartografia e geologia. Congedo (2021) lo inserisce, insieme alle altre fonti di immagini satellitari (Landsat, Modis e Sentinel), all'interno del Semi-Automatic Classification Plugin (SCP)⁹, sviluppato per il software QGIS. Questo plugin fornisce una molteplicità di strumenti per l'elaborazione dei dati telerilevati, facilitando le fasi legate al download, alla preelaborazione delle immagini e alla post-elaborazione delle classificazioni.

I dati **Landsat** offrono una risoluzione spaziale molto dettagliata e sono spesso utilizzati per applicazioni che richiedono una valutazione dell'uso del suolo, come l'agricoltura, l'urbanizzazione e la pianificazione territoriale. Infatti, per la capitale della Cina, Pechino, vengono utilizzati dati

⁹ Il Semi-Automatic Classification Plugin è un plugin Python per il software QGIS (QGIS Development Team, 2021) sviluppato con l'obiettivo generale di facilitare il monitoraggio della copertura del suolo da parte di persone il cui campo principale non è strettamente il telerilevamento, ma che potrebbero trarre vantaggio dall'analisi del telerilevamento

Stato dell'arte

Landsat per studiare la relazione tra indice di vegetazione e temperature al suolo (Jiang & Tian, 2010). Anche Rajeshwari & Mani (2014) utilizzano questa banca dati per mappare le LST dello stato di Tamil Nadu, in India. Numerosi studi utilizzano i dati Landsat per diverse applicazioni. Questo è possibile in quanto questo set di dati è molto spesso disponibile gratuitamente. Per esempio Gholami & Beck (2019) e Geletič et al. (2016) hanno determinato la relazione che intercorre tra LCZ e LST, mentre altri studi hanno utilizzato questo datasets per rilevare le isole di calore urbane superficiali dalla temperatura della superficie terrestre (Aduah et al., 2012; Zhao, 2018). Altri studi utilizzano immagini satellitari derivati da Landsat per lo sviluppo di plugin o algoritmi automatici che rendano la procedura di estrazione delle LST più facile e veloce anche ad un utente non esperto sul tema. I plugin fanno principalmente riferimento all'utilizzo di software GIS come ArcGIS (Walawender et al., 2012) o QGIS (Isaya Ndossi & Avdan, 2016). Avdan & Jovanovska (2016) sviluppano invece un algoritmo per la mappatura automatica applicato alle città di Ontario e Quebec in Canada.

In sintesi, la scelta tra l'utilizzo di dati MODIS, ASTER e Landsat dipende dalle specifiche necessità che si vogliono andare a studiare. Spesso, la combinazione di più sensori può essere vantaggiosa per ottenere una visione più completa delle condizioni terrestri.

Sono stati sviluppati molti algoritmi per recuperare l'LST dalle immagini Landsat:

- l'algoritmo a canale singolo (Single Channel, SCA), utilizzato ad esempio da Aduah et al. (2012);
- l'algoritmo a finestra divisa (Split-Window, SWA), utilizzato da Hellings & Rienow (2021);
- l'equazione di trasferimento radiativo (RTE), utilizzata da Isaya Ndossi & Avdan, (2016);
- l'equazione di Plank, utilizzata da Zhao (2018).

García-Santos et al. (2018) utilizza gli algoritmi a canale singolo, a finestra divisa e l'equazione di trasferimento radiativo per confrontare quale tra i tre metodi è il migliore per la stima delle LST nell'isola di Maiorca (Spagna). Risulta che tutti e tre i metodi mostrano buone prestazioni, ma gli l'algoritmo a finestra divisa è il metodo migliore per il caso studio specifico. Al contrario, uno studio recente ha suggerito che la funzione Plank e l'algoritmo a canale singolo hanno mostrato le migliori prestazioni per dati Landsat (Isaya Ndossi & Avdan, 2016).

Un riepilogo rappresentativo, ma non esaustivo, delle varie alternative di banche dati e metodi di elaborazione delle immagini presenti in letteratura per mappare le Land Surface Temperature è indicato in Tabella 4.

Tabella 4 - Sintesi delle banche dati e dei metodi di elaborazione delle immagini satellitari per le LST

Autori, anno	Caso Studio	Banca dati	Metodo di elaborazione delle immagini	
<i>Jiang & Tian, 2010</i>	Pechino (Cina)	Landsat	Algoritmi	NA
<i>Aduah et al., 2012</i>	Tarkwa (Ghana)	Landsat	Algoritmi	Single Channel (SCA)
<i>Walawender et al., 2012</i>	Cracovia (Polonia)	Landsat	Algoritmi	Single Channel (SCA)
<i>Rajeshwari & Mani, 2014</i>	Tamil Nadu (India)	Landsat	Algoritmi	Split-Window (SWA)
<i>Avdan & Jovanovska, 2016</i>	Ontario e Quebec (Canada)	Landsat	Algoritmi	ERDAS IMAGINE 2014
<i>Isaya Ndossi & Avdan, 2016</i>	Moncton e Nuovo Brunswick (Canada)	Landsat	Algoritmi	Single Channel (SCA), Equazione di trasferimento radiativo (RTE), Equazione di Plank
<i>Geletič et al., 2016</i>	Praga e Brno (Repubblica Ceca)	Landsat MODIS	Algoritmi	Split-Window (SWA) Multispectral
<i>Agbor & Makinde, 2018</i>	Akure (Nigeria)	Landsat	Software	ArcGIS
<i>Guha et al., 2018</i>	Firenze e Napoli (Italia)	Landsat	Algoritmi	NA
<i>García-Santos et al., 2018</i>	Maiorca (Spagna)	Landsat	Algoritmi	Split-Window (SW) Single Channel (SCA), Equazione di trasferimento radiativo (RTE)
<i>Zhao, 2018</i>	San Antonio (Texas)	Landsat	Algoritmi	Single Channel (SCA), Equazione di Plank
<i>Shatnawi & Abu Qdais, 2019</i>	Irbid, Ajloun, Jarash e Mafraq (Giordania)	Dati meteorologici Landsat	Algoritmi	Artificial neural network model
<i>Gholami & Beck, 2019</i>	25 città del mondo	Landsat	Algoritmi	Mappatura automatizzata
<i>T.-L. Chen, 2021</i>	Taiwan	MODIS	Statistiche di autocorrelazione spaziale	#NA
<i>Congedo, 2021</i>	#NA	ASTER GOES Landsat MODIS Sentinel	Software	QGIS

Autori, anno	Caso Studio	Banca dati	Metodo di elaborazione delle immagini	
<i>Hellings & Rienow, 2021</i>	Bolzano (Italia) Madrid (Spagna) Nizza (Francia) Oberhausen (Germania) Porto (Portogallo) Fiume (Croazia) Stavanger (Norvegia) Salonicco (Grecia) Varsavia (Polonia)	MODIS	Algoritmi	Split-Window (SW)

#NA: *Informazione non disponibile*

2.3.3 Il concetto di rischio

Il concetto di rischio è stato ampiamente studiato in tutto il mondo in diversi ambiti scientifici e professionali, in quanto rappresenta un parametro di supporto alle decisioni estremamente utile per qualsiasi processo di gestione (Guarascio et al., 2019). Gli eventi disastrosi si presentano in genere con periodicità definibile e, in alcuni casi, con crescente intensità distruttiva. Ciononostante, permane la difficoltà di prevedere l'arrivo dell'evento in tempo utile per assumere comportamenti difensivi, e spesso si constata l'impossibilità di mitigarne gli effetti. Il termine rischio è comunemente associato a questi concetti di incertezza e perdita o danno (Tira, 1997).

Per comprendere meglio il rischio, la letteratura ha cercato di fornirne una definizione univoca (ad esempio, UNI ISO 31000:2018 - Risk Management Guidelines, 2018), ma ad oggi non è ancora possibile trovare una definizione universale e ampiamente condivisa (Aven, 2012; Fine, 1971). Il concetto di rischio è aperto a una grande varietà di possibilità a seconda della disciplina e della specifica area di interesse. Per esempio, il rischio può essere definito come “una misura della probabilità e della gravità degli effetti avversi”, “la possibilità che il verificarsi di determinate condizioni provochi danni a persone o cose” o “l'impatto di un evento e delle sue conseguenze”. Quindi, quando si tratta di restituire una quantificazione del rischio, possono sorgere incongruenze e ostacoli e possono essere proposte diverse soluzioni matematiche (Aven, 2012).

La Tabella 5 riporta un elenco rappresentativo, ma non esaustivo, di studi che hanno cercato di definire il rischio, fornito una formulazione matematica per esso, o entrambi.

Tabella 5 - Definizione di rischio, formulazione del rischio e componenti

Autore, anno	Definizione di Rischio	Formula del Rischio	Componenti	Campo di applicazione
Fine, 1971	Qualsiasi condizione non sicura o potenziale fonte di incidente.	$R = P \cdot C \cdot E$	P = Probabilità C = Conseguenze E = Esposizione	G
Crichton, 1999	La probabilità di una perdita, che dipende da tre elementi: pericolo, vulnerabilità ed esposizione	-	Pericolo, Vulnerabilità, Esposizione	G
UNI ISO 31000:2018, 2018	L'effetto dell'incertezza rispetto agli obiettivi.	-	Fattori di rischio, Evento potenziale, Probabilità dell'evento, Conseguenza dell'evento	G
Kaźmierczak & Cavan, 2011	-	$R=f(P; E; V)$	P = Pericolo di eventi meteorologici estremi V = Vulnerabilità della comunità E = Esposizione dei recettori	A
Hendel et al., 2020	-	$R=P \cdot (E+S)$	P = Pericolo microclimatico E = Esposizione della popolazione sensibile S = Sensitività legata a fattori socioeconomici che microclimatici	OC
Lee et al., 2020	Il processo che causa sequenzialmente o simultaneamente disastri naturali e disastri causati dall'uomo.	$R=f(P; E; V)$	P = Pericolo E = Esposizione del sistema al pericolo V = Vulnerabilità del sistema	OC
Yin et al., 2020	Perdite potenziali derivanti da un particolare pericolo per un elemento specifico a rischio in un particolare periodo di tempo futuro	$R=f(P; E; V)$	P = Pericolo, misura la gravità degli eventi di calore E = Esposizione economica e della popolazione V = Vulnerabilità, misura dei fattori che aumentano o diminuiscono il rischio nell'ambiente	OC
Dai et al., 2021	-	$R=f(P; E; V)$	P = Pericolo V = Vulnerabilità E = Esposizione	OC

G = campo di applicazione generale; OC= campo delle ondate di calore; A=campo delle alluvioni

Stato dell'arte

La comunità scientifica è ormai concorde sul fatto che il rischio dipenda direttamente dalla possibilità che accada l'evento ipotizzato e dalla possibilità che si abbiano delle perdite (Tiboni, 2002).

Secondo Varnes & Iaeg (1984) il rischio si può esprimere come combinazione di tre variabili:

- P = Pericolosità (o hazard): probabilità che un fenomeno potenzialmente distruttivo si verifichi in un dato periodo di tempo e in una data area;
- V = Vulnerabilità (o vulnerability): grado di perdita prodotto su un certo elemento o gruppo di elementi esposti a rischio, risultante dal verificarsi di un fenomeno naturale di una data intensità;
- E = Esposizione (o element at risk): popolazione, proprietà, attività economiche a rischio in una determinata area.

Sinteticamente, si può esprimere il rischio come funzione delle tre variabili:

$$R = f(P, V, E)$$

2.4 Alcune lacune nella letteratura studiata sugli impatti dei cambiamenti climatici in ambito urbano

Tutte le ricerche precedenti sulle tecniche legate alla mappatura delle LCZ, delle LST e del Rischio hanno fornito progressi e approfondimenti significativi, sia a livello teorico che pratico. Tuttavia, persistono alcune lacune (Figura 10). Dal punto di vista teorico, un'ulteriore esplorazione metodologica può aiutare a far luce su un argomento di ricerca non trattato. Dal punto di vista pratico, alcuni problemi potrebbero impedire la piena attuazione delle diverse procedure.

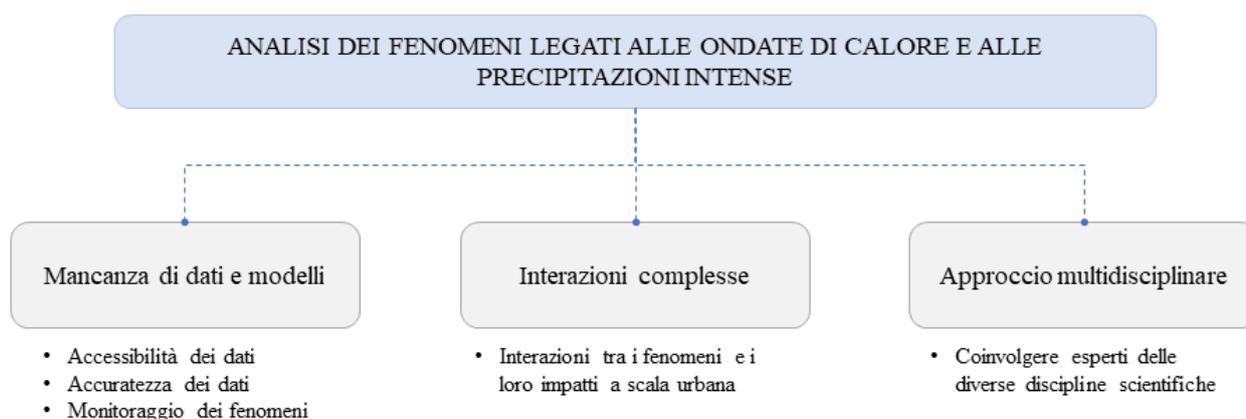


Figura 10 - Schema delle lacune nella letteratura studiata

Un problema fondamentale è la *carezza di dati* di alta qualità che forniscano informazioni sul territorio e che documentino i fenomeni legati alle ondate di calore e alle precipitazioni intense. Questi dati sono fondamentali per la costruzione di modelli affidabili e la valutazione delle tendenze a lungo termine. Molti paesi e regioni non dispongono di reti di monitoraggio climatico sufficientemente sviluppate, e ciò rende difficile la raccolta di dati affidabili su questi eventi. Come evidenziato per la mappatura delle LCZ, numerosi studi si avvalgono dell'utilizzo della raccolta dati tramite Remote Sensing (per esempio Bechtelet al. 2012, Brousse et al. 2016, Yoo et al. 2016) mentre quelli che si avvalgono delle misurazioni in sito con l'utilizzo di dati amministrativi sono in numero decisamente inferiore (per esempio Lelovics 2014, Zhao et al, 2019). Questo sottolinea come la disponibilità di dati aggiornati sia una problematica evidente. Altro problema riguarda la *complessità dello sviluppo di modelli climatici* specifici per affrontare i fenomeni globali. Dall'analisi della letteratura in merito alle temperature della superficie terrestre (LST) emerge infatti come solo pochi studi sono impegnati nel monitoraggio e nella previsione dei cambiamenti della temperatura a lungo termine (per esempio Quidas, 2019, Chen, 2021) e sembra che non siano presenti studi¹⁰ che prevedano l'implementazione di piani o politiche per contrastare gli effetti dei cambiamenti climatici.

La problematica delle *interazioni complesse* è ben visibile dal fatto che in letteratura non sono documentati casi studio che tengono in considerazione contemporaneamente sia i fenomeni delle ondate di calore, sia quelli legati alle precipitazioni intense. Si è visto come queste tipologie di eventi possono avere conseguenze gravi per l'ambiente, la salute umana e l'infrastruttura, e dunque richiedono un approccio olistico per la loro comprensione e gestione. Le interazioni tra ondate di calore e piogge intense possono verificarsi in modi diversi. In alcuni casi, le ondate di calore possono precedere le piogge intense, contribuendo all'accumulo di calore nell'atmosfera e aumentando la probabilità di piogge intense quando le condizioni cambiano. Questa combinazione può portare a un aumento del rischio di inondazioni repentine e alluvioni. Allo stesso tempo, le ondate di calore possono contribuire alla siccità, riducendo la quantità di acqua disponibile nel terreno. Quando le piogge intense si verificano in seguito, il terreno può essere meno in grado di assorbire l'acqua, aumentando il rischio di inondazioni. Per affrontare queste complesse interazioni tra ondate di calore e piogge intense, è fondamentale adottare approcci integrati di gestione del rischio e mitigazione.

Infine, le tematiche trattate coinvolgono una vasta gamma di discipline scientifiche, tra cui climatologia, ecologia, medicina e ingegneria. Tuttavia, spesso manca un *approccio multidisciplinare*

¹⁰ L'affermazione è strettamente legata all'analisi della letteratura effettuata per questo elaborato. Non si esclude che con review letterarie ulteriormente approfondite, si possano individuare studi che trattano queste tematiche.

che tenga conto di tutti questi aspetti in modo integrato. In particolare, un approccio multidisciplinare potrebbe aiutare a mitigare gli impatti combinati tra questi due fenomeni. Ad esempio, potrebbe essere utile studiare come le ondate di calore influenzano i modelli di precipitazioni intense e viceversa. Inoltre, le strategie di adattamento e mitigazione potrebbero essere più efficaci se fossero sviluppate con una comprensione più completa dei collegamenti tra questi fenomeni. L'implementazione di misure preventive come la creazione di aree verdi urbane, il miglioramento delle infrastrutture di drenaggio e l'educazione pubblica sulle pratiche di adattamento al caldo potrebbero ridurre i rischi complessivi.

2.5 Il contributo del presente elaborato alla letteratura esistente

Sulla base delle lacune evidenziate nel capitolo 2.4, questa ricerca mira ad ampliare la letteratura esistente integrando analisi riferite al fenomeno delle ondate di calore con il fenomeno delle precipitazioni intense. Nello specifico, questa ricerca propone lo sviluppo di un nuovo approccio metodologico per la definizione di alcuni strumenti a supporto al governo del territorio per individuare zone delle città prioritarie sui cui eseguire interventi di contrasto gli impatti negativi dei cambiamenti climatici.

La Figura 11 evidenzia schematicamente come la proposta metodologica miri a rispondere alle lacune evidenziate nel paragrafo precedente.

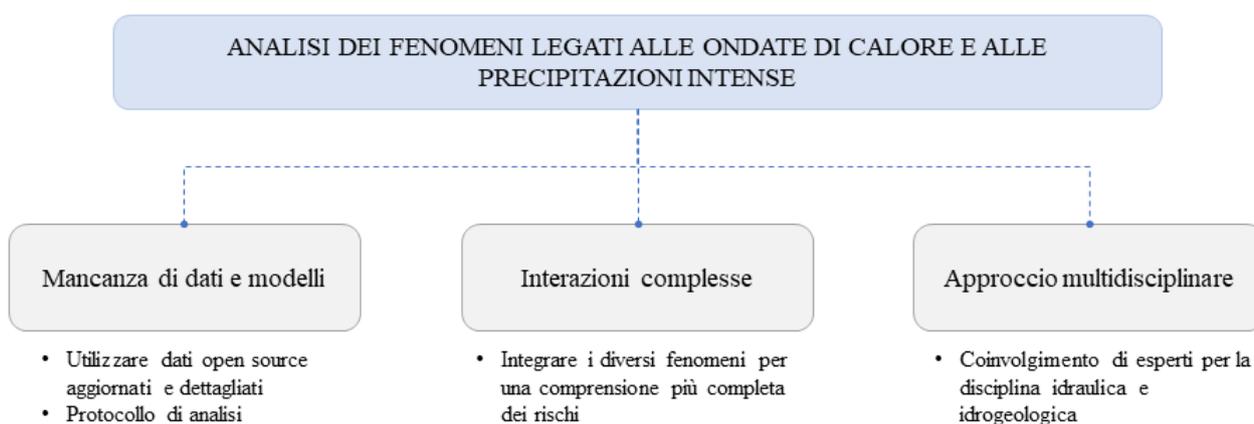


Figura 11 - Schema del contributo della ricerca alla teoria e alla pratica

Nel dettaglio, la proposta metodologica mira a:

- utilizzare *dati open source* come fondamento per lo sviluppo delle indagini. Questo approccio mira a sfruttare fonti di informazioni liberamente accessibili e condivise dalla comunità, consentendo così un'analisi approfondita e dettagliata senza la necessità di investire risorse considerevoli nella raccolta di dati primari;
- creare un *protocollo* di analisi definito che stabilisca le procedure e le metodologie specifiche per l'analisi dei fenomeni. Questo protocollo dovrà essere aggiornato nel corso degli anni per monitorare gli impatti dei cambiamenti climatici sul territorio, ma anche per verificare l'efficacia degli interventi eseguiti sul territorio e delle politiche adottate;
- *integrare* le analisi riferite alle ondate di calore con quelle legate alle precipitazioni intense per definire aree della città particolarmente critiche quando questi fenomeni si verificano, con particolare attenzione alla componente della popolazione residente in queste aree. Questo consente di avere una comprensione più completa dei rischi legati ai cambiamenti climatici a scala urbana e di sviluppare strategie di adattamento più efficaci;
- applicare un *approccio multidisciplinare* che coinvolge esperti provenienti da diverse discipline e campi di conoscenza per affrontare il problema da molteplici prospettive. In particolare, in questo elaborato, ci si avvale di esperti in merito alle analisi degli impatti delle precipitazioni intense legate al drenaggio urbano, allo smaltimento delle acque meteoriche e all'impermeabilità dei suoli.

3. Approccio Metodologico

Nel presente capitolo, verrà esaminata e discussa una proposta di approccio metodologico per la definizione di alcuni strumenti a supporto al governo del territorio nell'ottica dell'adattamento ai cambiamenti climatici, attraverso interventi di depavimentazione con creazione di nuovi habitat urbani e di realizzazione di tetti verdi. Per individuare le zone della città in cui prioritariamente introdurre questo tipo di soluzioni, è necessaria la costruzione di un quadro conoscitivo dei fattori che maggiormente possono contribuire a trasformare il territorio in città oasi e città spugna. Questo approccio è fondamentale per affrontare le sfide legate ai cambiamenti climatici e alle pressioni ambientali, contribuendo anche a una migliore gestione delle aree urbane.

Il metodo si compone di tre fasi: prende avvio con la raccolta e il reperimento di dati, per poi proseguire con un'analisi di aspetti tecnico-oggettivi che definiscono le condizioni fisiche e ambientali del territorio e concludersi con l'analisi di aspetti più strettamente strategico-decisionali. Le analisi tecniche fanno principalmente riferimento ai fenomeni delle ondate di calore e agli eventi meteorologici estremi, in particolare le piogge intense in ambiente urbanizzato.

Il tema delle ondate di calore viene affrontato attraverso la mappatura delle Local Climate Zone (LCZ) che definiscono il contesto microclimatico connesso all'uso del suolo, costruito e non, per poi proseguire con la mappatura delle Land Surface Temperature (LST – Temperature al suolo). Unendo queste due informazioni è possibile definire la pericolosità del fenomeno delle ondate di calore. La mappatura della pericolosità delle ondate di calore si riferisce alle aree maggiormente soggette a incremento di temperatura. La letteratura mostra come uno dei più preoccupanti effetti delle ondate di calore ricade sulla salute della popolazione: è dunque necessario analizzare il livello di rischio per la salute derivante dall'esposizione alle ondate di calore. La formula del rischio prevede di combinare la pericolosità con altre due componenti: vulnerabilità ed esposizione, in questo caso riferita alla popolazione residente, con particolare attenzione a quella più fragile.

Il fenomeno delle forti piogge viene affrontato considerando gli effetti che queste provocano sull'urbanizzato e il suo intorno. In particolare, vengono analizzate le criticità connesse con il sistema di drenaggio urbano e l'idoneità del terreno all'infiltrazione dell'acqua nel suolo secondo diverse tipologie di vincoli fisici/amministrativi/idrogeologici.

Il quadro conoscitivo che scaturisce da queste analisi è fondamentale per definire i livelli di priorità per gli interventi di depavimentazione e i livelli di idoneità alla diffusione di tetti verdi.

Approccio Metodologico

La metodologia proposta si pone l'obiettivo di creare un quadro completo e integrato per la gestione del territorio, tenendo conto degli impatti dei cambiamenti climatici e delle esigenze urbane.

3.1 Panoramica dell'approccio metodologico proposto

In questa sezione viene illustrata la proposta metodologica per la costruzione di un Piano Attuativo di Depavimentazione (da ora in poi PAD) e di una Strategia di Diffusione di Tetti Verdi (da ora in poi SDTV) a supporto del governo del territorio in ambito urbano. Tale metodologia prevede alla base la definizione dei due principali effetti secondari che il cambiamento climatico provoca nelle aree urbanizzate: le ondate di calore e gli eventi metereologici estremi.

L'obiettivo del PAD è quello di individuare le aree prioritarie per interventi di depavimentazione, attraverso l'applicazione di Nature-Based Solutions (NBSs) al suolo (come strade alberate, aree verdi nei parcheggi, rain garden, fossati inondabili), mentre l'obiettivo della SDTV è quello di individuare delle politiche che consentano la diffusione dei tetti verdi nel territorio comunale (sia per gli edifici pubblici che per quelli privati). Gli interventi individuati contribuiscono:

- a risolvere le criticità idrauliche urbane (eccessivo carico della fognatura con conseguente sfioro delle acque durante gli eventi meteorici estremi);
- al miglioramento del microclima urbano raffrescando, attraverso la presenza di nuove essenze arboree e arbustive, la temperatura percepita dalla popolazione residente e dai city users;
- alla creazione di nuovi habitat secondari urbani per l'incremento della biodiversità;
- al miglioramento del paesaggio urbano, alla creazione di nuovi spazi urbani ancor più vivibili.

La metodologia, rappresentata nella Figura 12, si compone di tre fasi principali:

- I. costruzione della banca dati;
- II. definizione di aspetti tecnico-oggettivi;
- III. definizione di aspetti strategico-decisionali.

Le diverse fasi sono illustrate in modo dettagliato per rendere l'approccio metodologico costruito su un caso studio specifico, dove possibile, ripetibile in contesti diversi. In particolare, la Fase II è caratterizzata da cinque sottofasi che corrispondono alle diverse analisi da svolgere per giungere alla definizione del PAD e della SDTV. Le sottofasi possono essere a loro volta suddivise in quelle che contribuiscono a contrastare le ondate di calore, come (i) la mappatura delle Local Climate Zone, (ii) la mappatura delle Land Surface Temperature, (iii) la mappatura del Rischio da ondate di calore per la salute dei residenti. Invece, le sottofasi che analizzano gli impatti negativi delle precipitazioni

estreme sono legate a (iv) analisi delle criticità connesse con il sistema di drenaggio urbano e (v) analisi dell'idoneità al suolo dell'infiltrazione dell'acqua.

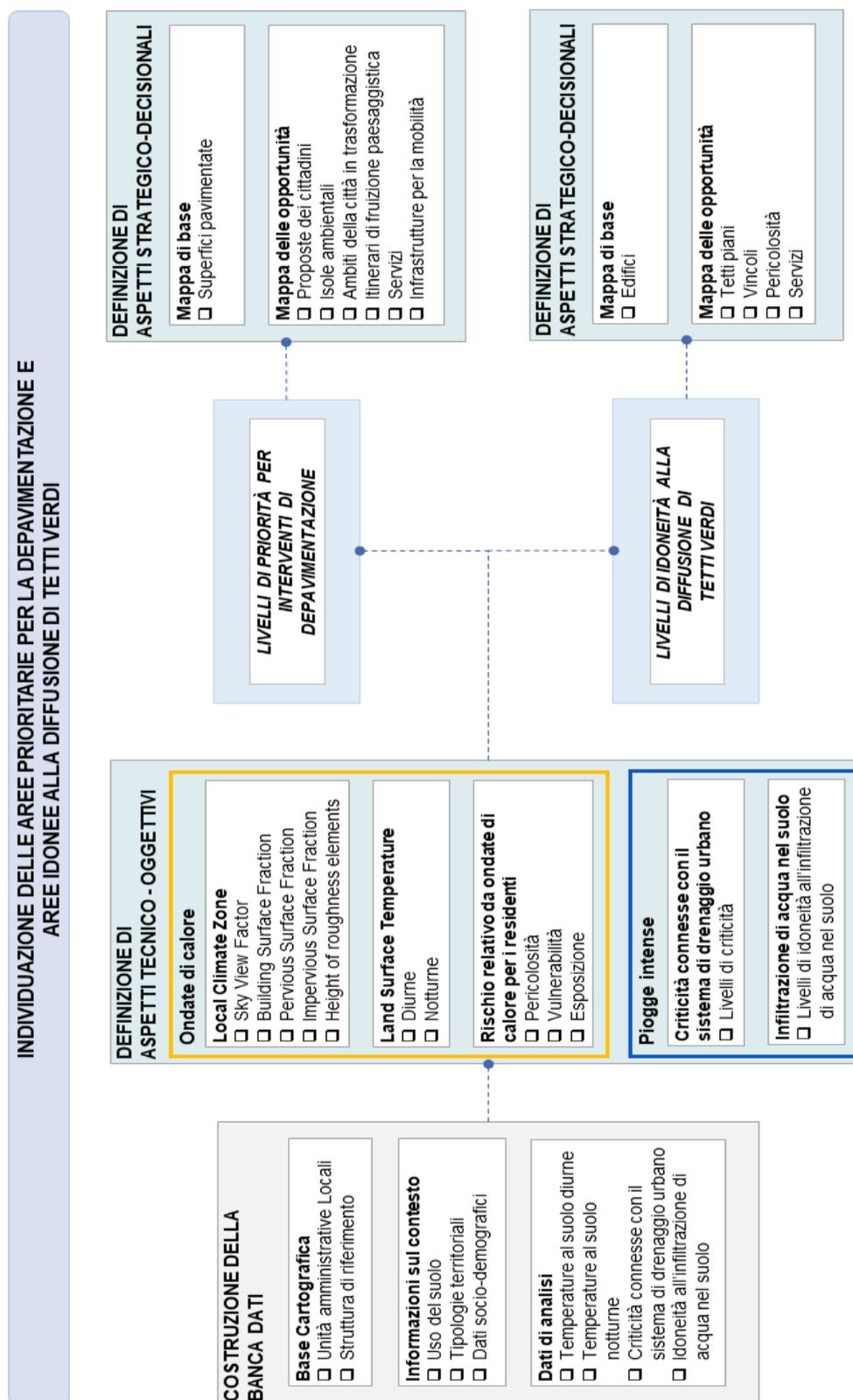


Figura 12 - Flowchart della metodologia applicata

3.2 Fase I – Costruzione della banca dati

Prima di illustrare le diverse fasi e sottofasi di analisi propedeutiche alla costruzione degli strumenti citati, è necessario definire l'area di studio e, nello specifico, la struttura di riferimento alla base del procedimento. Successivamente, la prima parte del metodo è dedicata alla raccolta di tutte le informazioni e i dati necessari da includere nel processo di valutazione.

Con riferimento alla Figura 12, il riquadro *Costruzione della banca dati* contiene un riferimento ai dati utili per le analisi. I principali elementi da considerare sono:

- **Base cartografica** – Questa base informativa si riferisce alle unità amministrative locali dell'area considerata e alla struttura di riferimento utilizzata. In particolare, è richiesta la mappa che mostra la suddivisione amministrativa del territorio (comunale) e la struttura utilizzata come riferimento per tutte le analisi svolte. La struttura di riferimento è la suddivisione del territorio in isolati di diverse dimensioni. Questo tipo di suddivisione, tuttavia, non consente il confronto tra le singole parti in quanto la loro dimensione è molto disomogenea e i primi risultati delle analisi risultano non del tutto adatti alla definizione dei passaggi successivi. Si è quindi deciso di cambiare la struttura di riferimento, optando per una *griglia a maglia quadrata*, che deve essere realizzata con una dimensione utile per il livello di dettaglio che si vuole raggiungere. Per analisi a scala locale e per avere informazioni puntuali, la maglia della griglia potrà avere dimensioni tra i 20 e i 50 metri, mentre per analisi a scala territoriale la maglia dovrà avere una dimensione minima di 100 metri. Sia il confine amministrativo comunale, sia la griglia, devono essere file vettoriali.
- **Informazioni sul contesto** – Questa base informativa si riferisce a tutti i dati relativi alle caratteristiche dell'area considerata. Più precisamente, sono necessari:
 1. i dati sulle le caratteristiche morfologiche dell'area, come informazioni sull'uso del suolo;
 2. i dati sociodemografici, che comprendono il numero di abitanti suddivisi in classi di età.

Tali dati sono generalmente forniti come file vettoriali che integrano informazioni geografiche e le banche dati di riferimento.

- **Dati di analisi** – Questa informazione si riferisce a tutti i dati relativi alle criticità legate a ondate di calore ed eventi meteorologici estremi. In particolare, sono richiesti:
 1. i dati delle temperature diurne e notturne per quantificare la temperatura in ogni area della città;

2. dati legati alla permeabilità dei suoli per comprendere la composizione del terreno e la sua idoneità all'infiltrazione di acqua;
3. informazioni in merito alle criticità degli sfioratori per individuare quei sottobacini maggiormente critici in caso di forti piogge.

Tali dati sono forniti come file vettoriali che integrano informazioni geografiche e le banche dati di riferimento (ad esempio i dati legati alla permeabilità dei suoli), ma possono essere anche forniti come file raster (ad esempio le immagini satellitari per l'estrazione del dato della temperatura).

3.3 Fase II – Definizione degli aspetti tecnico-oggettivi

Una volta recuperati tutti i dati necessari dalle fonti ufficiali, la Fase II del metodo è dedicata all'analisi dei dati e al loro utilizzo per la definizione delle cinque sottofasi precedentemente indicate.

Le mappe che verranno realizzate per ogni sottofase terranno in considerazione solo aspetti tecnici e dati ufficiali, oggetto di analisi scientifiche.

Come precedentemente indicato (paragrafo 3.1), le mappature delle LCZ, delle LST e del rischio da ondate di calore per la salute dei residenti sono strettamente legate allo studio del fenomeno delle ondate di calore (paragrafi 3.3.1, 3.3.2, 3.3.3), mentre le analisi riferite alle criticità connesse al sistema di drenaggio urbano (paragrafo 0) e l'idoneità del suolo all'infiltrazione dell'acqua (paragrafo 3.3.5) analizzano gli impatti negativi derivanti dalle piogge intense.

3.3.1 Mappatura delle Local Climate Zone

Tra i metodi presenti in letteratura, per la mappatura delle Local Climate Zone (LCZ) (definite nel paragrafo 2.3.1) si è scelto di seguire il metodo di analisi basato sui parametri e gli indicatori definiti da Stewart & Oke (2012), calcolandoli in ambiente GIS per la mappatura delle LCZ. La banca dati è fornita tramite misurazioni in sito disponibili dal Geoportale di Regione Lombardia.

La scelta dei parametri da utilizzare, definiti in Tabella 2, dipende dalla disponibilità e dall'aggiornamento dei dati. Da un'analisi della letteratura esistente (Tabella 6), rappresentativa ma non esaustiva, risulta come non sia necessario utilizzare tutti i parametri indicati da Stewart & Oke (2012), ma almeno 3.

Tabella 6 - Identificazione dei parametri utilizzati in letteratura per il calcolo delle Local Climate Zone

Autori	SVF	λ_s	BSF	PSF	ISF	BH	TR	SA	Albedo	AHO
<i>Leconte et al., 2014</i>	X	X	X	X	X	X	X			
<i>Lelovics et al., 2014</i>	X		X	X	X	X	X		X	
<i>Unger et al., 2014</i>	X		X	X	X	X	X		X	
<i>Bechtel et al., 2015</i>	X	X	X		X	X		X		X
<i>Geletič et al., 2016</i>			X	X	X	X				
<i>Ching et al., 2018</i>	X		X	X	X	X			X	X
<i>Shi et al., 2018</i>	X	X	X			X	X			
<i>Wang et al., 2018</i>	X		X			X				
<i>Yang et al., 2018</i>	X	X	X	X	X		X			
<i>Zheng et al., 2018</i>	X	X	X	X	X	X				
<i>Demuzere et al., 2019</i>	X		X	X	X	X				X
<i>Estacio et al., 2019</i>	X		X	X	X	X	X		X	
<i>Kotharkar et al., 2019</i>		X	X	X	X	X	X			
<i>Molnár et al., 2019</i>	X		X	X	X	X				
<i>Quan, 2019</i>	X		X	X	X	X				
<i>Rodler & Leduc, 2019</i>	X	X	X		X	X				
<i>Chen et al., 2020</i>	X	X	X	X	X	X	X			
<i>Jin et al., 2020</i>	X	X	X	X	X	X	X			
<i>Muhammad et al., 2022</i>	X	X	X	X	X	X	X			X
<i>Zhao et al., 2020</i>	X	X	X	X	X	X	X			

Dalla letteratura risulta che i parametri maggiormente studiati sono i seguenti, calcolati con riferimento ad una specifica unità territoriale:

- **Sky View Factor (SVF)**: rapporto tra la quantità di cielo visibile dal livello del suolo rispetto a quella di un emisfero non ostruito (Figura 13);

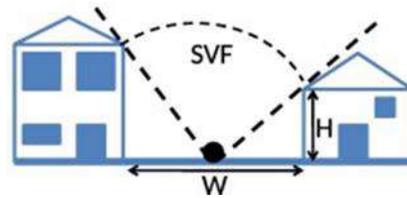


Figura 13 - SVF in un canyon stradale; dove W è la larghezza della strada e H è l'altezza dell'edificio
(Fonte: Dirksen et al., 2019)

- **Building Surface Fraction (BSF)**: rapporto tra l'area in pianta dell'edificio e l'area dell'unità territoriale (%) (Figura 14);

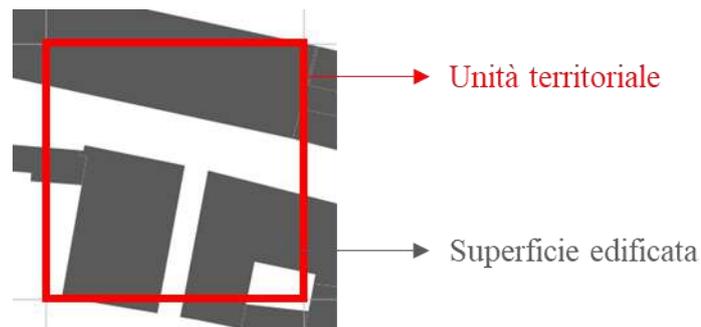


Figura 14 - Rapporto tra la superficie edificata e l'unità territoriale

- **Pervious Surface Fraction (PSF)**: rapporto tra l'area del piano permeabile (suolo nudo, vegetazione, acqua) e l'area dell'unità territoriale (%) (Figura 15);

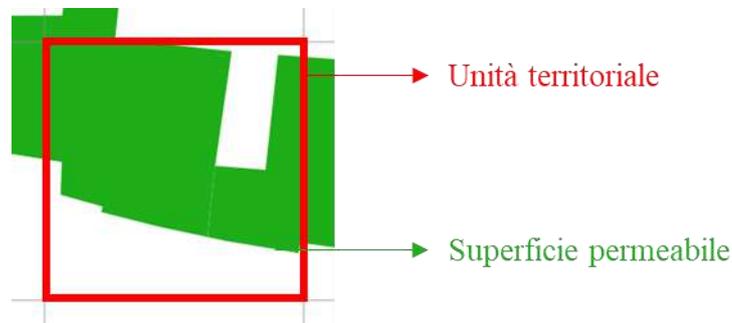


Figura 15 - Rapporto tra la superficie permeabile e l'unità territoriale

- **Impervious Surface Fraction (ISF)**: rapporto tra l'area del piano impermeabile (pavimentata, roccia) e l'area dell'unità territoriale (%). Viene calcolata come l'inverso della somma delle aree edificate e delle aree permeabili;
- **Height of roughness elements (BH)**: media geometrica delle altezze degli edifici (LCZ 1-10) e delle altezze di alberi/piante (LCZ A-F) (m).

Di seguito, per ogni parametro verrà illustrata la modalità di calcolo.

3.3.1.1 Sky View Factor (SVF)

Il primo parametro da calcolare è lo Sky View Factor (SVF) per il quale è necessario utilizzare tutti i dati relativi agli elementi presenti in superficie come edifici, alberi e terreno. Nello specifico è utile avere a disposizione il dato dell'altezza di questi elementi. Il calcolo dello Sky View Factor viene eseguito con il software SAGA GIS¹¹, che elabora solo immagini di tipo raster. Per questo motivo è necessario, in ambiente GIS, convertire gli elementi in superficie da file vettoriale a file raster. La conversione avviene inserendo come campo principale l'altezza degli elementi, le dimensioni del pixel che si vuole ottenere e l'estensione della figura. In SAGA GIS l'immagine realizzata in precedenza in formato GeoTIFF viene inserita nello specifico strumento di geoprocessing. Si inserisce il sistema della griglia, l'elevazione del file raster, il raggio di ricerca, il numero di settori e il metodo da utilizzare. I valori all'interno del raster devono essere ricondotti alla struttura di riferimento: si esegue così una media dei valori di ogni pixel all'interno di ogni cella. Il campo dello SVF verrà rappresentato sulla mappa con un intervallo di 0,1.

3.3.1.2 Building Surface Fraction (BSF)

Il secondo parametro da calcolare è la percentuale di suolo edificato (BSF). All'interno di ogni cella viene quindi definita e sommata l'area di ogni edificio ($\sum A_{ed}$) e relazionata all'estensione della cella stessa (A_c). Gli edifici vengono intersecati con la struttura di riferimento e viene calcolata la loro area all'interno di ogni cella. L'ambiente GIS consente di eseguire la somma delle aree degli edifici contenuti in ogni cella e di associare questa nuova informazione alla cella stessa. In questo modo si ottiene l'area edificata all'interno di ogni cella. Si calcola poi il valore percentuale rispetto all'estensione di ogni cella.

$$BSF = \frac{\sum A_{ed}}{A_c} \quad (1)$$

$$BSF\% = BSF \times 100 \quad (2)$$

Per eseguire i calcoli, vista la notevole quantità di dati, si suggerisce di esportare la tabella attributi in un foglio di lavoro elettronico e successivamente re-importarla in ambiente GIS. Questa operazione è possibile grazie all'applicazione di una procedura di join tabellare che permette di mettere in relazione dati in formato spaziale (i.e., shapefile) con tabelle e fogli di calcolo. Operativamente, nelle

¹¹ System for Automated Geoscientific Analyses (Sistema per analisi geoscientifiche automatizzate), è un software GIS che offre una serie completa e crescente di metodi geoscientifici (<https://saga-gis.sourceforge.io/en/index.html>)

due banche dati deve essere presente un campo comune codificato in uguale modo. L'algoritmo di join tabellare, definiti il layer di ingresso e il layer di join e utilizzando come riferimento per l'associazione le osservazioni contenute nel campo comune, trasferisce le nuove informazioni dal secondo layer al primo.

Il campo del BSF in percentuale verrà rappresentato sulla mappa con un intervallo del 10%.

3.3.1.3 Pervious Surface Fraction (PSF)

Il terzo parametro che si calcola è la percentuale di suolo permeabile (PSF). All'interno di ogni cella viene quindi definita e sommata l'area permeabile ($\sum A_{perm}$) e relazionata all'estensione della singola cella (A_c). Vengono considerate quelle aree a suolo nudo, agricole, verdi e in cui è presente acqua. Si considerano superfici permeabili anche le alberature all'interno della città in quanto creano delle zone d'ombra utili a migliorare il microclima, anche se assorbono una bassa percentuale di acqua. Come per il parametro precedente si interseca con la struttura di riferimento, se ne calcola l'area e si sommano tutte le aree permeabili all'interno di ogni cella.

Per ottenere il valore percentuale di PSF, la percentuale di suolo permeabile è da mettere in relazione all'area della cella stessa.

$$PSF = \frac{\sum A_{perm}}{A_c} \quad (3)$$

$$PSF\% = PSF \times 100 \quad (4)$$

I calcoli vengono poi eseguiti, come per il BSF, su un foglio di calcolo e successivamente importati nel software GIS attraverso il *join tabellare*.

Il campo del PSF in percentuale verrà rappresentato sulla mappa con un intervallo del 10%.

3.3.1.4 Impervious Surface Fraction (ISF)

Il quarto parametro è la percentuale di suolo impermeabile (ISF). All'interno di ogni cella viene quindi definita l'area impermeabile e relazionata all'estensione della cella stessa. La superficie di suolo impermeabile si riferisce a quelle porzioni di suolo pavimentate o di roccia. Sono dunque escluse le porzioni di suolo edificate. Le formule da utilizzare per il calcolo del ISF sono le seguenti:

$$ISF = 1 - (BSF + PSF) \quad (5)$$

$$ISF\% = ISF \times 100 \quad (6)$$

I calcoli vengono eseguiti su un foglio di calcolo e successivamente importati nel software GIS attraverso il *join tabellare*.

Il campo del ISF in percentuale verrà rappresentato sulla mappa con un intervallo del 10%.

3.3.1.5 Height of roughness elements (BH)

Il quinto ed ultimo parametro che si calcola è l'altezza degli elementi di rugosità (BH). Viene quindi individuata, attraverso i dati disponibili, l'altezza di ogni edificio e di ogni albero presente all'interno di ogni cella. Gli elementi vengono intersecati con la struttura di riferimento e viene eseguita la media delle altezze all'interno di ogni cella.

Per rappresentare al meglio le altezze degli elementi di rugosità si utilizza una suddivisione dei dati secondo l'interpiano standard di un edificio di 3m. La legenda sarà quindi composta da 10 classi, fino a rappresentare edifici con altezza maggiore di 27m.

3.3.1.6 Classificazione delle Local Climate Zone

Con tutti i dati a disposizione si può quindi proseguire alla suddivisione del territorio in LCZ. Si procede con un *join tabellare* di tutti i parametri calcolati alla struttura di riferimento per ottenere così un file vettoriale unico con associate l'insieme delle informazioni calcolate.

Zhao et al. (2019) mostra come la definizione dei parametri indicata da Stewart & Oke (2012) non può essere utilizzata direttamente per la classificazione delle LCZ, perché la combinazione dei parametri può portare a situazioni in cui a un'area non sarà assegnata alcuna LCZ specifica. Inoltre, altri studi condotti (Bechtel et al., 2015; Geletič et al., 2016) hanno confermato che non tutti i parametri sono necessari hanno la stessa importanza per la mappatura, e quindi non tutte possono essere incluse in un algoritmo di delineazione delle LCZ basato su GIS. Secondo Bechtel et al. (2015) l'Height of roughness elements è la caratteristica più significativa per la struttura urbana, mentre il Building Surface Fraction (BSF) è importante per rappresentare la morfologia e la copertura urbana. Inoltre, anche il Pervious Surface Fraction (PSF) è stato identificato come un altro parametro importante.

A fronte di questi studi, vengono inizialmente isolate le LCZ 10 (industria pesante) individuate attraverso l'uso del suolo. Poi si procede con la distinzione tra LCZ riferite al costruito (1-9) e quelle riferite al suolo (A-G). La suddivisione avviene utilizzando i valori del parametro BSF (Tabella 7).

Tabella 7 - Divisione primaria secondo il parametro BSF

BSF	LCZ
> 10 %	1 - 9
≤ 10 %	A - G

Identificato l'insieme delle LCZ 1-9 è necessario suddividerle nelle rispettive classi secondo i valori dei parametri BSF, PSF e BH. Si procede alla suddivisione delle LCZ un parametro per volta partendo dalla percentuale di suolo edificato (BSF), passando poi all'altezza degli edifici (BH) e infine la percentuale di superficie permeabile (PSF). Si procede con la selezione delle singole LCZ dall'insieme LCZ 1-9 secondo i valori indicati la seguente tabella (Tabella 8). Per ogni suddivisione bisognerà creare un layer specifico per poi procedere con le successive suddivisioni.

Tabella 8 - Suddivisione dei parametri

1		2		3	
BSF	LCZ	BH	LCZ	PSF	LCZ
BSF ≥ 40%	1,2,3,7	BH ≥ 27m	1		
		9m < BH < 27m	2		
		3m < BH ≤ 9m	3		
		BH ≤ 3m	7		
20% < BSF < 40%	4,5,6,8	BH ≥ 27m	4		
		9m < BH < 27m	5		
		BH ≤ 9m	6, 8	PSF ≥ 30%	6
				PSF < 30%	8
BSF ≤ 20%	9				

Dall'insieme delle classi LCZ A-G vengono estratte le LCZ E (roccia nuda o lastricata), definite dall'espressione:

$$PSF \leq 10\% \quad (7)$$

Successivamente si associano le informazioni dell'uso del suolo alle varie classi di LCZ dell'ambito non urbanizzato (Tabella 9).

Tabella 9 - Associazione LCZ A-G con il Database Uso del Suolo

LCZ	Descrizione	Livelli Uso del Suolo (Fonte: DUSAF 6.0)
A	Alberi densi	31111,31112
B	Alberi sparsi	31121
C	Cespugli	3221, 3222, 3241
D	Prato	1411, 1412, 1421
F	Agricoltura	2111, 2112, 21131, 21132, 21141, 21142, 2115, 221, 222, 223, 2241, 2242, 2311, 2312
G	Acqua	511, 5122, 5123

Le celle a cui non è ancora stata attribuita una classe LCZ verranno isolate da quelle già calcolate e distinte secondo la suddivisione in Tabella 10.

Tabella 10 - Divisione secondo il parametro PSF

PSF	LCZ
PSF \geq 50%	D
PSF < 50%	E

A questo punto, la tabella attributi dello strato informativo conterrà i valori dei parametri analizzati e la relativa classe di LCZ associata. Per la classificazione in ambiente GIS è necessario che il campo delle classi di LCZ sia di tipo numerico, si procede quindi alla modifica della denominazione LCZ A-G secondo la Tabella 11:

Tabella 11 - Adattamento numerico delle LCZ A-G

LCZ	
A	11
B	12
C	13
D	14
E	15
F	16
G	17

3.3.2 Mappatura delle Land Surface Temperature

La media delle Land Surface Temperature (Temperature al suolo, LST) vengono calcolate in ambiente GIS sulla base di immagini satellitari restituite da satellite Landsat 8. In un primo momento, le LST sono state ottenute dal sito *Remote Sensing Lab*¹², che consente di acquisire immagini contenenti il dato di temperatura di una specifica area, in uno specifico intervallo di tempo. All'interno del database è possibile selezionare il tipo di satellite Landsat da utilizzare e le fonti di emissività.

Le fonti di emissività disponibili sono tre:

- ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) ha una risoluzione spaziale di 100 m × 100 m;
- MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) è un prodotto giornaliero con una risoluzione spaziale di 1 km × 1 km;
- NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), emissività basata sulla vegetazione con una risoluzione 30 m x 30 m.

Per identificare il periodo più rappresentativo del fenomeno delle ondate di calore, si sono raccolte tutte date delle immagini satellitari presenti nel database per i mesi di giugno, luglio e agosto dal 2000 fino al 2021. Grazie al supporto del Centro euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC) è stato possibile identificare quali giornate presentavano condizioni anomale in termini di stress termico. L'indicatore *Heat Stress* dalla suite di indicatori di E3CI¹³ del 2022 viene definito calcolando il numero di giorni in cui la temperatura massima giornaliera è superiore al novantacinquesimo percentile della temperatura massima giornaliera (calcolato su una finestra mobile di 5 giorni, centrata sul giorno di interesse) sul periodo di riferimento 1981-2010 e standardizzata mediante media e deviazione standard della baseline. Essendo un calcolo in anomalia standardizzata, tutto quello che ricade tra -1 e 1 può essere associato alla normale variabilità climatica, in tal senso quindi tutto quello che è maggiore di 1 rappresenta un'anomalia. Il valore dell'indicatore è adimensionale.

Il database *Remote Sensing Lab* mette a disposizione solo immagini diurne catturate intorno alle 10 del mattino. Per una maggiore rappresentatività dell'ondata di calore, è necessario ottenere anche un'immagine satellitare notturna che definisca una notte tropicale.

Il termine *notte tropicale*, o anche nella forma plurale *notti tropicali*, è un indicatore climatico che identifica il numero di notti nell'anno con temperatura minima maggiore di 20°C. È un valore

¹² https://rslab.gr/downloads_LandsatLST.html

¹³ [E3CI \(dataclime.com\)](https://dataclime.com)

internazionale definito dal progetto CLIVAR¹⁴ nell'ambito dell'Organizzazione meteorologica mondiale (WMO).

Le immagini satellitari notturne e diurne si ottengono dal database USGS Earth Explorer¹⁵. Per il calcolo delle LST, le immagini e i dati in esse contenuti vengono scaricati ed elaborati in ambiente GIS con l'utilizzo del Semi-Automatic Classification Plugin. Tale plugin consente la classificazione supervisionata delle immagini di telerilevamento, fornendo strumenti per il download, la preelaborazione e la post-elaborazione delle immagini. Lo stesso plugin è stato utilizzato con successo in diversi studi per la copertura del suono e l'elaborazione delle immagini satellitari (Arekhi et al., 2019; Garilli et al., 2021; Leroux et al., 2018; Teodoro & Amaral, 2019).

In particolare, delle 11 Bande di cui è composta un'immagine, viene utilizzata solo la Banda 10 che contiene i dati della temperatura al suolo. Inoltre, il software GIS permette di intersecare i dati derivati dall'immagine satellitare con la griglia di riferimento e di convertirli in dati vettoriali. Il dato della temperatura viene dunque associato alla cella di riferimento, calcolando la media delle temperature presenti all'interno della stessa cella.

In questo modo ad ogni cella è attribuita una classe di LCZ e un valore medio di temperatura diurna e una notturna.

3.3.3 Mappatura del Rischio da ondate di calore per la salute dei residenti

Il rischio viene valutato come funzione delle tre variabili:

$$R = f(P, V, E)$$

Il rischio oggetto di studio in questo lavoro è legato alle ondate di calore. Le ondate di calore sono condizioni meteorologiche estreme che si verificano quando si registrano temperature molto elevate per più giorni consecutivi, spesso associati a tassi elevati di umidità, forte irraggiamento solare e assenza di ventilazione; tali condizioni rappresentano un rischio per la salute della popolazione, specialmente quella più fragile.

Per il calcolo della Pericolosità, sappiamo che le isole di calore, provocate dalle ondate di calore, sono fortemente correlate alla composizione morfologica della città: è quindi necessario mettere in

¹⁴ CLIVAR (Climate and Ocean: Variability, Predictability and Change) è uno dei sei progetti principali del Programma mondiale di ricerca sul clima (WCRP). La sua missione è comprendere le dinamiche, l'interazione e la prevedibilità del sistema climatico con particolare attenzione alle interazioni oceano-atmosfera (<https://www.clivar.org/>).

¹⁵ Lo strumento USGS EarthExplorer (EE) offre agli utenti la possibilità di interrogare, cercare e ordinare immagini satellitari, fotografie aeree e prodotti cartografici da diverse fonti (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

Approccio Metodologico

relazione la tipologia di uso del suolo e di costruito con le temperature registrate. Per valutare la Vulnerabilità si sono considerate le fasce di popolazione più fragili e quindi più propense a subire un danno. Infine, la mappa dell'Esposizione è calcolata in base al numero di persone che risiedono all'interno della struttura di riferimento.

3.3.3.1 Pericolosità

La pericolosità rappresenta la temperatura raggiunta dalle diverse zone della città per effetto di un'ondata di calore ed è ottenuta dal calcolo della temperatura media al suolo tra giorno e notte per ogni classe di LCZ.

Si è quindi proseguito calcolando la temperatura media al suolo notturna e diurna per ogni classe di LCZ del costruito e di uso del suolo. Eseguendo la media tra le temperature diurne e notturne di ogni classe LCZ è stato possibile definire i livelli di pericolo. In particolare, partendo dalla classe LCZ con temperatura più bassa, è stata calcolata la differenza di temperatura con le altre classi per arrivare ad una divisione in tre livelli di rischio basso-medio-alto. La differenza di temperatura tra le classi di LCZ e la LCZ con temperatura più bassa indica l'intensità dell'isola di calore urbana (UHI). I tre livelli sono stati definiti considerando sia la differenza con il valore di temperatura minore, sia in base alle caratteristiche delle singole classi di LCZ.

3.3.3.2 Vulnerabilità

La vulnerabilità di una popolazione è funzione della sensibilità, che può essere influenzata da fattori individuali come per esempio l'età, e dalla capacità adattiva, che può comprendere fattori come malattie pregresse o caratteristiche socioeconomiche.

Nel presente elaborato, viene invece applicato un approccio semplificato dove la componente della vulnerabilità tiene in considerazione solo la sensibilità della popolazione e, in particolare, il livello di sensibilità alle ondate di calore associato alle diverse fasce di età della popolazione residente.

Condizioni di caldo estremo rappresentano un rischio per la salute soprattutto in sottogruppi di popolazione caratterizzati da una limitata capacità di termoregolazione fisiologica o ridotta possibilità di mettere in atto comportamenti protettivi. Tra le categorie più a rischio abbiamo le persone anziane, i neonati e i bambini. Gli anziani, soprattutto se malati cronici (cardiopatici, diabetici etc.), sono le persone più a rischio di complicanze a causa di una maggiore sensibilità al calore, di una riduzione dello stimolo della sete e di una minore efficienza di meccanismi della termoregolazione. I lattanti e i bambini, a causa di una minore capacità di termoregolazione e per l'incapacità di esprimere eventuali

disagi legati alle condizioni ambientali, sono maggiormente esposti al rischio di un aumento eccessivo della temperatura corporea e ad una disidratazione, con possibili conseguenze dannose sul sistema cardiocircolatorio, respiratorio e neurologico (European Environment Agency, 2022).

Dunque, la vulnerabilità rappresenta la distribuzione della popolazione residente che può essere soggetta a impatti diretti sulla salute a causa delle ondate di calore.

La popolazione residente viene suddivisa in 6 fasce di età. In ambiente GIS viene associata ad ogni cella la popolazione residente. Le informazioni inerenti alla fascia di età di appartenenza all'interno del database della popolazione vengono utilizzate per calcolare il numero di persone per ogni fascia di età. Per ogni fascia di età viene valutato un livello di sensibilità al calore assunto secondo quanto riportato in Tabella 12.

Tabella 12 - Divisione in fasce di età e livelli di sensibilità

Classi di età (C)		Livelli di sensibilità (S)
Lattanti	0 – 4 anni	0,7
Bambini	5 – 14 anni	0,6
Adolescenti	15 – 19 anni	0,3
Adulti	20 – 59 anni	0,2
Anziani	60 – 74 anni	0,8
Molto anziani	> 75 anni	1

Il livello maggiore viene attribuito ai “molto anziani” e diminuisce con la riduzione dell’età anagrafica. Gli studi presenti in letteratura evidenziano come le fasce d’età più vulnerabili alle ondate di calore siano gli anziani e i neonati. Di conseguenza, il valore di sensibilità più alto viene attribuito alla fascia di età che comprende la popolazione maggiore di 75 anni. Il livello inferiore, 0,8, viene attribuito alla fascia di età precedente in quanto più prossima all’invecchiamento. Un valore di sensibilità elevato viene utilizzato per i lattanti, identificati come vulnerabili vista la scarsa capacità di termoregolazione e la difficoltà di comunicare il disagio, e il valore 0,6 viene associato alla classe dei bambini che mantengono la poca capacità di termoregolazione, ma hanno maggiori capacità di comunicazione. Al contrario, le classi intermedie, come adolescenti e adulti, hanno infatti livelli di sensibilità notevolmente più bassi, in quanto subiscono gli impatti delle ondate di calore, ma non sono state registrate in letteratura particolari criticità.

Per ottenere i valori di vulnerabilità è stato utilizzato il seguente calcolo per ogni cella:

$$\frac{\sum_{i=1}^n C_i \cdot S_i}{P} \quad (8)$$

C = Classe di età

S = Livello di sensibilità

P = Popolazione della cella

Il numero di persone per ogni classe di età (C) all'interno di ogni cella è moltiplicato per il rispettivo livello di sensibilità (S). I risultati sono sommati tra di loro e divisi per il numero di persone residenti all'interno di ogni cella (P).

I valori di vulnerabilità sono stati suddivisi in 3 livelli di vulnerabilità al calore, che, analogamente ai livelli di pericolo, vanno dal livello basso al livello alto, attraverso l'attribuzione proporzionale dei loro valori basata sulla divisione in 3 parti della differenza tra valore massimo e valore minimo dei risultati ottenuti.

$$\frac{Val_{max} - Val_{min}}{3} \quad (9)$$

3.3.3.3 Esposizione

Per l'esposizione si assume la popolazione residente. Pertanto, la mappa dell'esposizione rappresenta la popolazione residente ed è calcolata in base al numero di persone che risiedono in ogni cella. Grazie al database della popolazione georeferenziata, in ambiente GIS viene conteggiata la popolazione residente all'interno di ogni cella.

La suddivisione in tre livelli viene eseguita attraverso gli *intervalli naturali* che rappresentano una differenza di valore massima tra le singole classi, mentre sarà minima all'interno di ciascuna classe.

3.3.3.4 Rischio da ondate di calore per la salute dei residenti

La mappa del Rischio da ondate di calore per la salute dei residenti (da ora in poi mappa del Rischio) è ottenuta sovrapponendo i valori di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione calcolati in precedenza. La sovrapposizione si ottiene mediante l'uso di una matrice. Ad ogni livello basso-medio-alto è attribuito un valore. Inizialmente si sovrappone la pericolosità con la vulnerabilità (P x V) (Tabella 13).

Tabella 13 - Sovrapposizione della pericolosità alla vulnerabilità

		Vulnerabilità		
		<i>Basso</i>	<i>Medio</i>	<i>Alto</i>
Pericolosità	<i>Basso</i>	Basso	Basso	Medio
	<i>Medio</i>	Basso	Medio	Alto
	<i>Alto</i>	Medio	Alto	Alto

I valori della sovrapposizione (P x V) vengono a loro volta sovrapposti all'esposizione [(P x V) x E] (Tabella 14).

Tabella 14 - Sovrapposizione della pericolosità e vulnerabilità all'esposizione

		Esposizione		
		<i>Basso</i>	<i>Medio</i>	<i>Alto</i>
P x V	<i>Basso</i>	Basso	Basso	Medio
	<i>Medio</i>	Basso	Medio	Alto
	<i>Alto</i>	Medio	Alto	Alto

3.3.4 Analisi delle criticità connesse con il sistema di drenaggio urbano

A differenza delle analisi svolte nei paragrafi precedenti che avevano come obiettivo quello di mappare gli impatti del fenomeno delle ondate di calore, in questo paragrafo e in quello successivo ci si concentrerà sulle analisi utili a individuare le aree più critiche connesse con il fenomeno degli eventi meteorologici estremi, in particolare le piogge intense.

L'analisi delle criticità connesse con il sistema di drenaggio urbano non prevede una particolare elaborazione di dati, ma recepisce le analisi effettuate sulle criticità degli sfioratori da parte dell'azienda territoriale che gestisce il sistema di smaltimento delle acque meteoriche. Le analisi sono di carattere provvisorio in attesa che venga effettuata la modellazione idraulica del territorio e che si riescano quindi a ottenere misure più attendibili effettuate sugli sfioramenti.

Per il caso studio analizzato, per esempio, l'azienda territoriale A2A ha fornito una suddivisione del territorio in sottobacini idraulici, assegnando a ciascuno un livello di priorità, considerando più urgenti (livello alto) quelle aree in cui l'infrastruttura di drenaggio ha dei problemi e causa degli allagamenti. Inoltre, in queste aree non è possibile intervenire in modo diretto sulla rete per adeguarla

Approccio Metodologico

strutturalmente; dunque risultano ancora più fondamentali interventi in superficie per drenare le acque meteoriche.

Essa distingue quattro livelli di priorità di intervento più l'identificazione di una zona industriale con criticità elevata, in quanto queste aree sono quasi totalmente impermeabilizzate e con poche aree pubbliche su cui intervenire. Questa classificazione viene trasformata nei tre livelli di priorità utilizzati in questo sistema di mappe, applicando i criteri seguenti e non attribuendo priorità nulla poiché qualsiasi intervento in superficie ha un effetto positivo sul drenaggio urbano:

- viene attribuito un livello di priorità alto alle aree in cui sono stati assegnati livelli di priorità alta e molto alta e all'ambito zona industriale;
- viene attribuito un livello di priorità medio alle aree in cui sono stati assegnati livelli di priorità media e bassa;
- viene attribuito un livello di priorità basso alle aree restanti.

3.3.5 Analisi dell'idoneità all'infiltrazione di acqua nel suolo

Nel presente elaborato, le analisi dell'idoneità del suolo all'infiltrazione dell'acqua, come per l'analisi della criticità precedente, non prevedere elaborazione di dati, ma recepisce le analisi già effettuate dall'amministrazione sul territorio. In particolare, l'analisi dell'idoneità all'infiltrazione di acqua nel suolo mostra quelle aree in cui l'esecuzione di interventi di drenaggio urbano sostenibile può essere limitata da diverse tipologie di vincoli idrogeologici, tecnici, ambientali e giuridici.

Dunque, viene attribuita la massima idoneità alle aree che non presentano limitazioni di alcun tipo, mentre vengono attribuiti i livelli di idoneità bassa e media a quelle limitazioni potenziali la cui entità può essere verificata solo attraverso successive analisi specifiche che potrebbero rendere l'infiltrazione rispettivamente molto difficile o problematica. Non essendo disponibili informazioni quantitative estese sul territorio urbano analizzato, sono adottati criteri di valutazione di tipo qualitativo.

3.3.6 Definizione dei livelli di priorità per interventi di depavimentazione

In questo elaborato, le aree che verranno individuate attraverso la definizione dei livelli di priorità per interventi di depavimentazione, poiché tengono in considerazione la componente della popolazione residente, saranno localizzate solo nelle zone della città con presenza di abitanti.

Utilizzando la matrice di calcolo precedente (Tabella 13, Tabella 14), per ottenere le aree prioritarie a interventi di depavimentazione si sovrappone in un primo momento l'analisi delle criticità degli sfioratori e l'analisi dell'idoneità del suolo all'infiltrazione definendo così la "mappa dell'idoneità idraulica" (Tabella 15). Il livello di idoneità idraulica alto mostra quelle aree in cui l'esecuzione di interventi di drenaggio urbano sostenibile non è limitata dalla presenza di vincoli sui territori e porta beneficio al sistema di drenaggio urbano presente.

Successivamente, la mappa del rischio, ottenuta nel paragrafo 3.3.3.4, viene sovrapposta alla mappa dell'idoneità idraulica con la medesima matrice (Tabella 16).

Tabella 15 - Sovrapposizione criticità connesse al sistema di drenaggio urbano e idoneità all'infiltrazione

		Idoneità all'infiltrazione		
		Basso	Medio	Alto
Criticità drenaggio urbano	Basso	Basso	Basso	Medio
	Medio	Basso	Medio	Alto
	Alto	Medio	Alto	Alto

Tabella 16 - Sovrapposizione rischio e idoneità idraulica

		Idoneità idraulica		
		Basso	Medio	Alto
Rischio	Basso	Basso	Basso	Medio
	Medio	Basso	Medio	Alto
	Alto	Medio	Alto	Alto

Dall'analisi dei primi risultati è emersa chiaramente la necessità di individuare una unità funzionale territoriale oggettiva sulla quale effettuare le analisi diversa dalla griglia a maglia quadrata utilizzata fino a questo momento. Poiché tutti gli interventi che saranno individuati avranno come base comune quella di depavimentare alcune aree della città (rendendo quindi permeabile la pavimentazione) e poiché è noto che le Nature-Based Solutions per avere efficacia devono essere diffuse sul territorio, si è ritenuto opportuno scegliere, come unità funzionale finale i sottobacini idraulici individuati nel territorio comunale. Questa scelta è possibile in quanto a questo punto di analisi non è più necessario avere delle unità funzionali confrontabili tra loro, ma siamo nella fase della rappresentazione finale utile alla scelta dei siti prioritari per interventi di depavimentazione.

Questa nuova suddivisione prevede quindi un passaggio ulteriore dalla dimensione delle celle alla dimensione dei sottobacini idraulici. Il passaggio è stato eseguito in ambiente GIS calcolando la

Approccio Metodologico

maggioranza delle celle sottostanti per ogni sottobacino. Questo passaggio però non risulta essere rappresentativo dei valori delle celle. Di conseguenza si è eseguita la somma pesata delle celle sulla base del numero totale di celle presenti in ogni sottobacino. Nello specifico, per poter eseguire la somma, ai valori qualitativi “Basso-Medio-Alto” sono stati assegnati rispettivamente i valori numerici “1-2-3”. Per eseguire questo calcolo è necessario prima definire il centroide di ogni cella, in modo da evitare di conteggiare la stessa cella in due sottobacini diversi. Si precisa che ad ogni sottobacino è stato associato un codice numerico sequenziale per la corretta identificazione.

La suddivisione dei livelli avviene secondo gli intervalli naturali. In un primo momento si è deciso di suddividere i sottobacini nei tre livelli precedentemente utilizzati (basso-medio-alto), ma in questo modo alcuni sottobacini ottenevano lo stesso livello di priorità, nonostante i valori delle celle di riferimento prima della loro somma avessero valori molto diversi tra loro. Di conseguenza, si è deciso di suddividere le aree aggiungendo un livello di priorità. I livelli sono quindi:

- basso;
- medio;
- alto;
- molto alto.

3.3.7 Definizione dei livelli di idoneità alla diffusione di tetti verdi

L'obiettivo della Strategia di Diffusione dei Tetti Verdi è quello di individuare delle politiche che consentano la diffusione dei tetti verdi nel territorio comunale (sia per gli edifici pubblici che per quelli privati) per ottenere dei benefici a livello urbano. Gli edifici vengono individuati attraverso un'analisi territoriale che classifica il territorio in zone più o meno idonee, identificate attraverso i seguenti fattori:

- livelli di rischio da ondate di calore per la salute dei residenti;
- livelli di criticità connessa al sistema di drenaggio urbano;
- scarsa presenza di aree verdi;
- scarsa possibilità di realizzare nuove infrastrutture verdi a terra.

I tetti verdi hanno diversi benefici sul microclima urbano e sul comfort dell'edificio su cui sono realizzati, ad esempio: raffrescamento, laminazione, creazione di aree verdi, miglioramento della biodiversità urbana con l'inserimento di habitat secondari. Quindi, i fattori utilizzati per la realizzazione della mappa di idoneità tengono conto di questi aspetti.

La mappa dei livelli di idoneità alla diffusione di tetti verdi è realizzata considerando aspetti tecnici relativi alle criticità idrauliche legate al sistema di drenaggio urbano, al rischio per la salute umana derivante dall'esposizione alle ondate di calore, alla presenza del verde e della disponibilità di spazio per realizzarlo.

Ciò premesso, si sottolinea che le aree che verranno individuate attraverso la definizione dei livelli di idoneità alla diffusione di tetti verdi, poiché tengono in considerazione la componente della popolazione residente, saranno localizzate solo nelle zone della città con presenza di abitanti.

Tutte le analisi necessarie per la realizzazione della mappa sono già state sviluppate in precedenza.

In particolare:

- la mappatura del rischio da ondate di calore per la salute dei residenti si rimanda al paragrafo 3.3.3;
- per l'analisi delle criticità connesse al sistema di drenaggio urbano si rimanda al paragrafo 3.3.4;
- per la mancanza di aree verdi si utilizza l'inverso del calcolo della percentuale di suolo permeabile (PSF) del paragrafo 3.3.1.3;
- per la disponibilità di suolo per realizzare aree verdi si fa riferimento alla percentuale di suolo edificato (BSF) del paragrafo 3.3.1.2.

La mappa del rischio e quella delle criticità connesse al sistema di drenaggio urbano vengono sovrapposte attraverso la matrice di calcolo definendo la “mappa delle criticità delle questioni climatiche analizzate” (Tabella 17).

Per la definizione dei livelli di idoneità alla diffusione dei tetti verdi, contrariamente a quanto eseguito per la definizione dei livelli di priorità per interventi di depavimentazione, lo strato informativo dell'idoneità all'infiltrazione di acqua nel suolo non viene considerato. Questa scelta deriva dall'obiettivo dello strato informativo stesso. L'idoneità all'infiltrazione di acqua nel suolo mira a evidenziare i vincoli presenti sui territori che potrebbero/non potrebbero portare allo sviluppo di interventi NBSs al suolo. Dunque, i livelli di idoneità alla diffusione dei tetti verdi non risentono di questo strato informativo.

Tabella 17 - Sovrapposizione Rischio e criticità connesse al sistema di drenaggio urbano

		Criticità drenaggio urbano		
		<i>Basso</i>	<i>Medio</i>	<i>Alto</i>
Rischio	<i>Basso</i>	Basso	Basso	Medio
	<i>Medio</i>	Basso	Medio	Alto
	<i>Alto</i>	Medio	Alto	Alto

Approccio Metodologico

La dimensione della griglia a maglia quadrata utilizzata fino ad ora per le mappature, risulta non essere sufficientemente adatta per mostrare il beneficio delle aree verdi nel loro intorno. Infatti, la presenza di infrastrutture verdi ha un raggio di influenza tra i 10 e i 300 m (Ruzzon & Armiraglio, 2020).

Si è quindi scelto di utilizzare da qui in poi una griglia con una struttura di riferimento con una maglia di dimensioni che ricadono all'interno dell'intervallo indicato (10 - 300m) e multiplo della maglia precedente (Figura 16).

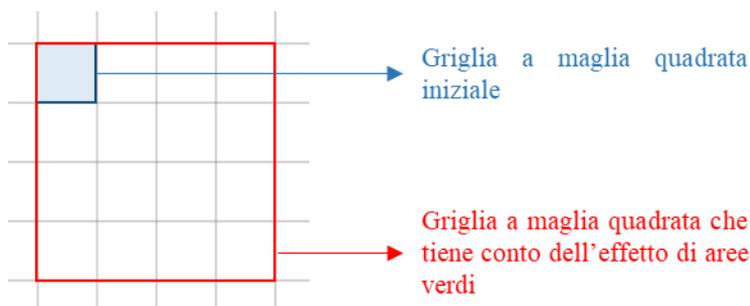


Figura 16 - Schema della griglia a maglia quadrata di riferimento

In ambiente GIS è quindi possibile estendere i risultati della mappa delle criticità alla nuova struttura di riferimento. Lo stesso procedimento viene eseguito sul calcolo del BSF e PSF.

In questo modo, tutte le analisi necessarie alla SDTV hanno la stessa struttura di riferimento.

Per il calcolo della presenza del verde, utilizziamo l'inverso del PSF calcolato in precedenza: se prima era necessario identificare le aree già destinate a superficie permeabile, ora è necessario identificare quelle aree in cui c'è scarsa presenza di verde.

La mappa delle criticità delle questioni climatiche analizzate viene sovrapposta alla mappatura della mancanza di aree verdi secondo la Tabella 18 e il risultato a sua volta sovrapposto alla densità dell'edificato (Tabella 19).

Tabella 18 - Sovrapposizione mappa delle Criticità delle questioni climatiche con il PSF⁻¹

		Mancanza aree verdi		
		<i>Basso</i>	<i>Medio</i>	<i>Alto</i>
Questioni climatiche	<i>Basso</i>	Basso	Basso	Medio
	<i>Medio</i>	Basso	Medio	Alto
	<i>Alto</i>	Medio	Alto	Alto

Tabella 19 - Sovrapposizione mappa delle Criticità delle questioni climatiche e PSF¹ con il BSF

		Densità dell'edificato		
		<i>Basso</i>	<i>Medio</i>	<i>Alto</i>
Questioni climatiche e mancanza di aree verdi	<i>Basso</i>	Basso	Basso	Medio
	<i>Medio</i>	Basso	Medio	Alto
	<i>Alto</i>	Medio	Alto	Alto

Le sovrapposizioni portano alla definizione della mappa di idoneità alla diffusione dei tetti verdi.

Dall'analisi dei primi risultati è emerso chiaramente che è necessario individuare una unità funzionale territoriale oggettiva sulla quale effettuare le analisi diversa dalla griglia a maglia quadrata utilizzata fino a questo momento. Poiché il sistema di tetti verdi agisce sull'edificio e sul suo intorno, ma anche in minima parte sugli sfioratori, le aree idonee alla SDTV avranno come unità funzionale i sottobacini idraulici individuati nel territorio comunale. Questa scelta è possibile in quanto a questo punto di analisi non è più necessario avere delle unità funzionali confrontabili tra loro, ma siamo nella fase della rappresentazione finale utile alla scelta dei siti idonei alla diffusione di tetti verdi.

Questa nuova suddivisione prevede quindi un passaggio ulteriore dalle celle ai sottobacini idraulici. Il passaggio è stato eseguito in ambiente GIS calcolando prima il centroide di ogni cella, in modo da evitare di conteggiare la stessa cella in due sottobacini diversi, e successivamente è stata eseguita la somma pesata del livello di ogni cella sulla base del numero totale di celle presenti in ogni sottobacino. Nello specifico, per poter eseguire la somma, ai valori qualitativi "Basso-Medio-Alto" sono stati assegnati rispettivamente i valori numerici "1-2-3". Si precisa che per ad ogni sottobacino è stato associato un codice numerico sequenziale per la corretta identificazione. La suddivisione dei livelli avviene secondo gli intervalli naturali. In questo caso si è deciso di suddividere le aree secondo quattro livelli di priorità:

- basso;
- medio;
- alto;
- molto alto.

3.4 Fase III – Definizione degli aspetti strategico-decisionali

Gli aspetti strategico-decisionali, rispetto a quelli tecnico-oggettivi, agiscono in maniera più soggettiva/valutativa nell'individuazione della lista delle priorità. Gli aspetti individuati offrono la libertà di adottare politiche e strategie in base alle esigenze e alle circostanze specifiche.

L'analisi di questi aspetti è suddivisa in due fasi: una prima fase che consiste nella definizione di una mappa di base e una seconda fase che tiene in considerazione le opportunità e i limiti presenti nel territorio.

3.4.1 Mappe di Base

Una volta identificate le aree prioritarie per interventi di depavimentazione e quelle più idonee per la diffusione di tetti verdi, è necessario definire le mappe di base utili ad individuare le superfici pavimentate e gli edifici che potrebbero essere oggetto di intervento.

3.4.1.1 Superfici pavimentate

La mappa di base per il PAD ha l'obiettivo di individuare puntualmente le aree pavimentate di proprietà pubblica su cui è possibile attuare interventi di depavimentazione. Vengono quindi tenute in considerazione tutte quelle aree destinate a servizio pubblico e tutte le strade e parcheggi, sempre di proprietà pubblica.

Dal database dei servizi delle proprietà comunali sono stati eliminati alcuni areali che rappresentano servizi già permeabili o con funzioni ritenute non idonee alla depavimentazione (per esempio, aree verdi già permeabili, impianti e attrezzature sportive, servizi tecnologici).

3.4.1.2 Edifici

La mappa di base per la SDTV rappresenta tutti gli edifici all'interno del territorio oggetto di studio suddivisi per edifici di proprietà comunale o altra proprietà. Per ottenerla si interseca il database delle proprietà comunali con il database degli edifici.

3.4.2 Mappa delle opportunità

La mappa delle opportunità rappresenta aspetti strategico-decisionali che sono da tenere in considerazione nell'individuazione puntuale delle priorità di intervento. L'approccio risulta quindi sensibile a possibili cambiamenti nella strategia politica o al sorgere di nuove esigenze. Si ritiene perciò di inserire le opportunità come semplici indicazioni di presenza, rappresentative ma non esaustive, creando uno strumento di supporto alle decisioni di pianificazione.

La mappa delle opportunità è necessariamente diversa per gli interventi di depavimentazione e per la diffusione di tetti verdi.

Le diverse opportunità sono riassunte nella Tabella 20 e approfondite nei paragrafi successivi.

Tabella 20 - Sintesi delle opportunità

Depavimentazione	Tetti verdi
Proposte dei cittadini	Tetti piani
Isole ambientali	Vincoli sugli edifici
Ambiti della città in trasformazione	Pericolosità
Itinerari di fruizione paesaggistica	Servizi
Servizi	
Infrastrutture per la mobilità	

3.4.2.1 Opportunità per gli interventi di depavimentazione

Con riferimento agli interventi di depavimentazione gli elementi che possono essere presi in considerazione sono costituiti in particolare da:

- *proposte dei cittadini*: questo strato informativo raccoglie le diverse aree proposte dalla cittadinanza per interventi di rigenerazione urbana. Questo strato consente al decisore di scegliere sui quali eseguire interventi che potrebbero avere una maggiore condivisione da parte degli abitanti, soddisfacendo in questo modo alcune richieste derivanti direttamente dai cittadini (richieste BOTTOM-UP);
- *isole ambientali*: intese come comparti urbani a elevata accessibilità per il trasporto pubblico, caratterizzate al loro interno da condizioni sicure per la mobilità pedonale e ciclabile. Entro questi ambiti sono di norma sviluppate politiche di moderazione del traffico, con limitazione a quello motorizzato individuale (Zone a Traffico Limitato, di Riqualficazione Urbana, a Pedonalità Privilegiata, Aree pedonali, strade residenziali, Zone

30, ecc.), in particolare mediante l'allontanamento delle componenti di traffico. Ogni isola ambientale si configura come zona:

- interna al centro abitato;
- a carattere prevalentemente residenziale;
- caratterizzata da relazioni di quartiere significative e/o omogenee per tipologia urbanistica;
- racchiusa dalla maglia della viabilità principale, e dunque interessata solo da viabilità locale in senso stretto o, nel caso di transito della rete TPL, interzonale.

Questo strato informativo è utile al decisore per identificare quelle aree che già prediligono il traffico di pedoni e ciclisti per poter realizzare interventi utili anche al miglioramento del benessere umano;

- ambiti della città in trasformazione: questa informazione consente di individuare quelle aree già soggette ad ambito di trasformazione, in corso o previsto. In particolare, gli Ambiti di Trasformazione comprendono aree e immobili oggetto di specifica perimetrazione, Piani Attuativi e/o permessi di costruire già convenzionati o approvati. Vengono inclusi in questa valutazione anche i Progetti Speciali, ossia quelle aree assoggettate a interventi specifici al fine di destinare aree a servizi pubblici e di interesse pubblico o interventi che perseguono gli obiettivi di recupero e riqualificazione di porzioni di città esistente obsoleta e/o in via di degrado;
- itinerari di fruizione paesaggistica: l'informazione circa la presenza di itinerari di fruizione paesaggistica in determinate aree dà la possibilità al decisore di scegliere quegli interventi che, se realizzati, potranno anche avere un impatto positivo sul paesaggio urbano. Infatti, la rete di itinerari di fruizione paesaggistica è finalizzata a promuovere:
 - la percorrenza degli spazi aperti lungo direttrici preferibilmente distinte dalle principali direttrici di conurbazione degli insediamenti e delle infrastrutture;
 - la connessione dei grandi spazi aperti tra loro attraverso vere e proprie greenway;
 - la penetrazione nelle aree urbane per garantire l'accessibilità dell'utenza alla rete;
 - la messa a sistema delle aree verdi urbane, dei nuclei storici, dei beni paesaggistici, servizi sovracomunali e aree commerciali.
- servizi: l'identificazione dei servizi presenti all'interno delle aree è un'informazione utile al decisore in quanto prevedere interventi di depavimentazione in prossimità di servizi può concorrere a migliorare la qualità e l'attrattività del luogo;

- infrastrutture per la mobilità: questa informazione individua le infrastrutture per la mobilità che attraverso interventi di nuova realizzazione o di sistemazione dell'esistente, possono essere viste come un'opportunità di rigenerazione dei luoghi di transito. Nelle azioni di rigenerazione, infatti, possono essere previsti anche interventi di depavimentazione.

3.4.2.2 Opportunità per la diffusione di tetti verdi

Con riferimento alla diffusione di tetti verdi gli aspetti strategico/decisionali da tenere in considerazione nell'individuazione delle aree più idonee sono costituiti da:

- tetti piani: questo strato consente al decisore di scegliere quei siti dove, dato il livello di inclinazione della copertura, è possibile realizzare un sistema di tetto verde. Il dato della pendenza del tetto è ottenuto tramite scansioni LiDAR su piattaforma aerea acquisite dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (ora Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica) nell'ambito del Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale;
- vincoli sugli edifici: questa informazione indica quali edifici sono soggetti a vincolo e/o sono edifici di interesse storico;
- pericolosità: benché questo strato informativo sia già all'interno del calcolo del rischio, in questo caso la presenza di tale informazione dà la possibilità al decisore di scegliere anche quegli edifici dove non sono presenti residenti (per esempio, edifici commerciali, direzionali, industriali), per eventualmente realizzare interventi che porteranno benefici all'edificio e al suo intorno, con un impatto positivo sulle temperature e sulla riduzione delle emissioni;
- servizi: l'identificazione dei servizi presenti all'interno degli edifici delle aree identificate è un'informazione utile al decisore in quanto consente di valutare e migliorare il comfort delle persone che lavorano e che usufruiscono di tali servizi;

4. Applicazione al caso studio

Dopo aver delineato nel capitolo precedente l'approccio metodologico per la gestione del territorio nell'ambito degli interventi di depavimentazione e della promozione di tetti verdi, il capitolo 4 applica il metodo in un contesto reale. Viene analizzato il caso studio della città di Brescia, un'area urbana caratterizzata da una serie di sfide legate ai cambiamenti climatici, tra cui ondate di calore sempre più frequenti ed eventi meteorologici estremi, come forti piogge.

All'interno del capitolo verranno dettagliate le fasi operative della metodologia e verranno mostrati i risultati di ogni analisi sulla città, approfondendone prima il contesto climatico generale e locale.

Successivamente verranno individuate le fonti esatte da cui sono stati reperiti i dati e l'applicazione del metodo in ogni sua fase.

Si partirà quindi dall'analisi degli aspetti tecnico-oggettivi per poi passare alla definizione di quelli più strategico-decisionali che tengono in considerazione specifiche opportunità o bisogni all'interno del territorio.

Di ogni calcolo e/o analisi effettuata vengono descritti i passaggi svolti in ambiente GIS o su fogli di lavoro elettronici che permettono l'utilizzo di file vettoriali e/o raster.

Le mappe vengono poi interamente rappresentate all'interno dell'Appendice A.

4.1 Descrizione del caso studio

Per testare la metodologia di individuazione delle aree prioritarie per la depavimentazione e quelle più idonee alla realizzazione di tetti verdi, è stata assunta come caso di studio la città di Brescia.

Brescia è un comune sito in Regione Lombardia, nella parte nord-orientale dell'Italia, suddiviso in 33 quartieri e con un'estensione territoriale di 90 km². La città è il capoluogo della Provincia di Brescia, che conta più di un milione e duecentomila abitanti (205 comuni). Con circa 200.000 abitanti (199.749 abitanti nel 2022), Brescia è la seconda città della Regione Lombardia, dopo Milano. Inoltre, il numero di utenti giornalieri della città raddoppia il numero di persone presenti nel Comune: la quantità di servizi, le infrastrutture e il mercato del lavoro fanno di Brescia un polo in grado di attrarre utenti provenienti da tutta la provincia (Figura 17).



Figura 17 - Inquadramento della città di Brescia

Dal punto di vista morfologico, il territorio è costituito da una parte pianeggiante a sud e da una zona montuosa a nord. Brescia si trova al confine tra queste due frange e questo aspetto contribuisce a rendere il suo territorio particolare in quanto si possono trovare elementi naturalistici appartenenti a diversi ambiti. Più in dettaglio, a nord confina con il sistema delle Prealpi bresciane che, in corrispondenza della città, formano colline ideali per lo svago all'aria aperta, mentre a sud il territorio è segnato dalla presenza di vaste aree rurali a prevalente uso agricolo.

Applicazione al caso studio

Brescia è inoltre caratterizzata dalla presenza del fiume Mella, che attraversa il territorio cittadino da nord a sud. Il fiume è l'elemento principale del reticolo idrico comunale che è caratterizzato anche da una fitta rete di canali e fiumi secondari che nascono sulle colline che circondano la città, attraversano il tessuto urbano e contribuiscono a irrigare le aree agricole meridionali.

4.1.1 Contesto Climatico Generale

Il presente paragrafo descrive il contesto climatico generale della città di Brescia a partire dall'analisi della condizione climatica attuale, contenuta nel Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (PNACC) di giugno 2018 (<https://bit.ly/30bSzLE>), redatto dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio del Mare (oggi Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - MASE). Il testo, aggiornato nel 2022 è attualmente sottoposto a procedimento di Valutazione Ambientale Strategica.

Secondo l'analisi della condizione climatica attuale, la città di Brescia appartiene alla macroregione climatica omogenea 1 "**Prealpi e Appennino Settentrionale**". Le macroregioni climatiche omogenee sono porzioni di territorio rappresentative del clima attuale aventi analoghe condizioni climatiche durante un periodo storico di riferimento. Rispetto ad altre regioni, i valori di accumulo delle precipitazioni invernali ed estive in questa macroregione sono nella media, mentre i fenomeni di precipitazione estrema hanno valori più alti. Dopo la macroregione 2, è la regione del Nord Italia con il maggior numero di giornate con temperature massime superiori alla soglia considerata (95° percentile). La figura seguente (Figura 18) mostra un riepilogo delle stime della variabilità e dei valori medi (in termini di deviazione standard) per gli indicatori di analisi selezionati.

Macroregione 1 - Prealpi e Appennino Settentrionale e relative aree climatiche omogenee:								
RCP 4.5: area calda - secca estiva (1A), area calda invernale - secca estiva (1B) e area piovosa invernale - secca estiva (1D)								
RCP 8.5: area calda invernale (1B), area piovosa-calda estiva (1C) e area calda - piovosa invernale - secca estiva (1E)								
Indicatori climatici	Include le Prealpi e l'Appennino settentrionale. L'area è caratterizzata da valori intermedi di precipitazioni invernali ed estive (dati climatici osservati) rispetto alle altre macroregioni climatiche e valori elevati di indicatori relativi ai fenomeni di precipitazione estremi (R20 e R95p).							
	 Temperatura media annua Tmean (°C)	 Precipitazioni intense R20 (n. giorni/anno con precipitazioni >20mm)	 Giorni con gelo FD (n. giorni/anno con Tmean <0°C)	 Giorni estivi SU95p (n. giorni/anno con Tmax > 29.2 °C)	 Cumulata delle precipitazioni invernali WP (mm)	 Cumulata delle precipitazioni estive SP (mm)	 95° percentile della precipitazione R95p (mm)	 Numero massimo di giorni asciutti consecutivi CDD (giorni/anno)
	13 (±0.6)	10 (±2)	51 (±13)	34 (±12)	187(±61)	168 (±47)	28	33 (±0)

Figura 18 - Indicatori climatici per la Macroregione 1
(Fonte: PNACC)

La situazione meteo-climatica della città di Brescia è analizzata attraverso i dati misurati nella stazione cittadina di ARPA Lombardia installata presso l'Istituto Agrario ITAS Pastori in Viale della Bornata e nella stazione sinottica presente presso l'aeroporto militare di Ghedi.

I dati ottenuti dalle misurazioni di queste stazioni sono gli unici con durata almeno ventennale liberamente messi a disposizione dal Sistema nazionale per l'elaborazione e la diffusione dei dati climatici realizzato da ISPRA.

I dati misurati dalla stazione meteorologica Ghedi mostrano che la temperatura media annuale negli ultimi 30 anni è stata compresa tra 12 e 16 °C, con una chiara tendenza al rialzo negli ultimi 10 anni. La temperatura massima assoluta annuale supera regolarmente i 35°C, con una massima registrata nell'estate del 2003 di 38°C. La temperatura minima assoluta dell'anno è compresa tra 0 e -5°C, con la più fredda registrata nell'inverno del 2005 quando il termometro segnava -15,2°C. Questa tendenza è confermata anche analizzando i dati della stazione cittadina dell'ARPA di Brescia, che presenta massimi e minimi più elevati rispetto alla stazione di Ghedi a causa della formazione di un'isola di calore in città, soprattutto durante i torridi mesi estivi.

4.1.2 Contesto Climatico Locale

Partendo dall'analisi generale del contesto climatico bresciano derivante dal Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici, il presente paragrafo ha lo scopo di fornire una rappresentazione locale di maggior dettaglio dell'area sulla quale insiste il comune di Brescia.

L'elaborazione dei dati disponibili è stata effettuata dalla Fondazione Centro euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC) nell'ambito della realizzazione della Strategia di Transizione Climatica (STC) della città di Brescia.

Nello specifico, per la temperatura (Figura 19) si può notare un aumento di circa 0.5-1°C nel periodo 2006-2018 rispetto agli anni precedenti, mentre per la precipitazione (Figura 20) è possibile riscontrare un aumento in frequenza di valori superiori alla media a partire dal 2008.

Applicazione al caso studio

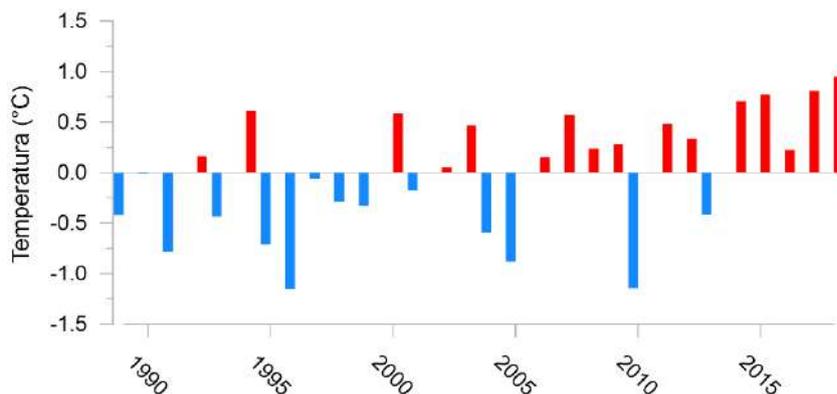


Figura 19 - Evoluzione dell'anomalia annuale di temperatura media in gradi, calcolata rispetto alla temperatura annuale media sul periodo 1989-2018

(Fonte: elaborazione CMCC tratta dalla Strategia di Transizione Climatica)

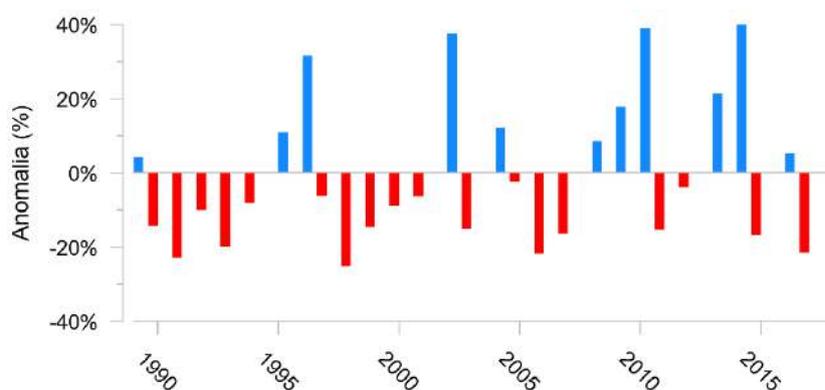


Figura 20 - Evoluzione dell'anomalia di precipitazione annuale (espressa in percentuale), calcolata rispetto alla precipitazione annuale media sul periodo 1989-2018

(Fonte: elaborazione CMCC tratta dalla Strategia di Transizione Climatica)

La piovosità media annua nell'area di studio è di circa 1000 mm (Figura 21a): questi valori sono più elevati nelle zone montuose, tra 1.100 e 1.250 mm, e minori nelle zone pianeggianti, tra 900 e 950 mm. È dunque visibile forte connessione con l'orografia del territorio. Al contrario, la temperatura media annuale dell'aria ha mostrato l'andamento opposto, con un valore medio di 15,3 °C (Figura 21b) in diminuzione con l'aumentare dell'altitudine. L'area più urbanizzata è caratterizzata da temperature che raggiungono i 16,2 °C per la presenza di edifici e attività umane.

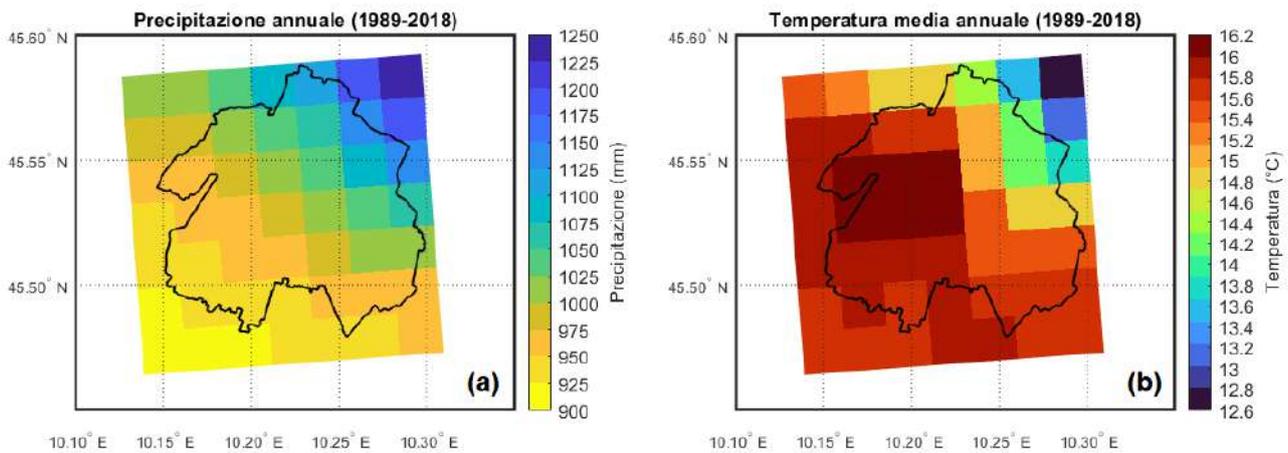


Figura 21 - Distribuzione spaziale della precipitazione annuale (a) e della temperatura media annuale (b)
(Fonte: elaborazione CMCC tratta dalla Strategia di Transizione Climatica)

Analizzando l'evoluzione dell'anomalia della temperatura media annua (Figura 19) e delle precipitazioni medie annue (Figura 20), calcolate sulla base dei valori medi del periodo 1989-2018, osserviamo un aumento di entrambi gli indicatori nel trentennio. Nello specifico, per la temperatura dell'aria (Figura 19), possiamo osservare un aumento di circa 0,5-1°C nel periodo 2006-2018 rispetto agli anni precedenti, mentre per le precipitazioni si nota un aumento in frequenza di valori superiori alla media a partire dal 2008.

4.2 Costruzione della banca dati

In base alla Parte I della metodologia, una volta stabilita la città di Brescia come caso di studio, si è proceduto alla raccolta dei dati. Per questa ricerca, i dati sono stati raccolti da tre fonti principali.

I dati della **base cartografica** sono stati recuperati dal *Geoportale di Regione Lombardia*¹⁶, che permette di accedere a informazioni e database open-source sia in formato raster che in formato vettoriale. Più precisamente, sono stati raccolti i file vettoriali relativi ai confini amministrativi delle diverse unità amministrative locali. La struttura di riferimento invece è stata realizzata interamente in ambiente GIS. Considerata l'estensione del Comune di Brescia, si è scelto di realizzare una griglia a base quadrata con una maglia di dimensioni 30x30m che permette di costruire una base informativa dettagliata. A questa griglia sono stati associati un campo ID che contiene i numeri progressivi delle celle e il campo Area che indica l'area della cella stessa. In particolare, quest'ultimo campo è variabile per quelle celle intersecate con il confine amministrativo della città di Brescia.

¹⁶https://www.geoportale.regione.lombardia.it/ricerca?p_p_id=gptadvancedsearch_WAR_gptmetadataportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&_gptadvancedsearch_WAR_gptmetadataportlet_searchTerm=&_gptadvancedsearch_WAR_gptmetadataportlet_showSearchFields=true

Applicazione al caso studio

Le **informazioni sul contesto** sono state raccolte da diverse fonti. I dati vettoriali contenenti le caratteristiche morfologiche dell'area, come le informazioni sull'uso del suolo o le tipologie territoriali, sono stati scaricati dal Geoportale di Regione Lombardia, in particolare dal *Database Topografico (DBT)* e dalla banca dati *Uso e copertura del suolo (DUSAF 6.0)*. Il DBT è una banca dati geografica costituita da diverse informazioni territoriali digitali che rappresentano e descrivono gli oggetti topografici del territorio e nel loro insieme rappresentano la cartografia di base. Il DBT è realizzato in collaborazione con gli enti locali per avere un riferimento cartografico unitario e omogeneo per tutti i comuni, le Province, Regione Lombardia e gli altri enti ed i professionisti, per organizzare un Sistema Informativo Territoriale (SIT) regionale in cui confluiscono i dati tematici e i piani dei diversi enti e settori. Il database *Uso e copertura del suolo* è uno strumento di analisi e monitoraggio dell'uso del suolo omogeneo su tutto il territorio nazionale e condiviso all'interno dell'Infrastruttura per l'Informazione Territoriale (IIT) tramite il Geoportale di Regione Lombardia. Il livello informativo utilizzato è relativo *all'Uso e copertura del suolo 2018 (DUSAF 6.0)*. Altre informazioni sul territorio più puntuali e di dettaglio sono state fornite dall'amministrazione del Comune di Brescia, in particolare dal Settore Trasformazione Urbana e dal Settore Verde - Parchi Cittadini - Reticolo Idrico. L'amministrazione ha anche fornito la banca dati della popolazione residente aggiornata al 31/12/2018, depurata di tutti i dati sensibili. Il database contiene l'età dei residenti, la fascia di età di appartenenza suddivisa in cinque anni, l'indirizzo di residenza completo di CAP, la cittadinanza (se italiana o straniera) e il quartiere. Ogni residente è associato sulla mappa al civico in cui risiede.

Anche i **dati di analisi** derivano da molteplici fonti. Le immagini satellitari da cui si ricavano i dati delle temperature diurne e notturne sono state ottenute dal database *USGS Earth Explorer*¹⁷. All'interno del database è possibile ottenere immagini satellitari Landsat, dati radar, dati di modelli digitali di elevazione, foto aeree, dati satellitari Sentinel, dati sulla copertura del suolo, dati cartografici digitali dalla mappa nazionale e molti altri set di dati. In particolare, è possibile inserire tra i criteri primari il perimetro dell'area di studio e il range delle date di interesse. È necessario poi selezionare il tipo di dato che si vuole ottenere: in questo caso per le immagini satellitari si sceglie il data set Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L1, della categoria Landsat Collection 2 Level-1, e nei criteri aggiuntivi si scelgono le condizioni diurne o notturne dell'immagine (Tabella 21). Invece, i dati riferiti alle criticità degli sfioratori e della permeabilità dei suoli sono stati forniti dall'Amministrazione del Comune di Brescia, dal Settore Trasformazione Urbana.

¹⁷ <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Tabella 21 - Dati delle immagini satellitari Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L1

	Date acquired	Time	Landsat product ID
Immagine diurna	2019-06-24	10:04:25.2222760	LC08_L1TP_193028_20190624_20200827_02_T1
Immagine notturna	2019-06-26	21:00:23.3132679	LC08_L1TP_193028_20190624_20200827_02_T1

4.3 Aspetti tecnici oggettivi

Una volta raccolti e preparati i dati necessari, si è passati alla definizione della cinque sottofasi della Parte II della metodologia di riferimento.

4.3.1 Mappatura delle Local Climate Zone

Per il calcolo delle Local Climate Zone, utilizzando come fonte dei dati il database *Usa e copertura del suolo (DUSAF 6.0)* e il Database Topografico, sulla base dei dati disponibili si è scelto, per la città di Brescia, di analizzare cinque dei dieci parametri individuati da Stewart & Oke (2012).

4.3.1.1 Sky View Factor (SVF)¹⁸

Per definire lo Sky View Factor (SVF) del caso studio si utilizzano solo i dati inerenti all'altezza degli edifici in quanto più facilmente reperibili. In ambiente GIS si converte il file vettoriale che contiene il valore delle altezze degli edifici in un file raster.

Il calcolo dello Sky View Factor avviene attraverso gli strumenti di geoprocessing all'interno del software SAGA GIS. Sempre in ambiente GIS si calcola il valore medio del raster intersecandolo con la griglia di riferimento 30x30m in modo da ottenere un valore vettoriale utile per i successivi calcoli. L'intervallo utilizzato per la legenda della mappa sarà di 0,1 e più il valore si avvicina a 0 minore è la vista del cielo.

L'analisi mostra come le aree boscate e quelle agricole non assumano alcun valore data la mancanza di edifici (Figura 22). Nelle aree edificate lo SVF ha valori medi (tra 0,6 e 0,9) nella maggioranza dei casi, mentre ha valori minori, tra 0,3 e 0,6, all'interno del centro storico (Figura 23).

¹⁸ La mappa dell'intero territorio è rappresentata nell'Appendice A, Tavola 1a.

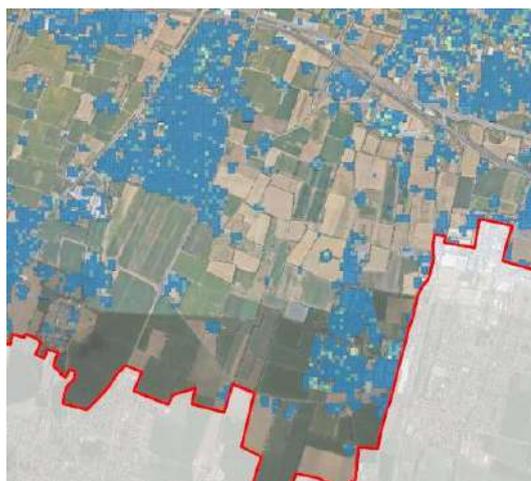


Figura 22 - Estratto dello SVF per le aree agricole

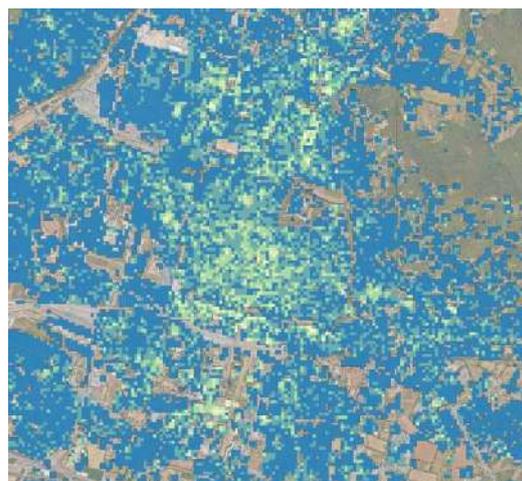
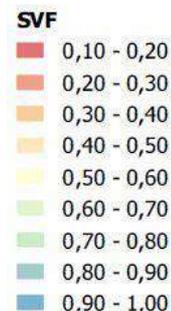


Figura 23 - Estratto dello SVF per il centro storico e le aree circostanti



4.3.1.2 Building Surface Fraction (BSF)¹⁹

La percentuale di suolo edificato viene calcolata grazie all'utilizzo delle informazioni contenute nel DBT della città di Brescia. Il database contiene infatti un file vettoriale dove tutti gli edifici sono poligoni e ciò permette di intersecare facilmente gli edifici con la griglia di riferimento. Si procede con il calcolo dell'area di ogni edificio all'interno di ogni cella, per poi sommarle tra loro ($\sum A_{ed}$) e ottenere quindi l'area coperta dagli edifici. Nel foglio di calcolo Excel, calcoliamo il BSF come indicato nelle equazioni (1) e (2). Del valore ottenuto viene poi calcolata la sua percentuale (Tabella 22).

Tabella 22 - Estratto della tabella di calcolo per il BSF

ID	A_c [m ²]	$\sum A_{ed}$ [m ²]	BSF	BSF%
3833	901			0
3834	901	133	0,148	15
3835	901	300	0,333	33
3836	901	737	0,818	82
3837	901	893	0,991	99
3838	901	510	0,566	57
3839	901	244	0,271	27
3840	901	32	0,036	4
3841	901			0
3842	901			0
3843	901			0
3844	901	180	0,200	20
3845	901	95	0,105	11
3846	901	204	0,226	23
3847	901	136	0,151	15

¹⁹ La mappa dell'intero territorio è rappresentata nell'Appendice A, Tavola 1b.

Il foglio di calcolo viene importato in QGIS attraverso l'operazione di join tabellare e la percentuale di suolo edificata viene rappresentata in tavola secondo un intervallo del 10%.

La mappa di analisi mostra come la percentuale di suolo edificato (BSF) è maggiore laddove sono presenti aree industriali e ha valori superiori al 50% all'interno del centro storico (Figura 24).



Figura 24 - Estratto del BSF del centro storico e alcune aree industriali

4.3.1.3 Pervious surface fraction (PSF)²⁰

Per il calcolo delle superfici permeabili si fonderanno le informazioni del DBT (vegetazione: area verde, bosco, coltura agricola, pascolo incolto; superfici idrografiche - ghiacciai e nevai perenni: area bagnata di corso d'acqua, invaso artificiale, specchio d'acqua) e quelle fornite dall'amministrazione (verde pubblico, cespugliato) ad eccezione delle alberature e delle siepi. Essendo questi ultimi file vettoriali di tipo puntuale, sarà necessario unirli e successivamente realizzare un buffer di 2,5 m per renderli poligonali e poterli così unire alle superfici permeabili già individuate. Si prosegue intersecando le informazioni delle superfici permeabili con la griglia di riferimento e calcolando l'area di superficie permeabile presente all'interno di ogni cella. Come per il parametro precedente viene eseguita la somma delle aree in ogni cella ($\sum A_{perm}$), poi divisa per l'area della cella stessa (A_c). Nel foglio di calcolo Excel, calcoliamo il PSF come indicato nelle formule (3) e (4). Del valore ottenuto viene poi calcolata la sua percentuale (Tabella 23).

²⁰ La mappa dell'intero territorio è rappresentata nell'Appendice A, Tavola 1c.

Applicazione al caso studio

Tabella 23 - Estratto della tabella di calcolo per il PSF

ID	A _c [m ²]	∑A _{perm} [m ²]	PSF	PSF%
1	3	3	1,000	100
2	232	197	0,849	85
3	603	464	0,769	77
4	651	186	0,286	29
5	57	56	0,982	98
6	390	390	1,000	100
7	759	533	0,702	70
8	901	645	0,716	72
9	901	718	0,797	80
10	864	802	0,928	93
11	155	101	0,652	65
12	172	31	0,180	18
13	549	549	1,000	100
14	863	803	0,930	93
15	901	665	0,738	74

Il foglio di calcolo viene importato in GIS attraverso l'operazione di join tabellare e la percentuale di suolo permeabile viene rappresentata nella mappa secondo un intervallo del 10%.

La Tavola 1c mostra chiaramente la “cintura” verde che circonda la città, a nord con il monte Maddalena e i colli Campiani e a sud con le aree agricole di cintura (Figura 25). All'interno dell'urbanizzato, escludendo il centro storico, sono presenti aree verdi più o meno grandi a disposizione della cittadinanza (Figura 26).

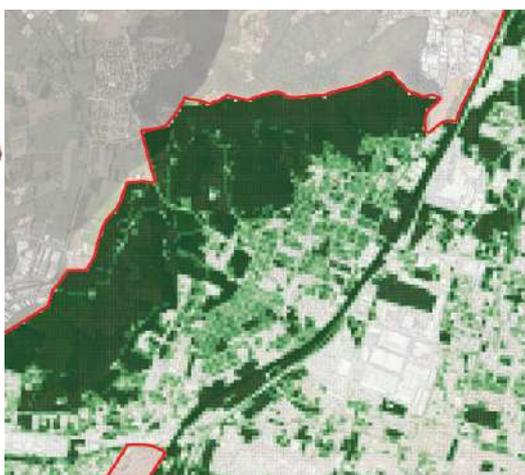
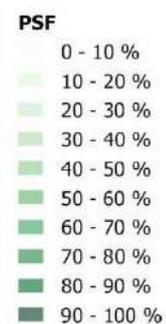


Figura 25 - Estratto del PSF dei Colli Campiani



Figura 26 - Estratto del PSF per il centro storico e le aree circostanti



4.3.1.4 Impervious Surface Fraction (ISF)²¹

La percentuale di suolo impermeabile viene calcolata partendo dai parametri BSF e PSF calcolati in precedenza secondo la formula. Nel foglio di calcolo Excel, calcoliamo l'ISF come indicato nelle formule (5) e (6). Del valore ottenuto viene poi calcolata la sua percentuale (Tabella 24).

Tabella 24 - Estratto della tabella di calcolo per il ISF

ID	Area Celle [m ²]	BSF	PSF	(BSF + PSF)	ISF	ISF%
2317	901	0,001	0,68	0,68	0,32	32
2318	901	0,361	0,54	0,90	0,10	10
2319	901	0,124	0,79	0,91	0,09	9
2320	901		1,00	1,00	0,00	0
2321	901	0,082	0,69	0,77	0,23	23
2322	901	0,302	0,46	0,76	0,24	24
2323	901	0,400	0,55	0,95	0,05	5
2324	901	0,261	0,22	0,48	0,52	52
2325	901	0,263	0,24	0,50	0,50	50
2326	901	0,375	0,26	0,64	0,36	36
2327	901	0,299	0,14	0,44	0,56	56
2328	901	0,499	0,26	0,76	0,24	24
2329	901	0,310	0,18	0,49	0,51	51
2330	901	0,337	0,30	0,63	0,37	37
2331	901	0,279	0,09	0,37	0,63	63

Il foglio di calcolo viene importato in QGIS attraverso l'operazione di join tabellare e la percentuale di suolo impermeabile viene rappresentata nella mappa secondo un intervallo del 10%.

La Figura 27 mostra la grande quantità di superficie impermeabile dovuta alle infrastrutture stradali e ferroviarie e ai grandi piazzali delle aree industriali.

²¹ La mappa dell'intero territorio è rappresentata nell'Appendice A, Tavola 1d.



Figura 27 - Estratto del ISF del centro storico e alcune aree industriali

4.3.1.5 Height of roughness elements (BH)²²

L'altezza degli edifici è un dato presente nel DBT. All'interno della cartella edificato si trovano diversi file vettoriali con informazioni in merito agli edifici mappati. In particolare, il file "Unita_volumetriche" riporta come campo l'altezza della porzione dell'edificio (un_vol_av) (Figura 28).

	uuid	un_vol_av	un_vol_por	cr_edf_uui	un_vol_qe	un_vol_ex	md_posacc	md_upd_dt	u
1	RLB-fadffade-3...	8,840000000000	al suolo	RLB-4fbfe409-a...	8,840000000000	altezza	1:2000	2007-07-21	RLB-è
2	RLB-925f6bca-7...	7,370000000000	al suolo	RLB-901337fb-...	7,370000000000	altezza	1:2000	2007-07-21	RLB-è
3	RLB-77d1ad92-...	7,940000000000	al suolo	RLB-fa114548-1...	7,940000000000	altezza	1:2000	2007-07-21	RLB-è
4	RLB-385e0398-...	6,520000000000	al suolo	RLB-ce018f4b-0...	6,520000000000	altezza	1:2000	2007-07-21	RLB-è
5	RLB-96588b00-...	8,000000000000	al suolo	RLB-a4e3f1b2-...	8,000000000000	altezza	1:2000	2007-07-21	RLB-è
6	RLB-7b4d0b89-...	3,000000000000	al suolo	RLB-d1997296-...	3,000000000000	altezza	1:2000	2007-07-21	RLB-è
7	RLB-afc8ee2a-6...	6,780000000000	al suolo	RLB-c9fbac36-4...	6,780000000000	altezza	1:2000	2007-07-21	RLB-è
8	RLB-9c9faae9-f...	24,630000000000	al suolo	RLB-5b587464-...	24,630000000000	altezza	1:2000	2007-07-21	RLB-è
9	RLB-35c660e3-...	6,300000000000	al suolo	RLB-f57e29c3-d...	6,300000000000	altezza	1:2000	2007-07-21	RLB-è
10	RLB-b845d0ea-...	13,380000000000	al suolo	RLB-8d87aadf-...	13,380000000000	altezza	1:1000	2007-07-21	RLB-è
11	RLB-445e4eac-...	3,000000000000	al suolo	RLB-f4aff967-0...	3,000000000000	altezza	1:2000	2007-07-21	RLB-è
12	RLB-cb6494b7-...	28,760000000000	al suolo	RLB-58f88603-c...	28,760000000000	altezza	1:2000	2007-07-21	RLB-è

Figura 28 - Estratto della tabella attributi con evidenziato il campo dell'altezza degli edifici

²² La mappa dell'intero territorio è rappresentata nell'Appendice A, Tavola 1e.

Il file nativo si interseca direttamente con la struttura di riferimento e ne viene calcolata la media all'interno di ogni cella. L'altezza degli edifici viene rappresentata in tavola secondo un intervallo di 3m.

La mappa che rappresenta l'altezza media degli edifici evidenzia come gli edifici molto alti (maggiori di 24 m) siano sporadici: è possibile trovarne alcuni a sud del centro storico e altri nel nord della città. Il resto degli edifici ha un'altezza medio-alta nel centro storico e nella prima cintura di espansione. Più ci si avvicina alla cintura verde, più l'altezza degli edifici diminuisce (Figura 29).

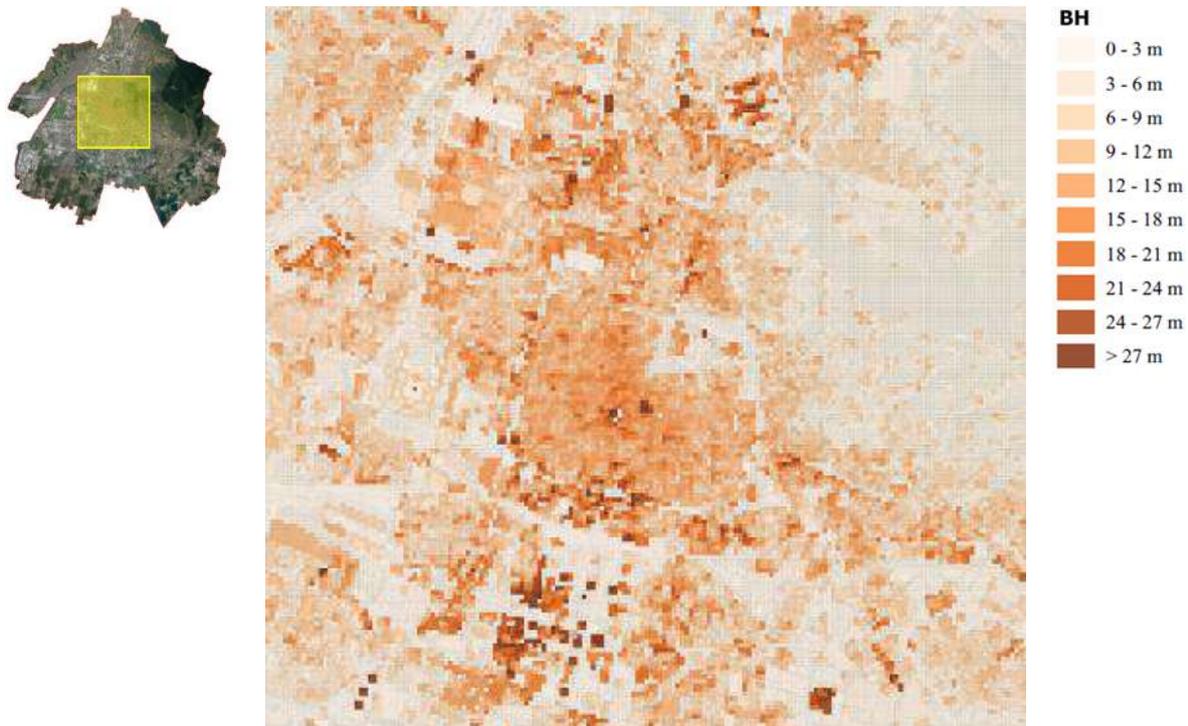


Figura 29 - Estratto del BH del centro storico e le aree circostanti

4.3.1.6 Classificazione delle Local Climate Zone (LCZ)

A seguito dei risultati delle singole analisi, i valori dei parametri indicati in letteratura vengono adattati al caso studio. Non avendo a disposizione l'altezza delle alberature, il parametro BH per le LCZ A-G non viene considerato (Tabella 25).

I singoli parametri calcolati in precedenza vengono uniti in un foglio di calcolo Excel e successivamente associati alla struttura di riferimento (Tabella 26).

Tabella 25 - Parametri delle classi di LCZ adattati al caso studio

	SVF	BSF [%]	ISF [%]	PSF [%]	BH [m]
LCZ 1	0,2 - 0,4	> = 40	60 - 90	< = 10	> = 27
LCZ 2	0,3 - 0,6	> = 40	40 - 60	10 - 20	9 - 27
LCZ 3	0,2 - 0,6	> = 40	40 - 60	20 - 30	3 - 9
LCZ 4	0,5 - 0,7	20 - 40	30 - 40	30 - 60	> = 27
LCZ 5	0,5 - 0,8	20 - 40	30 - 40	30 - 60	9 - 27
LCZ 6	0,6 - 0,9	20 - 40	20 - 30	30 - 60	3 - 9
LCZ 7	0,2 - 0,5	> = 40	10 - 20	20 - 30	<=3
LCZ 8	> 0,7	20 - 40	40 - 60	10 - 20	3 - 9
LCZ 9	> 0,8	< = 20	10 - 20	60 - 90	3 - 9
LCZ 10	0,6 - 0,9	20 - 40	30 - 40	20 - 30	3 - 27
LCZ A	-	< = 10	< = 10	> = 90	-
LCZ B	-	< = 10	< = 10	> = 90	-
LCZ C	-	< = 10	< = 10	> = 90	-
LCZ D	-	< = 10	< = 10	> = 90	-
LCZ E	> 0,9	< = 10	> = 90	< = 10	-
LCZ F	-	< = 10	< = 10	> = 90	-
LCZ G	-	< = 10	< = 10	> = 90	-

Tabella 26 - Estratto della tabella con i parametri calcolati

ID	SVF	BSF%	PSF%	ISF%	BH [m]
1416	0,93	35	13	51,90	4,06
1417	1,00	24	60	15,97	5,15
1418	0	0	97	3,44	0,00
1419	0,93	29	58	13,30	3,42
1420	0,98	28	41	31,27	3,48
1421	0,91	33	16	50,61	3,66
1422	0,94	24	25	51,76	4,47
1423	1,00	17	40	43,27	5,70
1424	1,00	26	66	8,26	7,03
1425	1,00	33	49	17,82	6,70
1426	1,00	11	33	56,08	6,64
1427	1,00	50	50	0,18	6,64
1428	1,00	23	38	39,04	6,64
1429	0	0	57	43,40	0,00
1430	1,00	12	8	80,15	4,11

Come indicato nella metodologia, dalle celle vengono prima isolate le LCZ 10, successivamente, attraverso il BSF vengono suddivise nella tipologia di costruito (1-9) e uso del suolo (A-G). Per la suddivisione delle classi di LCZ in tipologia di costruito viene quindi suddiviso il territorio prima secondo il parametro BSF, poi secondo il parametro BH e infine il parametro PSF.

Per la suddivisione in classi di LCZ di uso del suolo viene seguita la metodologia indicata nel paragrafo 3.3.1.6.

Dall'insieme delle LCZ A-G si estrae tramite la selezione per espressione e la formula (7) la classe di LCZ E. L'insieme dei poligoni appartenenti ai livelli dell'Uso del suolo DUSAF 6.0 vengono uniti in un unico file vettoriale per essere intersecato in modo più semplice con la struttura di riferimento.

Si procede calcolando l'area della superficie DUSAF all'interno di ogni cella, eliminando le LCZ E e 1-10 già identificate. In questo modo si esportano singolarmente le LCZ A, B, C, D, F, G.

Il file vettoriale contenente le classi di LCZ di uso del suolo esportate dal DUSAF, vengono sottratte dal file delle classi di LCZ A-G ottenuto tramite la prima suddivisione del parametro BSF.

In questo modo è possibile individuare quelle celle che risultano senza una corretta classificazione. Queste celle vengono suddivise in classi D e E secondo la Tabella 10.

Per avere la restituzione grafica delle LCZ si estraggono le tabelle attributi dei vari layer LCZ e si uniscono in un unico foglio di lavoro in modo da uniformare la tabella. Le LCZ A-G vengono classificate secondo la Tabella 11 diventando LCZ 11-17 (Tabella 27).

Tabella 27 - Estratto della tabella con i parametri e le classi di LCZ

ID	SVF	BSF%	PSF%	ISF%	BH	Classi di LCZ	LCZ
1416	0,93	35	13	51,90	4,06	LCZ 8	8
1417	1,00	24	60	15,97	5,15	LCZ 6	6
1418	0	0	97	3,44	0	LCZ D	14
1419	0,93	29	58	13,30	3,42	LCZ 6	6
1420	0,98	28	41	31,27	3,48	LCZ 6	6
1421	0,91	33	16	50,61	3,66	LCZ 8	8
1422	0,94	24	25	51,76	4,47	LCZ 8	8
1423	1,00	17	40	43,27	5,70	LCZ 9	9
1424	1,00	26	66	8,260	7,03	LCZ 6	6
1425	1,00	33	49	17,82	6,70	LCZ 6	6
1426	1,00	11	33	56,08	6,64	LCZ 9	9
1427	1,00	50	50	0,18	6,64	LCZ 3	3
1428	1,00	23	38	39,04	6,64	LCZ 6	6
1429	0	0	57	43,40	0	LCZ D	14
1430	1,00	12	8	80,15	4,11	LCZ 10	10

Applicazione al caso studio

Si importa il foglio di lavoro Excel in ambiente GIS tramite l'operazione di join tabellare e si procede con la creazione della legenda.

La Tavola 1f presente nell'Appendice A mostra la distribuzione delle LCZ per il territorio di Brescia. In Figura 30 un estratto della mappa delle LCZ che mostra il centro storico e il suo intorno.

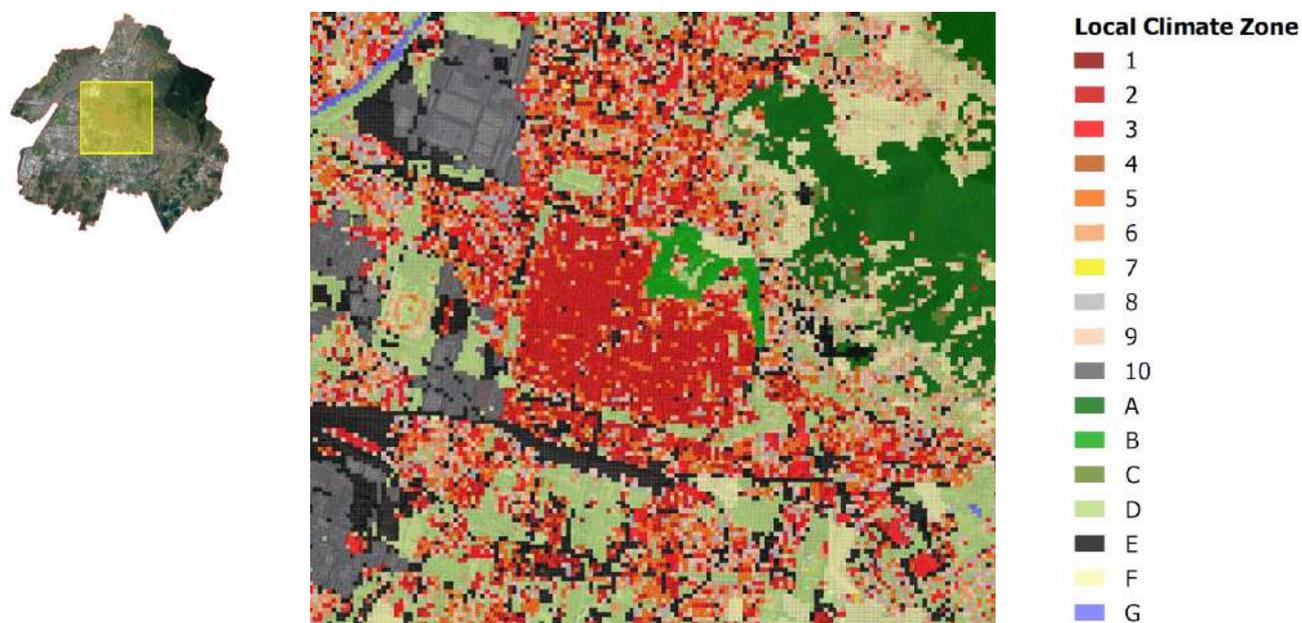


Figura 30 - Estratto delle LCZ per il centro storico e il suo intorno

La Tabella 28 mostra il numero e la percentuale delle classi di LCZ presenti.

Tabella 28 - Calcolo delle tipologie di LCZ presenti nel territorio

LCZ	Numero di celle per ogni LCZ	% rispetto al territorio
1	79	0,08%
2	3206	3,15%
3	3511	3,45%
4	53	0,05%
5	3487	3,43%
6	4449	4,37%
7	42	0,04%
8	2609	2,56%
9	6482	6,37%
10	6400	6,29%
A	17317	17,01%
B	264	0,26%
C	968	0,95%
D	15029	14,76%
E	9018	8,86%
F	26741	26,27%
G	2152	2,11%
Totale	101.807	100,00%

Con riferimento al costruito, si nota come le tipologie più diffuse sono le LCZ 9 (Edifici sparsi) e le LCZ 6 (Edifici bassi e aperti). Le zone più compatte sono riferite alle classi LCZ 2 e 3 presenti in minima parte sul territorio. Gli edifici industriali occupano più del 6% dell'intero territorio comunale.

In relazione al suolo, la classe LCZ F riferita all'agricoltura è presente in maggioranza rispetto alle altre classi. Segue la classe delle LCZ A (Alberi Densi) grazie alla presenza del monte Maddalena a nord-est del centro città e la classe delle LCZ D (Prati).

I dettagli sulle singole classi di LCZ per il territorio di Brescia sono presenti nell'Appendice B.

Un'attenta analisi delle LCZ mostra come in numerose aree della città siano presenti diverse classi di LCZ nonostante il quartiere sia omogeneo rispetto alla morfologia urbana. Questo dimostra come la scelta della dimensione della griglia sia fondamentale per calcolare le LCZ. Ad esempio, la Figura 31 rappresenta un'area della città in cui sono presenti 4 classi di LCZ diverse (LCZ 3, 6, 8, 9), ma la tipologia abitativa è la stessa. Infatti, in alcune celle sono presenti più edifici rispetto al verde o rispetto alle strade e viceversa.



Figura 31 - Esempio di area della città con quattro diverse classi di LCZ

4.3.2 Mappatura delle Land Surface Temperature

Per il calcolo delle Land Surface Temperature si sono identificate, per mezzo della piattaforma *Remote Sensing Lab (RSLab)*, le immagini satellitari disponibili per l'area di studio. La ricerca è stata effettuata per i mesi di giugno, luglio e agosto, dal 2000 al 2021 utilizzando satelliti Landsat 5, 7 e 8 con emissività NDVI-based (Tabella 29).

Tabella 29 - Giornate con disponibilità di LST calcolate

2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
19-giu	8-lug	25-giu	28-giu	14-giu	17-giu	20-giu	23-giu
22-ago	24-lug		30-lug	30-giu	19-lug	22-lug	25-lug
	25-ago			16-lug		7-ago	10-ago
				1-ago		23-ago	26-ago
				17-ago			
2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
11-lug	12-giu	17-lug	21-ago	28-giu	7-giu	10-giu	13-giu
27-lug	28-giu			30-lug	23-giu	26-giu	15-lug
28-ago	14-lug			15-ago	9-lug	12-lug	31-lug
	30-lug				25-lug	28-lug	
	15-ago				10-ago	29-ago	
					26-ago		
2016	2017	2018	2019	2020	2021		
15-giu	2-giu	5-giu	8-giu	26-giu	13-giu		
1-lug	18-giu	21-giu	24-giu	12-lug	29-giu		
17-lug	4-lug	7-lug	10-lug	28-lug	15-lug		
2-ago	5-ago	23-lug	26-lug	13-ago	31-lug		
18-ago	21-ago	8-ago	11-ago		16-ago		
		24-ago	27-ago				

Delle date identificate, grazie al supporto di CMCC, è stato possibile individuare quelle giornate che presentavano condizioni anomale in termini di stress termico. In particolare, più il valore è superiore a 1, maggiori sono le anomalie (Tabella 30).

Tra le immagini diurne disponibili più recenti all'interno di un'ondata di calore, anche verificando la totale copertura del territorio, si è inizialmente scelta la giornata del 26/07/2019.

Come spiegato in precedenza però, il database RSLab non fornisce dati delle temperature notturne.

Al contrario, il database USGS Earth Explorer offre immagini satellitari munite di dati delle temperature diurne e notturne. Si è quindi cercato in un primo momento l'immagine notturna del 26/07/2019, senza ottenere risultati.

La decisione è stata quindi di ricercare le immagini satellitari notturne delle altre giornate anomale identificate o di giornate vicine che potessero rientrare all'interno dell'ondata di calore.

La ricerca ha portato all'individuazione delle immagini satellitari notturne del 26/06/2019 (ore 21:00) e delle immagini diurne del 24/06/2019 (ore 10:04) già definita come una giornata anomala. Il CMCC conferma che la notte del 26/06/2019 sia stata una notte tropicale con temperature non inferiori a 20°. Le due date ricadono quindi all'interno di un'ondata di calore.

Gli orari del rilevamento delle immagini satellitari non sono pienamente rappresentativi del picco di calore diurno e del raffrescamento notturno, ma danno indicazione della situazione anomala delle temperature di quelle giornate.

Tabella 30 - Giornate anomale

DATA	STRESS TERMICO
25/08/2001	1,085
25/06/2002	1,380
28/06/2003	3,724
30/07/2003	1,222
17/06/2005	1,356
22/07/2006	2,358
15/08/2009	1,596
17/07/2010	1,992
21/08/2011	1,476
15/08/2012	1,992
15/07/2015	4,431
31/07/2015	4,431
02/06/2017	2,204
18/06/2017	2,204
05/08/2017	2,021
21/08/2017	2,021
08/08/2018	1,388
24/08/2018	1,388
08/06/2019	1,505
24/06/2019	1,505
10/07/2019	1,876
26/07/2019	1,876
13/08/2020	1,093

Le immagini satellitari vengono processate in ambiente GIS tramite il Semi-Automatic Classification Plugin²³. Tale plugin consente la classificazione supervisionata delle immagini di telerilevamento, fornendo strumenti per il download, la preelaborazione e la post-elaborazione delle immagini. Le operazioni di preelaborazione delle immagini satellitari prevedono la conversione delle

²³ Il Semi-Automatic Classification Plugin è un plugin Python per il software QGIS sviluppato con l'obiettivo generale di facilitare il monitoraggio della copertura del suolo da parte di persone il cui campo principale non è strettamente il telerilevamento, ma che potrebbero trarre vantaggio dall'analisi del telerilevamento.

Applicazione al caso studio

immagini in riflettanza superficiale e la successiva derivazione degli indici spettrali (per esempio l'indice di vegetazione della differenza normalizzata - NDVI) (Leroux et al., 2018; Teodoro & Amaral, 2019). Successivamente, La temperatura della superficie terrestre può essere calcolata dalla temperatura di luminosità del satellite (Weng et al., 2004). Utilizzando esclusivamente la Banda 10, si estraggono i dati delle temperature al suolo (Figura 32, Figura 33).

Grazie agli algoritmi presenti in ambiente GIS, si intersecano i valori delle temperature con la cella 30x30 di riferimento, facendo una media delle temperature che ricadono all'interno di ogni cella.

Le immagini delle temperature diurne e notturne mostrano come, nelle aree boscate e nelle aree agricole, le temperature siano sempre inferiori rispetto all'urbanizzato. Nelle temperature diurne²⁴ identifichiamo i dati più alti all'interno del centro storico e nelle aree industriali, sia quelle a margine, sia quelle all'interno del tessuto urbanizzato. Spicca in particolare un'area, all'interno di un contesto industriale, in cui le temperature risultano più basse rispetto all'intorno: questo è dovuto dal tetto bianco presente in alcuni edifici che fanno parte dell'azienda. Le aree con una temperatura medio-alta (30-32 °C) sono quelle poste a confine tra l'urbanizzato e le aree boscate e/o agricole.

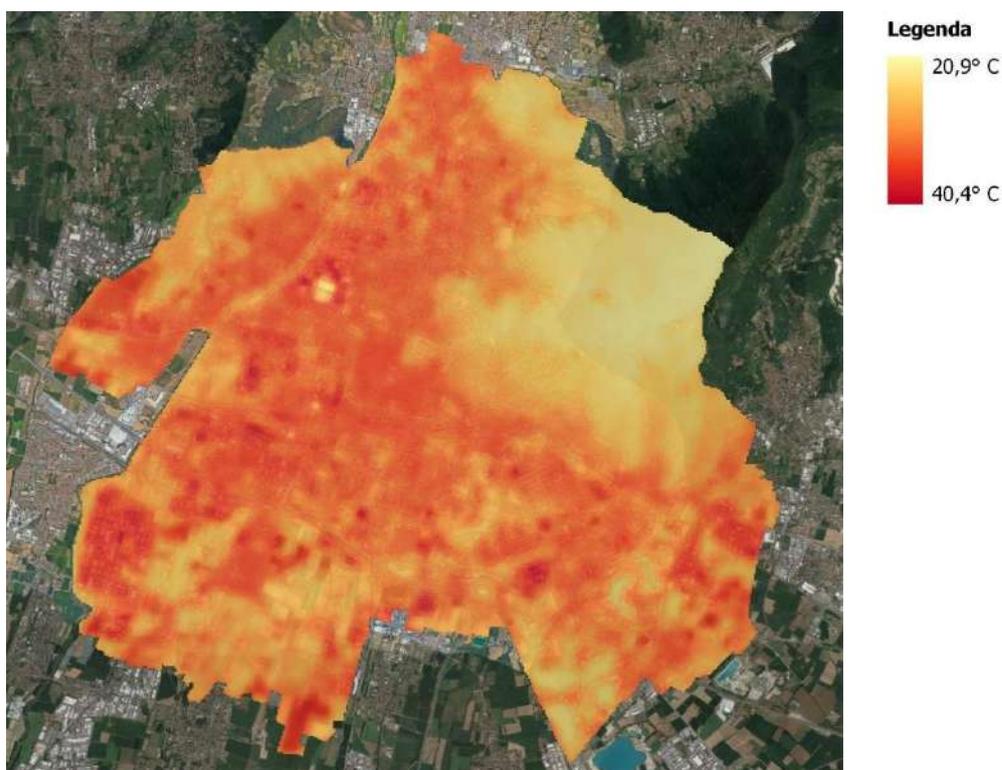


Figura 32 - LST diurne

²⁴ La mappa dell'intero territorio è rappresentata nell'Appendice A, Tavola 2a.

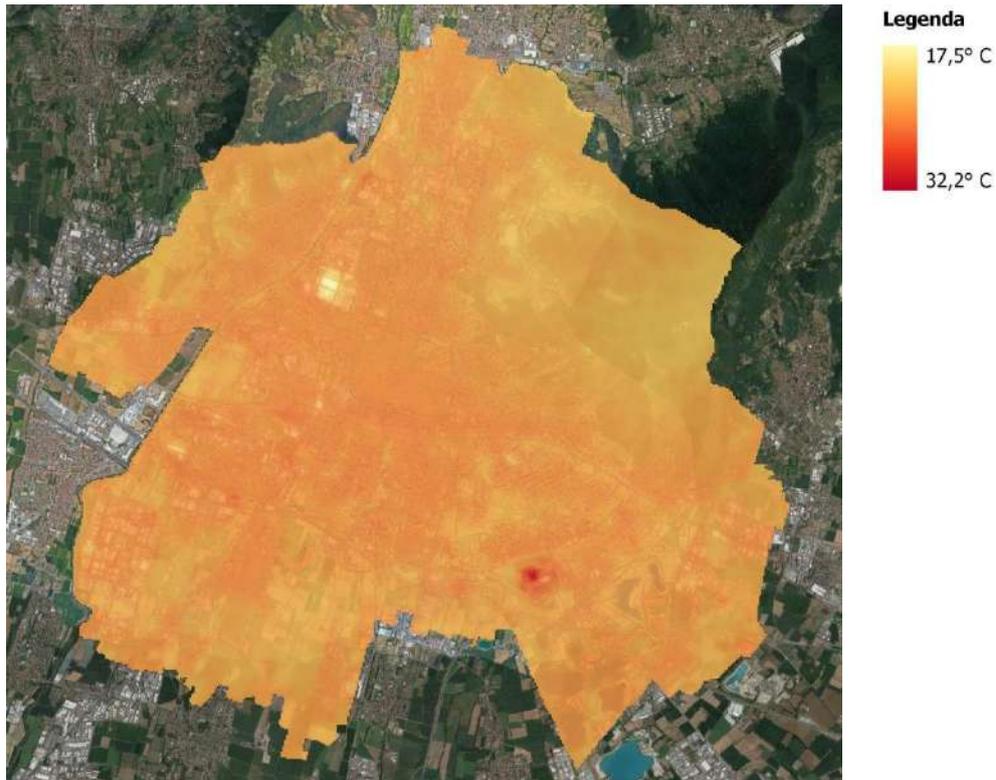


Figura 33 - LST notturne

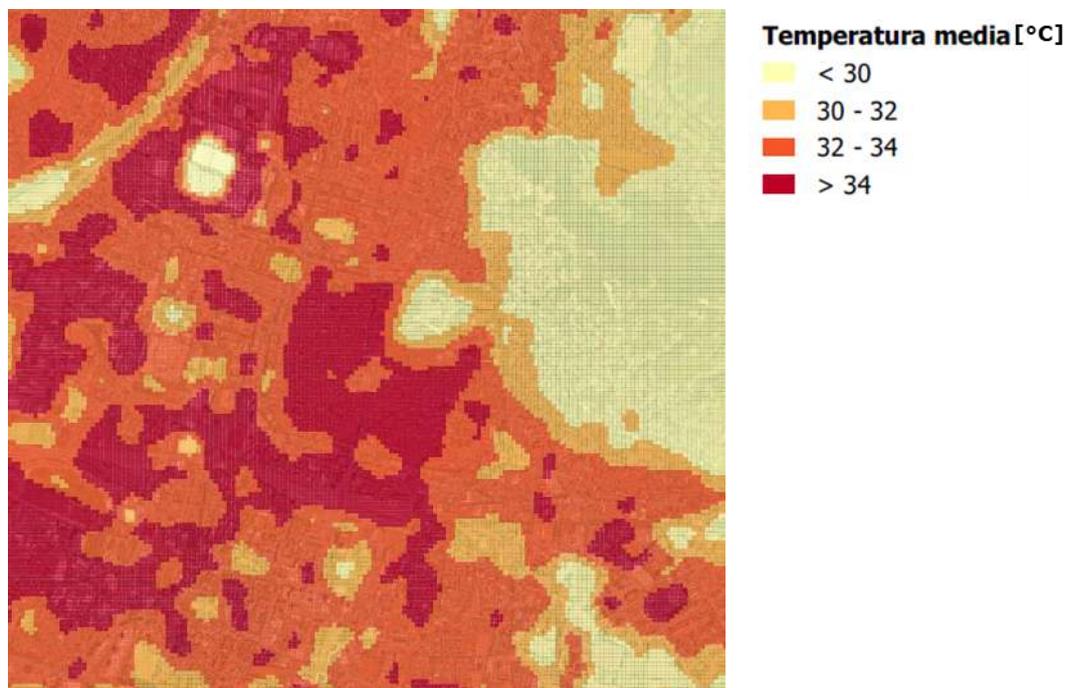


Figura 34 - Estratto delle LST adattate alle celle per il centro storico e il suo intorno

Applicazione al caso studio

Al contrario le temperature notturne²⁵ risultano essere distribuite in modo più omogeneo all'interno del tessuto urbanizzato. Troviamo la particolarità di un'area industriale a sud con temperature elevate, mentre le aree a confine con le zone boschive e agricole hanno una temperatura più bassa rispetto alle aree più densamente urbanizzate.

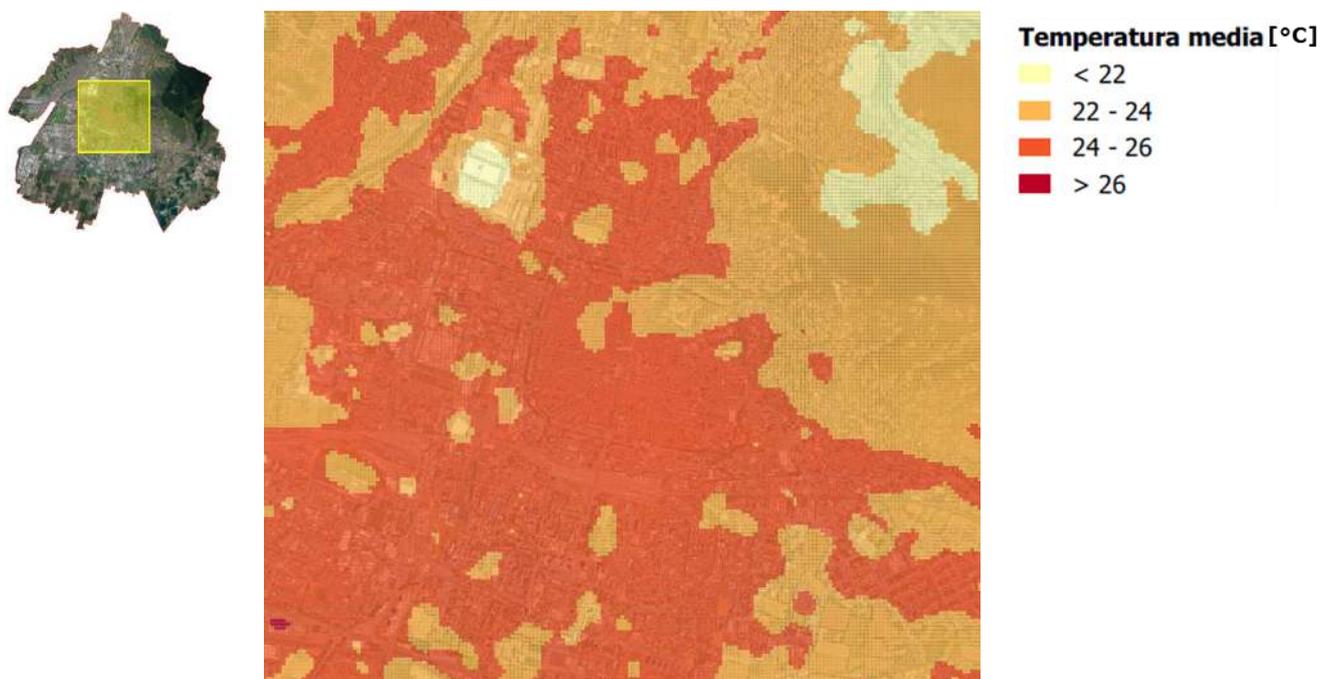


Figura 35 - Estratto delle LCZ per il centro storico e il suo intorno

4.3.3 Mappatura del Rischio da ondate di calore per la salute dei residenti

Il rischio (R) per la salute umana dovuto all'esposizione a ondate di calore viene espresso come combinazione delle tre variabili pericolosità, vulnerabilità ed esposizione.

La pericolosità (P) rappresenta la probabilità che il fenomeno delle ondate di calore si verifichi in una determinata area; la vulnerabilità è la propensione delle persone a subire un danno alla salute; mentre l'esposizione (E) è la popolazione a rischio in una determinata area.

²⁵ La mappa dell'intero territorio è rappresentata nell'Appendice A, Tavola 2b.

4.3.3.1 Pericolosità

Grazie all'utilizzo della struttura di riferimento, ogni valore di temperatura al suolo (diurna e notturna) è stato associato alla rispettiva classe di LCZ. In questo modo è stato poi possibile calcolare per ogni classe di LCZ la media delle temperature diurne²⁶ e notturne²⁷ al suolo.

La suddivisione in livelli è avvenuta utilizzando le informazioni in Tabella 31.

Tabella 31 - Divisione in livelli di pericolo

Local Climate Zone	Day to night temperatura media	Differenza di temperatura rispetto alla LCZ più bassa	Livelli di pericolo
LCZ A	23,75	0,00	Livello Basso Aree non urbanizzate caratterizzate da verde naturale o urbano di tipo arboreo-arbustivo-erbaceo o paesaggio alberato, rurale e prato naturale. La LCZ G, che riguarda i corpi idrici, è inclusa perché ha temperature vicine.
LCZ G	25,53	1,78	
LCZ C	25,67	1,92	
LCZ F	26,41	2,66	
LCZ B	26,86	3,11	
LCZ D	27,75	4,00	
LCZ 9	28,10	4,35	Livello Medio Questo livello riguarda tipi di LCZ urbane che hanno un comportamento termoclimatico molto simile, ma non sono morfologicamente omogenee. In particolare, le LCZ 4, LCZ 5 e LCZ 6 sono aree con edifici di diverse altezze ma aperte e con presenza di verde, mentre le restanti si riferiscono a edifici bassi, sparsi, senza aree verdi e con pavimentazione per lo più pavimentata e impermeabile.
LCZ 6	28,20	4,45	
LCZ 7	28,38	4,63	
LCZ 8	28,60	4,85	
LCZ 4	28,61	4,86	
LCZ 5	28,62	4,87	
LCZ E	28,63	4,88	Livello Alto In questo livello le aree presentano valori abbastanza simili (elevati). Le LCZ 1, LCZ 2 e LCZ 3 hanno caratteristiche urbane simili, la LCZ 10 fa riferimento a strutture industriali, mentre la LCZ E si riferisce ad aree con uso del suolo fortemente impermeabile (pavimentato).
LCZ 3	28,68	4,93	
LCZ 1	28,87	5,13	
LCZ 2	28,99	5,24	
LCZ 10	29,44	5,69	

Otteniamo quindi la mappa della pericolosità²⁸ divisa in tre livelli basso-medio-alto. Vediamo che le zone con pericolosità bassa sono quelle riferite alle aree verdi, mentre le aree industriali e le infrastrutture stradali e ferroviarie hanno il livello di pericolosità alto (Figura 36).

²⁶ La mappa dell'intero territorio è rappresentata nell'Appendice A, Tavola 3a.

²⁷ La mappa dell'intero territorio è rappresentata nell'Appendice A, Tavola 3b.

²⁸ La mappa dell'intero territorio è rappresentata nell'Appendice A, Tavola 3c.

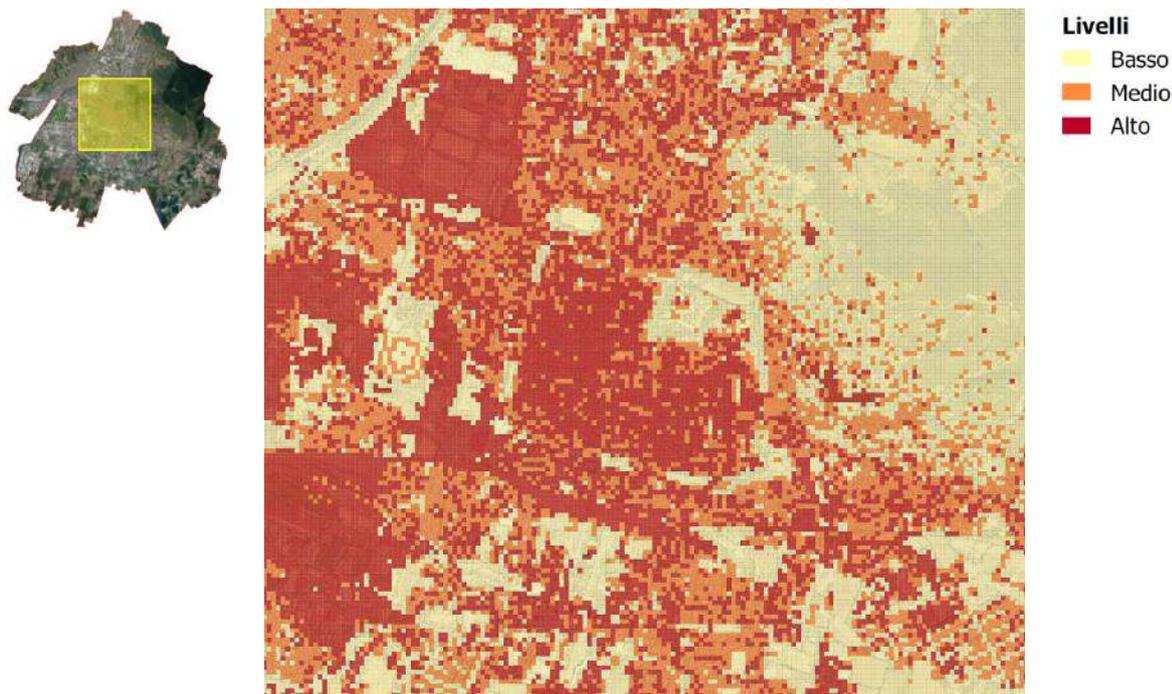


Figura 36 - Estratto dei livelli di pericolosità – centro storico

4.3.3.2 Vulnerabilità²⁹

Il calcolo della vulnerabilità viene eseguito utilizzando la formula (9), mentre la suddivisione in livelli viene definita secondo la formula (10). In base ai valori massimi e minimi i livelli di vulnerabilità vengono suddivisi secondo la Tabella 32.

Definiti i valori dei singoli livelli, questi possono essere associati alle rispettive celle. La Tabella 33 mostra un estratto dei calcoli.

Tabella 32 - Divisione in tre livelli di vulnerabilità

	Valore	Livello
$\frac{1,00 - 0,2}{3} = 0,2667$	0,2 – 0,47	Basso
	0,48 – 0,74	Medio
	0,75 – 1,00	Alto

²⁹ La mappa dell'intero territorio è rappresentata nell'Appendice A, Tavola 4.

Tabella 33 - Estratto della tabella di calcolo per definire i livelli di vulnerabilità

ID	Classi di età						$\sum C \times S$	Popolazione	Vulnerabilità	Livello
	0-4	5-14	15-19	20-59	60-74	+75				
4337	2	2		5	6	2	10,4	17	0,612	Medio
4338							0	0		
4339	1		2	5	3	4	8,7	15	0,580	Medio
4340				2		2	2,4	4	0,600	Medio
4341		3		6			3,0	9	0,332	Basso
4342	2	2		6			3,8	10	0,380	Basso
4343		1		12	3	1	6,4	17	0,376	Basso
4344				2	1	1	2,2	4	0,550	Medio
4345		1	1	6	3	3	7,5	14	0,536	Medio
4346		4	1	8	1	2	7,1	16	0,444	Basso
4347						1	1,0	1	1,000	Alto
4348		3	1	8		2	5,7	14	0,407	Basso
4349		1	4	7	4	1	7,4	17	0,435	Basso
4350		1	1	10	5	1	7,9	18	0,439	Basso
4351		4	4	20	10	3	18,6	41	0,454	Basso

La mappa della vulnerabilità differisce da quella della pericolosità in quanto non copre tutto il territorio, ma considera solo quelle celle in cui c'è almeno una persona residente.

In questo caso notiamo come ci sia notevole frammentazione dei livelli all'interno del territorio, ad eccezione di alcune aree che hanno un livello di vulnerabilità medio-basso (Figura 37).



Figura 37 - Estratto dei livelli di vulnerabilità – centro storico

4.3.3.3 Esposizione³⁰

L'esposizione rappresenta la somma della popolazione residente all'interno di ogni cella. La suddivisione in valori viene definita secondo la Tabella 34. Nella suddivisione in livelli il valore 436 viene momentaneamente escluso in quanto rappresenta un dato particolare, appartenente ad una sola cella ed isolato rispetto agli altri valori. Il dato deriva dalla popolazione residente all'interno di un edificio a torre di Edilizia Residenziale Pubblica "Torre Tintoretto" (ora demolita), situato nell'area sud-est della città di Brescia. Il livello *Alto* sarebbe quindi tra i valori 97 e 301 a cui poi viene aggiunto in fase di legenda il valore 436.

Tabella 34 - Divisione in tre livelli di esposizione

Valore	Livello
1 - 26	Basso
27 - 96	Medio
97 - 436	Alto

A parte alcune eccezioni di valori molto alti, il territorio ha complessivamente un livello di esposizione medio bassa (Figura 38).



Livelli
■ Basso
■ Medio
■ Alto

Figura 38 - Estratto dei livelli di esposizione – centro storico

³⁰ La mappa dell'intero territorio è rappresentata nell'Appendice A, Tavola 5.

4.3.3.4 Rischio da ondate di calore per la salute dei residenti

Utilizzando la matrice del rischio si sono sovrapposti i tre livelli Pericolosità, Vulnerabilità ed Esposizione per definire la mappa dei livelli di rischio legato alle ondate di calore (Figura 39).

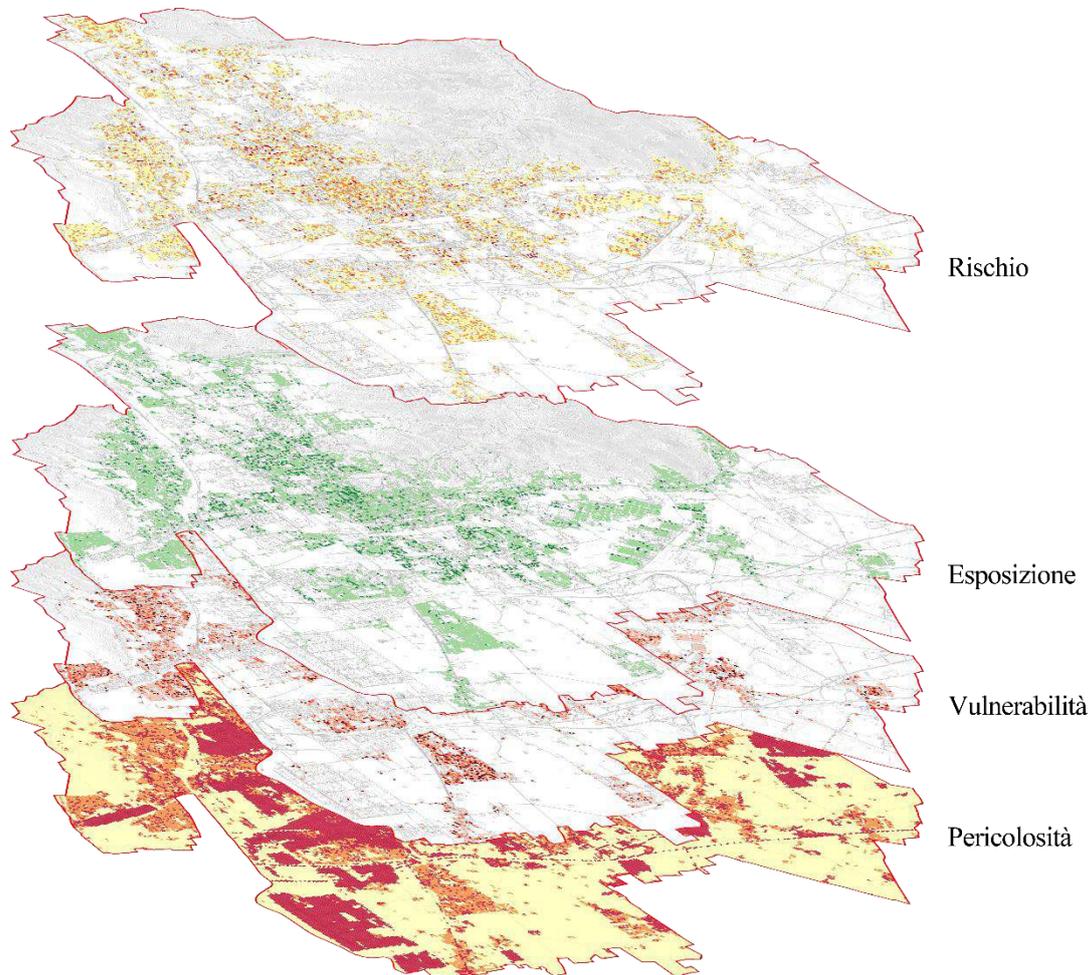


Figura 39 - Sovrapposizione dei livelli di Pericolosità, Vulnerabilità ed Esposizione per il calcolo del Rischio

Dalla mappa³¹ risulta che le aree con un rischio medio-alto sono il centro storico e la prima cintura di espansione. La Figura 40 mostra un estratto dei livelli di rischio nella zona del centro storico.

³¹ La mappa dell'intero territorio è rappresentata nell'Appendice A, Tavola 6.

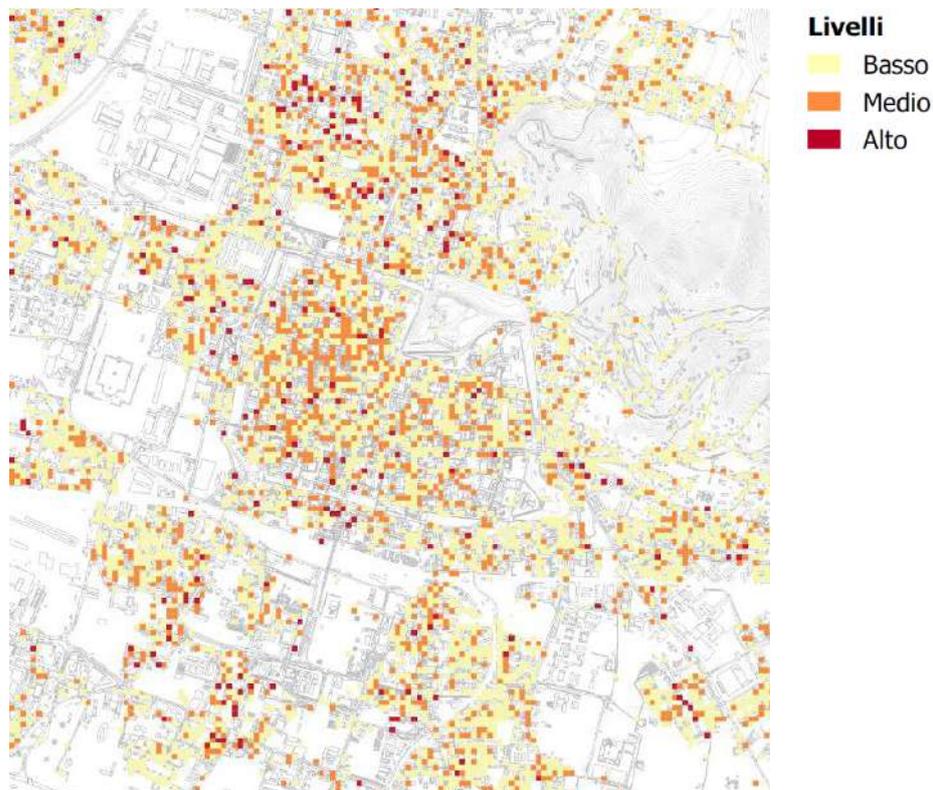


Figura 40 - Estratto dei livelli di rischio – centro storico

4.3.4 Analisi delle criticità connesse al sistema di drenaggio urbano

Le analisi legate alle criticità connesse con il sistema di drenaggio urbano sono specifiche per il caso di Brescia. Non è sempre detto che l'azienda che si occupa del servizio di smaltimento acque abbia questi dati e possa condividerli. Di conseguenza, si potrebbero utilizzare modelli idraulici sito specifici dove presenti o analisi legate al rischio idrogeologico del territorio.

Per il caso di Brescia, le informazioni sono fornite dall'azienda territoriale A2A.

La Tabella 35 rappresenta la definizione dei bacini più critici, il livello di priorità secondo l'azienda e quello fornito in base ai livelli decisi per le analisi.

Tabella 35 - Livelli di priorità e idoneità per gli sfioratori

Bacini degli sfioratori	Livelli di priorità A2A	Livelli di priorità
Bacino dello sfioratore SF14	Molto alta	Alta
Bacini di via Dalmazia, in particolare zona comparto Milano e Freccia Rossa	Alta	Alta
Bacino dello sfioratore SF8	Media	Media
Bacini con sfioratori che scaricano nel vaso celato	Bassa	Media
Ambito zona industriale: criticità elevata in quanto quasi totalmente impermeabilizzato	-	Alta
Altre aree		Bassa

La mappa del territorio³² mostra l'intero territorio con un livello basso e i bacini identificati con la suddivisione in livelli basso-medio-alto (Figura 41).

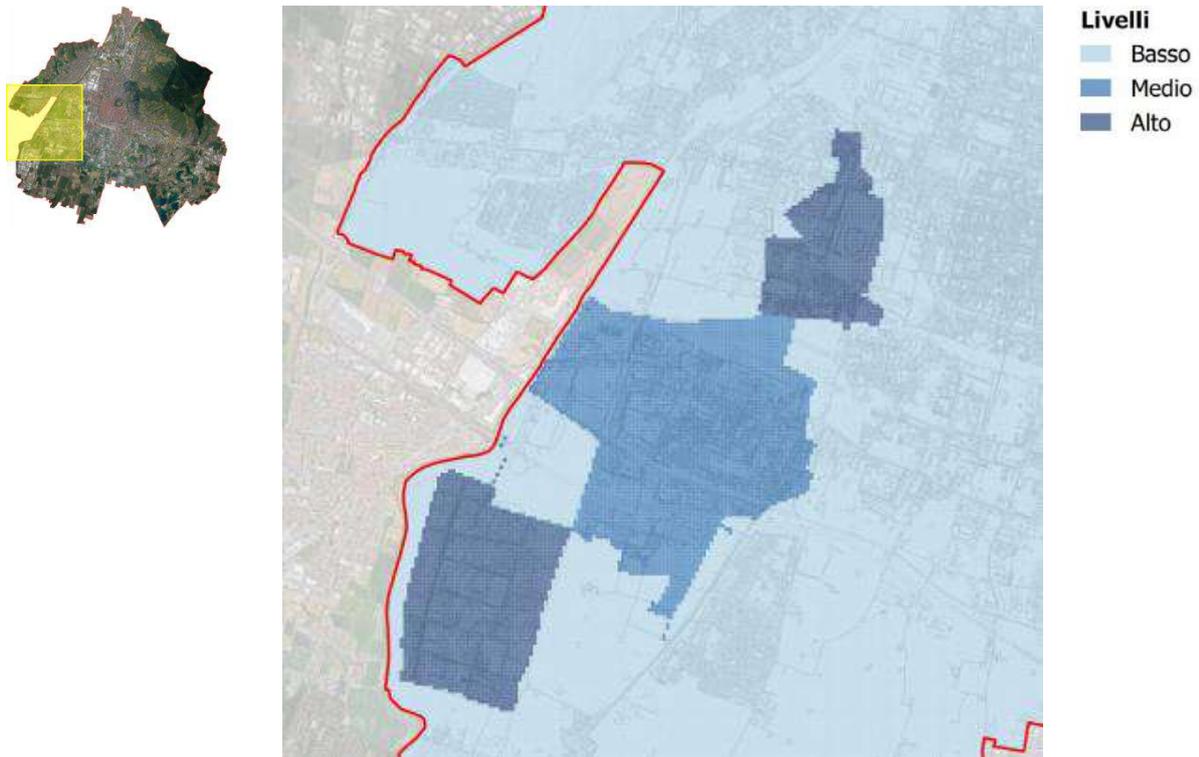


Figura 41 - Estratto delle criticità degli sfioratori – zona sud ovest

³² La mappa dell'intero territorio è rappresentata nell'Appendice A, Tavola 7a.

4.3.5 Analisi dell'idoneità all'infiltrazione di acqua nel suolo

Anche in questo caso, lo strato informativo delle analisi legate all'idoneità del suolo all'infiltrazione è specifico per il caso di Brescia. Informazioni simili possono essere ricavate dalla carta dei vincoli di difesa del suolo o dalla carta idrogeologica, se presenti per il territorio analizzato.

Per il caso del Comune di Brescia vengono analizzati i seguenti tipi di vincoli:

- vincoli fisici e idrogeologici, dovuti a classi di fattibilità geologica elevate, alla presenza di versanti, fontanili, pozzi, riporti storici e fasce di raccordo, aree con forti escursioni o vulnerabilità della falda, aree di compatibilità idraulica o a bassa soggiacenza;
- vincoli connessi alla contaminazione di suoli, in particolare con riferimento al Sito di Interesse Nazionale SIN Caffaro;
- vincoli amministrativi, come i vincoli cimiteriali, archeologici, le fasce di rispetto cimiteriali e infrastrutturali.

Sulla base di questa suddivisione, la Tabella 36 riassume le tipologie di vincoli legati all'infiltrazione del suolo con i livelli di idoneità scelti associati.

Tabella 36 - Tipologie di vincoli

	Limitazioni all'infiltrazione	Livello di idoneità
Vincoli fisici e idrogeologici	Aree con fattibilità geologica 4 (esclusa 4a1)	Nullo
	Versanti	Nullo
	Fontanili, pozzi idropotabili, fonte Mompiano	Nullo
	Aree con riporti storici	Medio
	Fasce raccordo	Medio
	Aree con forti escursioni falda	Basso
	Aree con vulnerabilità falda	Basso
	Aree con compatibilità idraulica	Basso
	Aree con bassa soggiacenza	Basso
	Aree con fattibilità geologica 4a1	Basso
Vincoli connessi alla contaminazione di suoli	Area Caffaro - SIN	Basso
	Area Caffaro - Ordinanza sindacale	Basso
Vincoli amministrativi	Cimiteri	Nullo
	Zone di interesse archeologico	Nullo
	Aree rispetto cimiteriale	Basso
	Fasce rispetto metropolitana	Basso
	Fasce rispetto pozzi idropotabili e fonte Mompiano	Basso
Aree senza limiti		Alto

La mappa del Comune di Brescia³³ mostra le aree boschive a nord e alcune aree puntuali senza livello di idoneità, mentre il resto del territorio è caratterizzato da tutti e tre i livelli, in particolare la zona sud con un livello di idoneità basso, mentre la maggior parte dell'urbanizzato con idoneità alto. Il centro storico e alcune aree pedecollinari hanno invece un livello di idoneità medio (Figura 42).

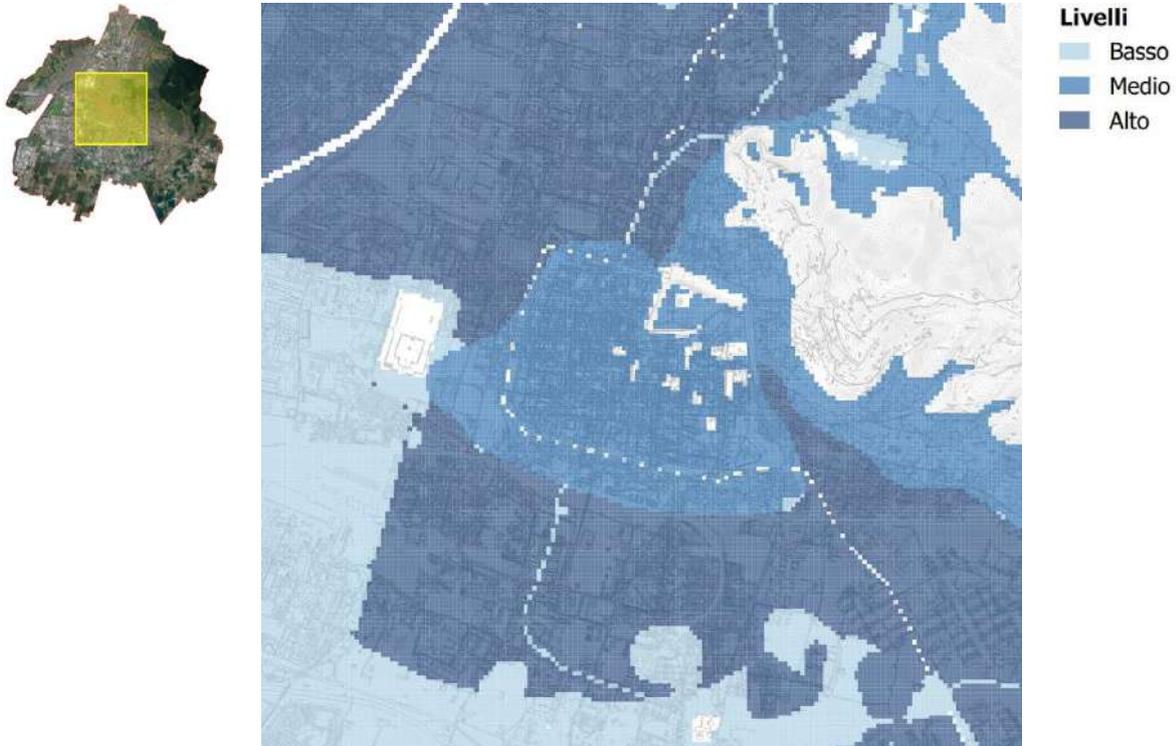


Figura 42 - Estratto dell'idoneità del suolo all'infiltrazione – centro storico

4.3.6 Definizione dei livelli di priorità per interventi di depavimentazione

I livelli di priorità per gli interventi di depavimentazione sono il risultato di una serie di sovrapposizioni delle mappe precedentemente realizzate. In particolare, sono state sovrapposte prima la mappa delle analisi delle criticità degli sfioratori con la mappa dell'idoneità del suolo all'infiltrazione (Figura 43).

³³ La mappa dell'intero territorio è rappresentata nell'Appendice A, Tavola 7b

Applicazione al caso studio

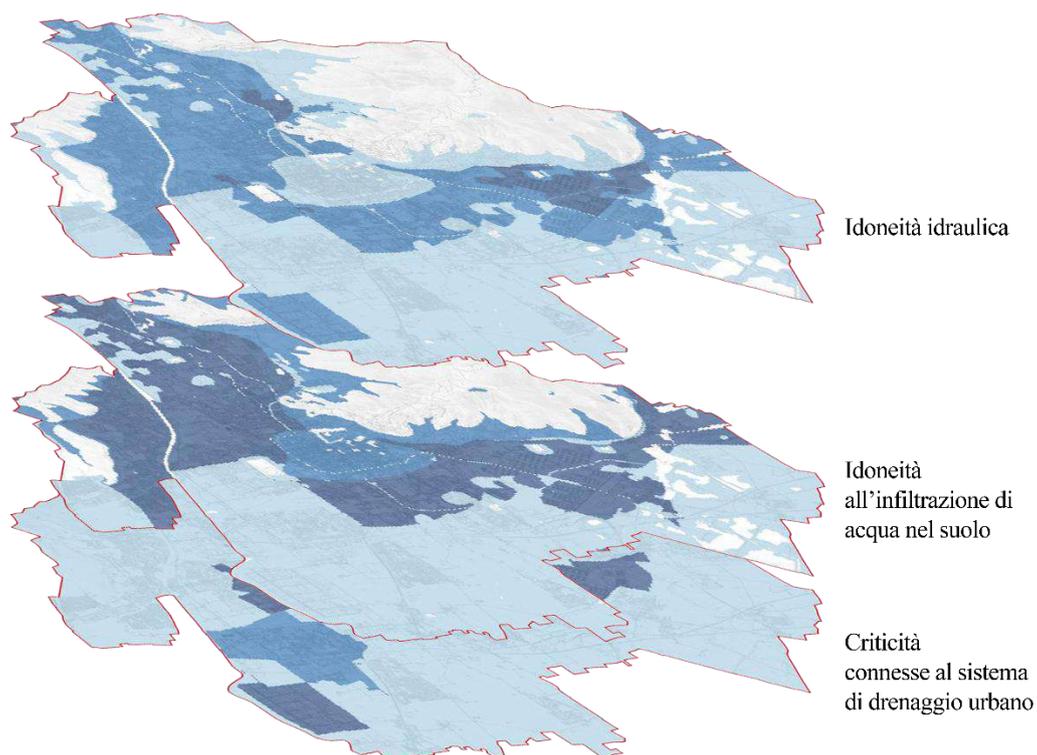


Figura 43 - Sovrapposizione della mappa delle criticità degli sfioratori alla mappa dell'idoneità del suolo all'infiltrazione

Questa mappa denominata “Idoneità idraulica”³⁴ mostra un livello di idoneità nullo nelle aree boschive, basso nelle aree agricole, nelle aree periurbane e in centro storico e medio nelle restanti aree urbanizzate. Fanno eccezione solo tre aree con un livello di idoneità alto (Figura 44).

³⁴ La mappa dell'intero territorio è rappresentata nell'Appendice A, Tavola 7c

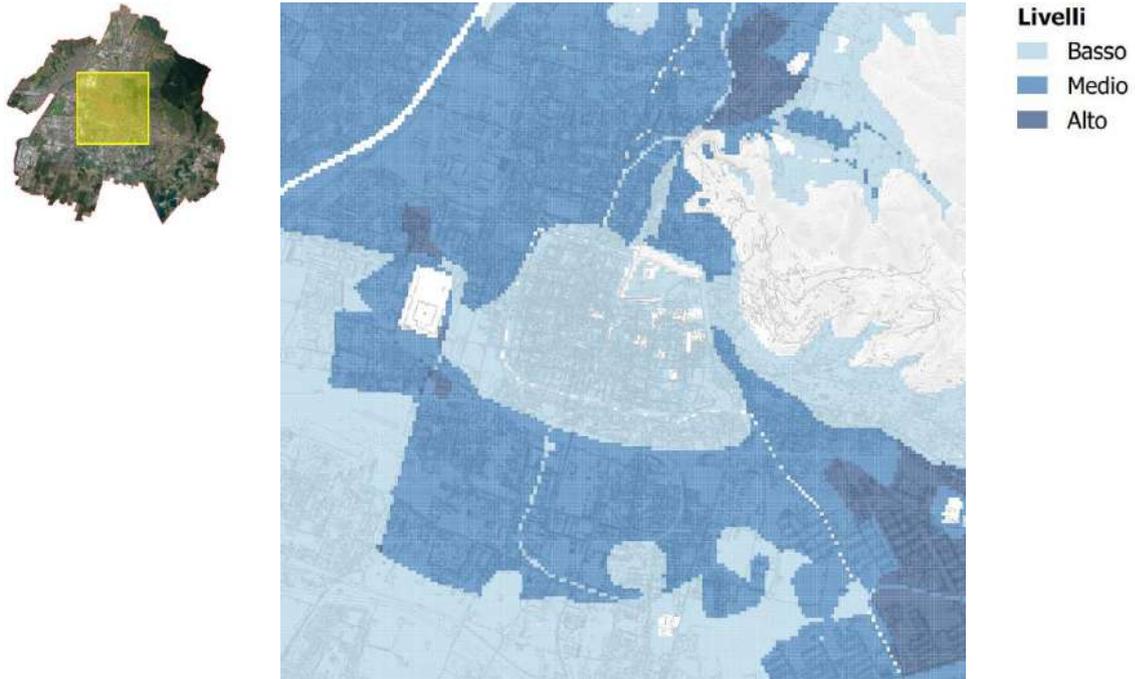


Figura 44 - Estratto dell'idoneità idraulica – centro storico e intorno

La mappa dell'idoneità idraulica viene a questo punto sovrapposta alla mappa del rischio per la salute della popolazione (Figura 45).

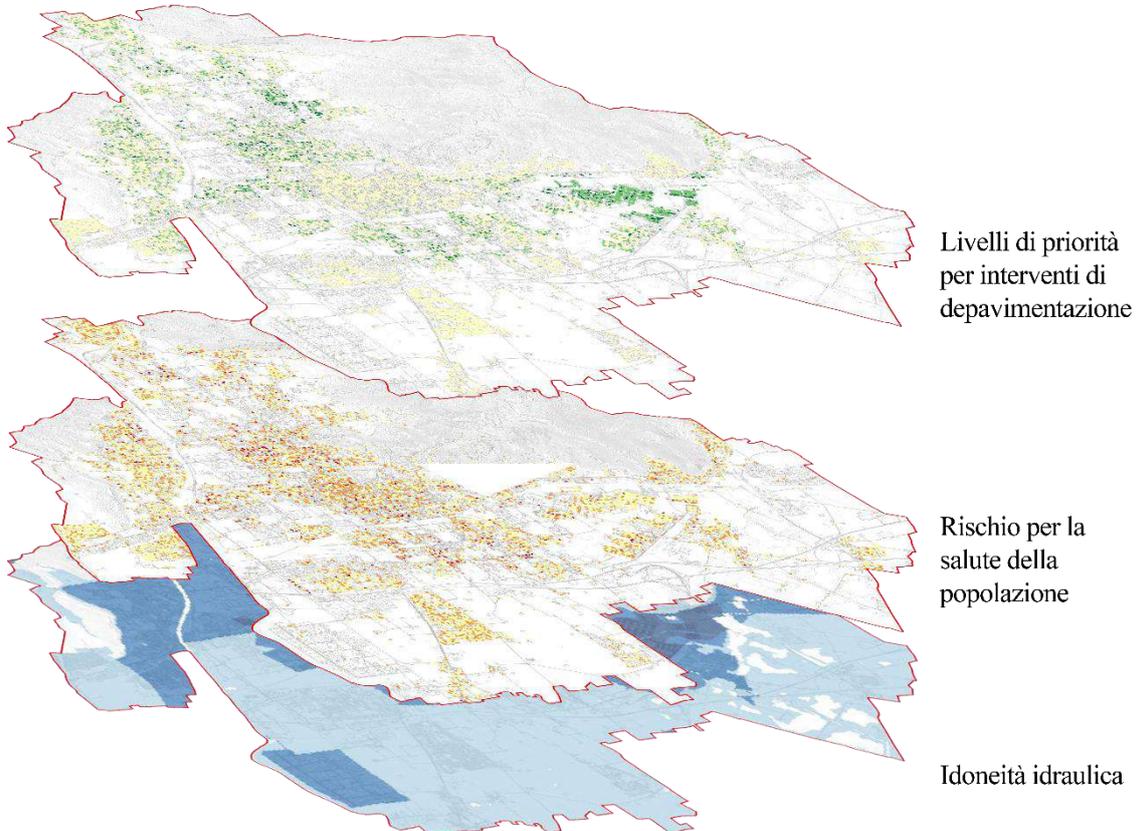


Figura 45 - Sovrapposizione dell'idoneità idraulica con la mappa del rischio

Applicazione al caso studio

La mappa dei livelli di priorità alla depavimentazione³⁵ risulta così suddivisa in celle lasciando scoperte numerose aree della città. Per questo motivo, si è scelto di cambiare unità funzionale e utilizzare i sottobacini idraulici del territorio per le motivazioni precedentemente indicate.

Il passaggio da celle a sottobacini ha comportato il calcolo della somma pesata delle celle all'interno di ogni sottobacino. La Tabella 37 presenta un estratto dei calcoli effettuati.

Tabella 37 - Estratto dei calcoli per l'identificazione dei livelli di priorità alla depavimentazione di ogni sottobacino

ID	Somma pesata	Totale celle	Valore di priorità alla depavimentazione
1	378	460	1,217
2	19	25	1,316
3	114	146	1,287
4	175	244	1,394
5	108	131	1,213
6	43	57	1,326
7	104	133	1,279
8	277	392	1,415
9	599	741	1,237
10	260	322	1,238
11	13	13	1,000
12	171	253	1,480
13	238	287	1,206
14	37	47	1,270
15	58	69	1,190

I quattro livelli di priorità sono stati suddivisi secondo la Tabella 38.

Tabella 38 - Divisione in tre livelli di priorità alla depavimentazione

Valore	Livello
1,000 – 1,116	Basso
1,117 – 1,300	Medio
1,300 – 1,509	Alto
1,510 – 2,327	Molto Alto

La mappa³⁶ mostra i livelli di priorità per interventi di depavimentazione per sottobacini. In particolare, si notano quattro sottobacini con un livello molto alto, altri che fanno parte dell'intorno

³⁵ La mappa dell'intero territorio è rappresentata nell'Appendice A, Tavola 8a

³⁶ La mappa dell'intero territorio è rappresentata nell'Appendice A, Tavola 8b

del centro storico con un livello alto, i sottobacini più esterni con un livello medio, mentre il centro storico e i sottobacini all'interno delle aree agricole con un livello basso (Figura 46).

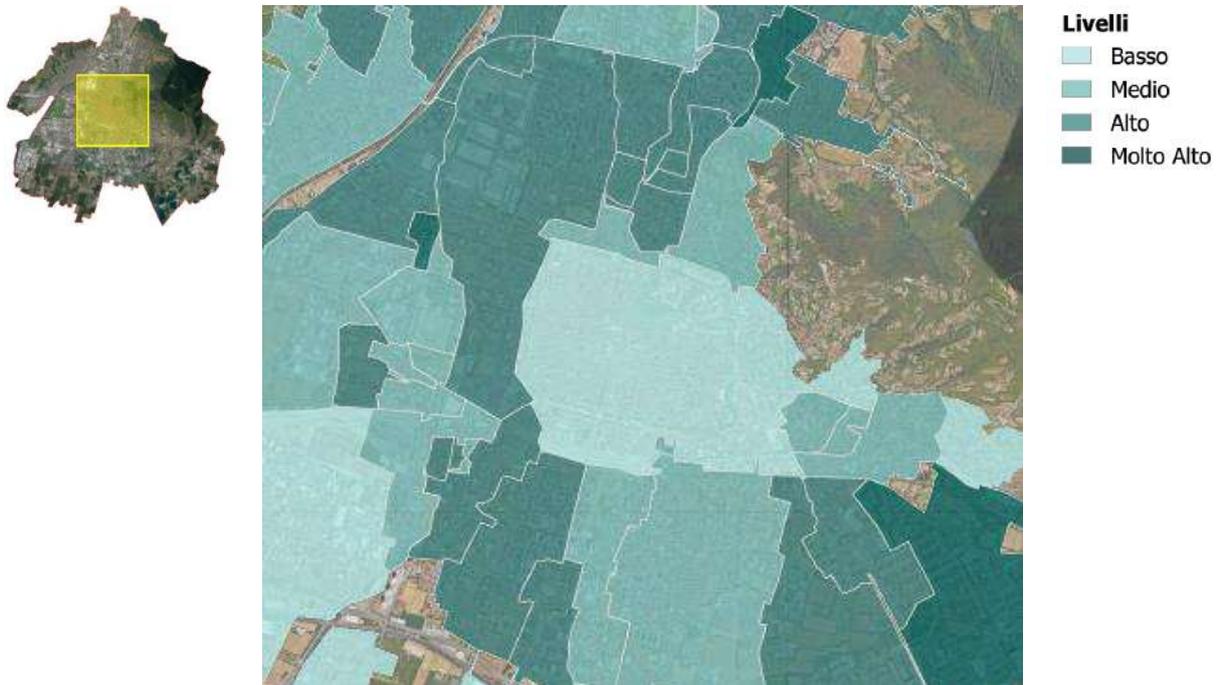


Figura 46 - Estratto dei livelli di priorità per interventi di depavimentazione – centro storico e intorno

4.3.7 Definizione dei livelli di idoneità alla diffusione di tetti verdi

I livelli di idoneità alla diffusione di tetti verdi sono il risultato di una serie di sovrapposizioni delle analisi precedenti.

In primo luogo, si procede sovrapponendo la mappa del rischio con quella delle criticità degli sfioratori secondo la Tabella 17 per definire la “mappa delle criticità delle questioni climatiche analizzate” (Figura 47).

Applicazione al caso studio

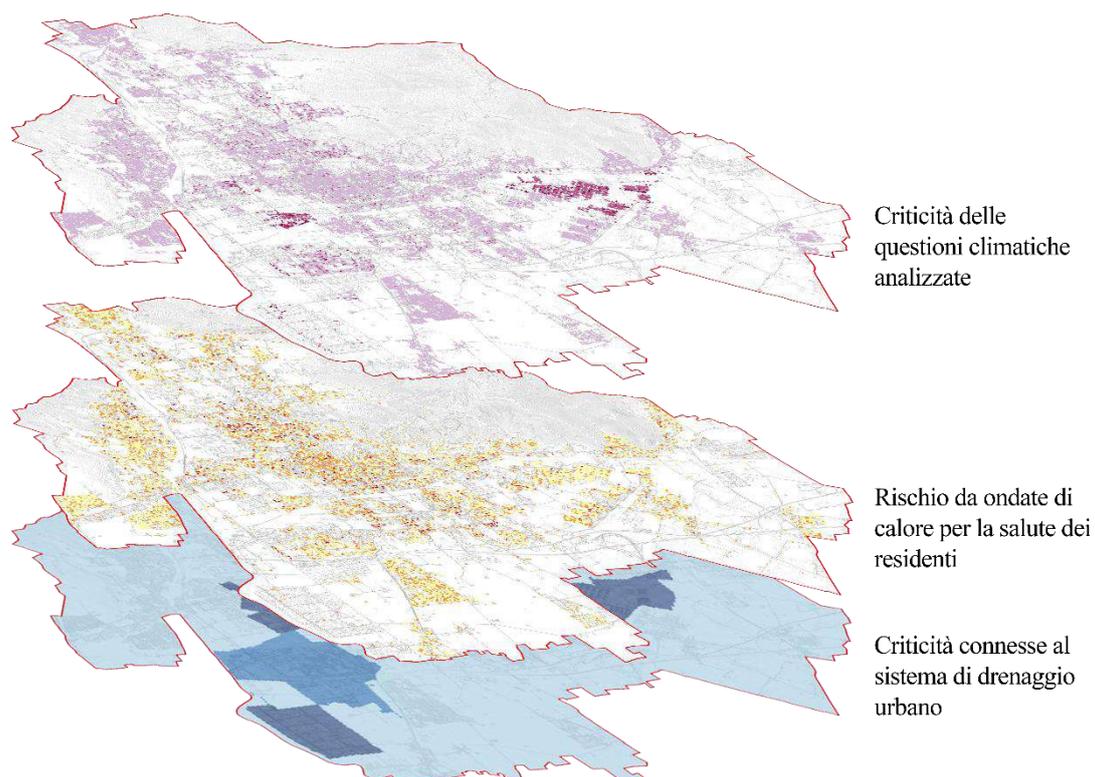


Figura 47 - Sovrapposizione della mappa delle criticità del sistema di drenaggio urbano con la mappa del rischio

La mappa³⁷ mostra criticità medio-alte in due aree circoscritte della città, mentre nel resto del territorio il livello può essere considerato nel complesso medio-basso (Figura 48).



Figura 48 - Estratto della mappa delle criticità delle questioni climatiche analizzate

³⁷ La mappa dell'intero territorio è rappresentata nell'Appendice A, Tavola 9a
132

Tenendo conto dell'influenza che le aree verdi hanno nel loro intorno, si è deciso di modificare la struttura di riferimento da una griglia a maglia quadrata con celle 30x30 m, a una griglia sempre a maglia quadrata, ma con celle 120x120 m.

Tutte le analisi precedentemente effettuate sono state quindi adattate alla nuova suddivisione in celle, eseguendo una media tra i valori delle celle 30x30 che la compongono. I valori dei diversi livelli sono definiti attraverso la suddivisione in intervalli naturali.

In Figura 49 si mostra a titolo di esempio lo stesso estratto della Figura 48, ma con la struttura di riferimento 120x120 m³⁸.

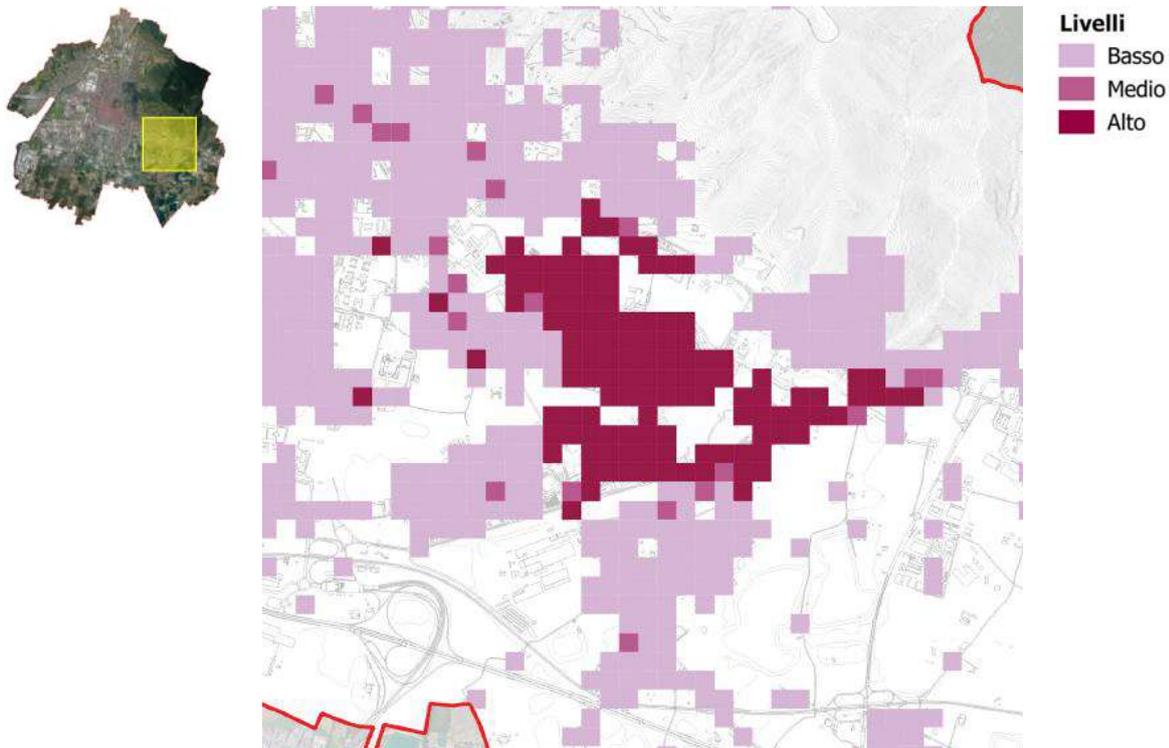


Figura 49 - Estratto della mappa delle criticità delle questioni climatiche analizzate con celle 120x120 m

La mappa del PSF³⁹ viene rappresentata in modo inverso rispetto a quanto indicato nella Tavola 1c (Appendice A). Infatti, l'obiettivo è di visualizzare quelle aree dove la presenza di verde è scarsa. L'analisi mostra un livello alto di assenza di aree verdi in gran parte del territorio urbanizzato (Figura 50).

³⁸ La mappa dell'intero territorio è rappresentata nell'Appendice A, Tavola 9b

³⁹ La mappa dell'intero territorio è rappresentata nell'Appendice A, Tavola 9c

Applicazione al caso studio

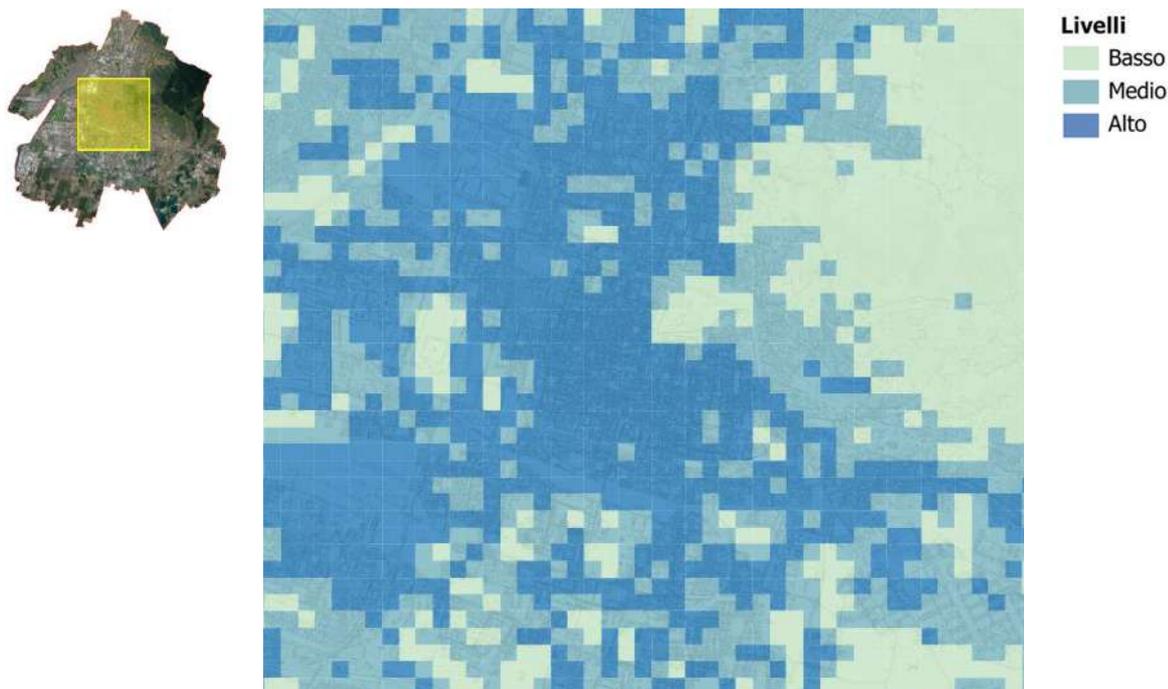


Figura 50 - Estratto della mappa che mostra la mancanza di aree verdi

L'ultima mappa da utilizzare è invece quella riferita alla percentuale di suolo edificato che mostra appunto, quanto territorio sia già stato costruito e di conseguenza quanto spazio può essere disponibile per la realizzazione di aree verdi. La mappa⁴⁰ mostra un'edificazione con livello alto all'interno del centro storico e in alcune aree industriali, un livello di densità medio nel resto dell'urbanizzato e un livello basso nelle aree boschive e agricole (Figura 51).

⁴⁰ La mappa dell'intero territorio è rappresentata nell'Appendice A, Tavola 9d



Figura 51 - Estratto della mappa densità dell'edificato – centro storico

A questo punto le tre mappe vengono sovrapposte (Figura 52) con l'utilizzo delle matrici di calcolo riportate in Tabella 18 e Tabella 19 definendo la mappa dell'idoneità alla diffusione dei tetti verdi⁴¹ secondo la struttura di riferimento 120x120 m.

⁴¹ La mappa dell'intero territorio è rappresentata nell'Appendice A, Tavola 10a

Applicazione al caso studio

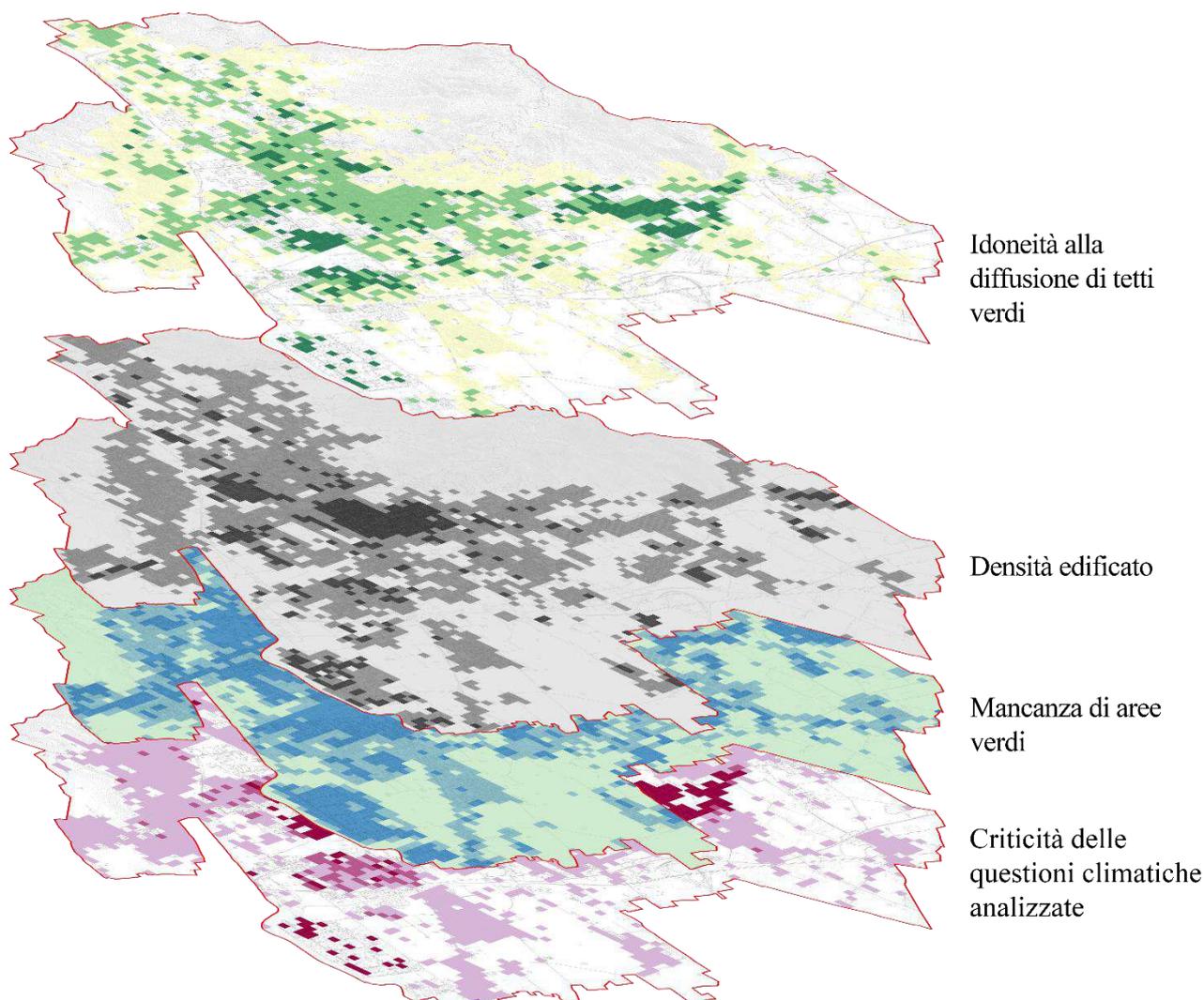


Figura 52 - Sovrapposizione della mappa delle questioni climatiche con la mappa della mancanza di aree verdi e della densità dell'edificato

Come per la mappa dei livelli di priorità alla depavimentazione, anche per quella dei livelli di idoneità alla diffusione dei tetti verdi si è scelto di cambiare unità funzionale e utilizzare i sottobacini idraulici del territorio per le motivazioni illustrate nel paragrafo 3.3.7.

Il passaggio da celle a sottobacini ha comportato il calcolo della somma pesata delle celle all'interno di ogni sottobacino. La Tabella 39 presenta un estratto dei calcoli effettuati.

Tabella 39 - Estratto dei calcoli per l'identificazione dei livelli di idoneità alla diffusione dei tetti verdi per ogni sottobacino

ID	Somma pesata	Totale celle	Valore di idoneità alla diffusione di tetti verdi
1	68	47	1,447
2	15	7	2,143
3	31	23	1,348
4	60	44	1,364
5	26	20	1,300
6	20	16	1,250
7	59	39	1,513
8	57	44	1,296
9	101	80	1,263
10	62	48	1,292
11	4	4	1,000
12	46	30	1,533
13	68	55	1,236
14	4	3	1,333
15	16	11	1,455

I quattro livelli di priorità sono stati suddivisi secondo la Tabella 40.

Tabella 40 - Divisione in tre livelli di idoneità alla diffusione dei tetti verdi

Valore	Livello
1,000 – 1,267	Basso
1,268 – 1,667	Medio
1,668 – 2,167	Alto
2,168 – 3,000	Molto Alto

La mappa⁴² mostra i livelli di idoneità alla diffusione dei tetti verdi per sottobacini. In particolare, si notano tre sottobacini con un livello molto alto, altri come il centro storico, il primo sviluppo a nord e a sud-ovest con un livello alto, mentre i sottobacini più esterni con un livello medio-basso (Figura 53).

⁴² La mappa dell'intero territorio è rappresentata nell'Appendice A, Tavola 10b

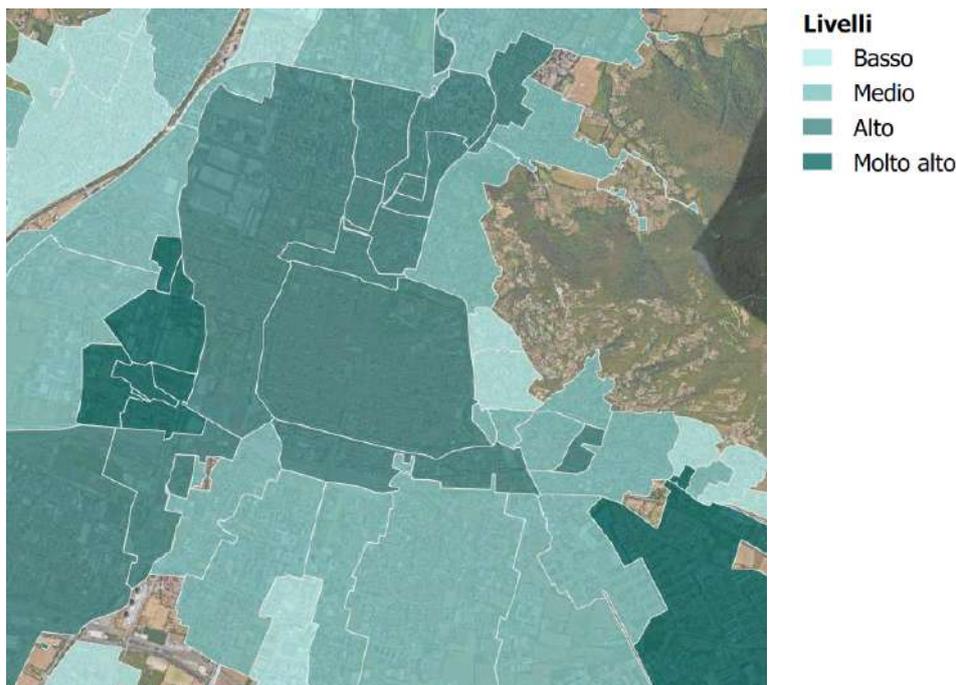


Figura 53 - Estratto dei livelli di idoneità alla diffusione di tetti verdi – centro storico e intorno

4.4 Aspetti strategici

La Parte III della metodologia di riferimento considera gli aspetti strategici, che sono caratterizzati da una componente soggettiva e valutativa. In particolare, sono delineate due fasi fondamentali di questo processo: la definizione della mappa di base nella prima fase e la considerazione delle opportunità del territorio nella seconda fase. La mappa di base viene considerata per l'intero territorio della città, mentre la mappa delle opportunità viene realizzata per le singole aree che sono risultate con un livello molto alto di priorità alla depavimentazione e di idoneità alla diffusione di tetti verdi.

4.4.1 Mappa di base

La funzione della mappa di base è quella di individuare le aree pubbliche prioritarie per gli interventi di depavimentazione e quegli edifici idonei alla diffusione di tetti verdi.

4.4.1.1 Superfici pavimentate

La mappa di base per gli interventi di depavimentazione⁴³ tiene in considerazione le aree pubbliche con funzione a servizio e tutto ciò che riguarda le strade, come anche marciapiedi, piazze e parcheggi.

In merito ai servizi, dal database dei *servizi di proprietà pubblica* sono stati esclusi:

- V-Spazi aperti (V1-parchi e giardini, V2-verde urbano e d'arredo, V3-orti urbani, V4-parchi agricoli e fluviali, V5-verde di mitigazione) poiché rappresentano le aree verdi a servizio e quindi già permeabili (non necessitano di depavimentazione);
- G-Impianti e attrezzature sportive (G1-impianti coperti, G2-impianti scoperti), in quanto le aree pavimentate all'interno degli impianti sportivi sono strettamente funzionali al servizio e quindi in genere non depavimentabili;
- M-Servizi mobilità (M6-distributori, M8-centri intermodali merci) poiché aree con usi non idonei alla depavimentazione;
- T-Servizi tecnologici (T1-impianti tecnologici, T2-impianti per il trattamento dei rifiuti) in quanto aree con usi non idonei alla depavimentazione;
- Z-Servizi cimiteriali (Z1-cimiteri, Z2-case funerarie o case del commiato) in quanto aree con usi non idonei alla depavimentazione.

A questo livello di partenza sono stati poi aggiunti tutte le aree di pertinenza degli edifici pubblici e le aree adibite a parcheggio.

Dal database dei servizi sono state considerate solo le *piazze* e da queste sono state escluse tutte quelle in cui risultano essere presenti parcheggi pubblici in struttura e giardini pubblici: il primo ha chiaramente un uso non compatibile con interventi di depavimentazione, mentre i giardini pubblici sono già impermeabili.

Parallelamente, si realizza uno strato informativo che contiene solo le piazze adibite a stazione della metropolitana della città di Brescia. Queste verranno escluse dalla mappa di base in quanto di recente costruzione e alcune già con problematiche di infiltrazione. A queste e al tracciato della linea stessa della metropolitana si procede realizzando ulteriormente un buffer di 6 metri, che delimita lo spazio in cui non potranno essere eseguiti interventi di depavimentazione. Questo spazio deriva dalla fascia di rispetto della metropolitana, come indicato nella Tavola dei Vincoli del Piano del Governo del Territorio di Brescia (V-PR12)⁴⁴, da specifiche indicazioni da parte dell'ente stesso e dall'art. 65

⁴³ La mappa dell'intero territorio è rappresentata nell'Appendice A, Tavola 11

⁴⁴https://www.comune.brescia.it/sites/default/files/imported/servizi/urbanistica/PGT/Documents/PGT%202016/PR_PIANO%20DELLE%20REGOLE/V-PR12%20Vincoli%20Amministrativi.pdf

Applicazione al caso studio

delle Norme Tecniche di Attuazione del PGT⁴⁵ che prevede che “*nell’ambito della proiezione della linea della metropolitana e delle sue fasce di rispetto, come determinate dalla procedura d’esproprio, i progetti relativi alle trasformazioni dovranno essere sottoposti all’ente proprietario della linea allo scopo di verificare la non compromissione della struttura*”.

La mappa di base, quindi, viene realizzata unendo i *servizi di proprietà pubblica* (con le esclusioni e le aggiunte precedentemente indicate) con il database delle *piazze* depurato e con il database delle *strade*. A questo vengono sottratte le aree delle piazze della metropolitana e del tracciato della metropolitana con i relativi buffer. La Figura 54 mostra un breve estratto della mappa di base.



Figura 54 - Estratto della mappa di base delle superfici pavimentate

4.4.1.2 Edifici

La mappa di base degli edifici⁴⁶ si ottiene intersecando in ambiente GIS il database del patrimonio delle proprietà comunali con il database delle unità volumetriche. In questo modo è visibile la differenza tra gli edifici di proprietà comunale, su cui il comune può agire direttamente, e gli edifici privati o di altra proprietà. La Figura 55 mostra un breve estratto della mappa di base.

⁴⁵https://www.comune.brescia.it/sites/default/files/imported/servizi/urbanistica/PGT/Documents/PGT%202016/DC_DOCUMENTAZIONE%20COMUNE/V-NTAall00.pdf

⁴⁶ La mappa dell’intero territorio è rappresentata nell’Appendice A, Tavola 12

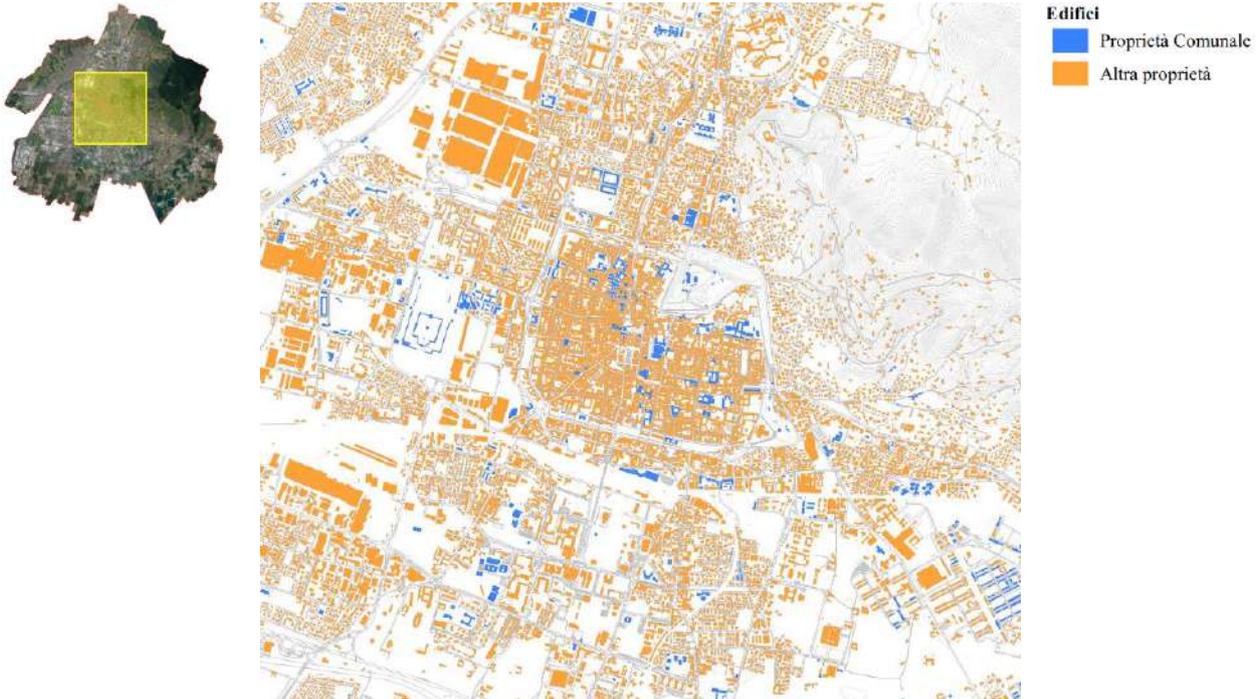


Figura 55 - Estratto della mappa di base degli edifici

4.4.2 Mappa delle opportunità

La mappa delle opportunità tiene conto di una serie di aspetti strategico-decisionali che sono particolarmente sensibili alle scelte dell'amministrazione in evoluzione o alle nuove esigenze che emergono nella società o nell'ambiente circostante. Necessariamente, le opportunità riscontrate per gli interventi di depavimentazione sono diverse da quelle riconosciute per la diffusione dei tetti verdi. Si ricorda che la mappa delle opportunità viene analizzata solo per le aree del territorio risultate con un livello molto alto.

4.4.2.1 Opportunità per gli interventi di depavimentazione

Gli aspetti strategico-decisionali tenuti in considerazione per gli interventi di depavimentazione sono quelli indicati nel paragrafo 3.4.2.1. Questi aspetti vengono identificati per ogni area con livello di priorità molto alto.

In particolare, le *proposte dei cittadini*⁴⁷ presenti al momento sul territorio sono quelle derivanti dal progetto "SpaziAttivi". Questo progetto è un percorso partecipativo organizzato che mira ad affrontare i temi della mitigazione e dell'adattamento climatico attraverso un approccio socialmente

⁴⁷ La mappa dell'intero territorio è rappresentata nell'Appendice A, Tavola 13a

Applicazione al caso studio

sensibile. In particolare, i partecipanti, attraverso processi di ricerca-azione, individuano aree, le selezionano, le studiano e propongono gli interventi di adattamento e mitigazione climatica.

Le isole ambientali⁴⁸ vengono identificate grazie al Piano Urbano della Mobilità Sostenibile della città di Brescia, approvato nel 2018. Al suo interno vengono individuate le isole ambientali già presenti e/o in progetto.

Gli ambiti della città in trasformazione⁴⁹ sono indicati nel Piano delle Regole e comprendono:

- gli Ambiti di Trasformazione del Documento di Piano;
- la Pianificazione Attuativa;
- i Progetti Speciali del Piano dei Servizi e del Piano delle Regole.

Gli itinerari di fruizione paesaggistica⁵⁰ sono indicati nel Documento di Piano del Comune di Brescia. Invece, dal Piano dei Servizi possono essere estratti i servizi⁵¹ presenti all'interno di ogni area.

In merito alle infrastrutture per la mobilità⁵² uno degli interventi in fase di definizione nei prossimi anni sarà lo sviluppo di una nuova linea tramviaria per la città di Brescia. I lavori per la realizzazione della nuova linea possono essere visti come un'opportunità di rigenerazione dei luoghi in cui questa si svilupperà. Nelle azioni di rigenerazione, infatti, possono essere previsti anche interventi di depavimentazione.

4.4.2.2 Opportunità per la diffusione di tetti verdi

Gli aspetti strategico-valutativi per la diffusione dei tetti verdi sono quelli indicati nel paragrafo 3.4.2.2.

Per l'identificazione dei tetti piani⁵³ vengono utilizzati i dati LiDAR. Questo tipo di dato è un dato puntuale che deve essere in primo luogo convertito in file vettoriale. Successivamente, viene eseguita un'interpolazione che permette di estrarre il dato delle altezze da ogni singolo punto sottoforma di file raster. A questo punto, le informazioni vengono ritagliate rispetto agli edifici della mappa di base e il risultato viene convertito in file vettoriale. Il file vettoriale viene poi analizzato in ambiente GIS che con una funzione specifica "slope" che permette di calcolare la pendenza dei tetti. La norma UNI

⁴⁸ La mappa dell'intero territorio è rappresentata nell'Appendice A, Tavola 13b

⁴⁹ La mappa dell'intero territorio è rappresentata nell'Appendice A, Tavola 13c

⁵⁰ La mappa dell'intero territorio è rappresentata nell'Appendice A, Tavola 13d

⁵¹ La mappa dell'intero territorio è rappresentata nell'Appendice A, Tavola 13e

⁵² La mappa dell'intero territorio è rappresentata nell'Appendice A, Tavola 13f

⁵³ La mappa dell'intero territorio è rappresentata nell'Appendice A, Tavola 14a

9460/2008 (2008) definisce tetti piani tutti quei tetti che presentano inclinazione compresa tra 0° e 3° rispetto al piano orizzontale (in percentuale minore del 5%).

Le informazioni sui vincoli⁵⁴ mostrano quali edifici sono sottoposti a vincoli o edifici di tipo storico. Questa informazione è fornita dal Piano delle Regole della città di Brescia.

La mappa della pericolosità⁵⁵ è calcolata come indicato nel paragrafo 3.3.3.1. Qui viene utilizzata per individuare le zone maggiormente soggette a ondate di calore, questo è un dato utile per ipotizzare delle priorità di intervento per la realizzazione di tetti verdi.

Infine, come per gli interventi di depavimentazione, è importante considerare l'individuazione dei servizi⁵⁶ definiti dal Piano dei Servizi, per rappresentare quali sono presenti all'interno degli edifici analizzati e dunque decidere anche qui un livello di priorità di intervento.

⁵⁴ La mappa dell'intero territorio è rappresentata nell'Appendice A, Tavola 14b

⁵⁵ La mappa dell'intero territorio è rappresentata nell'Appendice A, Tavola 3c

⁵⁶ La mappa dell'intero territorio è rappresentata nell'Appendice A, Tavola 13e

5. Considerazioni conclusive

Gli eventi meteorologici estremi che negli ultimi anni stanno interessando il nostro pianeta sotto forma di precipitazioni estreme, ondate di calore, alluvioni, esondazioni, incendi e uragani e i grandi mutamenti a lungo termine, come desertificazione, siccità, scioglimento dei ghiacci e innalzamento del livello del mare, sono causati principalmente dall'innalzamento delle temperature globali dovute a una alta concentrazione dei gas serra nell'atmosfera.

I cambiamenti climatici hanno un impatto diretto sulla società in termini economici, sociali e sulla salute umana. Le città sono particolarmente vulnerabili a questi fenomeni, in quanto sono densamente popolate e offrono servizi sociali e culturali essenziali. Inoltre, le caratteristiche geografiche, morfologiche, demografiche ed economiche delle città contribuiscono ad amplificare gli effetti dei cambiamenti climatici. In particolare, le ondate di calore e le precipitazioni estreme sono due dei fattori significativi del cambiamento climatico in Italia. Le ondate di calore contribuiscono alla formazione delle isole di calore urbane (UHI) anche a causa dell'alta densità edilizia, della mancanza di alberi e di spazi verdi. Invece, le precipitazioni estreme portano a rischi di esondazione e inondazione nelle città a causa di sistemi di drenaggio insufficienti.

Questi impatti hanno conseguenze dirette sulla salute delle persone, ma anche conseguenze indirette, come la perdita di posti di lavoro, danni alle infrastrutture e limitazioni all'uso degli spazi pubblici. Per mitigare questi effetti, si stanno utilizzando in modo sempre più diffuso soluzioni basate sulla natura, come la depavimentazione del suolo e l'implementazione di tetti verdi, che possono contribuire a ridurre le temperature urbane, migliorare la qualità dell'aria e aumentare la biodiversità.

L'adattamento al cambiamento climatico è fondamentale, e la pianificazione urbana gioca un ruolo chiave nel gestire questi impatti. Le strategie di adattamento dovrebbero andare di pari passo con il governo del territorio e mirare a migliorare la qualità ambientale e il benessere delle persone che vivono nelle città. Comprendere i fattori di vulnerabilità delle città è essenziale per sviluppare strategie di adattamento efficaci.

Il presente elaborato si è concentrato sull'analisi delle ondate di calore e del loro impatto sulla popolazione, con un'attenzione particolare alle metodologie finalizzate alla costruzione di un adeguato quadro conoscitivo del fenomeno e all'analisi delle relazioni tra la morfologia del territorio e le temperature registrate. L'interesse per le ondate di calore è in costante crescita nella ricerca e

Considerazioni conclusive

nella pianificazione urbana, poiché è fondamentale comprendere i fenomeni microclimatici locali e urbani per valutare il rischio per la salute della popolazione. Tuttavia, la metodologia per valutare questo rischio richiede ulteriori sviluppi. Si sottolinea che l'analisi delle precipitazioni estreme non è stata approfondita in questo studio in quanto richiederebbe competenze specifiche.

Per individuare le caratteristiche del territorio legate al microclima, viene utilizzata la classificazione delle Local Climate Zone (LCZ), mentre per il calcolo della temperatura vengono raccolti i dati delle Land Surface Temperature (LST). La correlazione tra LCZ e LST è fondamentale per analizzare il rischio da ondate di calore in modo accurato.

La letteratura scientifica considera generalmente il rischio come una funzione di tre variabili: pericolosità, vulnerabilità ed esposizione. Dall'esame della letteratura scientifica riguardante le ondate di calore, le precipitazioni intense e i metodi per valutare i loro impatti sul territorio, emergono alcune limitazioni significative. In particolare, si osserva una scarsità di dati accurati e facilmente accessibili necessari per condurre analisi dettagliate. Spesso, gli studi si concentrano su singoli territori a livello locale e non prevedono aggiornamenti periodici per monitorare gli impatti nel tempo. Inoltre, i fenomeni delle ondate di calore e delle precipitazioni estreme, insieme ai loro rischi associati, sono spesso studiati separatamente, senza considerare le interazioni tra di essi. Un approccio più completo dovrebbe tener conto di entrambi questi fenomeni per valutare gli impatti combinati sul territorio. Infine, manca spesso un approccio multidisciplinare in questi studi, nonostante le questioni coinvolte richiedano una collaborazione tra diverse discipline scientifiche, tra cui climatologia, ecologia, medicina e ingegneria.

Per colmare le lacune menzionate, questa ricerca si focalizza sullo sviluppo di strumenti utili per il supporto nella gestione del territorio al fine di adattarsi ai cambiamenti climatici. Questo si concretizza attraverso la creazione di un Piano Attuativo di Depavimentazione, volto a individuare le zone prioritarie in cui è necessario aumentare la permeabilità del suolo, e l'elaborazione di una Strategia di Diffusione dei Tetti Verdi, con l'obiettivo di identificare le aree più adatte per l'implementazione di tali infrastrutture. Più precisamente, l'approccio ha ampliato lo stato dell'arte:

- fornendo un quadro operativo efficace e di ampia applicabilità, che consenta una valutazione completa dell'intero territorio in relazione agli impatti delle ondate di calore e delle precipitazioni estreme;
- affrontando gli impatti legati alle ondate di calore e alle precipitazioni intense in modo strettamente correlato;

- utilizzando dati open source facilmente accessibili e aggiornati periodicamente;
- utilizzando un approccio multidisciplinare che coinvolge diverse discipline scientifiche, tra cui climatologia, ecologia e ingegneria.

Al fine di valutarne l'applicabilità e l'efficacia, la metodologia proposta è stata testata all'interno della città di Brescia e i risultati rilevati sono interessanti. In particolare, viene evidenziato il potenziale della metodologia nell'utilizzo di dati puntuali che permettono di avere una visione dettagliata del territorio, la sua ampia adattabilità e facile interpretabilità. Inoltre, ha consentito l'identificazione delle aree della città più critiche, definendo dei livelli di priorità per gli interventi da realizzare. Le aree maggiormente critiche saranno successivamente analizzate nel dettaglio, per individuare i siti che meglio si prestano agli interventi previsti. Per l'individuazione potranno essere utilizzate tutte le mappe precedentemente realizzate (es. pericolosità, idoneità all'infiltrazione di acqua nel suolo) e tutte le opportunità proposte.

Nonostante i risultati interessanti, questo studio presenta alcune limitazioni. In particolare, per quanto riguarda la mappatura Land Surface Temperature, si sono dovuti utilizzare per le analisi due giornate differenti, anche se ricadenti all'interno della stessa ondata di calore. Purtroppo, questo dipende totalmente dalla disponibilità delle immagini satellitari e delle condizioni atmosferiche (presenza o meno di nuvole): per lo specifico caso studio le immagini notturne della giornata del 24/06/2019 non erano disponibili. Inoltre, si è analizzata solo una giornata e una nottata all'interno di un'ondata di calore e questo non rappresenta il fenomeno nella sua interezza. Sarebbe interessante analizzare le temperature diurne e notturne all'interno della stessa giornata e anche diverse giornate e nottate nel corso degli anni, per monitorare l'andamento passato dei fenomeni delle ondate di calore.

Le LST indicano la temperatura superficiale terrestre, quindi quella riferita al suolo. Studiando il rischio da ondate di calore per la salute delle persone, sarebbe interessante mappare nuovamente l'informazione utilizzando però i dati delle temperature a 2 metri di altezza. In questo caso, non era possibile ottenere i dati per mancanza della strumentazione necessaria al rilevamento.

Un ulteriore limite a questa ricerca è la valutazione delle analisi degli impatti del fenomeno delle precipitazioni intense solo dal punto di vista qualitativo. Purtroppo, al momento della realizzazione del presente elaborato, non sono disponibili ulteriori studi approfonditi sulla permeabilità dei suoli e sul sistema di drenaggio. Attualmente è in corso uno studio che tratta queste tematiche e sarà sicuramente interessante inserire in futuro i valori di dettaglio all'interno della ricerca per ottenere

Considerazioni conclusive

risultati ancora più concreti sulle aree della città più critiche. Proprio questo tema introduce la volontà di prevedere una costante revisione dei Piani e delle Strategie per monitorare gli impatti dei cambiamenti climatici sul territorio e l'efficacia degli interventi adottati. Per esempio, si potrebbe pensare all'aggiornamento della mappatura del Rischio da ondate di calore per i residenti ogni 5 anni, in linea con la classificazione delle diverse fasce di età della popolazione.

Con riferimento alle opportunità per la diffusione dei tetti verdi, in particolare alle informazioni sui vincoli, sarebbe interessante approfondire lo stato di conservazione degli edifici per identificare quali possano essere maggiormente idonei a soluzioni progettuali sostenibili per instaurare un dialogo con la preesistenza. Infatti, alla luce delle recenti raccomandazioni UNESCO sul Paesaggio urbano storico (UNESCO, 2011), oltre all'interesse storico e artistico, si aggiunge un sistema di valori più complesso che abbraccia l'aspetto sociale, economico, politico e, soprattutto, ecologico (Ladu & Micelli, 2023).

Dal punto di vista pratico, questa ricerca fornisce alla pubblica amministrazione uno strumento di supporto al processo decisionale. Questo strumento può essere utilizzato per:

1. identificare le aree più critiche all'interno della città in relazione agli impatti dei cambiamenti climatici;
2. assegnare priorità agli interventi necessari per mitigare tali impatti;
3. definire la tipologia di intervento da attuare in ciascuna area identificata come prioritaria.

Inoltre, i metodi selezionati per condurre queste analisi sono tra i più diffusi e accessibili, il che facilita la loro implementazione e comprensione anche da parte di coloro che potrebbero non avere una vasta conoscenza delle tematiche trattate.

Questo strumento di supporto decisionale potrà contribuire quindi a migliorare la pianificazione e la gestione del territorio, consentendo una risposta più efficace e mirata ai cambiamenti climatici all'interno della città di Brescia.

Bibliografia

1. Adobati, F., & Garda, E. (2018). Recuperare terra: Cinque contesti applicativi di politiche di de-sealing [Reclaiming land: Five application contexts of de-sealing policies]. *Urbanistica informazioni*, 278 s.i., 160–164.
2. Aduah, M. S., Mantey, S., & Tagoe, N. D. (2012). *Mapping Land Surface Temperature and Land Cover to Detect Urban Heat Island Effect: A Case Study of Tarkwa, South West Ghana*.
3. Advisory Committee for Environmental Research and Education. (2018). *Sustainable Urban Systems Report*.
4. Agbor, C. F., & Makinde, E. O. (2018). Land Surface Temperature Mapping Using Geoinformation Techniques. *Geoinformatics FCE CTU*.
5. Aikawa, M., Hiraki, T., & Eiho, J. (2009). Change of atmospheric condition in an urbanized area of Japan from the viewpoint of rainfall intensity. *Environmental Monitoring and Assessment*, 148(1–4), 449–453. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0174-0>
6. Amanti, M., Berti, D., Lucarini, M., & Troccoli, A. (2014). *EVENTI ESTREMI DI PRECIPITAZIONE E CRITICITÀ GEOLOGICO-IDRAULICHE NELL'AREA URBANA DELLA CAPITALE*.
7. Arekhi, M., Goksel, C., Balik Sanli, F., & Senel, G. (2019). Comparative Evaluation of the Spectral and Spatial Consistency of Sentinel-2 and Landsat-8 OLI Data for Igneada Longos Forest. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(2), 56. <https://doi.org/10.3390/ijgi8020056>
8. Aslam, A., & Rana, I. A. (2022). The use of local climate zones in the urban environment: A systematic review of data sources, methods, and themes. *Urban Climate*.
9. Avdan, U., & Jovanovska, G. (2016). Algorithm for Automated Mapping of Land Surface Temperature Using LANDSAT 8 Satellite Data. *Journal of Sensors*, 2016, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2016/1480307>
10. Aven, T. (2012). The risk concept—Historical and recent development trends. *Reliability Engineering & System Safety*, 99, 33–44. <https://doi.org/10.1016/j.res.2011.11.006>
11. Balletto, G., Mundula, L., Milesi, A., & Ladu, M. (2021). Ex Post Evaluation of Cohesion Policies in the Strategic Planning of Italian Metropolitan Cities: Analysis for the Development of New Strategies. *La Rosa, D., Privitera, R. (eds) Innovation in Urban and Regional Planning. INPUT 2021. Lecture Notes in Civil Engineering*, 146. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68824-0_36
12. Balletto, G., Sinatra, M., Mura, R., & Borruso, G. (2022). Climate variation in metropolitan cities. Spatial self-containment, contiguity and space-time relations in Cagliari urban area (Sardinia, Italy). *TeMA-Journal of Land Use, Mobility and Environment*, 15(3), 501–516.
13. Bechtel, B., Alexander, P., Böhner, J., Ching, J., Conrad, O., Feddema, J., Mills, G., See, L., & Stewart, I. (2015). Mapping Local Climate Zones for a Worldwide Database of the Form and Function of Cities. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(1), 199–219. <https://doi.org/10.3390/ijgi4010199>

Bibliografia

14. Bechtel, B., & Daneke, C. (2012). Classification of Local Climate Zones Based on Multiple Earth Observation Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5(4), 1191–1202. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2012.2189873>
15. Bechtel, B., Langkamp, T., Böhner, J., Daneke, C., Oßenbrügge, J., & Schempp, S. (2012). *CLASSIFICATION AND MODELLING OF URBAN MICRO-CLIMATES USING MULTISENSORAL AND MULTITEMPORAL REMOTE SENSING DATA*.
16. Bechtel, B., See, L., Mills, G., & Foley, M. (2016). Classification of Local Climate Zones Using SAR and Multispectral Data in an Arid Environment. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(7), 3097–3105. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2531420>
17. Boglietti, S., Carra, M., Nota, M., & Tiboni, M. (2023). La realizzazione dei tetti verdi come misura di adattamento delle città ai cambiamenti climatici. In Galderisi A., Mininni M. & Presta I.G. (a cura di, 2023), *La declinazione della sostenibilità ambientale nella disciplina urbanistica, Atti della XXIV Conferenza Nazionale SIU Dare valore ai valori in urbanistica, Brescia, 23-24 giugno 2022, 03*.
18. Borbora, J., & Das, A. K. (2014). Summertime Urban Heat Island study for Guwahati City, India. *Sustainable Cities and Society*, 11, 61–66. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2013.12.001>
19. Brandsma, T., & Wolters, D. (2012). Measurement and Statistical Modeling of the Urban Heat Island of the City of Utrecht (the Netherlands). *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(6), 1046–1060. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0206.1>
20. Brousse, O., Martilli, A., Foley, M., Mills, G., & Bechtel, B. (2016). WUDAPT, an efficient land use producing data tool for mesoscale models? Integration of urban LCZ in WRF over Madrid. *Urban Climate*, 17, 116–134. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.04.001>
21. Caminiti, N. M., & La Motta, S. (2016). *L'Accordo di Parigi*.
22. Chen, T.-L. (2021). Mapping temporal and spatial changes in land use and land surface temperature based on MODIS data. *Environmental Research*, 196, 110424. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110424>
23. Chen, Y. C., Lin, T.-P., & Shih, W.-Y. (2017). Modeling the urban thermal environment distributions in Taipei Basin using Local climate zone (LCZ). *2017 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)*, 1–4.
24. Chen, Y., Zheng, B., & Hu, Y. (2020). Mapping Local Climate Zones Using ArcGIS-Based Method and Exploring Land Surface Temperature Characteristics in Chenzhou, China. *Sustainability*, 12(7), 2974. <https://doi.org/10.3390/su12072974>
25. Chen, Y.-C., Yao, C.-K., Honjo, T., & Lin, T.-P. (2018). The application of a high-density street-level air temperature observation network (HiSAN): Dynamic variation characteristics of urban heat island in Tainan, Taiwan. *Science of The Total Environment*, 626, 555–566. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.059>
26. Ching, J., Mills, G., Bechtel, B., See, L., Feddema, J., Wang, X., Ren, C., Brousse, O., Martilli, A., Neophytou, M., Mouzourides, P., Stewart, I., Hanna, A., Ng, E., Foley, M., Alexander, P., Aliaga, D., Niyogi, D., Shreevastava, A., ... Theeuwes, N. (2018). WUDAPT: An Urban Weather, Climate, and Environmental Modeling Infrastructure for the Anthropocene. *Bulletin*

- of the American Meteorological Society, 99(9), 1907–1924. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0236.1>
27. Ciscar, J. C., Ibarreta, D., & Soria, A. (2018). *Climate impacts in Europe: Final report of the JRCPESETA III project*.
 28. Commissione Europea. (2019). *European Green Deal*. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_it
 29. Congedo, L. (2021). Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *Journal of Open Source Software*, 6(64), 3172. <https://doi.org/10.21105/joss.03172>
 30. Crichton, D. (1999). The risk triangle. *Natural Disaster Management*. Tudor Rose, London.
 31. Da Silva, J., Kernaghan, S., & Luque, A. (2012). A systems approach to meeting the challenges of urban climate change. *International Journal of Urban Sustainable Development*, 4(2), 125–145. <https://doi.org/10.1080/19463138.2012.718279>
 32. Dai, X., Liu, Q., Huang, C., & Li, H. (2021). Spatiotemporal Variation Analysis of the Fine-Scale Heat Wave Risk along the Jakarta-Bandung High-Speed Railway in Indonesia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(22), 12153. <https://doi.org/10.3390/ijerph182212153>
 33. Davenport, A. G., Grimmond, S. B., Oke, T. R., & Wieringa, J. (2000). *Estimating the roughness of cities and sheltered country*. 96–99.
 34. De Maio, F., Sinisi, L., & Tuscano, J. (2014). Clima, salute e benessere in città. *QUALITÀ DELL'AMBIENTE URBANO*, 135–149.
 35. Demuzere, M., Bechtel, B., Middel, A., & Mills, G. (2019). Mapping Europe into local climate zones. *PLOS ONE*, 14(4), e0214474. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0214474>
 36. Dijkstra, J. A., Buckman, K. L., Ward, D., Evans, D. W., Dionne, M., & Chen, C. Y. (2013). Experimental and Natural Warming Elevates Mercury Concentrations in Estuarine Fish. *PLoS ONE*, 8(3), e58401. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0058401>
 37. Dirksen, M., Ronda, R. J., Theeuwes, N. E., & Pagani, G. A. (2019). Sky view factor calculations and its application in urban heat island studies. *Urban Climate*, 30, 100498. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100498>
 38. Eldesoky, A. H. M., Colaninno, N., & Morello, E. (2021). High-resolution air temperature mapping in a data-scarce, arid area by means of low-cost mobile measurements and machine learning. *Journal of Physics: Conference Series*, 2042(1), 012045. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2042/1/012045>
 39. Eldesoky, A. H. M., Colaninno, N., & Morello, E. (2019, dicembre). Improving Local Climate Zones Automatic Classification Based on Physic-Morphological Urban Features. *XIII CTV 2019 Proceedings: XIII International Conference on Virtual City and Territory: “Challenges and Paradigms of the Contemporary City”*: UPC, Barcelona, October 2-4, 2019. Virtual City and Territory. <https://doi.org/10.5821/ctv.8663>
 40. Erell, E., Pearlmutter, D., & Williamson, T. J. (2011). *Urban microclimate: Designing the spaces between buildings* (1st ed). Earthscan.

Bibliografia

41. Estacio, I., Babaan, J., Pecson, N. J., Blanco, A. C., Escoto, J. E., & Alcantara, C. K. (2019). GIS-BASED MAPPING OF LOCAL CLIMATE ZONES USING FUZZY LOGIC AND CELLULAR AUTOMATA. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-4/W19, 199–206. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W19-199-2019>
42. Estrada, F., Botzen, W. J. W., & Tol, R. S. J. (2017). A global economic assessment of city policies to reduce climate change impacts. *Nature Climate Change*, 7(6), 403–406. <https://doi.org/10.1038/nclimate3301>
43. European Climate and Health Observatory. (2021). *Exposure of vulnerable populations to heatwaves*.
44. European Environment Agency. (2012). *Urban adaptation to climate change in Europe: challenges and opportunities for cities together with supportive national and European policies*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2800/41895>
45. European Environment Agency. (2017). *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016: An indicator based report*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2800/534806>
46. European Environment Agency. (2018). *Unequal exposure and unequal impacts: Social vulnerability to air pollution, noise and extreme temperatures in Europe*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2800/324183>
47. European Environment Agency. (2020). *Healthy environment, healthy lives: How the environment influences health and well-being in Europe* [dataset]. https://doi.org/10.1163/9789004322714_cclc_2020-0201-1126
48. European Environment Agency. (2021). *Europe's changing climate hazards—An index-based interactive EEA report*.
49. European Environment Agency. (2022). *Climate change as a threat to health and well-being in Europe: Focus on heat and infectious diseases*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2800/67519>
50. Feng, X., Foody, G., Aplin, P., & Gosling, S. N. (2015). Enhancing the spatial resolution of satellite-derived land surface temperature mapping for urban areas. *Sustainable Cities and Society*, 19, 341–348. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.04.007>
51. Fernandez, A., Black, J., Jones, M., Wilson, L., Salvador-Carulla, L., Astell-Burt, T., & Black, D. (2015). Flooding and Mental Health: A Systematic Mapping Review. *PLOS ONE*, 10(4), e0119929. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0119929>
52. Field, C. B., Barros, V., Stocker, T. F., & Dahe, Q. (A c. Di). (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (1^a ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245>
53. Fine, W. T. (1971). Mathematical evaluation for controlling hazards. *Journal of Safety Research*, 3 (4), 157–166.
54. Forzieri, G., Cescatti, A., E Silva, F. B., & Feyen, L. (2017). Increasing risk over time of weather-related hazards to the European population: A data-driven prognostic study. *The Lancet Planetary Health*, 1(5), e200–e208. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(17\)30082-7](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(17)30082-7)

55. Funari, E., Manganelli, M., & Sinisi, L. (2012). Impacts of climate change on water borne diseases. *Ann Ist Super Sanità*, 48(4), 473–487. https://doi.org/10.4415/ANN_12_04_13
56. Gaglione, F. (2022). *Città e climate change. La vulnerabilità delle aree urbane alle isole di calore [Cities and climate change. The vulnerability of urban areas to heat islands]* (Vol. 9). FedOA-Federico II University Press.
57. Gál, T., Skarbit, N., & Unger, J. (2016). Urban heat island patterns and their dynamics based on an urban climate measurement network. *Hungarian Geographical Bulletin*, 65(2), 105–116. <https://doi.org/10.15201/hungeobull.65.2.2>
58. García-Santos, V., Cuxart, J., Martínez-Villagrasa, D., Jiménez, M., & Simó, G. (2018). Comparison of Three Methods for Estimating Land Surface Temperature from Landsat 8-TIRS Sensor Data. *Remote Sensing*, 10(9), 1450. <https://doi.org/10.3390/rs10091450>
59. Garilli, E., Bruno, N., Autelitano, F., Roncella, R., & Giuliani, F. (2021). Automatic detection of stone pavement's pattern based on UAV photogrammetry. *Automation in Construction*, 122, 103477. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103477>
60. Geletič, J., & Lehnert, M. (2016). GIS-based delineation of local climate zones: The case of medium-sized Central European cities. *Moravian Geographical Reports*, 24(3), 2–12. <https://doi.org/10.1515/mgr-2016-0012>
61. Geletič, J., Lehnert, M., & Dobrovolný, P. (2016). Land Surface Temperature Differences within Local Climate Zones, Based on Two Central European Cities. *Remote Sensing*, 8(10), 788. <https://doi.org/10.3390/rs8100788>
62. Geletič, J., Lehnert, M., Savić, S., & Milošević, D. (2019). Inter-/intra-zonal seasonal variability of the surface urban heat island based on local climate zones in three central European cities. *Building and Environment*, 156, 21–32. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.011>
63. Gholami, R., & Beck, C. (2019). Towards the determination of driving factors of varying LST-LCZ relationships: A case study over 25 cities. *Geographica Pannonica*, 23(4), 289–307. <https://doi.org/10.5937/gp23-24238>
64. Giordano, F., Capriolo, A., & Mascolo, R. A. (2013). *PLANNING FOR ADAPTATION TO CLIMATE CHANGE. GUIDELINES FOR MUNICIPALITIES*.
65. Goldreich, Y. (1995). Urban climate studies in Israel—A review. *Atmospheric Environment*, 29(4), 467–478. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(94\)00277-R](https://doi.org/10.1016/1352-2310(94)00277-R)
66. Guarascio, M., Lombardi, M., & Rossi, G. (2019). Metodi di analisi del rischio. In *Sicurezza Dei Trasporti. Teoria e Gestione* (pp. 73–88). EGAF Srl, Forlì.
67. Guha, S., Govil, H., Dey, A., & Gill, N. (2018). Analytical study of land surface temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS data in Florence and Naples city, Italy. *European Journal of Remote Sensing*, 51(1), 667–678. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1474494>
68. Hansen, J., Johnson, D., Lacis, A., Lebedeff, S., Lee, P., Rind, D., & Russell, G. (1981). Climate Impact of Increasing Atmospheric Carbon Dioxide. *Science*, 213(4511), 957–966. <https://doi.org/10.1126/science.213.4511.957>

Bibliografia

69. Hellings, A., & Rienow, A. (2021). Mapping Land Surface Temperature Developments in Functional Urban Areas across Europe. *Remote Sensing*, 13(11), 2111. <https://doi.org/10.3390/rs13112111>
70. Hendel, M., Bobée, C., Karam, G., Parison, S., Berthe, A., & Bordin, P. (2020). Developing a GIS tool for emergency urban cooling in case of heat-waves. *Urban Climate*, 33, 100646. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100646>
71. Howard, L. (1833). *The Climate of London*.
72. Hu, J., & Zhu, X. Xiang. (2018). Exploring Sentinel-L Data for Local Climate Zone Classification. *IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 4677–4680. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8519147>
73. Huang, X., Liu, A., & Li, J. (2021). Mapping and analyzing the local climate zones in China's 32 major cities using Landsat imagery based on a novel convolutional neural network. *Geo-Spatial Information Science*, 24(4), 528–557. <https://doi.org/10.1080/10095020.2021.1892459>
74. Hunt, J. (2004). How can cities mitigate and adapt to climate change? *Building Research & Information*, 31(1), 55–57.
75. Huong, H. T. L., & Pathirana, A. (2013). Urbanization and climate change impacts on future urban flooding in Can Tho city, Vietnam. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(1), 379–394. <https://doi.org/10.5194/hess-17-379-2013>
76. UNI ISO 31000:2018—Risk Management Guidelines, (2018).
77. IPCC. (2007). *Climate Change Glossary: Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
78. IPCC (A c. Di). (2014). *Climate change 2014: Synthesis report*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
79. IPCC. (2018). *Global Warming of 1.5°C: IPCC Special Report on Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels in Context of Strengthening Response to Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty* (1^a ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157940>
80. Isaya Ndossi, M., & Avdan, U. (2016). Application of Open Source Coding Technologies in the Production of Land Surface Temperature (LST) Maps from Landsat: A PyQGIS Plugin. *Remote Sensing*, 8(5), 413. <https://doi.org/10.3390/rs8050413>
81. Jiang, J., & Tian, G. (2010). Analysis of the impact of Land use/Land cover change on Land Surface Temperature with Remote Sensing. *Procedia Environmental Sciences*, 2, 571–575. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2010.10.062>
82. Jin, L., Pan, X., Liu, L., Liu, L., Liu, J., & Gao, Y. (2020). Block-based local climate zone approach to urban climate maps using the UDC model. *Building and Environment*, 186, 107334. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107334>
83. Kaźmierczak, A., & Cavan, G. (2011). Surface water flooding risk to urban communities: Analysis of vulnerability, hazard and exposure. *Landscape and Urban Planning*, 103(2), 185–197. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.07.008>

84. Kolokotroni, M., & Giridharan, R. (2008). Urban heat island intensity in London: An investigation of the impact of physical characteristics on changes in outdoor air temperature during summer. *Solar Energy*, 82(11), 986–998. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.05.004>
85. Kotharkar, R., Bagade, A., & Agrawal, A. (2019). Investigating local climate zones for outdoor thermal comfort assessment in an Indian city. *Geographica Pannonica*, 23(4), 318–328. <https://doi.org/10.5937/gp23-24251>
86. Krabbenhoft, D. P., & Sunderland, E. M. (2013). *Global Change and Mercury*.
87. Ladu, M. (2023). Conservation and Regeneration for a Sustainable and Circular City. *Gervasi, O., et al. Computational Science and Its Applications – ICCSA 2023 Workshops*, 14111, 77–88. https://doi.org/10.1007/978-3-031-37126-4_6
88. Ladu, M., & Micelli, E. (2023). Valori e metriche del costruito per la progettazione sostenibile e circolare della città. *La declinazione della sostenibilità ambientale nella disciplina urbanistica, Atti della XXIV Conferenza Nazionale SIU Dare valore ai valori in urbanistica, Brescia, 23-24 giugno 2022*, 3, 100–108.
89. Ladu, M., & Sulis, G. (2022). Nature-Based Solutions per mitigare gli impatti della urbanizzazione: Il caso del Parco di Molentargius-Saline. *Reticula*, 29, 44–59.
90. Leconte, F., Bouyer, J., Claverie, R., & Pétrissans, M. (2014). *Multiscale methods for urban air temperature analysis assisted by mobile measurements*.
91. Lee, S., Kang, J. E., Park, C. S., Yoon, D. K., & Yoon, S. (2020). Multi-risk assessment of heat waves under intensifying climate change using Bayesian Networks. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 50, 101704. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101704>
92. Lelovics, E., Unger, J., Gál, T., & Gál, C. (2014). Design of an urban monitoring network based on Local Climate Zone mapping and temperature pattern modelling. *Climate Research*, 60(1), 51–62. <https://doi.org/10.3354/cr01220>
93. Lelovics, E., Unger, J., Savić, S., Gál, T., Milošević, D., Gulyás, Á., Marković, V., Arsenović, D., & Gál, C. V. (2016). Intra-urban temperature observations in two Central European cities: A summer study. *Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*, 120, 283–300.
94. Leroux, L., Congedo, L., Bellón, B., Gaetano, R., & Bégué, A. (2018). Land Cover Mapping Using Sentinel-2 Images and the Semi-Automatic Classification Plugin: A Northern Burkina Faso Case Study. In N. Baghdadi, C. Mallet, & M. Zribi (A c. Di), *QGIS and Applications in Agriculture and Forest* (1^a ed., pp. 119–151). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119457107.ch4>
95. Lucentini, L., & Ottaviani, M. (2011a). *Cianobatteri in acque destinate al consumo umano. Linee guida per la gestione del rischio* (Roma: Istituto Superiore di Sanità, Vol. 2).
96. Lucentini, L., & Ottaviani, M. (2011b). *Cianobatteri in acque destinate al consumo umano. Stato delle conoscenze per la valutazione del rischio* (Roma: Istituto Superiore di Sanità, Vol. 1).
97. Manley, G. (1958). *Quarterly Journal of the Royal Meteorology Society*.
98. Mazdiyasn, O., Sadegh, M., Chiang, F., & AghaKouchak, A. (2019). Heat wave Intensity Duration Frequency Curve: A Multivariate Approach for Hazard and Attribution Analysis. *Scientific Reports*, 9(1), 14117. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50643-w>

Bibliografia

99. Mendel, G. (2006). *Climate change, urban flooding and the rights of the urban poor in Africa*.
100. Menne, B., & Murra, V. (2013). *Floods in the WHO European Region: Health effects and their prevention*. WHO Regional Office for Europe.
101. Ministero della Transizione Ecologica. (2017). <https://www.mase.gov.it/>
102. Ministero dell'Ambiente. (2017). <https://www.mase.gov.it/>
103. Mitraka, Z., Del Frate, F., Chrysoulakis, N., & Gastellu-Etchegorry, J.-P. (2015). Exploiting Earth Observation data products for mapping Local Climate Zones. *2015 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/JURSE.2015.7120456>
104. Molnár, G., Gyöngyösi, A. Z., & Gál, T. (2019). Integration of an LCZ-based classification into WRF to assess the intra-urban temperature pattern under a heatwave period in Szeged, Hungary. *Theoretical and Applied Climatology*, 138(1–2), 1139–1158. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02881-1>
105. Mote, T. L., Lacke, M. C., & Shepherd, J. M. (2007). Radar signatures of the urban effect on precipitation distribution: A case study for Atlanta, Georgia. *Geophysical Research Letters*, 34(20), L20710. <https://doi.org/10.1029/2007GL031903>
106. Muhammad, F., Xie, C., Vogel, J., & Afshari, A. (2022). Inference of Local Climate Zones from GIS Data, and Comparison to WUDAPT Classification and Custom-Fit Clusters. *Land*, 11(5), 747. <https://doi.org/10.3390/land11050747>
107. Narocki, C. (2021). *Heatwaves as an occupational hazard*.
108. Oke, T. R. (1976). The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands. *Atmosphere*, 14(4), 268–277. <https://doi.org/10.1080/00046973.1976.9648422>
109. Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1–24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>
110. Oke, T. R. (1987). *Boundary Layer Climates*. Cambridge University Press.
111. Oke, T. R. (1995). The Heat Island of the Urban Boundary Layer: Characteristics, Causes and Effects. In J. E. Cermak, A. G. Davenport, E. J. Plate, & D. X. Viegas (A c. Di), *Wind Climate in Cities* (pp. 81–107). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3686-2_5
112. Oke, T. R. (1997). *Urban environments. The surface climates of Canada*.
113. Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban climates*. Cambridge University Press.
114. Oliveira, A., Lopes, A., & Niza, S. (2020). Local climate zones in five southern European cities: An improved GIS-based classification method based on Copernicus data. *Urban Climate*, 33, 100631. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100631>
115. Pathirana, A., Veerbek, W., Deneke, H., & Banda, A. T. (2013). Urban Growth, Heat Islands and Extreme Rainfall: A Modelling Experiment. *Atmos. Res., in review*.
116. Perera, N. G. R., & Emmanuel, R. (2018). A “Local Climate Zone” based approach to urban planning in Colombo, Sri Lanka. *Urban Climate*, 23, 188–203. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.11.006>
117. Pogačar, T., Casanueva, A., Kozjek, K., Ciuha, U., Mekjavić, I. B., Kajfež Bogataj, L., & Črepinšek, Z. (2018). The effect of hot days on occupational heat stress in the

- manufacturing industry: Implications for workers' well-being and productivity. *International Journal of Biometeorology*, 62(7), 1251–1264. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1530-6>
118. Quan, J. (2019). Enhanced geographic information system-based mapping of local climate zones in Beijing, China. *Science China Technological Sciences*, 62(12), 2243–2260. <https://doi.org/10.1007/s11431-018-9417-6>
 119. Rajeshwari, A., & Mani, N. D. (2014). ESTIMATION OF LAND SURFACE TEMPERATURE OF DINDIGUL DISTRICT USING LANDSAT 8 DATA. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 03(05), 122–126. <https://doi.org/10.15623/ijret.2014.0305025>
 120. Rajkovich, N., & Larsen, L. (2016). A Bicycle-Based Field Measurement System for the Study of Thermal Exposure in Cuyahoga County, Ohio, USA. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(2), 159. <https://doi.org/10.3390/ijerph13020159>
 121. Ren, C., Cai, M., Li, X., Zhang, L., Wang, R., Xu, Y., & Ng, E. (2019). Assessment of Local Climate Zone Classification Maps of Cities in China and Feasible Refinements. *Scientific Reports*, 9(1), 18848. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55444-9>
 122. Rodler, A., & Leduc, T. (2019). Local climate zone approach on local and micro scales: Dividing the urban open space. *Urban Climate*, 28, 100457. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100457>
 123. Ruzzon, M., & Armiraglio, S. (2020). Il ruolo delle aree verdi nella regolazione delle temperature a Brescia. *Natura bresciana: annuario del Museo Civico di Storia Naturale di Brescia*, 43, 61–71.
 124. Schuster, P. F., Schaefer, K. M., Aiken, G. R., Antweiler, R. C., Dewild, J. F., Gryziec, J. D., Gusmeroli, A., Hugelius, G., Jafarov, E., Krabbenhoft, D. P., Liu, L., Herman-Mercer, N., Mu, C., Roth, D. A., Schaefer, T., Striegl, R. G., Wickland, K. P., & Zhang, T. (2018). Permafrost Stores a Globally Significant Amount of Mercury. *Geophysical Research Letters*, 45(3), 1463–1471. <https://doi.org/10.1002/2017GL075571>
 125. Schwarz, N., Schlink, U., Franck, U., & Großmann, K. (2012). Relationship of land surface and air temperatures and its implications for quantifying urban heat island indicators—An application for the city of Leipzig (Germany). *Ecological Indicators*, 18, 693–704. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.01.001>
 126. Shatnawi, N., & Abu Qdais, H. (2019). Mapping urban land surface temperature using remote sensing techniques and artificial neural network modelling. *International Journal of Remote Sensing*, 40(10), 3968–3983. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1557792>
 127. Shepherd, J. M., Pierce, H., & Negri, A. J. (2002). Rainfall Modification by Major Urban Areas: Observations from Spaceborne Rain Radar on the TRMM Satellite. *Journal of Applied Meteorology*, 41(7), 689–701. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2002\)041<0689:RMBMUA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2002)041<0689:RMBMUA>2.0.CO;2)
 128. Shi, Y., Lau, K. K.-L., Ren, C., & Ng, E. (2018). Evaluating the local climate zone classification in high-density heterogeneous urban environment using mobile measurement. *Urban Climate*.

Bibliografia

129. Sigler, L., Gilabert, J., & Villalba, G. (2022). Exploring Methods for Developing Local Climate Zones to Support Climate Research. *Climate*, 10(7), 109. <https://doi.org/10.3390/cli10070109>
130. Smoliak, B. V., Snyder, P. K., Twine, T. E., Mykleby, P. M., & Hertel, W. F. (2015). Dense Network Observations of the Twin Cities Canopy-Layer Urban Heat Island. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 54(9), 1899–1917. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-14-0239.1>
131. Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., & Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 90(4), 434–440. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.003>
132. Solomon, S., Intergovernmental Panel on Climate Change, & Intergovernmental Panel on Climate Change (A c. Di). (2007). *Climate change 2007: The physical science basis: contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
133. Spano, D., Mereu, V., Bacciu, V., Marras, S., Trabucco, A., Adinolfi, Barbato, Bosello, & Breil. (2020). *Analisi del rischio. I cambiamenti climatici in Italia*.
134. Stanke, C., Murray, V., Amlôt, R., Nurse, J., & Williams, R. (2012). The effects of flooding on mental health: Outcomes and recommendations from a review of the literature. *PLoS currents*, 4.
135. Stewart, I. D. (2011a). A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. *International Journal of Climatology*, 31(2), 200–217. <https://doi.org/10.1002/joc.2141>
136. Stewart, I. D. (2011b). *Redefining the Urban Heat Island*.
137. Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879–1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
138. Stone, B. Jr., & Rodgers, M. O. (2001). Urban form and thermal efficiency: How the design of cities influences the urban heat island effect. *American Planning Association. Journal of the American Planning Association*, 67((2)), 186–198.
139. Sun, T., Sun, R., & Chen, L. (2020). The Trend Inconsistency between Land Surface Temperature and Near Surface Air Temperature in Assessing Urban Heat Island Effects. *Remote Sensing*, 12(8), 1271. <https://doi.org/10.3390/rs12081271>
140. Teodoro, A., & Amaral, A. (2019). A Statistical and Spatial Analysis of Portuguese Forest Fires in Summer 2016 Considering Landsat 8 and Sentinel 2A Data. *Environments*, 6(3), 36. <https://doi.org/10.3390/environments6030036>
141. Tiboni, M. (2002). *La prospettiva dello sviluppo sostenibile. Pianificare per la sicurezza la città e il territorio*.
142. Tira, M. (1997). *Pianificare per la città sicura*. Librerie Dedalo, Roma.
143. UNESCO. (2011). *Recommendation on the Historic Urban Landscape, including a glossary of definitions*.

144. Unger, J., Lelovics, E., & Gál, T. (2014). Local Climate Zone mapping using GIS methods in Szeged. *Hungarian Geographical Bulletin*, 63(1), 29–41. <https://doi.org/10.15201/hungeobull.63.1.3>
145. UNI 9460/2008—Coperture discontinue – Istruzioni per la progettazione, l’esecuzione e la manutenzione di coperture realizzate con tegole di laterizio o calcestruzzo, (2008).
146. United Nations. (1987). *Our Common Future* (Report of the World Commission on Environment and Development).
147. United Nations. (1992). *United Nations framework convention on climate change*.
148. United Nations. (2015). *Trasformare il nostro mondo: L’Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile*. <https://unric.org/it/agenda-2030/>
149. United Nations Sustainable Development. (1992). *AGENDA 21*.
150. Van Daalen, K. R., Romanello, M., Rocklöv, J., Semenza, J. C., Tonne, C., Markandya, A., Dasandi, N., Jankin, S., Achebak, H., Ballester, J., Bechara, H., Callaghan, M. W., Chambers, J., Dasgupta, S., Drummond, P., Farooq, Z., Gasparyan, O., Gonzalez-Reviriego, N., Hamilton, I., ... Lowe, R. (2022). The 2022 Europe report of the Lancet Countdown on health and climate change: Towards a climate resilient future. *The Lancet Public Health*, 7(11), e942–e965. [https://doi.org/10.1016/S2468-2667\(22\)00197-9](https://doi.org/10.1016/S2468-2667(22)00197-9)
151. Van Leeuwen, C. J., Koop, S. H. A., & Sjerps, R. M. A. (2016). City Blueprints: Baseline assessments of water management and climate change in 45 cities. *Environment, Development and Sustainability*, 18(4), 1113–1128. <https://doi.org/10.1007/s10668-015-9691-5>
152. Varnes, D. J., & IAEG Commission on Landslides. (1984). *Landslide hazard zonation: A review of principles and practice*. UNESCO Paris.
153. Voogt, J. A. (2000). Urban Heat Island. In *Encyclopedia of Global Environmental Change* (Vol. 3, pp. 660–666). Ted Munn, Ian Douglas, Michael C. MacCracken, Harold A. Mooney, Peter Timmerman, Mostafa K. Tolba, et al.
154. Voogt, J. A., & Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 370–384. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8)
155. Walawender, J. P., Hajto, M. J., & Iwaniuk, P. (2012). A new ArcGIS toolset for automated mapping of land surface temperature with the use of LANDSAT satellite data. *2012 IEEE international geoscience and remote sensing symposium*, 4371–4374.
156. Wang, C., Middel, A., Myint, S. W., Kaplan, S., Brazel, A. J., & Lukasczyk, J. (2018). Assessing local climate zones in arid cities: The case of Phoenix, Arizona and Las Vegas, Nevada. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*.
157. Wang, R., Ren, C., Xu, Y., Lau, K. K.-L., & 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*, 24, 567–576. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.10.001>
158. Weilhhammer, V., Schmid, J., Mittermeier, I., Schreiber, F., Jiang, L., Pastuhovic, V., Herr, C., & Heinze, S. (2021). Extreme weather events in Europe and their health consequences – A systematic review. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 233, 113688. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2021.113688>

Bibliografia

159. Weng, Q., Lu, D., & Schubring, J. (2004). Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, 89(4), 467–483. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.005>
160. Wilson, E., & Piper, J. (2010). *Spatial planning and climate change*. Routledge.
161. Wong, N. H., Kardinal Jusuf, S., Aung La Win, A., Kyaw Thu, H., Syatia Negara, T., & Xuchao, W. (2007). Environmental study of the impact of greenery in an institutional campus in the tropics. *Building and Environment*, 42(8), 2949–2970. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.004>
162. Wong, N. H., & Yu, C. (2005). Study of green areas and urban heat island in a tropical city. *Habitat International*, 29(3), 547–558. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2004.04.008>
163. World Health Organization. Regional Office for Europe. (2021). *Heat and health in the WHO European Region: Updated evidence for effective prevention*. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/339462>
164. Xu, Y., Ren, C., Cai, M., Edward, N. Y. Y., & Wu, T. (2017). Classification of Local Climate Zones Using ASTER and Landsat Data for High-Density Cities. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(7), 3397–3405. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2683484>
165. Yang, X., Yao, L., Jin, T., Peng, L. L. H., Jiang, Z., Hu, Z., & Ye, Y. (2018). Assessing the thermal behavior of different local climate zones in the Nanjing metropolis, China. *Building and Environment*, 137, 171–184. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.04.009>
166. Yin, C., Yang, F., Wang, J., & Ye, Y. (2020). Spatiotemporal Distribution and Risk Assessment of Heat Waves Based on Apparent Temperature in the One Belt and One Road Region. *Remote Sensing*, 12(7), 1174. <https://doi.org/10.3390/rs12071174>
167. Yoo, C., Lee, Y., Cho, D., Im, J., & Han, D. (2020). Improving Local Climate Zone Classification Using Incomplete Building Data and Sentinel 2 Images Based on Convolutional Neural Networks. *Remote Sensing*, 12(21), 3552. <https://doi.org/10.3390/rs12213552>
168. Yow, D. M. (2007). Urban Heat Islands: Observations, Impacts, and Adaptation: Urban heat islands: observations, impacts, and adaptation. *Geography Compass*, 1(6), 1227–1251. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2007.00063.x>
169. Zhao, C. (2018). LINKING THE LOCAL CLIMATE ZONES AND LAND SURFACE TEMPERATURE TO INVESTIGATE THE SURFACE URBAN HEAT ISLAND, A CASE STUDY OF SAN ANTONIO, TEXAS, U.S. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV–3, 277–283. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-3-277-2018>
170. Zhao, C., Jensen, J. L. R., Weng, Q., Currit, N., & Weaver, R. (2020). Use of Local Climate Zones to investigate surface urban heat islands in Texas. *GIScience & Remote Sensing*, 57(8), 1083–1101. <https://doi.org/10.1080/15481603.2020.1843869>
171. Zhao, C., Jensen, J., Weng, Q., Currit, N., & Weaver, R. (2019). Application of airborne remote sensing data on mapping local climate zones: Cases of three metropolitan areas of Texas, U.S. *Computers, Environment and Urban Systems*, 74, 175–193. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2018.11.002>

172. Zheng, Y., Ren, C., Xu, Y., Wang, R., Ho, J., Lau, K., & Ng, E. (2018). GIS-based mapping of Local Climate Zone in the high-density city of Hong Kong. *Urban Climate*, 24, 419–448. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.05.008>
173. Ziter, C. D., Pedersen, E. J., Kucharik, C. J., & Turner, M. G. (2019). Scale-dependent interactions between tree canopy cover and impervious surfaces reduce daytime urban heat during summer. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(15), 7575–7580. <https://doi.org/10.1073/pnas.1817561116>

Elenco delle Figure

Figura 1 - Temperature superficiali diurne e notturne in aree con diverso uso del suolo	26
Figura 2 - Mappa delle isoterme che illustra le caratteristiche tipiche dell'UHI e la loro corrispondenza con il grado di sviluppo urbano	27
Figura 3 - Tipologie di isole di calore	28
Figura 4 - Impatti sulla salute derivanti dalla combinazione di vulnerabilità ed esposizione a rischi ambientali e sanitari	33
Figura 5 - Andamento dell'incidenza della mortalità correlata al caldo (morte annuale per milione di persone per decennio) in Europa per la popolazione generale (2000-2020)	34
Figura 6 - I 17 obiettivi per lo sviluppo sostenibile	40
Figura 7 - European Green Deal	41
Figura 8 - Tipi di Local Climate Zone	46
Figura 9 - Timeline del satellite Landsat.....	55
Figura 10 - Schema delle lacune nella letteratura studiata.....	60
Figura 11 - Schema del contributo della ricerca alla teoria e alla pratica	62
Figura 12 - Flowchart della metodologia applicata.....	68
Figura 13 - SVF in un canyon stradale; dove W è la larghezza della strada e H è l'altezza dell'edificio.....	72
Figura 14 - Rapporto tra la superficie edificata e l'unità territoriale	72
Figura 15 - Rapporto tra la superficie permeabile e l'unità territoriale	72
Figura 16 - Schema della griglia a maglia quadrata di riferimento.....	88
Figura 17 - Inquadramento della città di Brescia	97
Figura 18 - Indicatori climatici per la Macroregione 1	98
Figura 19 - Evoluzione dell'anomalia annuale di temperatura media in gradi, calcolata rispetto alla temperatura annuale media sul periodo 1989-2018	100
Figura 20 - Evoluzione dell'anomalia di precipitazione annuale (espressa in percentuale), calcolata rispetto alla precipitazione annuale media sul periodo 1989-2018.....	100
Figura 21 - Distribuzione spaziale della precipitazione annuale (a) e della temperatura media annuale (b).....	101
Figura 22 - Estratto dello SVF per le aree agricole.....	104
Figura 23 - Estratto dello SVF per il centro storico e le aree circostanti	104

Elenco delle Figure

Figura 24 - Estratto del BSF del centro storico e alcune aree industriali.....	105
Figura 25 - Estratto del PSF dei Colli Campiani.....	106
Figura 26 - Estratto del PSF per il centro storico e le aree circostanti.....	106
Figura 27 - Estratto del ISF del centro storico e alcune aree industriali	108
Figura 28 - Estratto della tabella attributi con evidenziato il campo dell'altezza degli edifici ...	108
Figura 29 - Estratto del BH del centro storico e le aree circostanti	109
Figura 30 - Estratto delle LCZ per il centro storico e il suo intorno	112
Figura 31 - Esempio di area della città con quattro diverse classi di LCZ	113
Figura 32 - LST diurne.....	116
Figura 33 - LST notturne.....	117
Figura 34 - Estratto delle LST adattate alle celle per il centro storico e il suo intorno.....	117
Figura 35 - Estratto delle LCZ per il centro storico e il suo intorno	118
Figura 36 - Estratto dei livelli di pericolosità – centro storico.....	120
Figura 37 - Estratto dei livelli di vulnerabilità – centro storico	121
Figura 38 - Estratto dei livelli di esposizione – centro storico.....	122
Figura 39 - Sovrapposizione dei livelli di Pericolosità, Vulnerabilità ed Esposizione per il calcolo del Rischio.....	123
Figura 40 - Estratto dei livelli di rischio – centro storico.....	124
Figura 41 - Estratto delle criticità degli sfioratori – zona sud ovest	125
Figura 42 - Estratto dell' idoneità del suolo all' infiltrazione – centro storico	127
Figura 43 - Sovrapposizione della mappa delle criticità degli sfioratori alla mappa dell' idoneità del suolo all' infiltrazione	128
Figura 44 - Estratto dell' idoneità idraulica – centro storico e intorno	129
Figura 45 - Sovrapposizione dell' idoneità idraulica con la mappa del rischio	129
Figura 46 - Estratto dei livelli di priorità per interventi di depavimentazione – centro storico e intorno	131
Figura 47 - Sovrapposizione della mappa delle criticità del sistema di drenaggio urbano con la mappa del rischio	132
Figura 48 - Estratto della mappa delle criticità delle questioni climatiche analizzate	132
Figura 49 - Estratto della mappa delle criticità delle questioni climatiche analizzate con celle 120x120 m	133
Figura 50 - Estratto della mappa che mostra la mancanza di aree verdi.....	134
Figura 51 - Estratto della mappa densità dell' edificato – centro storico.....	135

Figura 52 - Sovrapposizione della mappa delle questioni climatiche con la mappa della mancanza di aree verdi e della densità dell'edificato	136
Figura 53 - Estratto dei livelli di idoneità alla diffusione di tetti verdi – centro storico e intorno	138
Figura 54 - Estratto della mappa di base delle superfici pavimentate.....	140
Figura 55 - Estratto della mappa di base degli edifici.....	141

Elenco delle Tabelle

Tabella 1 - Principali fattori climatici ed impatti che influiscono sull'ambiente urbano e sui servizi erogati.....	32
Tabella 2 - Proprietà fisiche per ogni classe di LCZ.....	47
Tabella 3 - Sintesi dei metodi di raccolta dei dati e di analisi per le LCZ.....	52
Tabella 4 - Sintesi delle banche dati e dei metodi di elaborazione delle immagini satellitari per le LST	57
Tabella 5 - Definizione di rischio, formulazione del rischio e componenti.....	59
Tabella 6 - Identificazione dei parametri utilizzati in letteratura per il calcolo delle Local Climate Zone	71
Tabella 7 - Divisione primaria secondo il parametro BSF.....	76
Tabella 8 - Suddivisione dei parametri	76
Tabella 9 - Associazione LCZ A-G con il Database Uso del Suolo	77
Tabella 10 - Divisione secondo il parametro PSF.....	77
Tabella 11 - Adattamento numerico delle LCZ A-G	77
Tabella 12 - Divisione in fasce di età e livelli di sensibilità	81
Tabella 13 - Sovrapposizione della pericolosità alla vulnerabilità	83
Tabella 14 - Sovrapposizione della pericolosità e vulnerabilità all'esposizione	83
Tabella 15 - Sovrapposizione criticità connesse al sistema di drenaggio urbano e idoneità all'infiltrazione.....	85
Tabella 16 - Sovrapposizione rischio e idoneità idraulica	85
Tabella 17 - Sovrapposizione Rischio e criticità connesse al sistema di drenaggio urbano	87
Tabella 18 - Sovrapposizione mappa delle Criticità delle questioni climatiche con il PSF^{-1}	88
Tabella 19 - Sovrapposizione mappa delle Criticità delle questioni climatiche e PSF^{-1} con il BSF	89
Tabella 20 - Sintesi delle opportunità	91
Tabella 21 - Dati delle immagini satellitari Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L1	103
Tabella 22 - Estratto della tabella di calcolo per il BSF.....	104
Tabella 23 - Estratto della tabella di calcolo per il PSF	106
Tabella 24 - Estratto della tabella di calcolo per il ISF	107
Tabella 25 - Parametri delle classi di LCZ adattati al caso studio	110

Elenco delle Tabelle

Tabella 26 - Estratto della tabella con i parametri calcolati	110
Tabella 27 - Estratto della tabella con i parametri e le classi di LCZ	111
Tabella 28 - Calcolo delle tipologie di LCZ presenti nel territorio.....	112
Tabella 29 - Giornate con disponibilità di LST calcolate	114
Tabella 30 - Giornate anomale	115
Tabella 31 - Divisione in livelli di pericolo	119
Tabella 32 - Divisione in tre livelli di vulnerabilità	120
Tabella 33 - Estratto della tabella di calcolo per definire i livelli di vulnerabilità.....	121
Tabella 34 - Divisione in tre livelli di esposizione.....	122
Tabella 35 - Livelli di priorità e idoneità per gli sfioratori	125
Tabella 36 - Tipologie di vincoli.....	126
Tabella 37 - Estratto dei calcoli per l'identificazione dei livelli di priorità alla depavimentazione di ogni sottobacino	130
Tabella 38 - Divisione in tre livelli di priorità alla depavimentazione.....	130
Tabella 39 - Estratto dei calcoli per l'identificazione dei livelli di idoneità alla diffusione dei tetti verdi per ogni sottobacino.....	137
Tabella 40 - Divisione in tre livelli di idoneità alla diffusione dei tetti verdi	137

Appendice A

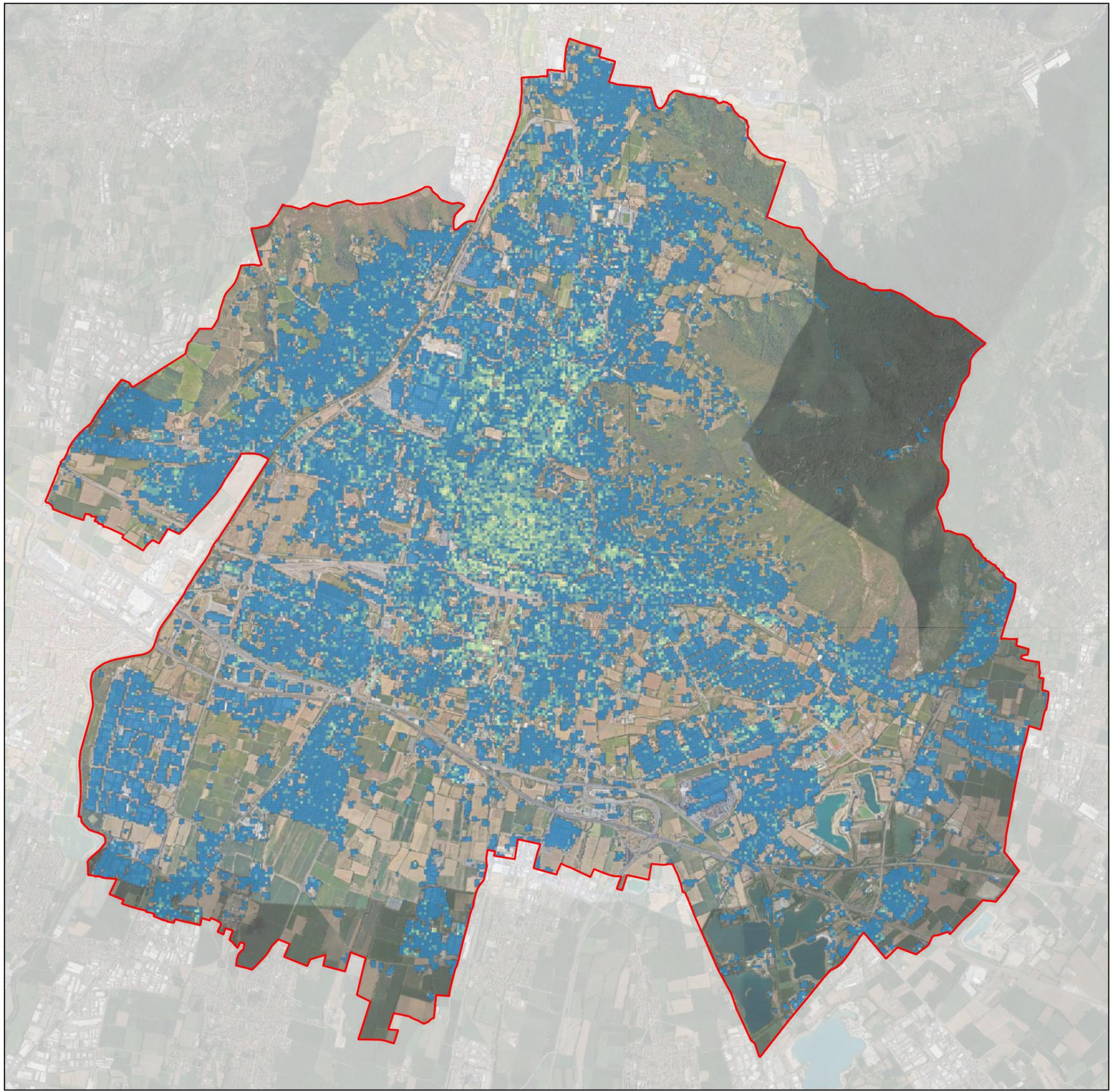
L'appendice A comprende tutte le mappe elaborate dalle analisi precedenti della città di Brescia.

In particolare, si allegano le seguenti mappe:

- Tavola 1a – Sky View Factor (SVF)
- Tavola 1b – Building Surface Fraction (BSF)
- Tavola 1c – Pervious Surface Fraction (PSF)
- Tavola 1d – Impervious Surface Fraction (ISF)
- Tavola 1e – Height of roughness elements (BH)
- Tavola 1f – Local Climate Zone
- Tavola 2a – Temperatura media al suolo diurna_24/06/2019
- Tavola 2b – Temperatura media al suolo notturna_26/06/2019
- Tavola 3a – Temperatura media al suolo diurna per classe di LCZ
- Tavola 3b – Temperatura media al suolo notturna per classe di LCZ
- Tavola 3c – Pericolosità
- Tavola 4 – Vulnerabilità
- Tavola 5 – Esposizione
- Tavola 6 – Rischio da ondate di calore per la salute dei residenti
- Tavola 7a – Criticità connesse al sistema di drenaggio urbano
- Tavola 7b – Idoneità all'infiltrazione di acqua nel suolo
- Tavola 7c – Idoneità idraulica
- Tavola 8a – Livelli di priorità per interventi di depavimentazione_Celle 30x30m
- Tavola 8b – Livelli di priorità per interventi di depavimentazione_Sottobacini
- Tavola 9a – Criticità delle questioni climatiche analizzate_Celle 30x30m
- Tavola 9b – Criticità delle questioni climatiche analizzate_Celle 120x120m
- Tavola 9c – Mancanza di aree verdi_Celle 120x120m
- Tavola 9d – Densità dell'edificato_Celle 120x120m
- Tavola 10a – Livelli di idoneità alla diffusione di tetti verdi_Celle 120x120m
- Tavola 10b – Livelli di idoneità alla diffusione di tetti verdi_Sottobacini
- Tavola 11 – Mappa di base delle superfici pavimentate di proprietà del Comune

Appendice A

- Tavola 12 – Mappa di base degli edifici suddivisi per proprietà
- Tavola 13a – Proposte dei cittadini_Progetto SpaziAttivi
- Tavola 13b – Isole ambientali
- Tavola 13c – Ambiti della città in trasformazione
- Tavola 13d – Itinerari di fruizione paesaggistica
- Tavola 13e – Servizi
- Tavola 13f – Infrastrutture per la mobilità_Linea del tram T2
- Tavola 14a – Tetti piani
- Tavola 14b – Edifici di valore storico e architettonico



Legenda

 Confine amministrativo
Comune di Brescia

Sky View Factor (SVF)

-  0,1 - 0,2
-  0,2 - 0,3
-  0,3 - 0,4
-  0,4 - 0,5
-  0,5 - 0,6
-  0,6 - 0,7
-  0,7 - 0,8
-  0,8 - 0,9
-  0,9 - 1,00



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE,
DELLA COOPERAZIONE INTERNAZIONALE E DI MATEMATICA

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/20

XXXVI CICLO

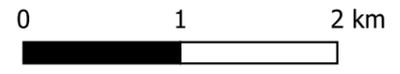
**IL CONTRIBUTO DEGLI STRUMENTI DI GOVERNO DEL TERRITORIO
PER L'ADATTAMENTO DELLE CITTÀ AI CAMBIAMENTI CLIMATICI**

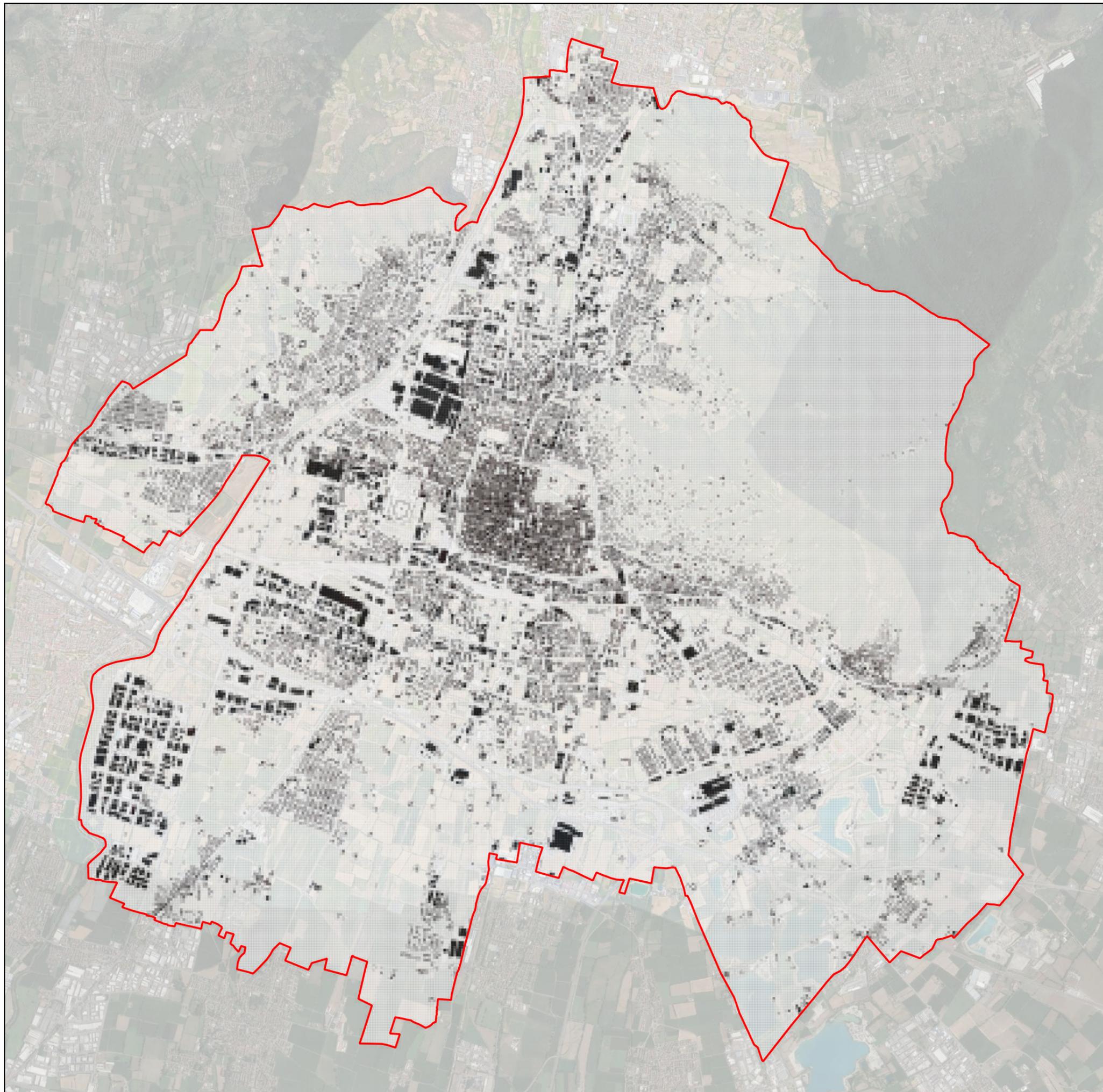
Supervisore:
Cl.ima Prof.ssa Michela TIBONI, Ph.D.
Co-supervisore:
Ing. Ilaria FUMAGALLI Ph.D.

Dottoranda:
Ing. Stefania BOGLIETTI

TAVOLA 1a

Sky View Factor (SVF)





Legenda

 Confine amministrativo
Comune di Brescia

Building Surface Fraction (BSF)

 0 - 10%
 10 - 20%
 20 - 30%
 30 - 40%
 40 - 50%
 50 - 60%
 60 - 70%
 70 - 80%
 80 - 90%
 90 - 100%



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE,
DELLA COOPERAZIONE INTERNAZIONALE E DI MATEMATICA

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/20

XXXVI CICLO

**IL CONTRIBUTO DEGLI STRUMENTI DI GOVERNO DEL TERRITORIO
PER L'ADATTAMENTO DELLE CITTÀ AI CAMBIAMENTI CLIMATICI**

Supervisore:
Cl.ima Prof.ssa Michela TIBONI, Ph.D.
Co-supervisore:
Ing. Ilaria FUMAGALLI Ph.D.

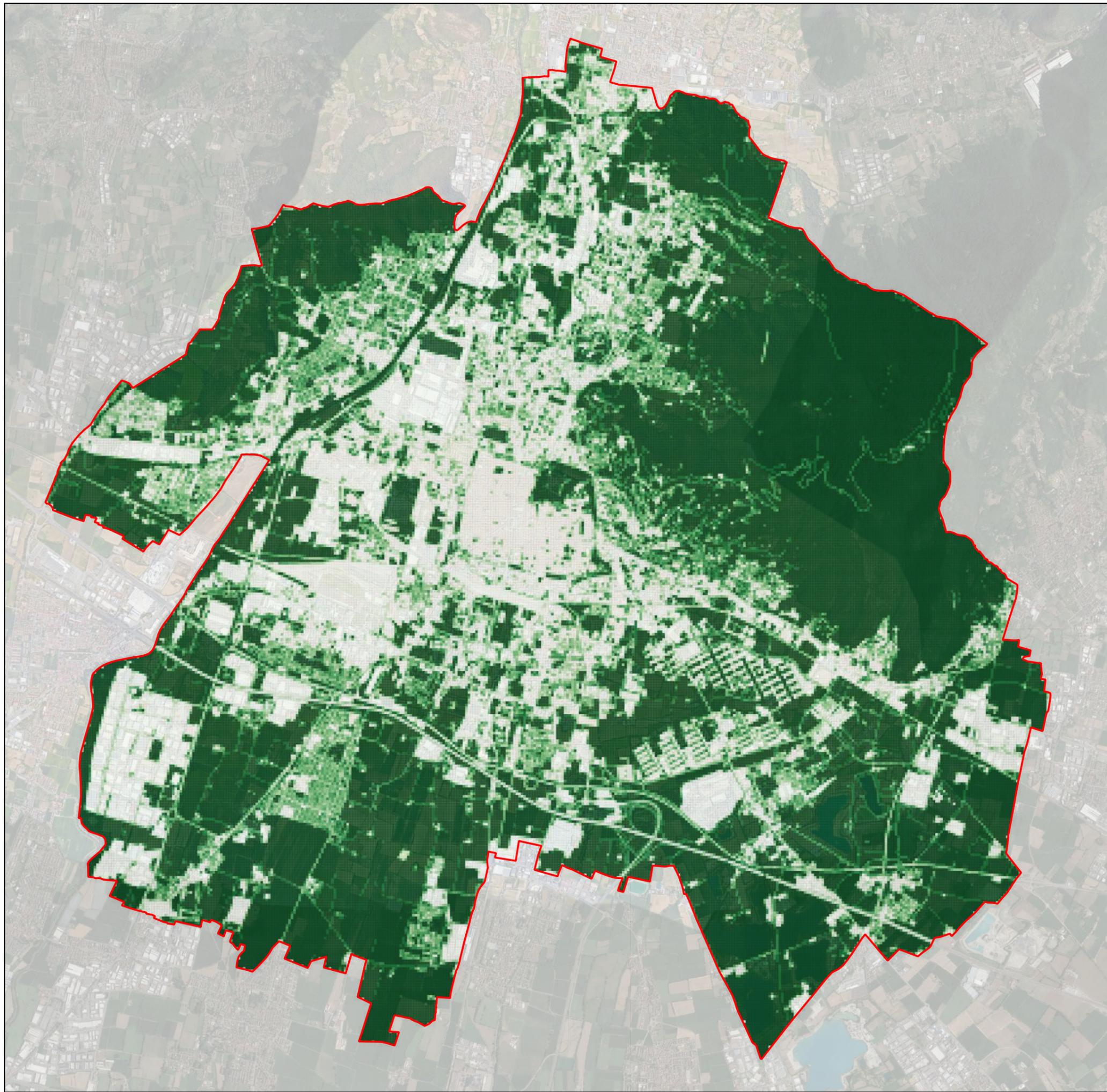
Dottoranda:
Ing. Stefania BOGLIETTI

**TAVOLA
1b**

Building Surface Fraction (BSF)
Percentuale di suolo edificato



0 1 2 km

Legenda

 Confine amministrativo
Comune di Brescia

Pervious Surface Fraction (PSF)

 0 - 10 %
 10 - 20 %
 20 - 30 %
 30 - 40 %
 40 - 50 %
 50 - 60 %
 60 - 70 %
 70 - 80 %
 80 - 90 %
 90 - 100 %



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE,
DELLA COOPERAZIONE INTERNAZIONALE E DI MATEMATICA

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/20

XXXVI CICLO

**IL CONTRIBUTO DEGLI STRUMENTI DI GOVERNO DEL TERRITORIO
PER L'ADATTAMENTO DELLE CITTÀ AI CAMBIAMENTI CLIMATICI**

Supervisore:
Cl. ma Prof.ssa Michela TIBONI, Ph.D.
Co-supervisore:
Ing. Ilaria FUMAGALLI, Ph.D.

Dottoranda:
Ing. Stefania BOGLIETTI

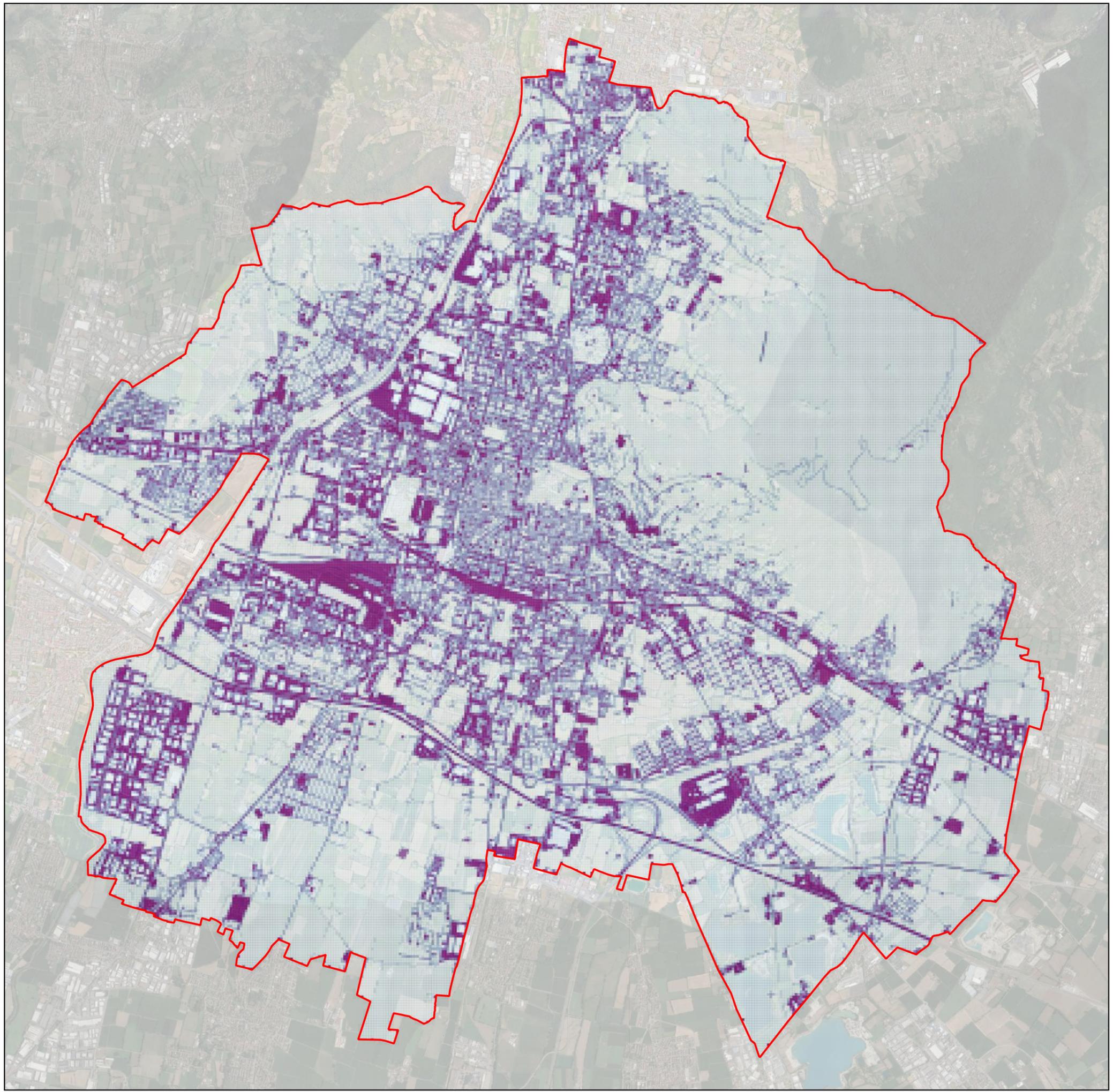
**TAVOLA
1c**

Pervious Surface Fraction (PSF)
Percentuale di suolo permeabile



0 1 2 km





Legenda

 Confine amministrativo
Comune di Brescia

Impervious Surface Fraction (ISF)

-  0 - 10 %
-  10 - 20 %
-  20 - 30 %
-  30 - 40 %
-  40 - 50 %
-  50 - 60 %
-  60 - 70 %
-  70 - 80 %
-  80 - 90 %
-  90 - 100 %



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE,
DELLA COOPERAZIONE INTERNAZIONALE E DI MATEMATICA

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/20

XXXVI CICLO

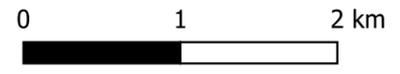
**IL CONTRIBUTO DEGLI STRUMENTI DI GOVERNO DEL TERRITORIO
PER L'ADATTAMENTO DELLE CITTÀ AI CAMBIAMENTI CLIMATICI**

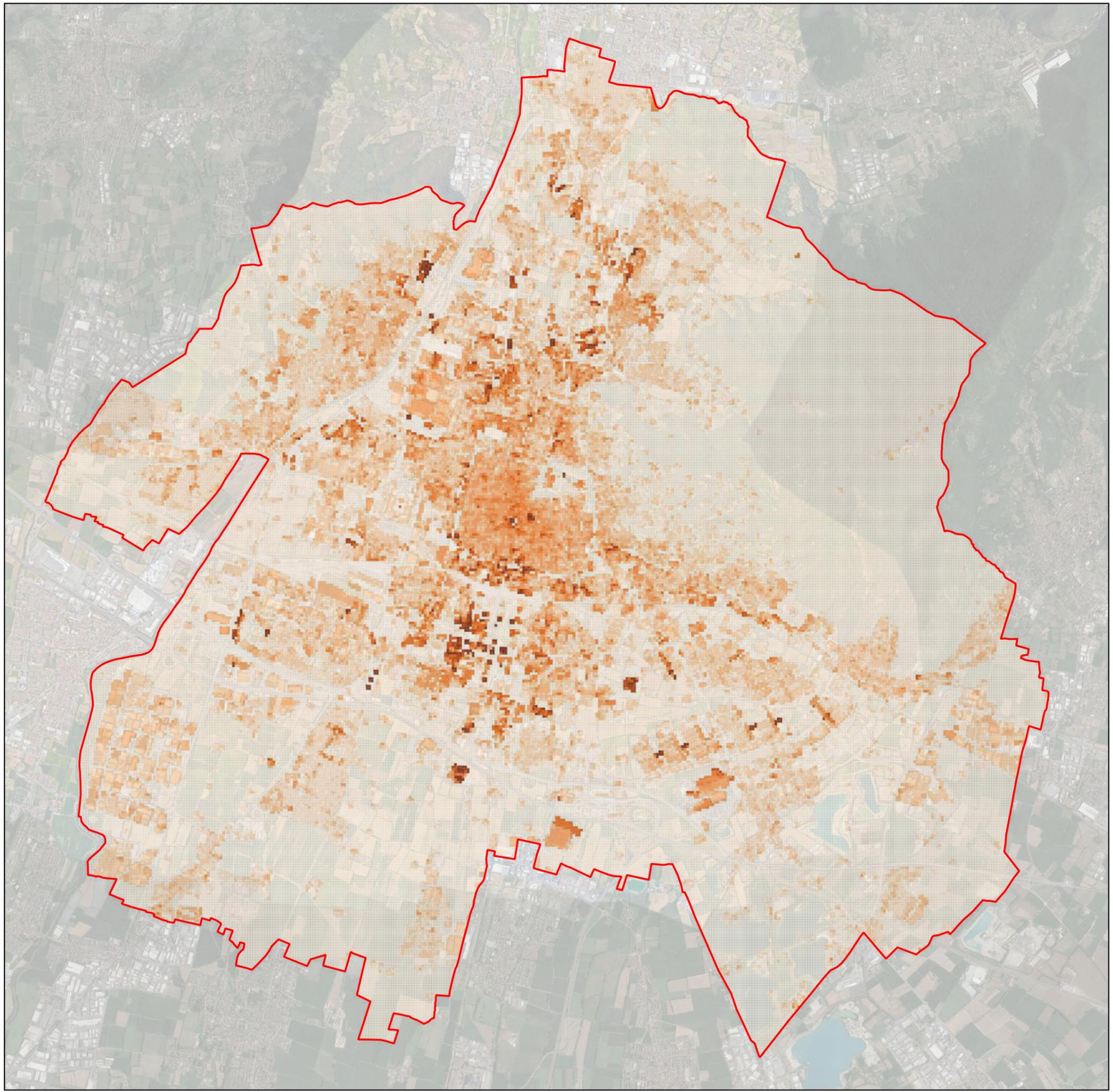
Supervisore:
Cl. ma Prof.ssa Michela TIBONI, Ph.D.
Co-supervisore:
Ing. Ilaria FUMAGALLI Ph.D.

Dottoranda:
Ing. Stefania BOGLIETTI

**TAVOLA
1d**

Impervious Surface Fraction (ISF)
Percentuale di suolo impermeabile





Legenda

 Confine amministrativo
Comune di Brescia

Height of roughness elements (BH)

-  0 - 3 m
-  3 - 6 m
-  6 - 9 m
-  9 - 12 m
-  12 - 15 m
-  15 - 18 m
-  18 - 21 m
-  21 - 24 m
-  24 - 27 m
-  > 27 m



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE,
DELLA COOPERAZIONE INTERNAZIONALE E DI MATEMATICA

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/20

XXXVI CICLO

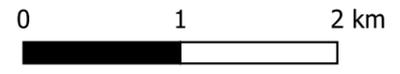
**IL CONTRIBUTO DEGLI STRUMENTI DI GOVERNO DEL TERRITORIO
PER L'ADATTAMENTO DELLE CITTÀ AI CAMBIAMENTI CLIMATICI**

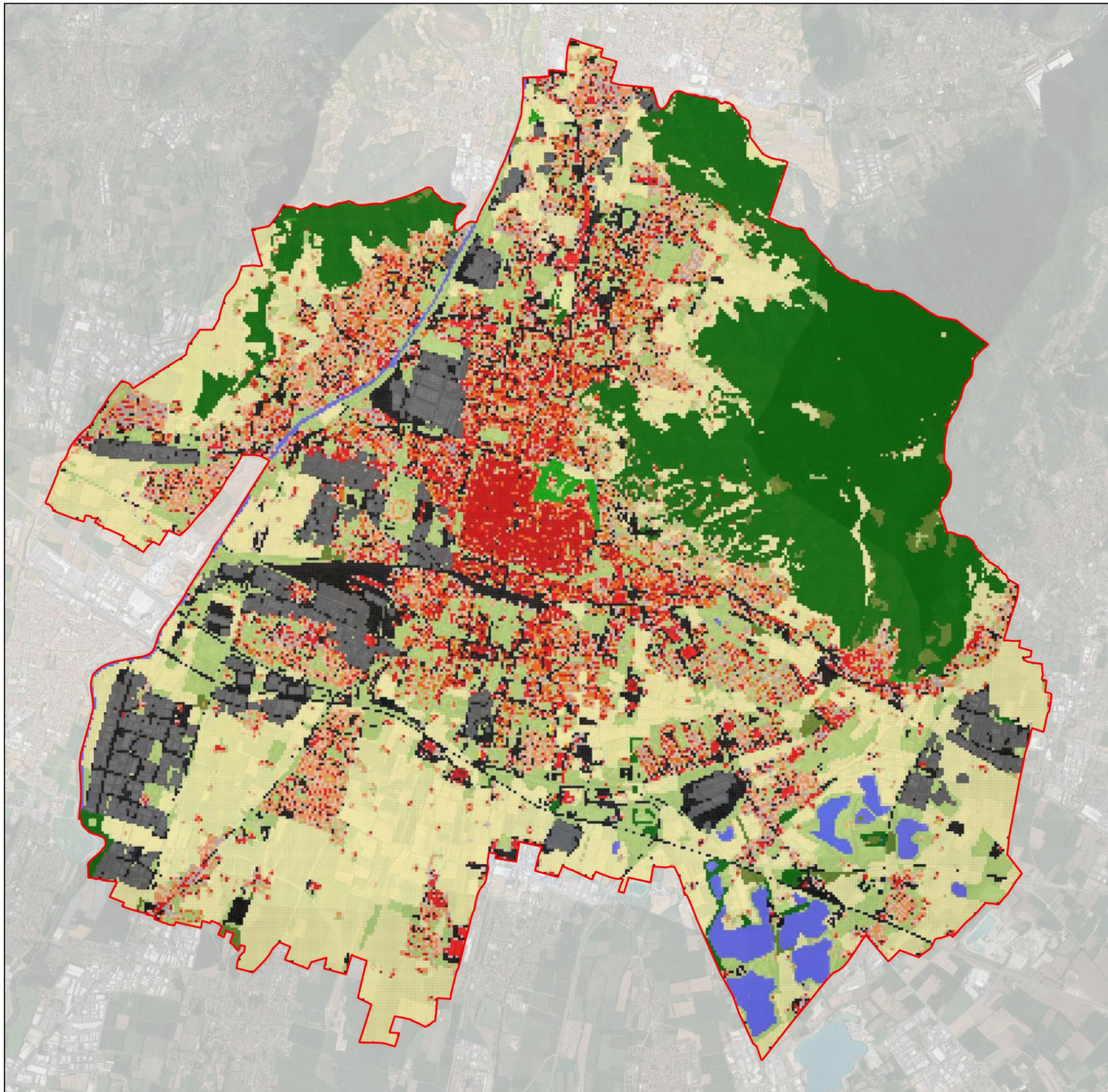
Supervisore:
Cl.ima Prof.ssa Michela TIBONI, Ph.D.
Co-supervisore:
Ing. Ilaria FUMAGALLI Ph.D.

Dottoranda:
Ing. Stefania BOGLIETTI

**TAVOLA
1e**

Height of roughness elements (BH)
Altezza media degli edifici





Legenda

 Confine amministrativo
Comune di Brescia

Local Climate Zone

 LCZ 1	 LCZ A
 LCZ 2	 LCZ B
 LCZ 3	 LCZ C
 LCZ 4	 LCZ D
 LCZ 5	 LCZ E
 LCZ 6	 LCZ F
 LCZ 7	 LCZ G
 LCZ 8	
 LCZ 9	
 LCZ 10	



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE,
DELLA COOPERAZIONE INTERNAZIONALE E DI MATEMATICA

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/20

XXXVI CICLO

**IL CONTRIBUTO DEGLI STRUMENTI DI GOVERNO DEL TERRITORIO
PER L'ADATTAMENTO DELLE CITTÀ AI CAMBIAMENTI CLIMATICI**

Supervisore:
Cl.ima Prof.ssa Michela TIBONI, Ph.D.
Co-supervisore:
Ing. Ilaria FUMAGALLI Ph.D.

Dottoranda:
Ing. Stefania BOGLIETTI

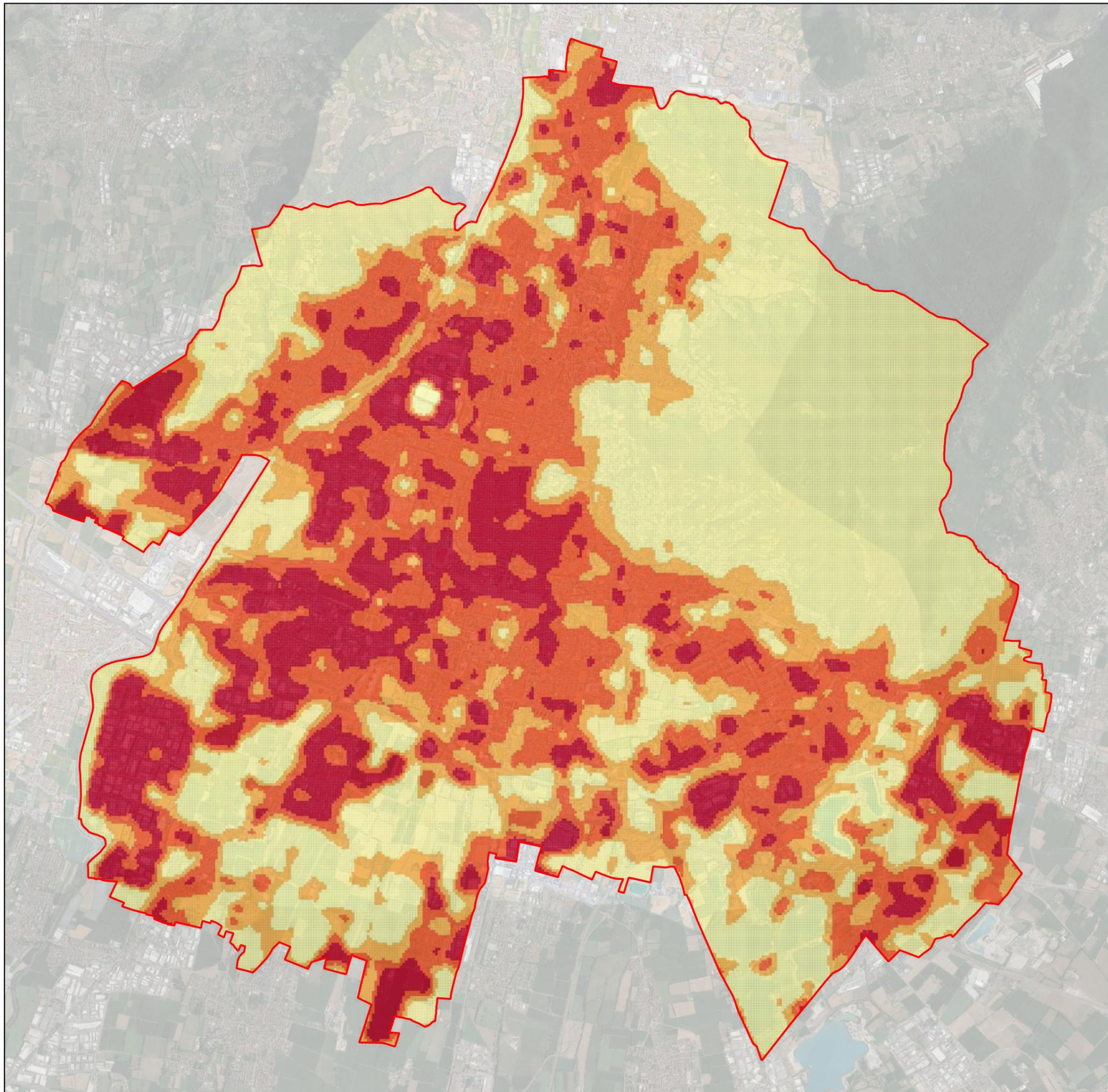
TAVOLA 1f

Local Climate Zone (LCZ)



0 1 2 km





Legenda

 Confine amministrativo
Comune di Brescia

Temperatura media diurna [°C]

 < 30
 30 - 32
 32 - 34
 > 34



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE,
DELLA COOPERAZIONE INTERNAZIONALE E DI MATEMATICA

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/20

XXXVI CICLO

**IL CONTRIBUTO DEGLI STRUMENTI DI GOVERNO DEL TERRITORIO
PER L'ADATTAMENTO DELLE CITTÀ AI CAMBIAMENTI CLIMATICI**

Supervisore:
Cl.ima Prof.ssa Michela TIBONI, Ph.D.
Co-supervisore:
Ing. Ilaria FUMAGALLI Ph.D.

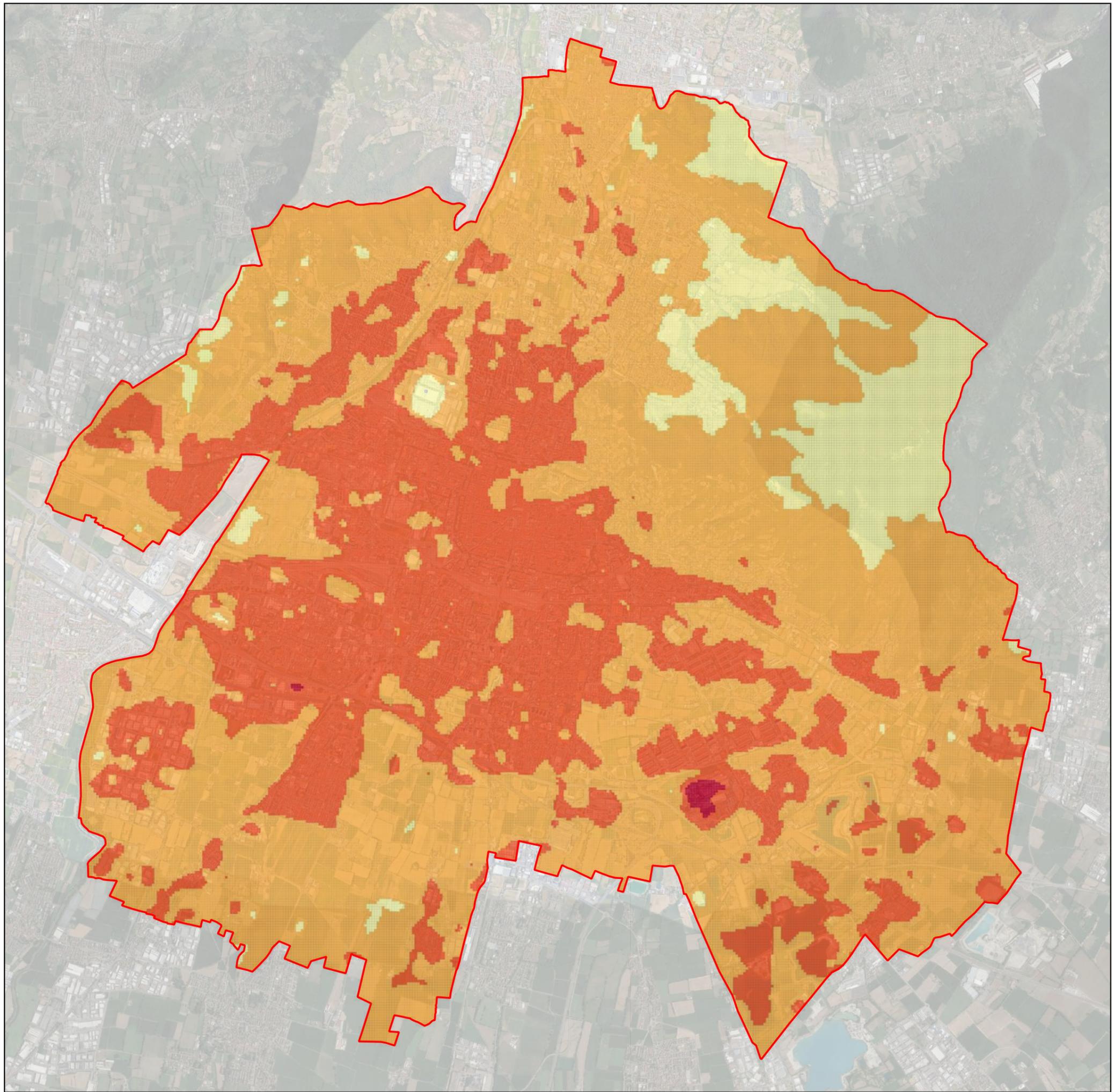
Dottoranda:
Ing. Stefania BOGLIETTI

**TAVOLA
2a**

Temperatura media al suolo diurna
24/06/2019



0 1 2 km

Legenda

 Confine amministrativo
Comune di Brescia

Temperatura media notturna [°C]

-  < 22
-  22 - 24
-  24 - 26
-  > 26



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE,
DELLA COOPERAZIONE INTERNAZIONALE E DI MATEMATICA

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/20

XXXVI CICLO

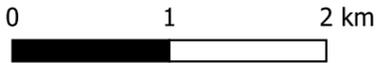
**IL CONTRIBUTO DEGLI STRUMENTI DI GOVERNO DEL TERRITORIO
PER L'ADATTAMENTO DELLE CITTÀ AI CAMBIAMENTI CLIMATICI**

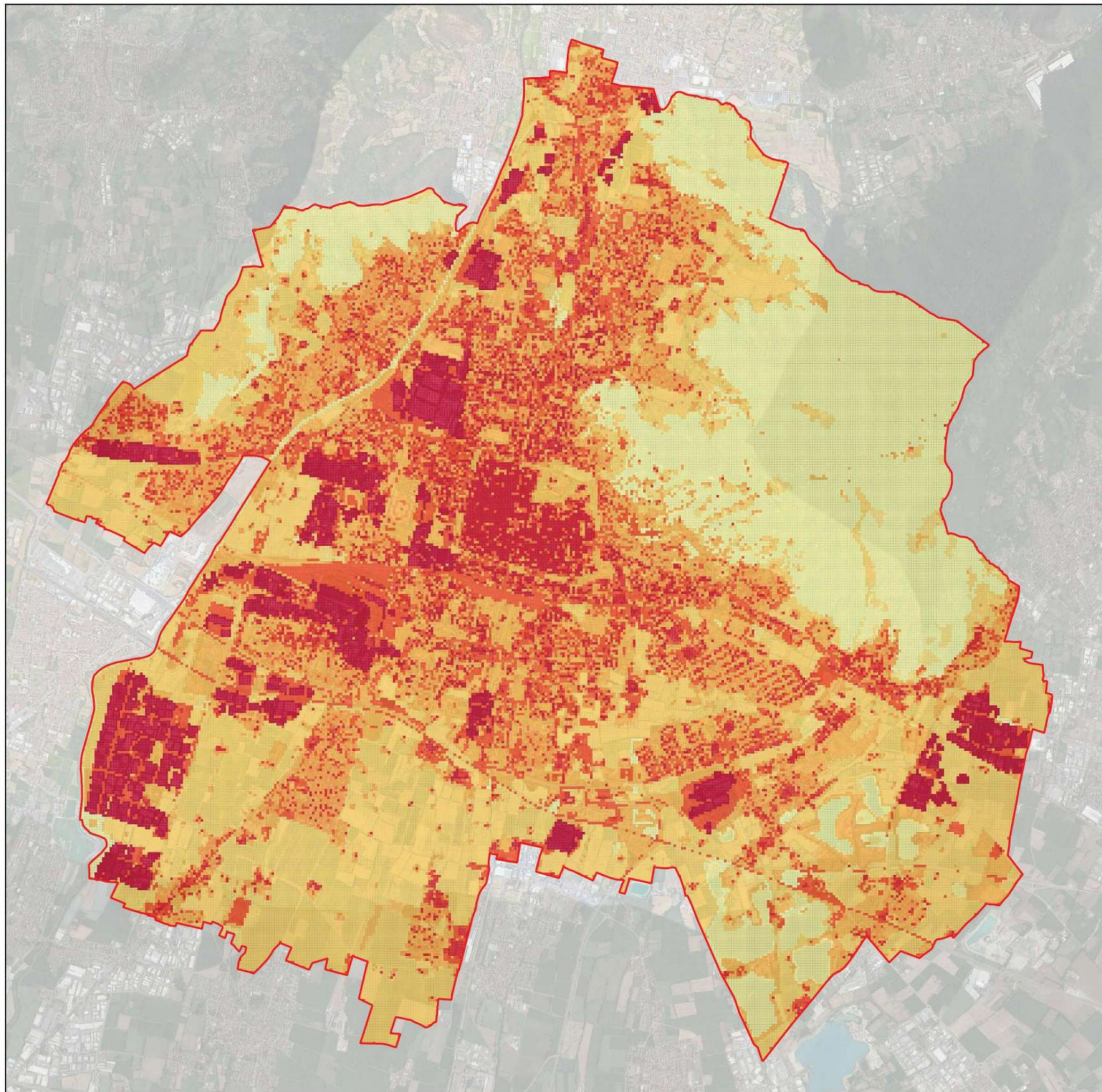
Supervisore:
Cl.ima Prof.ssa Michela TIBONI, Ph.D.
Co-supervisore:
Ing. Ilaria FUMAGALLI Ph.D.

Dottoranda:
Ing. Stefania BOGLIETTI

**TAVOLA
2b**

Temperatura media al suolo notturna
26/06/2019





Legenda

 Confine amministrativo
Comune di Brescia

Temperatura media al suolo diurna per classe di LCZ [°C]

 LCZ 10 - 34,90	 LCZ 6 - 32,52
 LCZ 2 - 33,72	 LCZ 9 - 32,33
 LCZ 3 - 33,34	 LCZ D - 31,75
 LCZ 1 - 33,31	 LCZ B - 30,00
 LCZ 8 - 33,17	 LCZ F - 29,98
 LCZ E - 33,09	 LCZ C - 28,43
 LCZ 5 - 33,05	 LCZ G - 27,22
 LCZ 4 - 32,87	 LCZ A - 25,05
 LCZ 7 - 32,84	



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE,
DELLA COOPERAZIONE INTERNAZIONALE E DI MATEMATICA

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/20

XXXVI CICLO

**IL CONTRIBUTO DEGLI STRUMENTI DI GOVERNO DEL TERRITORIO
PER L'ADATTAMENTO DELLE CITTÀ AI CAMBIAMENTI CLIMATICI**

Supervisore:
Ch.ma Prof.ssa Michela TIBONI, Ph.D.
Co-supervisore:
Ing. Ilaria FUMAGALLI, Ph.D.

Dottoranda:
Ing. Stefania BOGLIETTI

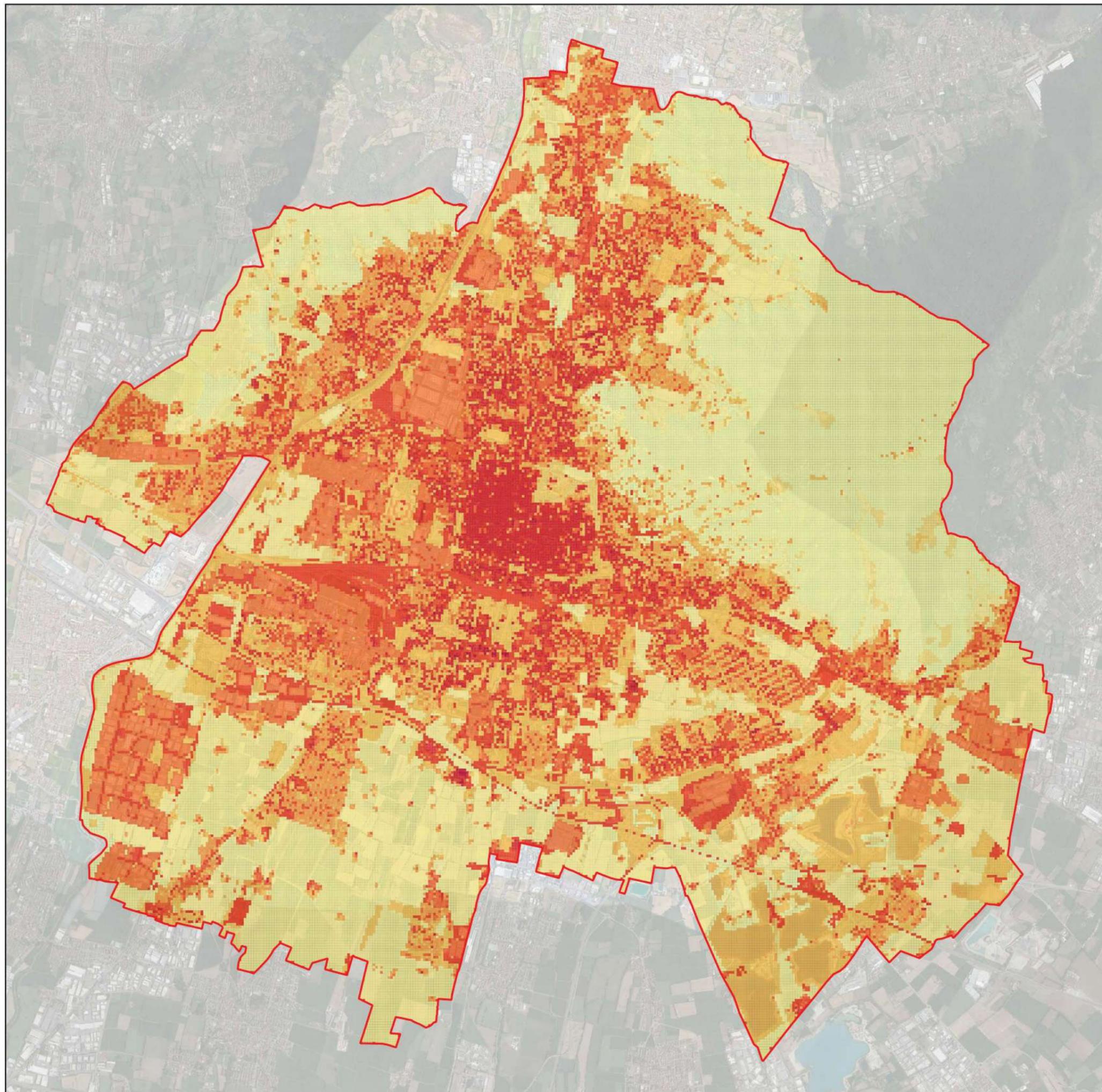
**TAVOLA
3a**

Temperatura media al suolo diurna
per classe di LCZ



0 1 2 km





Legenda

 Confine amministrativo
Comune di Brescia

Temperatura media al suolo notturna per classe di LCZ [°C]

 LCZ 1 - 24,43	 LCZ 6 - 23,87
 LCZ 4 - 24,35	 LCZ 9 - 23,87
 LCZ 2 - 24,27	 LCZ G - 23,84
 LCZ 5 - 24,19	 LCZ D - 23,75
 LCZ E - 24,16	 LCZ B - 23,71
 LCZ 8 - 23,03	 LCZ C - 22,90
 LCZ 3 - 24,01	 LCZ F - 22,84
 LCZ 10 - 23,97	 LCZ A - 22,24
 LCZ 7 - 23,92	



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE,
DELLA COOPERAZIONE INTERNAZIONALE E DI MATEMATICA

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/20

XXXVI CICLO

**IL CONTRIBUTO DEGLI STRUMENTI DI GOVERNO DEL TERRITORIO
PER L'ADATTAMENTO DELLE CITTÀ AI CAMBIAMENTI CLIMATICI**

Supervisore:
Ch.ma Prof.ssa Michela TIBONI, Ph.D.
Co-supervisore:
Ing. Ilaria FUMAGALLI, Ph.D.

Dottoranda:
Ing. Stefania BOGLIETTI

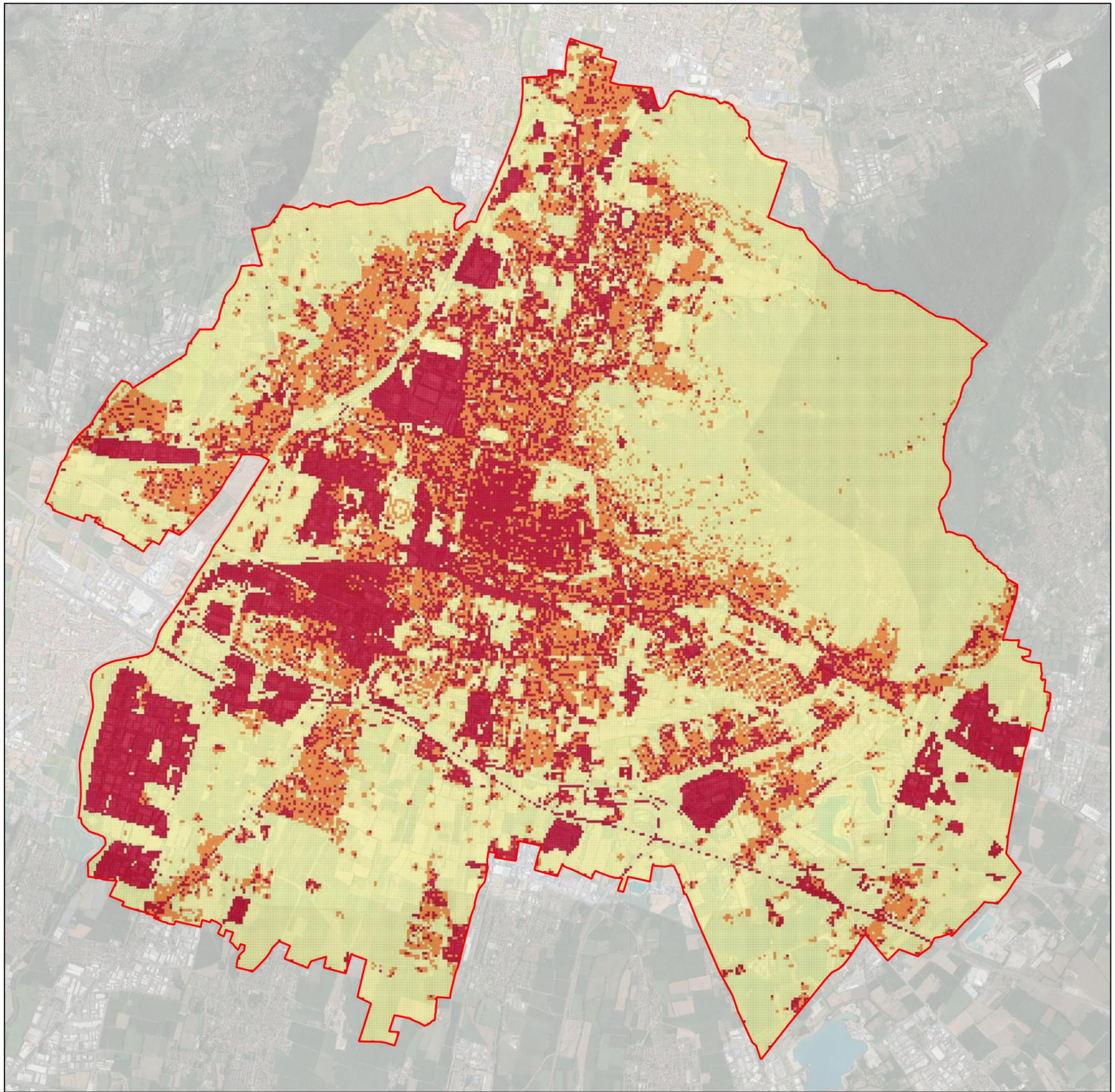
**TAVOLA
3b**

Temperatura media al suolo notturna
per classe di LCZ



0 1 2 km





Legenda

 Confine amministrativo
Comune di Brescia

Livelli di pericolosità

 Basso
 Medio
 Alto



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE,
DELLA COOPERAZIONE INTERNAZIONALE E DI MATEMATICA

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/20

XXXVI CICLO

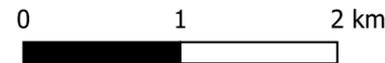
**IL CONTRIBUTO DEGLI STRUMENTI DI GOVERNO DEL TERRITORIO
PER L'ADATTAMENTO DELLE CITTÀ AI CAMBIAMENTI CLIMATICI**

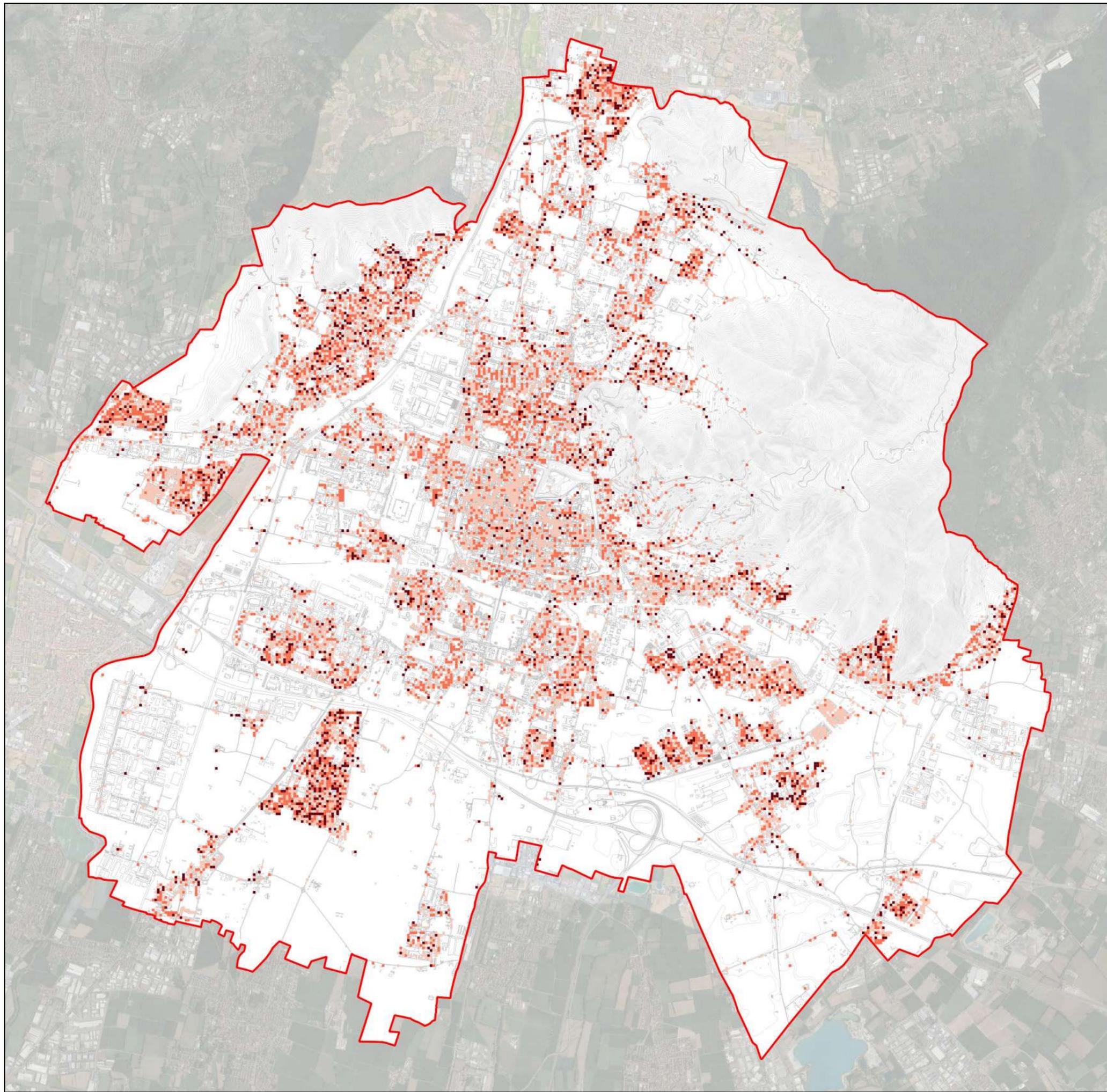
Supervisore:
Cl.ima Prof.ssa Michela TIBONI, Ph.D.
Co-supervisore:
Ing. Ilaria FUMAGALLI Ph.D.

Dottoranda:
Ing. Stefania BOGLIETTI

**TAVOLA
3c**

Pericolosità





Legenda

 Confine amministrativo
Comune di Brescia

Livelli di vulnerabilità

 Basso
 Medio
 Alto



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE,
DELLA COOPERAZIONE INTERNAZIONALE E DI MATEMATICA

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/20

XXXVI CICLO

**IL CONTRIBUTO DEGLI STRUMENTI DI GOVERNO DEL TERRITORIO
PER L'ADATTAMENTO DELLE CITTÀ AI CAMBIAMENTI CLIMATICI**

Supervisore:
Cl.ima Prof.ssa Michela TIBONI, Ph.D.
Co-supervisore:
Ing. Ilaria FUMAGALLI, Ph.D.

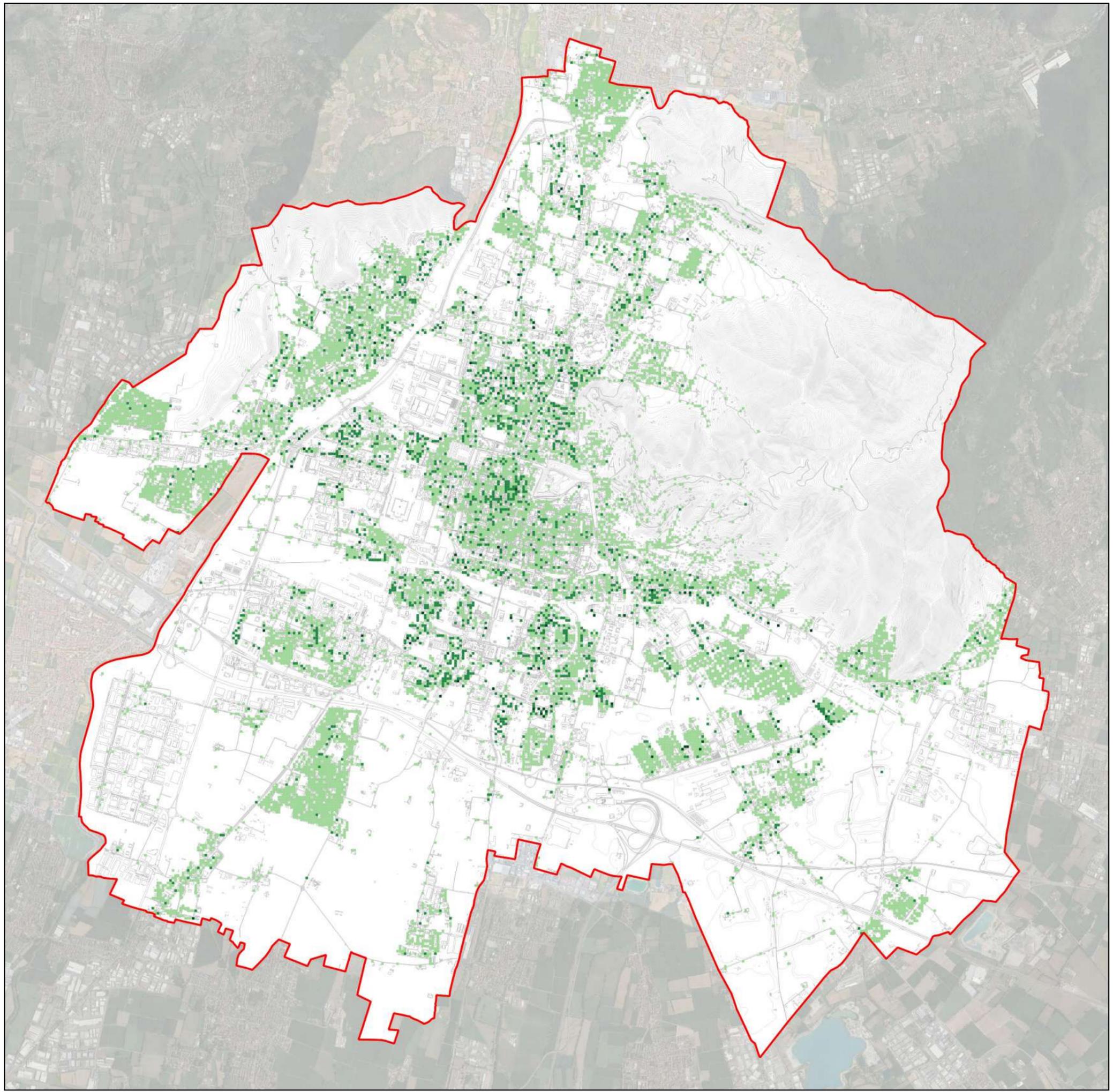
Dottoranda:
Ing. Stefania BOGLIETTI

TAVOLA
4

Vulnerabilità



0 1 2 km

Legenda

 Confine amministrativo
Comune di Brescia

Livelli di esposizione

 Basso
 Medio
 Alto



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE,
DELLA COOPERAZIONE INTERNAZIONALE E DI MATEMATICA

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/20

XXXVI CICLO

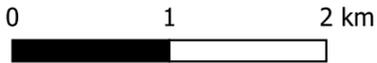
**IL CONTRIBUTO DEGLI STRUMENTI DI GOVERNO DEL TERRITORIO
PER L'ADATTAMENTO DELLE CITTÀ AI CAMBIAMENTI CLIMATICI**

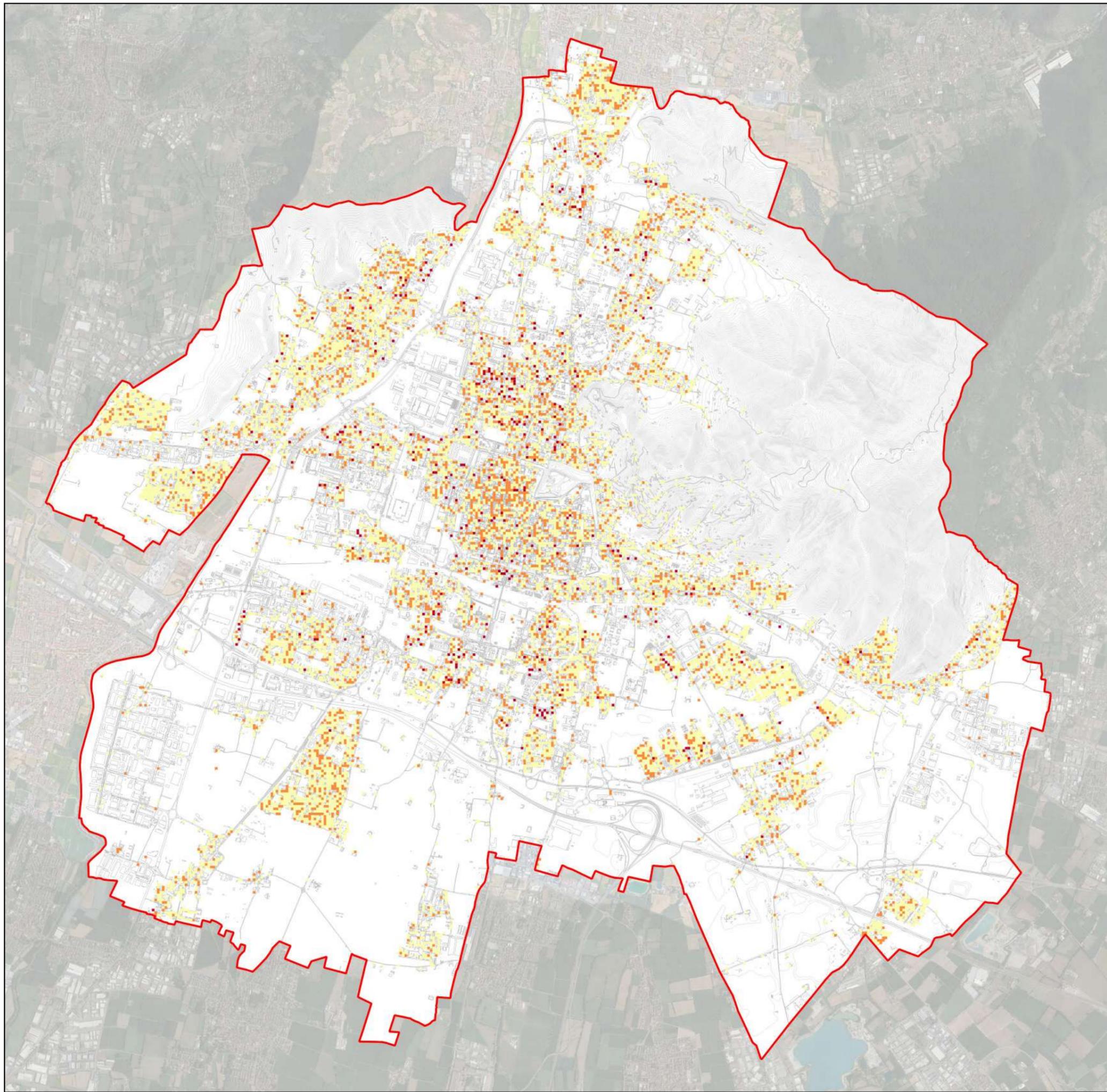
Supervisore:
Cl.ima Prof.ssa Michela TIBONI, Ph.D.
Co-supervisore:
Ing. Ilaria FUMAGALLI Ph.D.

Dottoranda:
Ing. Stefania BOGLIETTI

TAVOLA
5

Esposizione





Legenda

 Confine amministrativo
Comune di Brescia

Livelli di rischio

 Basso
 Medio
 Alto



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE,
DELLA COOPERAZIONE INTERNAZIONALE E DI MATEMATICA

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/20

XXXVI CICLO

**IL CONTRIBUTO DEGLI STRUMENTI DI GOVERNO DEL TERRITORIO
PER L'ADATTAMENTO DELLE CITTÀ AI CAMBIAMENTI CLIMATICI**

Supervisore:
Cl.ima Prof.ssa Michela TIBONI, Ph.D.
Co-supervisore:
Ing. Ilaria FUMAGALLI, Ph.D.

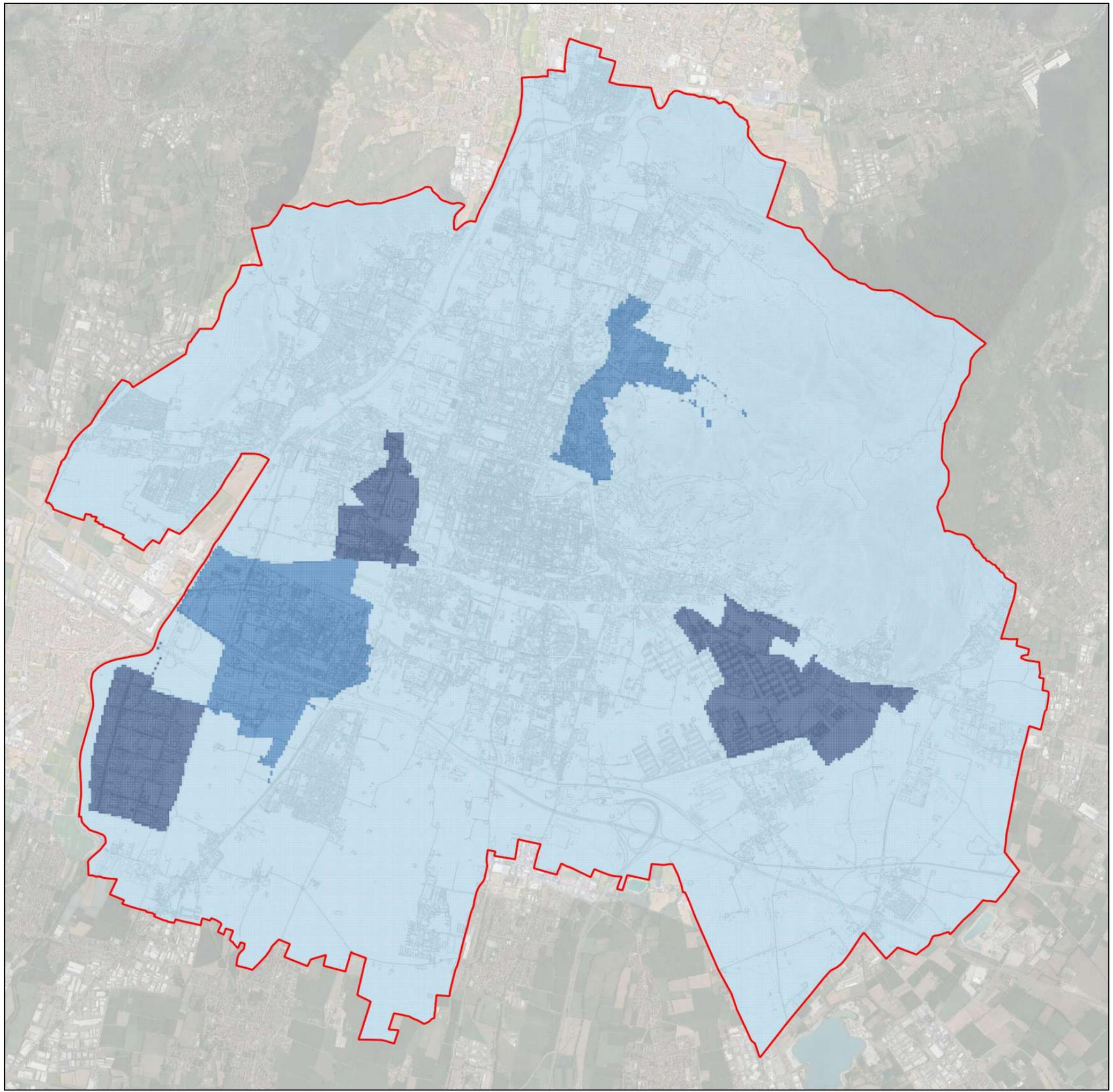
Dottoranda:
Ing. Stefania BOGLIETTI

**TAVOLA
6**

Rischio da ondate di calore per la salute dei
residenti



0 1 2 km

Legenda

 Confine amministrativo
Comune di Brescia

Livelli di criticità

 Basso
 Medio
 Alto



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE,
DELLA COOPERAZIONE INTERNAZIONALE E DI MATEMATICA

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/20

XXXVI CICLO

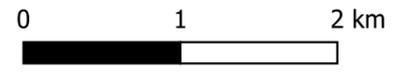
**IL CONTRIBUTO DEGLI STRUMENTI DI GOVERNO DEL TERRITORIO
PER L'ADATTAMENTO DELLE CITTÀ AI CAMBIAMENTI CLIMATICI**

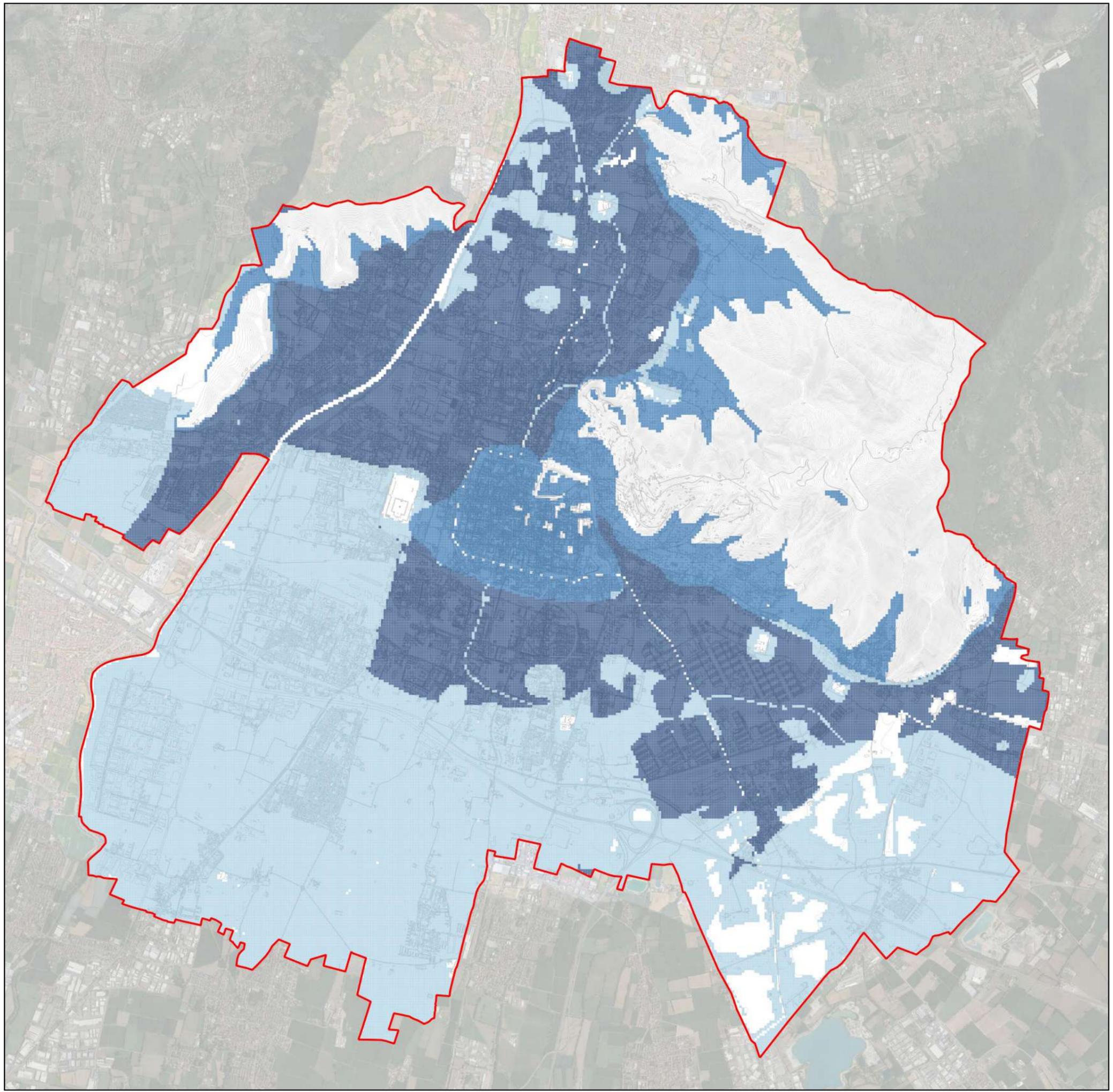
Supervisore:
Cl. ma Prof.ssa Michela TIBONI, Ph.D.
Co-supervisore:
Ing. Ilaria FUMAGALLI Ph.D.

Dottoranda:
Ing. Stefania BOGLIETTI

**TAVOLA
7a**

Criticità connesse al sistema di drenaggio urbano





Legenda

 Confine amministrativo
Comune di Brescia

Livelli di idoneità

 Basso
 Medio
 Alto



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE,
DELLA COOPERAZIONE INTERNAZIONALE E DI MATEMATICA

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/20

XXXVI CICLO

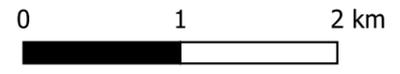
**IL CONTRIBUTO DEGLI STRUMENTI DI GOVERNO DEL TERRITORIO
PER L'ADATTAMENTO DELLE CITTÀ AI CAMBIAMENTI CLIMATICI**

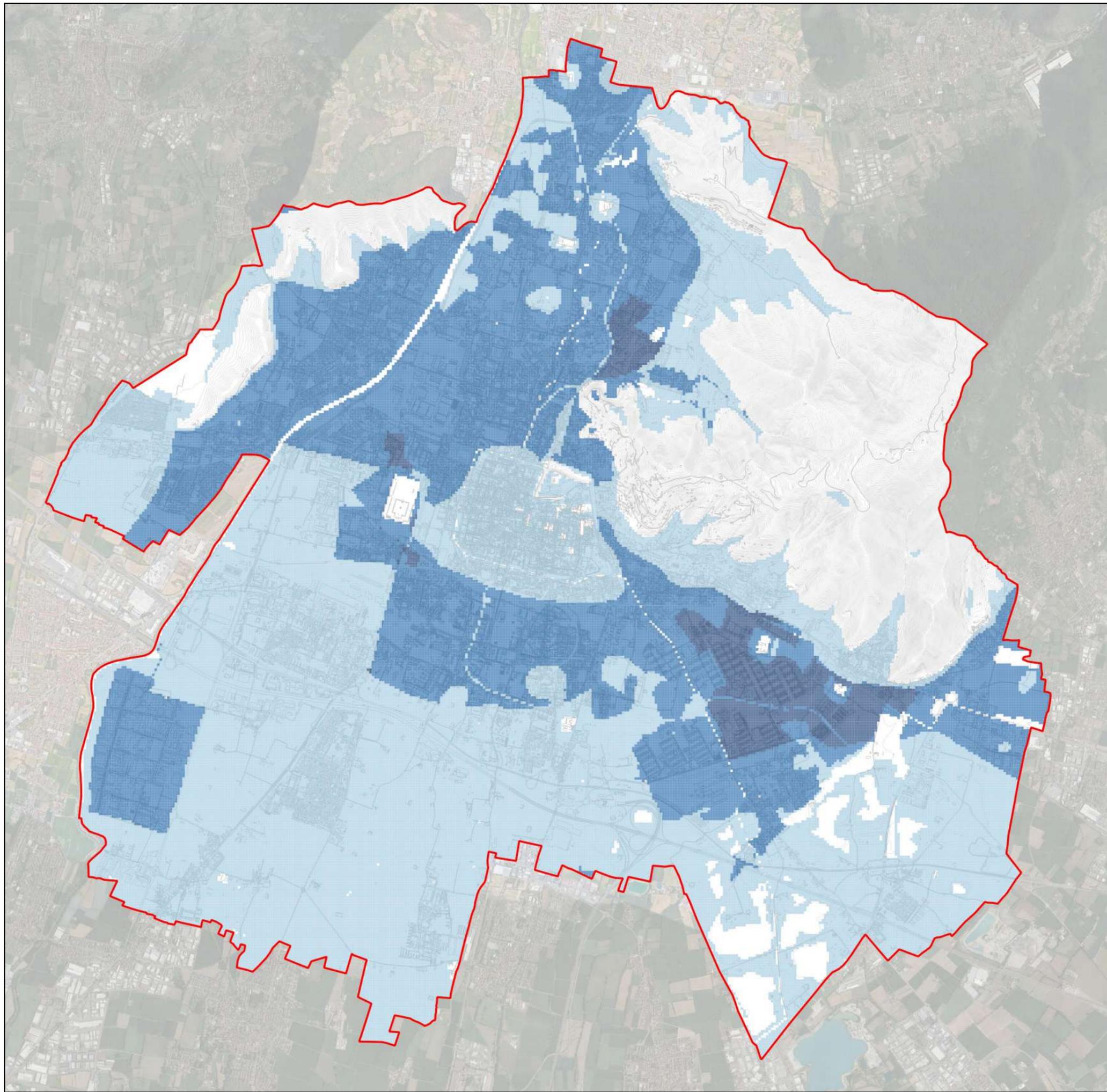
Supervisore:
Cl.ima Prof.ssa Michela TIBONI, Ph.D.
Co-supervisore:
Ing. Ilaria FUMAGALLI Ph.D.

Dottoranda:
Ing. Stefania BOGLIETTI

**TAVOLA
7b**

Idoneità all'infiltrazione di acqua nel suolo





Legenda

 Confine amministrativo
Comune di Brescia

Livelli di idoneità

 Basso
 Medio
 Alto



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE,
DELLA COOPERAZIONE INTERNAZIONALE E DI MATEMATICA

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/20

XXXVI CICLO

**IL CONTRIBUTO DEGLI STRUMENTI DI GOVERNO DEL TERRITORIO
PER L'ADATTAMENTO DELLE CITTÀ AI CAMBIAMENTI CLIMATICI**

Supervisore:
Cl. ma Prof.ssa Michela TIBONI, Ph.D.
Co-supervisore:
Ing. Ilaria FUMAGALLI, Ph.D.

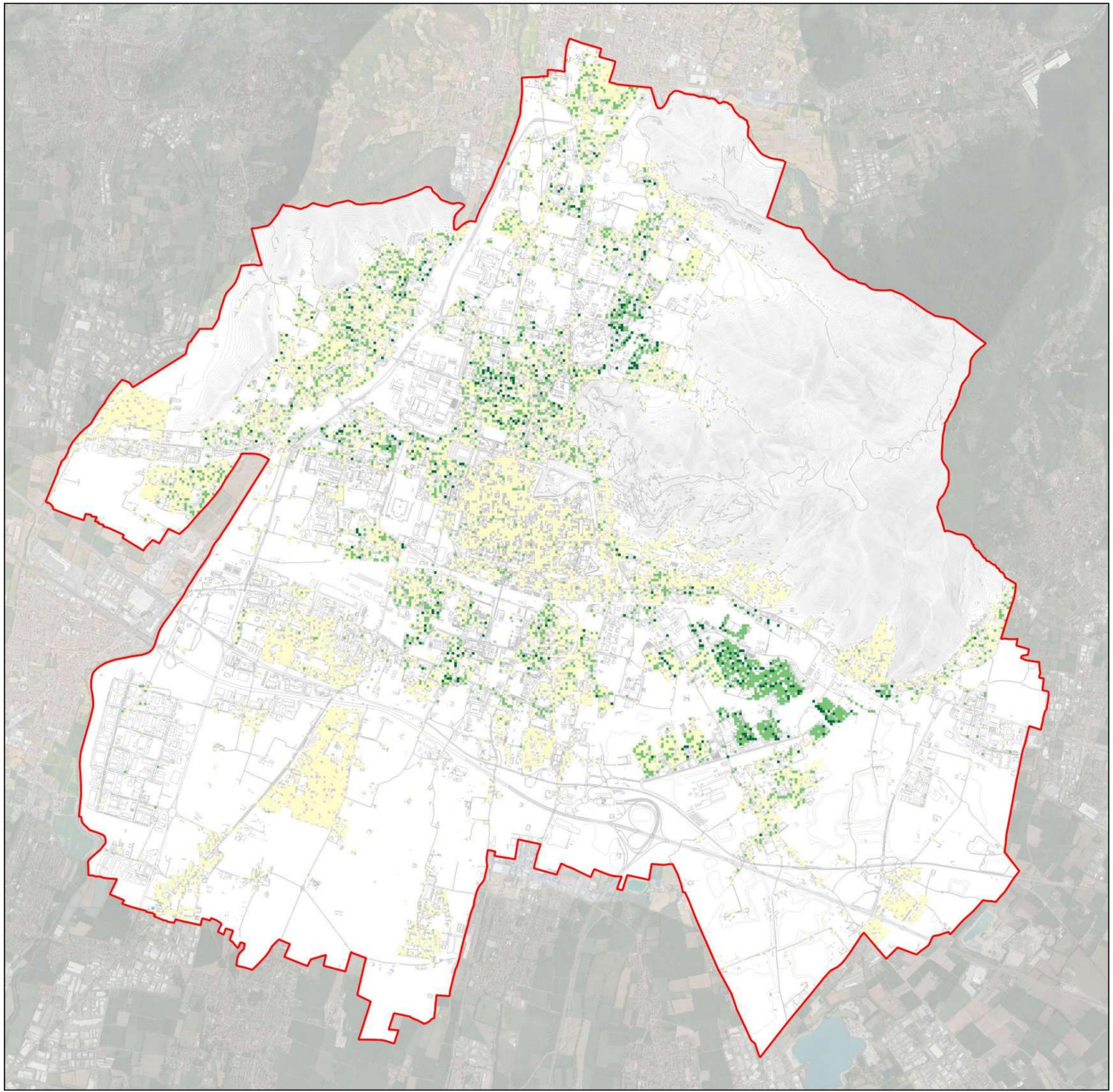
Dottoranda:
Ing. Stefania BOGLIETTI

**TAVOLA
7c**

Idoneità idraulica



0 1 2 km

Legenda

 Confine amministrativo
Comune di Brescia

Livelli di priorità

 Basso
 Medio
 Alto



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE,
DELLA COOPERAZIONE INTERNAZIONALE E DI MATEMATICA

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/20

XXXVI CICLO

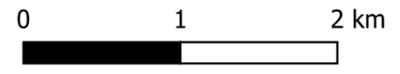
**IL CONTRIBUTO DEGLI STRUMENTI DI GOVERNO DEL TERRITORIO
PER L'ADATTAMENTO DELLE CITTÀ AI CAMBIAMENTI CLIMATICI**

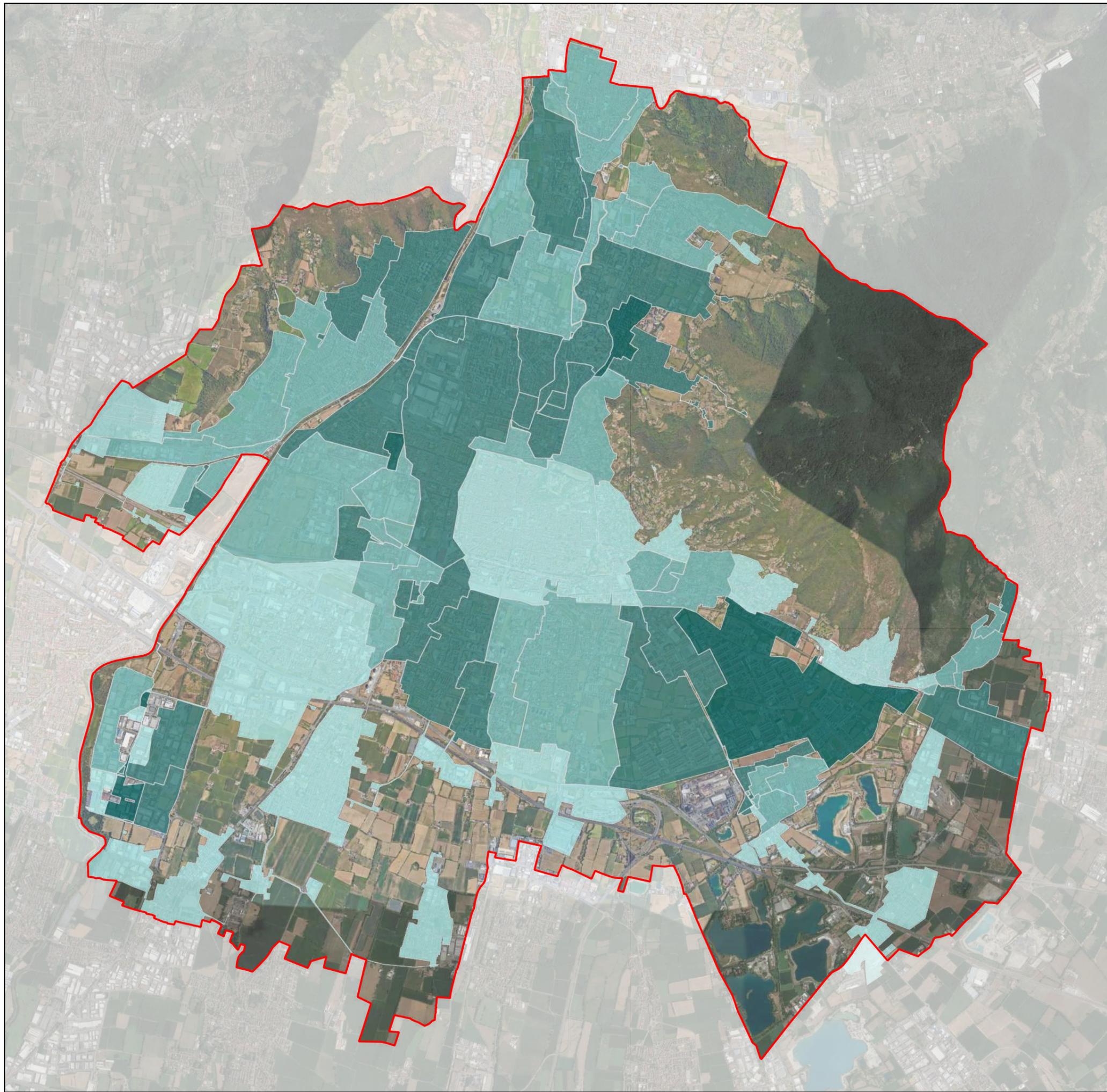
Supervisore:
Cl.ima Prof.ssa Michela TIBONI, Ph.D.
Co-supervisore:
Ing. Ilaria FUMAGALLI, Ph.D.

Dottoranda:
Ing. Stefania BOGLIETTI

**TAVOLA
8a**

Livelli di priorità
per interventi di depavimentazione
Celle 30x30m





Legenda

 Confine amministrativo
Comune di Brescia

Livelli di priorità

 Basso
 Medio
 Alto
 Molto Alto



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE,
DELLA COOPERAZIONE INTERNAZIONALE E DI MATEMATICA

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/20

XXXVI CICLO

**IL CONTRIBUTO DEGLI STRUMENTI DI GOVERNO DEL TERRITORIO
PER L'ADATTAMENTO DELLE CITTÀ AI CAMBIAMENTI CLIMATICI**

Supervisore:
Cl. ma Prof.ssa Michela TIBONI, Ph.D.
Co-supervisore:
Ing. Ilaria FUMAGALLI, Ph.D.

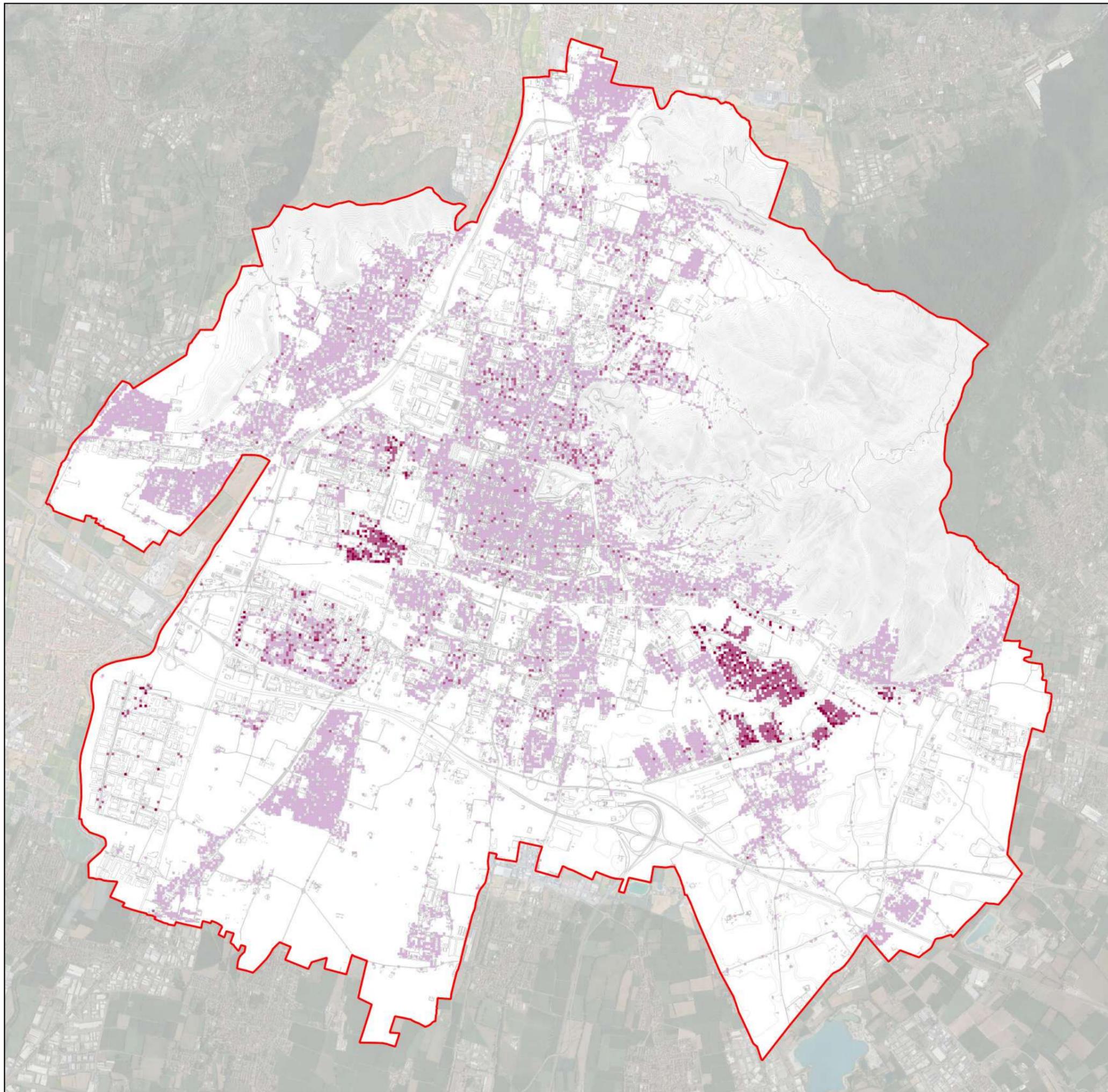
Dottoranda:
Ing. Stefania BOGLIETTI

**TAVOLA
8b**

Livelli di priorità per interventi
di depavimentazione
Sottobacini



0 1 2 km

Legenda

 Confine amministrativo
Comune di Brescia

Livelli di criticità

 Basso
 Medio
 Alto



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE,
DELLA COOPERAZIONE INTERNAZIONALE E DI MATEMATICA

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/20

XXXVI CICLO

**IL CONTRIBUTO DEGLI STRUMENTI DI GOVERNO DEL TERRITORIO
PER L'ADATTAMENTO DELLE CITTÀ AI CAMBIAMENTI CLIMATICI**

Supervisore:
Cl.ima Prof.ssa Michela TIBONI, Ph.D.
Co-supervisore:
Ing. Ilaria FUMAGALLI, Ph.D.

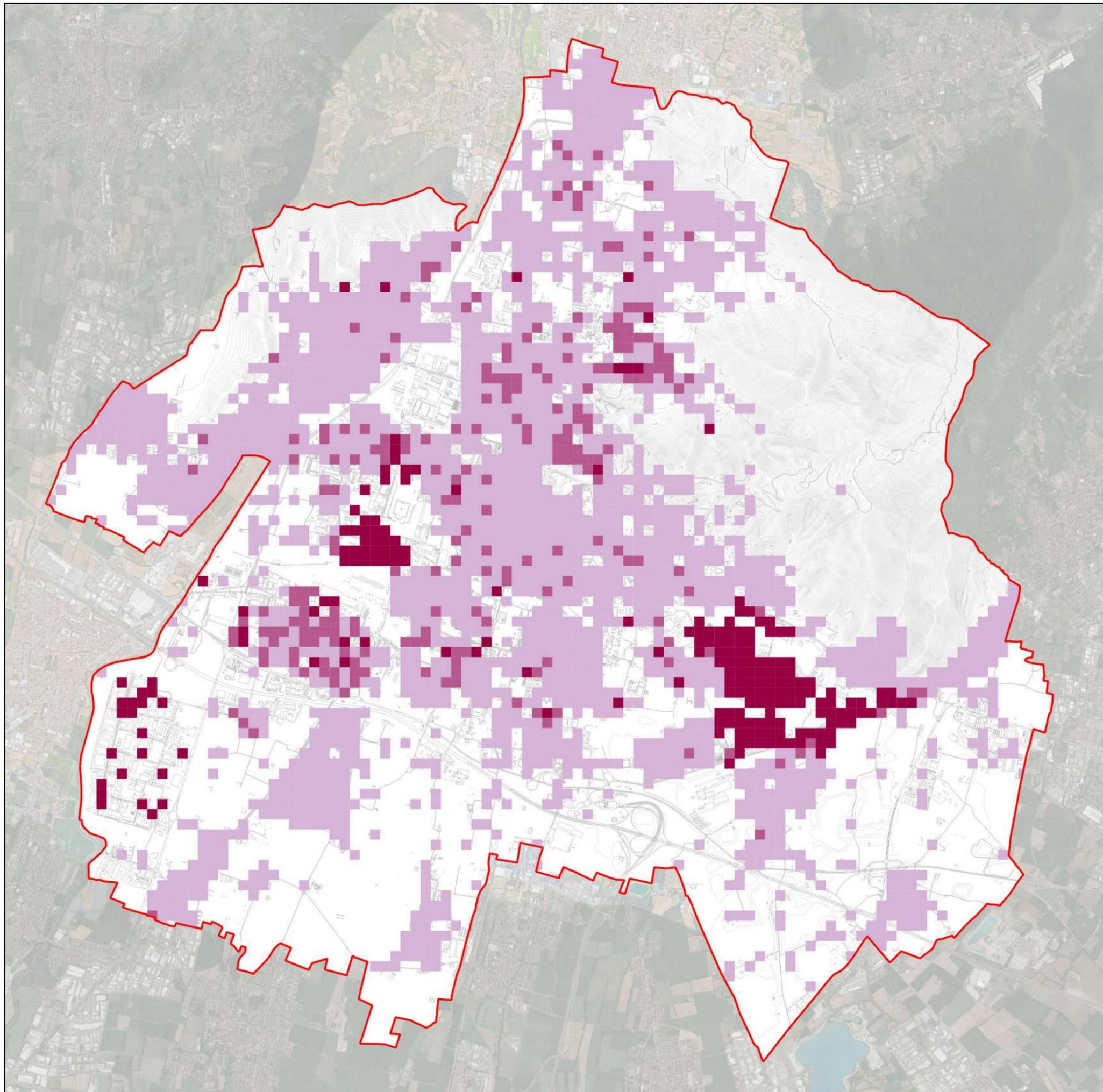
Dottoranda:
Ing. Stefania BOGLIETTI

**TAVOLA
9a**

Criticità delle questioni
climatiche analizzate
Celle 30x30m



0 1 2 km

Legenda

 Confine amministrativo
Comune di Brescia

Livelli di criticità

 Basso
 Medio
 Alto



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE,
DELLA COOPERAZIONE INTERNAZIONALE E DI MATEMATICA

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/20

XXXVI CICLO

**IL CONTRIBUTO DEGLI STRUMENTI DI GOVERNO DEL TERRITORIO
PER L'ADATTAMENTO DELLE CITTÀ AI CAMBIAMENTI CLIMATICI**

Supervisore:
Cl.ima Prof.ssa Michela TIBONI, Ph.D.
Co-supervisore:
Ing. Ilaria FUMAGALLI, Ph.D.

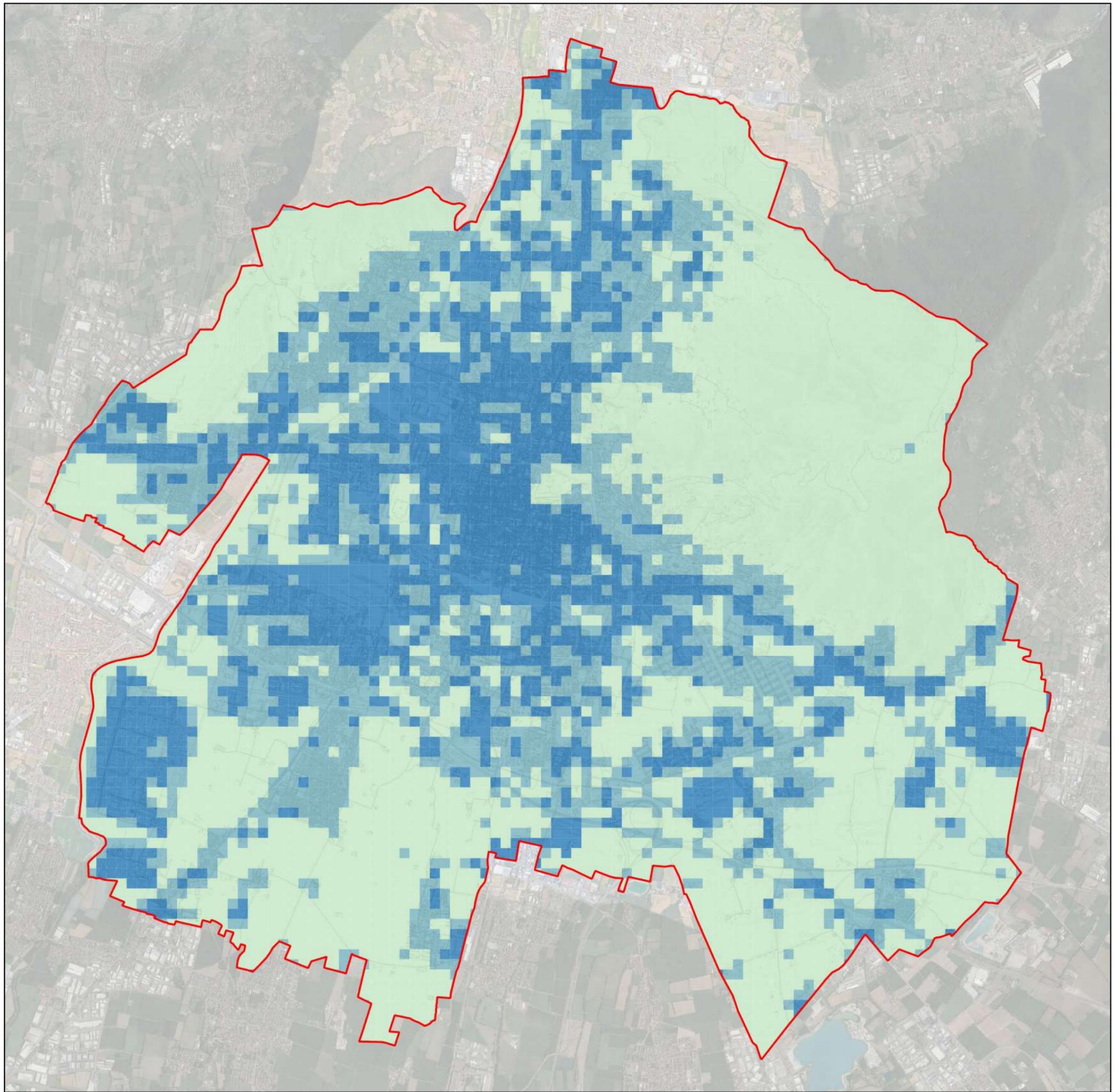
Dottoranda:
Ing. Stefania BOGLIETTI

**TAVOLA
9b**

Criticità delle questioni
climatiche analizzate
Celle 120x120m



0 1 2 km

Legenda

 Confine amministrativo
Comune di Brescia

Livelli di mancanza di aree verdi

 Basso
 Medio
 Alto



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE,
DELLA COOPERAZIONE INTERNAZIONALE E DI MATEMATICA

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/20

XXXVI CICLO

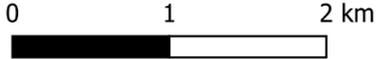
**IL CONTRIBUTO DEGLI STRUMENTI DI GOVERNO DEL TERRITORIO
PER L'ADATTAMENTO DELLE CITTÀ AI CAMBIAMENTI CLIMATICI**

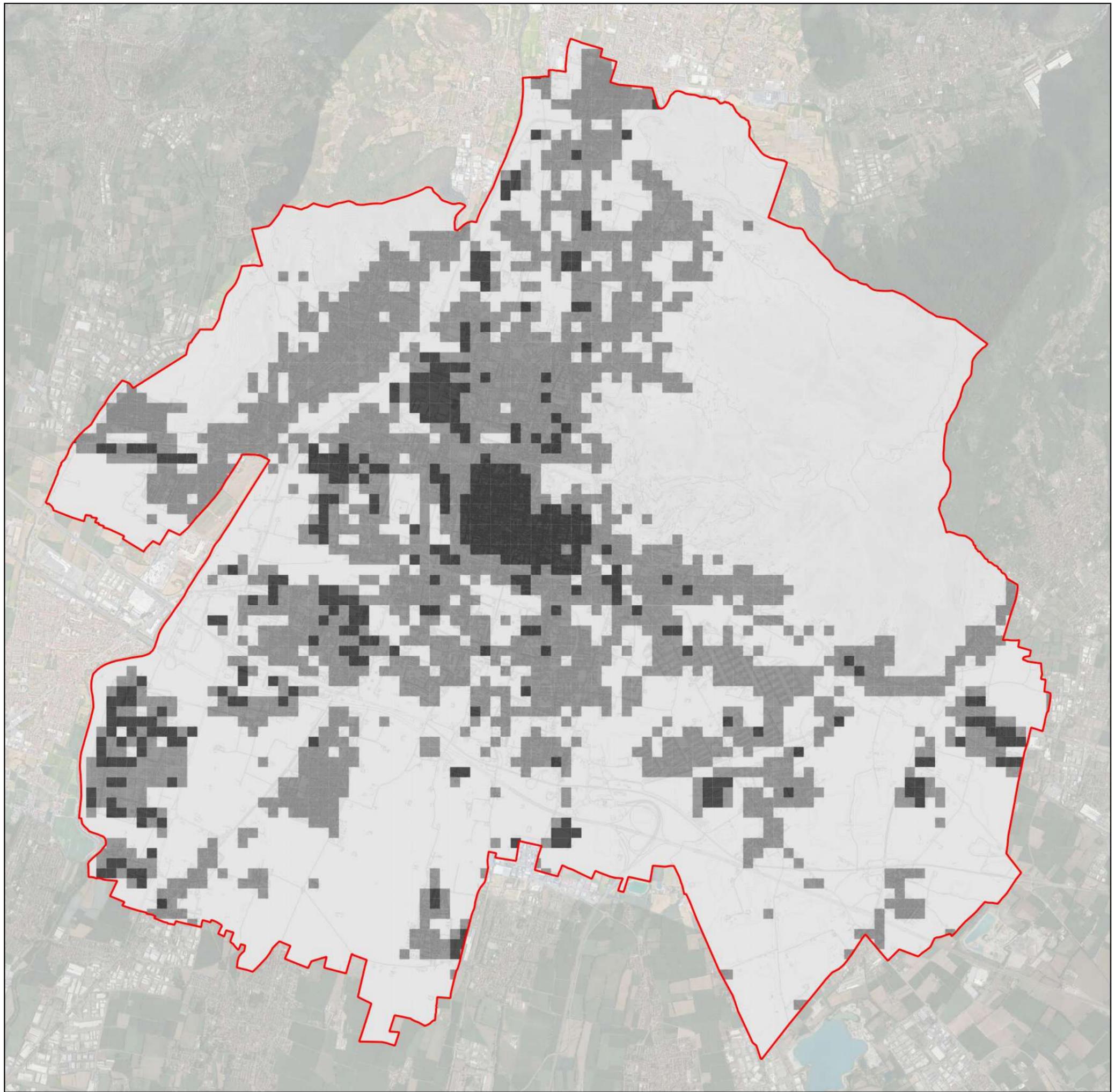
Supervisore:
Cl. ma Prof.ssa Michela TIBONI, Ph.D.
Co-supervisore:
Ing. Ilaria FUMAGALLI, Ph.D.

Dottoranda:
Ing. Stefania BOGLIETTI

**TAVOLA
9c**

Mancanza di aree verdi
Celle 120x120m





Legenda

 Confine amministrativo
Comune di Brescia

Livelli di densità dell'edificato

 Basso
 Medio
 Alto



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE,
DELLA COOPERAZIONE INTERNAZIONALE E DI MATEMATICA

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/20

XXXVI CICLO

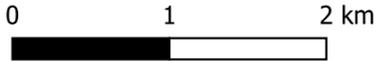
**IL CONTRIBUTO DEGLI STRUMENTI DI GOVERNO DEL TERRITORIO
PER L'ADATTAMENTO DELLE CITTÀ AI CAMBIAMENTI CLIMATICI**

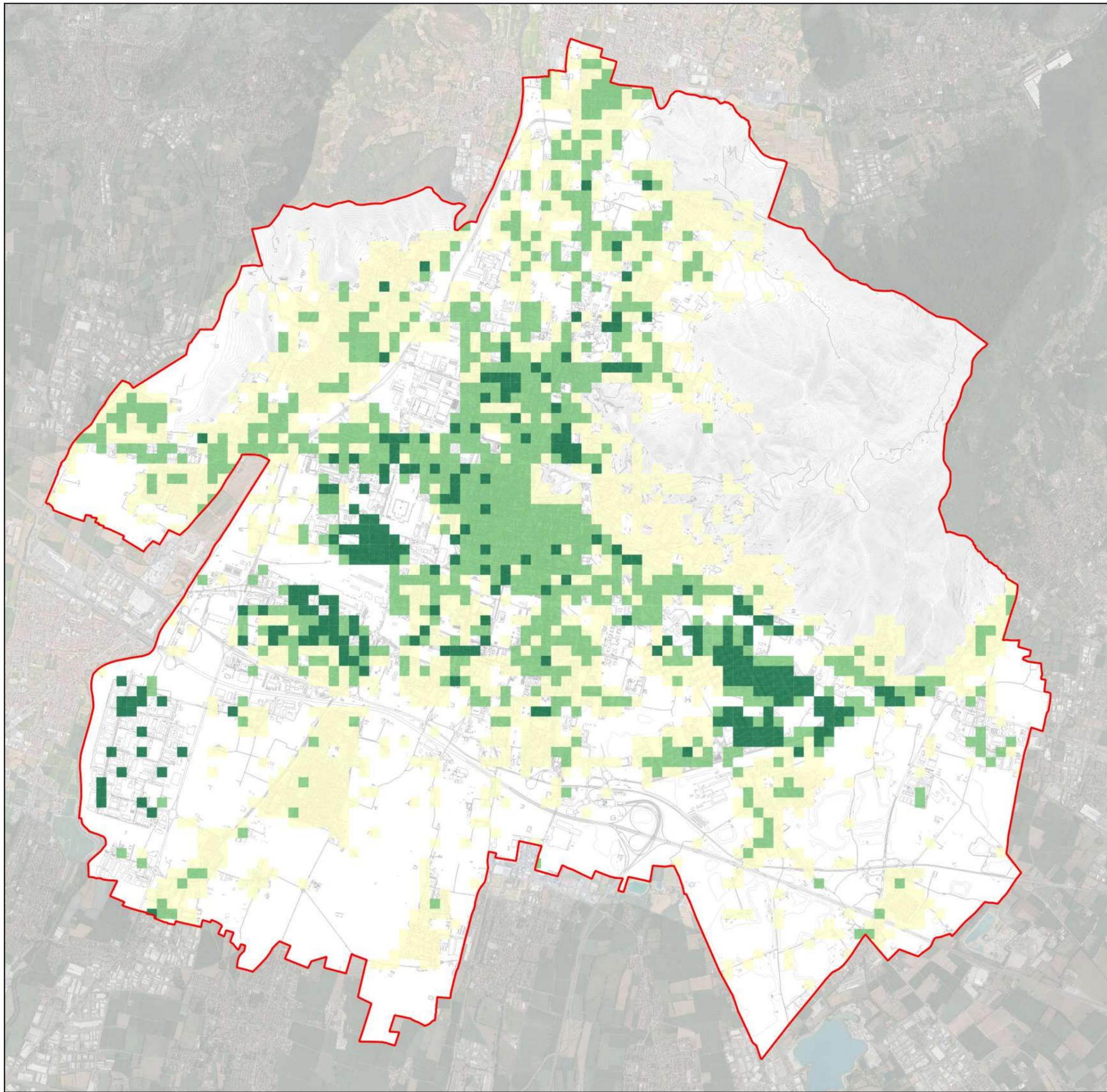
Supervisore:
Cl.ma Prof.ssa Michela TIBONI, Ph.D.
Co-supervisore:
Ing. Ilaria FUMAGALLI, Ph.D.

Dottoranda:
Ing. Stefania BOGLIETTI

**TAVOLA
9d**

Densità dell'edificato
Celle 120x120m





Legenda

 Confine amministrativo
Comune di Brescia

Livelli di idoneità

 Basso
 Medio
 Alto



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE,
DELLA COOPERAZIONE INTERNAZIONALE E DI MATEMATICA

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/20

XXXVI CICLO

**IL CONTRIBUTO DEGLI STRUMENTI DI GOVERNO DEL TERRITORIO
PER L'ADATTAMENTO DELLE CITTÀ AI CAMBIAMENTI CLIMATICI**

Supervisore:
Cl.ima Prof.ssa Michela TIBONI, Ph.D.
Co-supervisore:
Ing. Ilaria FUMAGALLI Ph.D.

Dottoranda:
Ing. Stefania BOGLIETTI

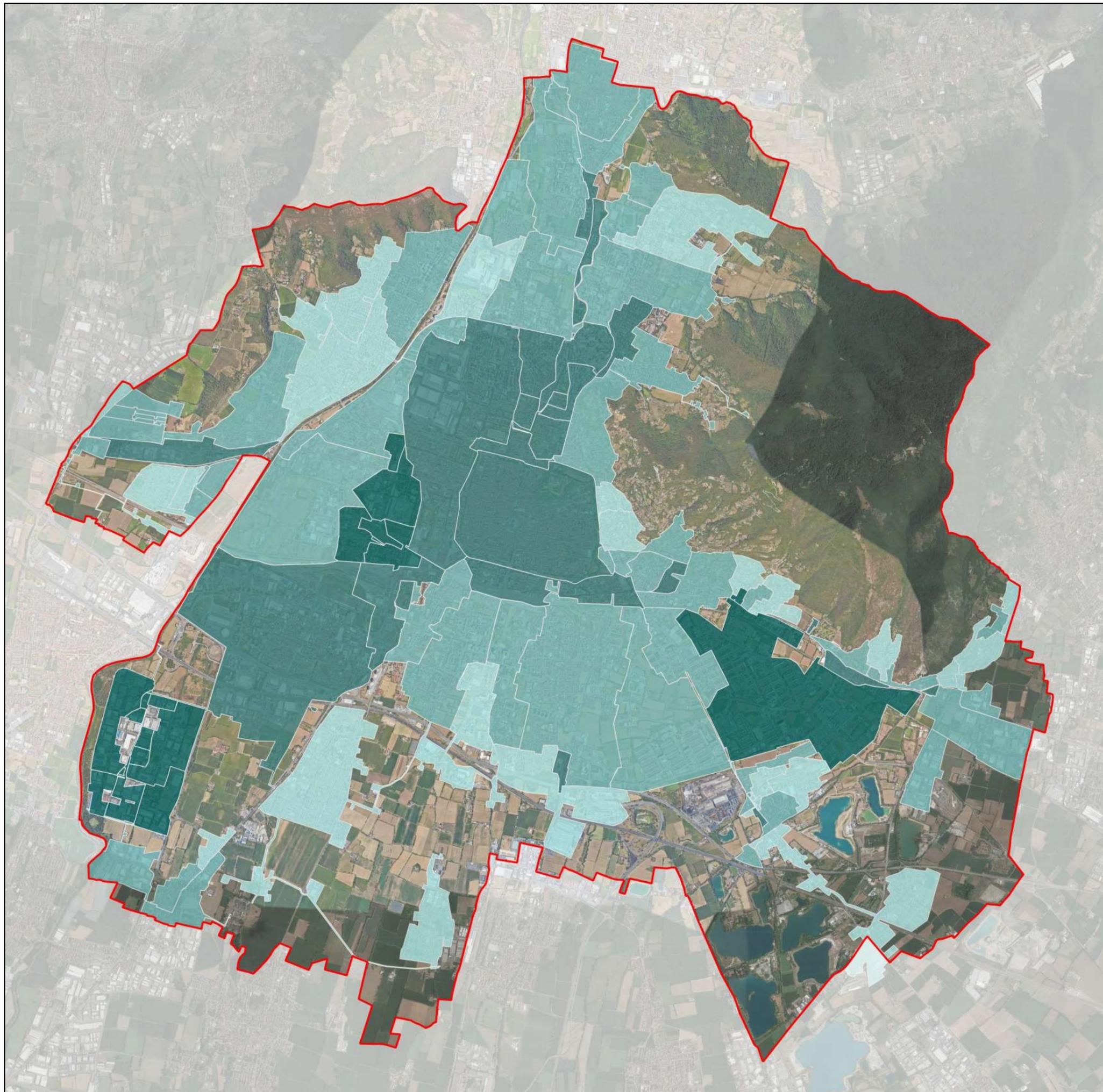
**TAVOLA
10a**

Livelli di idoneità
alla diffusione di tetti verdi
Celle 120x120m



0 1 2 km





Legenda

 Confine amministrativo
Comune di Brescia

Livelli di idoneità

 Basso
 Medio
 Alto
 Molto alto



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE,
DELLA COOPERAZIONE INTERNAZIONALE E DI MATEMATICA

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/20

XXXVI CICLO

**IL CONTRIBUTO DEGLI STRUMENTI DI GOVERNO DEL TERRITORIO
PER L'ADATTAMENTO DELLE CITTÀ AI CAMBIAMENTI CLIMATICI**

Supervisore:
Cl. ma Prof.ssa Michela TIBONI, Ph.D.
Co-supervisore:
Ing. Ilaria FUMAGALLI, Ph.D.

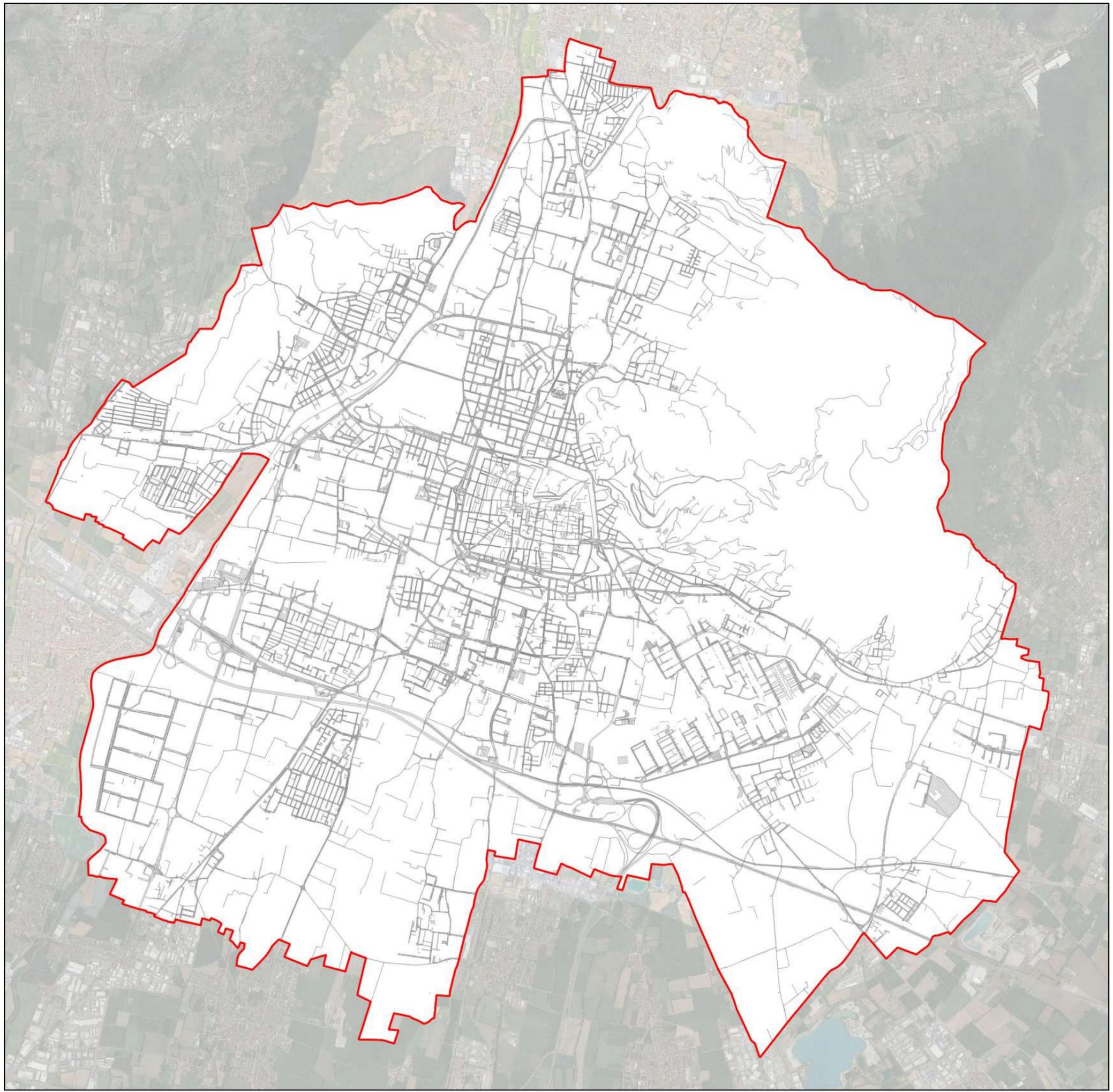
Dottoranda:
Ing. Stefania BOGLIETTI

**TAVOLA
10b**

Livelli di idoneità
alla diffusione di tetti verdi
Sottobacini



0 1 2 km

Legenda

-  Confine amministrativo Comune di Brescia
-  Superfici pavimentate di proprietà del Comune di Brescia



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE,
DELLA COOPERAZIONE INTERNAZIONALE E DI MATEMATICA

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/20

XXXVI CICLO

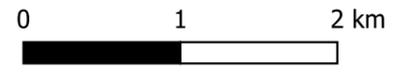
**IL CONTRIBUTO DEGLI STRUMENTI DI GOVERNO DEL TERRITORIO
PER L'ADATTAMENTO DELLE CITTÀ AI CAMBIAMENTI CLIMATICI**

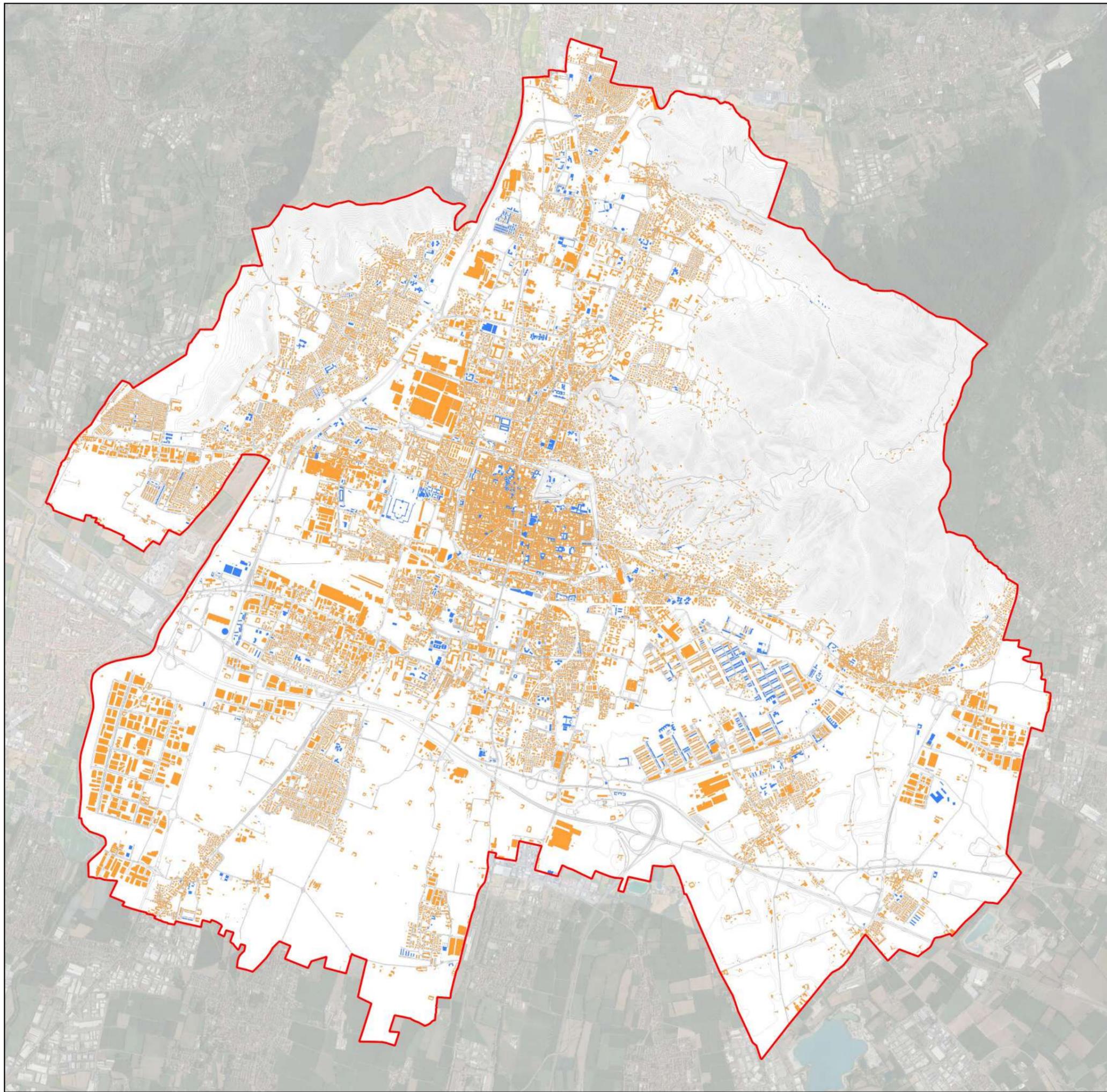
Supervisore:
Chim. Prof.ssa Michela TIBONI, Ph.D.
Co-supervisore:
Ing. Ilaria FUMAGALLI, Ph.D.

Dottoranda:
Ing. Stefania BOGLIETTI

TAVOLA
11

Mappa di base
delle superfici pavimentate
di proprietà del Comune





Legenda

 Confine amministrativo
Comune di Brescia

Edifici

 Proprietà Comunale

 Altra proprietà



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE,
DELLA COOPERAZIONE INTERNAZIONALE E DI MATEMATICA

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/20

XXXVI CICLO

**IL CONTRIBUTO DEGLI STRUMENTI DI GOVERNO DEL TERRITORIO
PER L'ADATTAMENTO DELLE CITTÀ AI CAMBIAMENTI CLIMATICI**

Supervisore:
Cl. ma Prof.ssa Michela TIBONI, Ph.D.
Co-supervisore:
Ing. Ilaria FUMAGALLI Ph.D.

Dottoranda:
Ing. Stefania BOGLIETTI

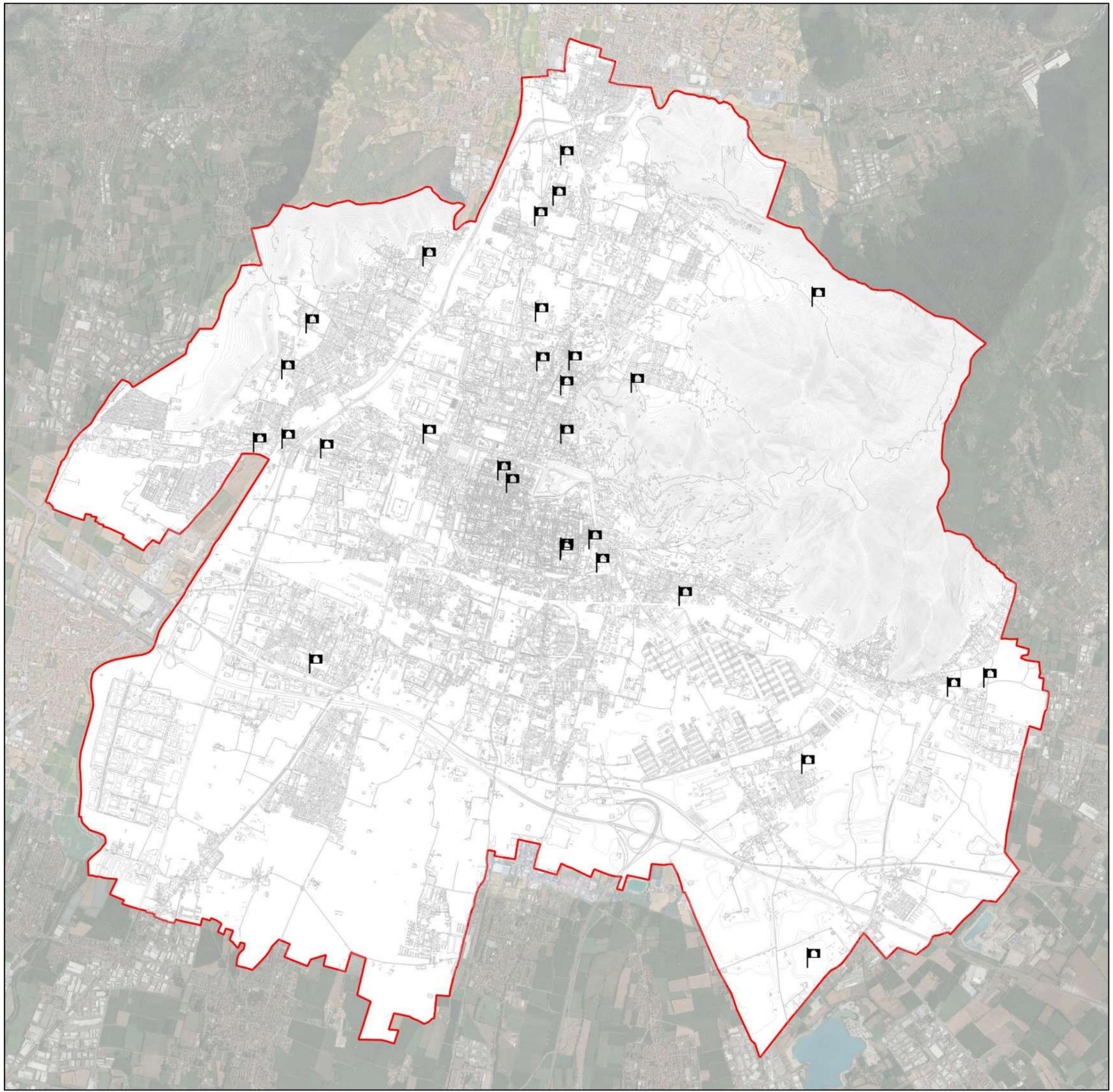
**TAVOLA
12**

Mappa di base degli edifici
suddivisi per proprietà



0 1 2 km





Legenda

-  Confine amministrativo
Comune di Brescia
-  Proposte
Progetto SpaziAttivi



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE,
DELLA COOPERAZIONE INTERNAZIONALE E DI MATEMATICA

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/20

XXXVI CICLO

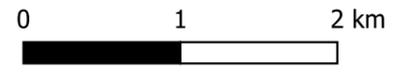
**IL CONTRIBUTO DEGLI STRUMENTI DI GOVERNO DEL TERRITORIO
PER L'ADATTAMENTO DELLE CITTÀ AI CAMBIAMENTI CLIMATICI**

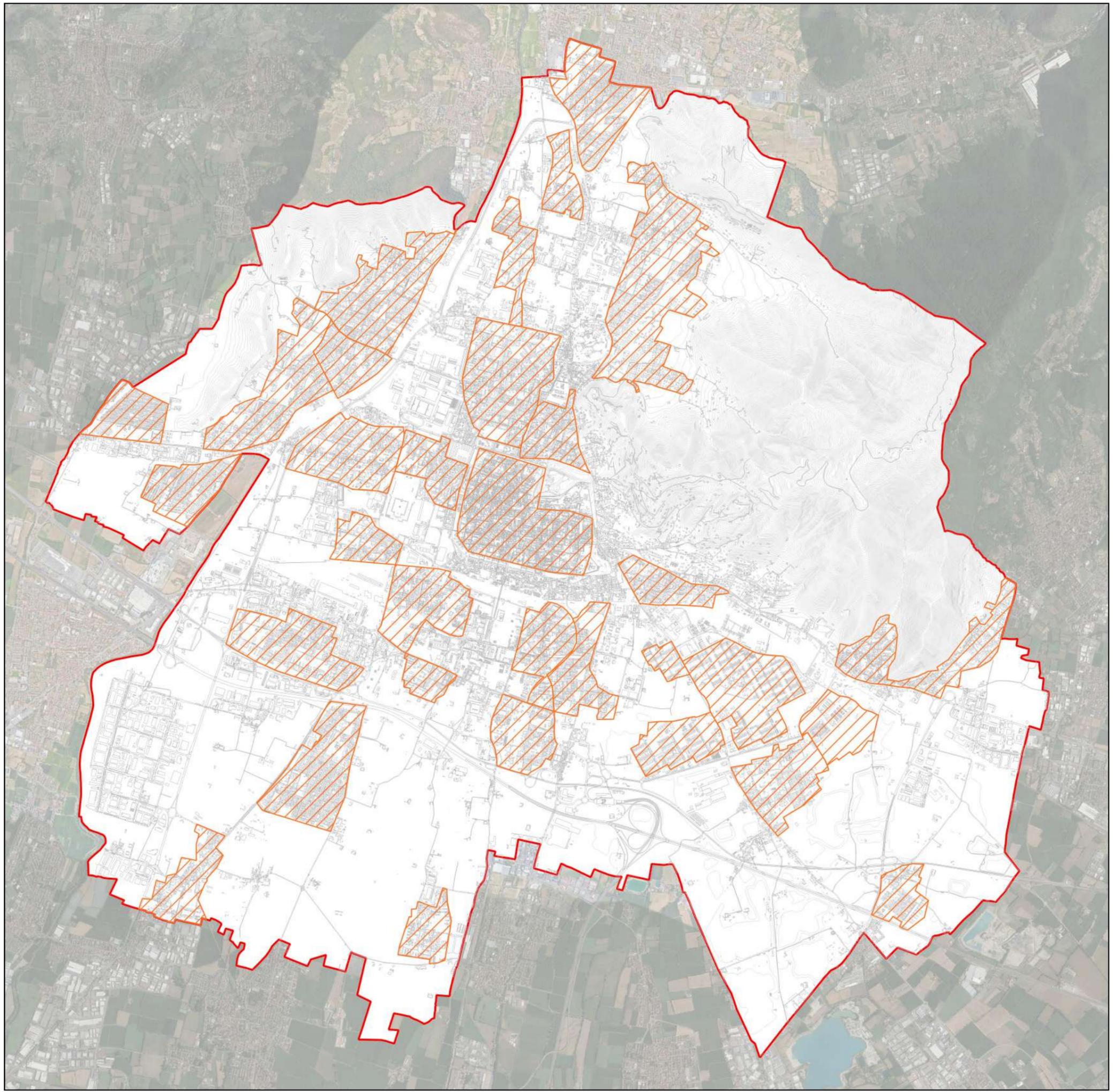
Supervisore:
Cl.ima Prof.ssa Michela TIBONI, Ph.D.
Co-supervisore:
Ing. Ilaria FUMAGALLI Ph.D.

Dottoranda:
Ing. Stefania BOGLIETTI

**TAVOLA
13a**

Proposte dei cittadini
Progetto SpaziAttivi





Legenda

-  Confine amministrativo
Comune di Brescia
-  Isole Ambientali



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA**

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE,
DELLA COOPERAZIONE INTERNAZIONALE E DI MATEMATICA

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/20

XXXVI CICLO

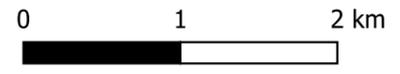
**IL CONTRIBUTO DEGLI STRUMENTI DI GOVERNO DEL TERRITORIO
PER L'ADATTAMENTO DELLE CITTÀ AI CAMBIAMENTI CLIMATICI**

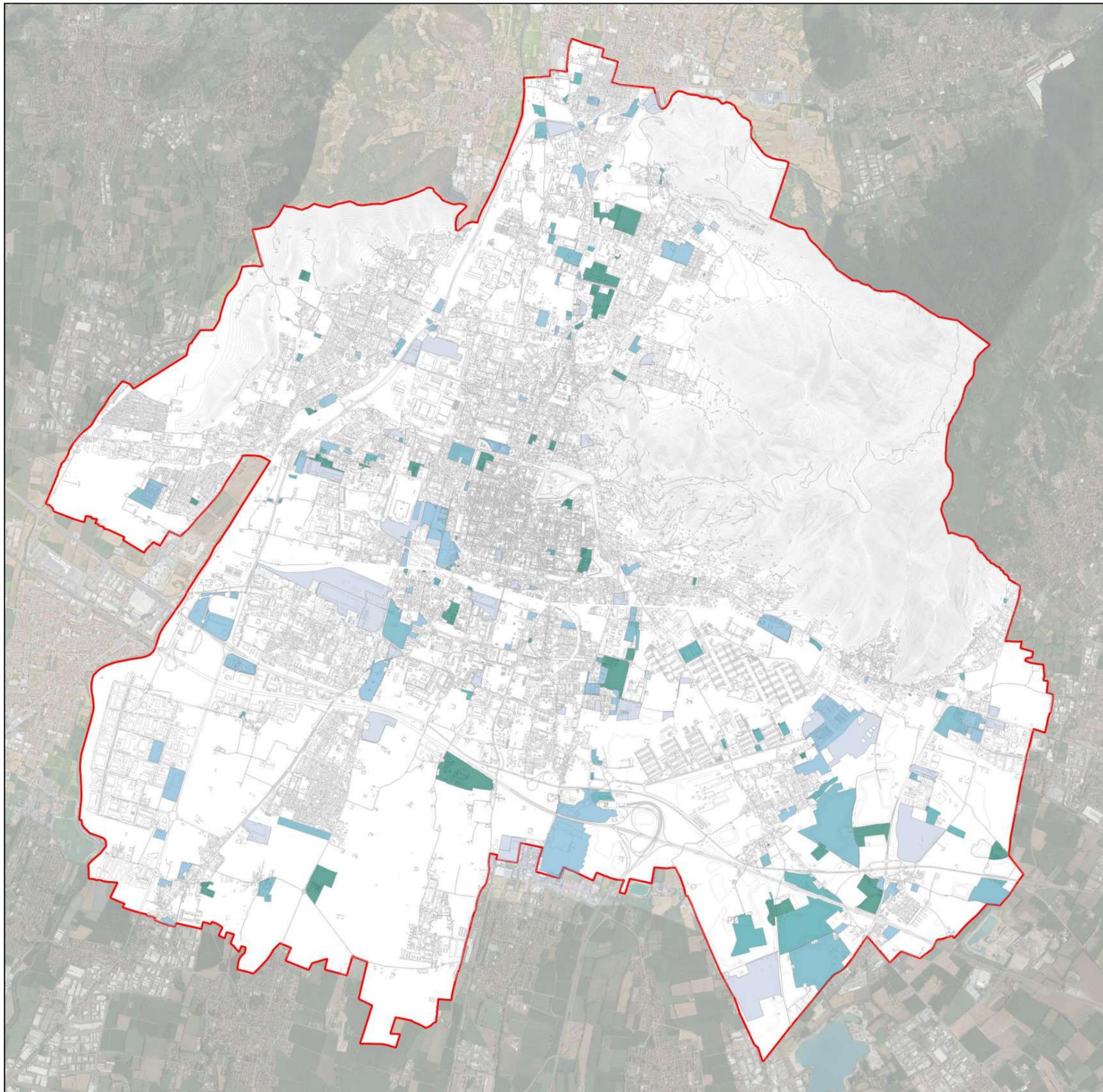
Supervisore:
Cl.ima Prof.ssa Michela TIBONI, Ph.D.
Co-supervisore:
Ing. Ilaria FUMAGALLI Ph.D.

Dottoranda:
Ing. Stefania BOGLIETTI

**TAVOLA
13b**

Isole ambientali





Legenda

 Confine amministrativo
Comune di Brescia

Ambiti della città in trasformazione

 Ambiti di Trasformazione
Documento di Piano

 Pianificazione attuativa
exAT_PN

 Pianificazione attuativa
in corso

 Progetti speciali
Piano delle Regole

 Progetti speciali
Piano dei Servizi



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE,
DELLA COOPERAZIONE INTERNAZIONALE E DI MATEMATICA

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/20

XXXVI CICLO

**IL CONTRIBUTO DEGLI STRUMENTI DI GOVERNO DEL TERRITORIO
PER L'ADATTAMENTO DELLE CITTÀ AI CAMBIAMENTI CLIMATICI**

Supervisore:
Cl. ma Prof.ssa Michela TIBONI, Ph.D.

Dottoranda:
Ing. Stefania BOGLIETTI

Co-supervisore:
Ing. Ilaria FUMAGALLI, Ph.D.

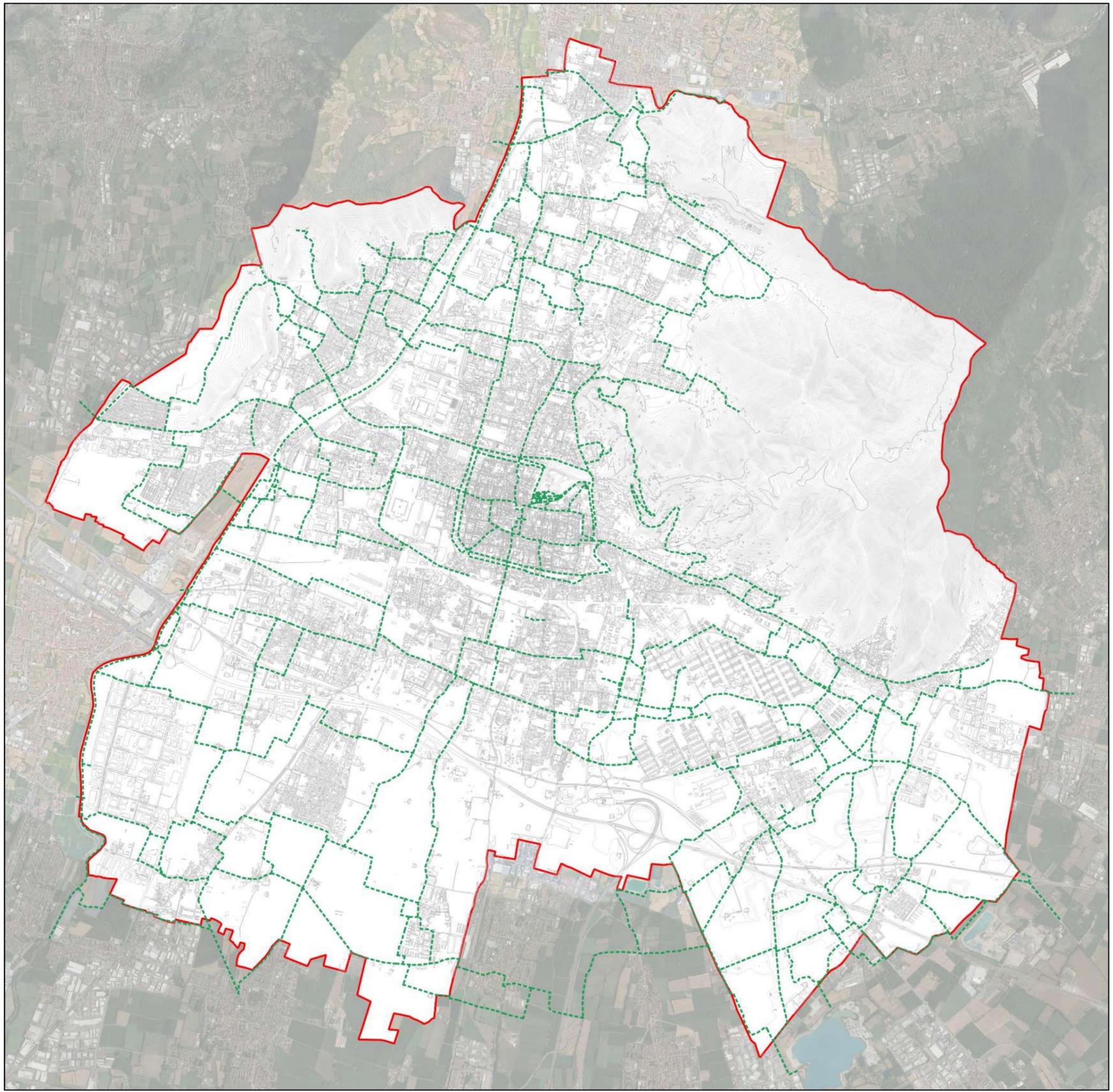
TAVOLA
13c

Ambiti della città in trasformazione



0 1 2 km





Legenda

- Confine amministrativo Comune di Brescia
- Itinerari di fruizione paesaggistica



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA**

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE,
DELLA COOPERAZIONE INTERNAZIONALE E DI MATEMATICA

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/20

XXXVI CICLO

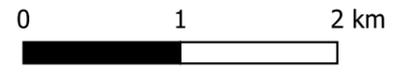
**IL CONTRIBUTO DEGLI STRUMENTI DI GOVERNO DEL TERRITORIO
PER L'ADATTAMENTO DELLE CITTÀ AI CAMBIAMENTI CLIMATICI**

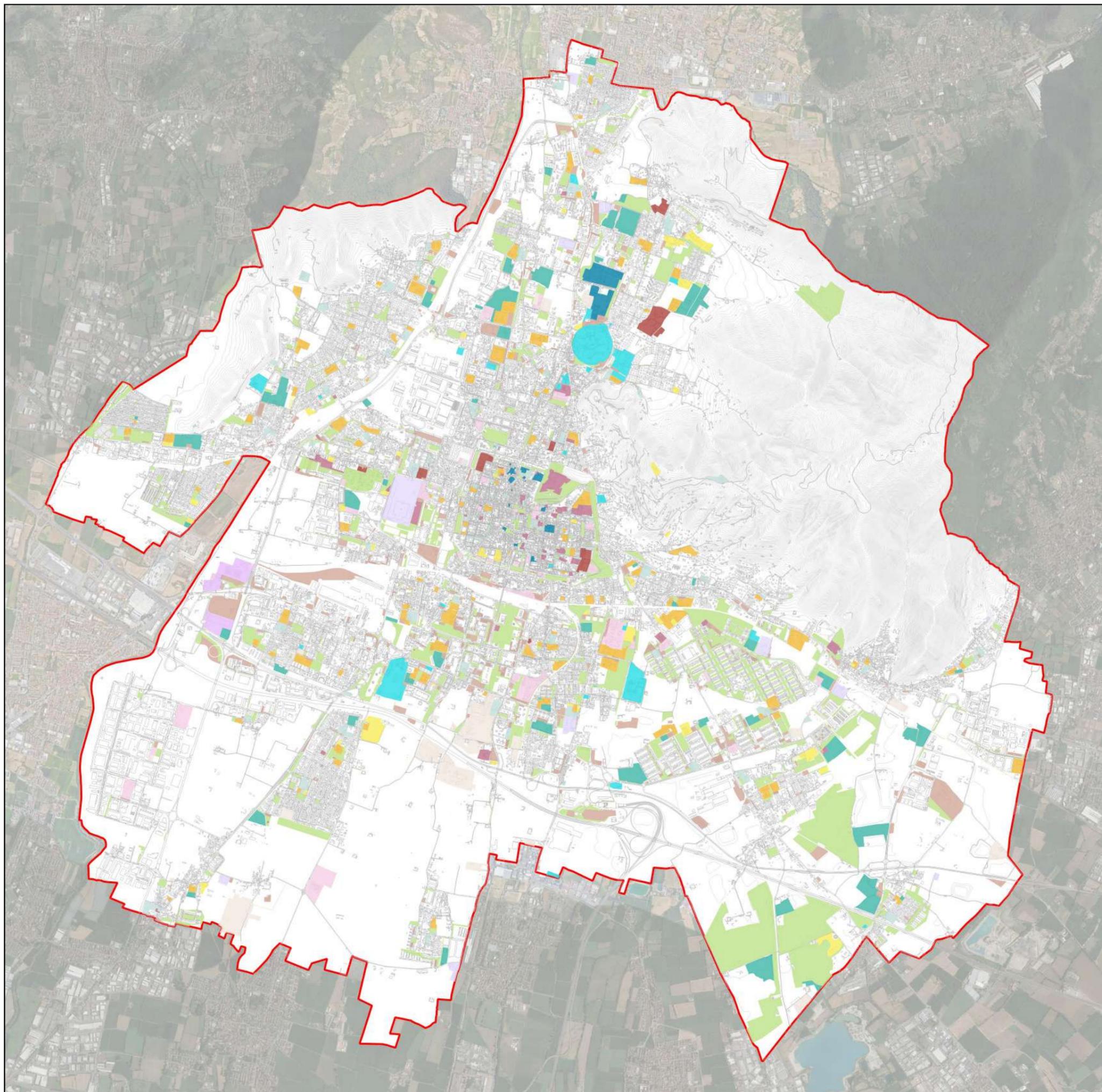
Supervisore:
Cl. ma Prof.ssa Michela TIBONI, Ph.D.
Co-supervisore:
Ing. Ilaria FUMAGALLI Ph.D.

Dottoranda:
Ing. Stefania BOGLIETTI

**TAVOLA
13d**

Itinerari di fruizione paesaggistica





Legenda

 Confine amministrativo
Comune di Brescia

Servizi

-  Servizi Istituzionali
-  Servizi per la produzione e la distribuzione
-  Servizi per la cultura
-  Servizi per lo sport e il tempo libero
-  Residenza sociale
-  Servizi per l'istruzione
-  Servizi per la mobilità
-  Servizi sanitari
-  Servizi religiosi
-  Servizi sociali
-  Servizi tecnologici
-  Servizi universitari
-  Spazi aperti
-  Centri polifunzionali
-  Servizi cimiteriali



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE,
DELLA COOPERAZIONE INTERNAZIONALE E DI MATEMATICA

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/20

XXXVI CICLO

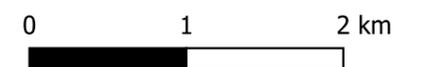
**IL CONTRIBUTO DEGLI STRUMENTI DI GOVERNO DEL TERRITORIO
PER L'ADATTAMENTO DELLE CITTÀ AI CAMBIAMENTI CLIMATICI**

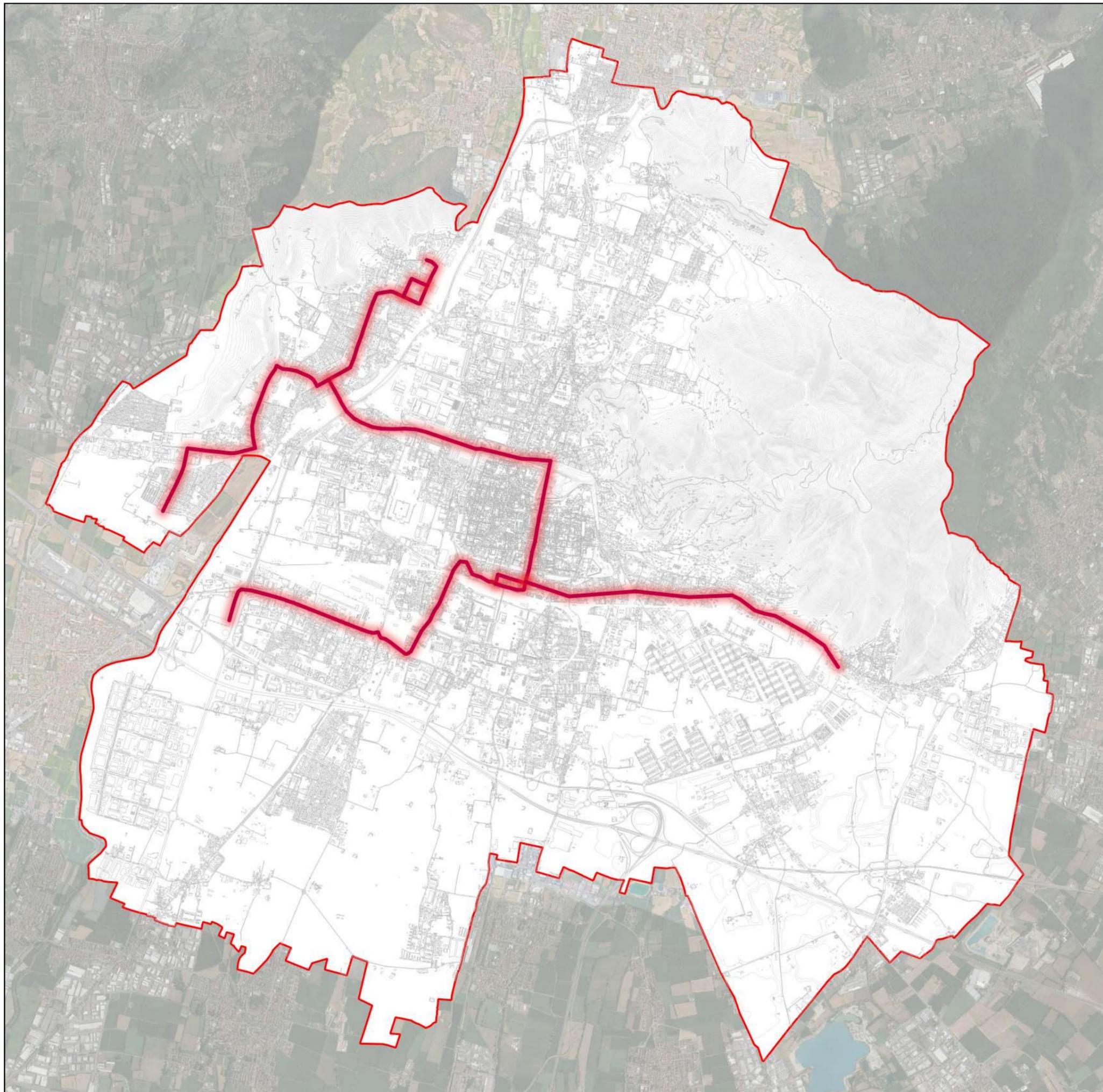
Supervisore:
Cl.ima Prof.ssa Michela TIBONI, Ph.D.
Co-supervisore:
Ing. Ilaria FUMAGALLI Ph.D.

Dottoranda:
Ing. Stefania BOGLIETTI

TAVOLA
13e

Servizi





Legenda

-  Confine amministrativo Comune di Brescia
-  Linea del tram T2



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE,
DELLA COOPERAZIONE INTERNAZIONALE E DI MATEMATICA

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/20

XXXVI CICLO

**IL CONTRIBUTO DEGLI STRUMENTI DI GOVERNO DEL TERRITORIO
PER L'ADATTAMENTO DELLE CITTÀ AI CAMBIAMENTI CLIMATICI**

Supervisore:
Cl. in Prof.ssa Michela TIBONI, Ph.D.
Co-supervisore:
Ing. Ilaria FUMAGALLI, Ph.D.

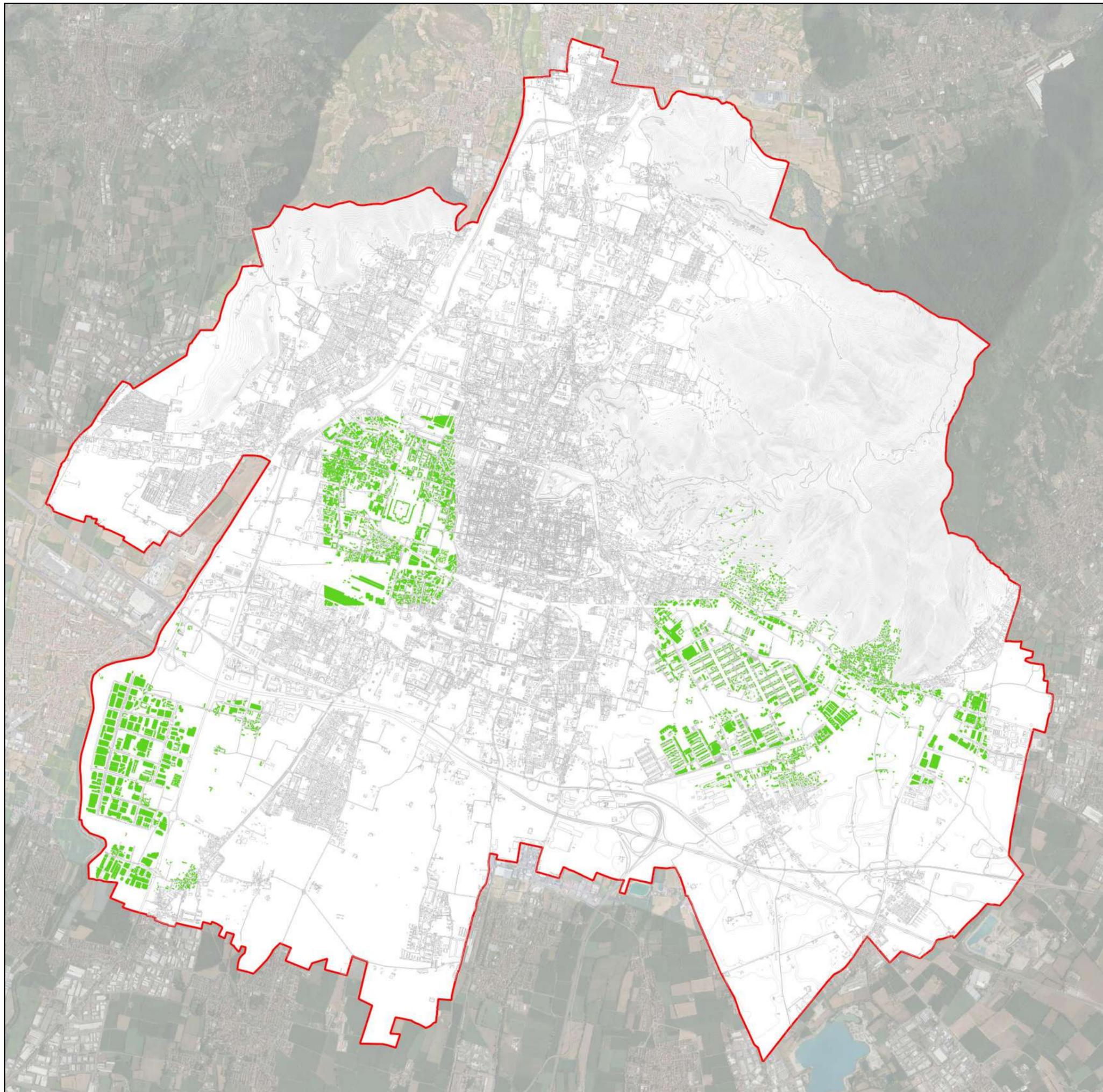
Dottoranda:
Ing. Stefania BOGLIETTI

**TAVOLA
13f**

Infrastrutture per la mobilità
Linea del tram T2



0 1 2 km

Legenda

- Confine amministrativo
Comune di Brescia
- Tetti piani*

*Preso atto della difficoltà nell'elaborazione dei dati LiDAR e che questi non sono disponibili per l'intero territorio comunale, l'inclinazione dei tetti è stata studiata solo per quelle aree che risultano avere un livello di idoneità alla diffusione dei tetti verdi MOLTO ALTO.



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE,
DELLA COOPERAZIONE INTERNAZIONALE E DI MATEMATICA

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/20

XXXVI CICLO

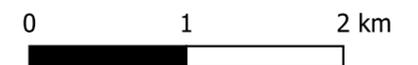
**IL CONTRIBUTO DEGLI STRUMENTI DI GOVERNO DEL TERRITORIO
PER L'ADATTAMENTO DELLE CITTÀ AI CAMBIAMENTI CLIMATICI**

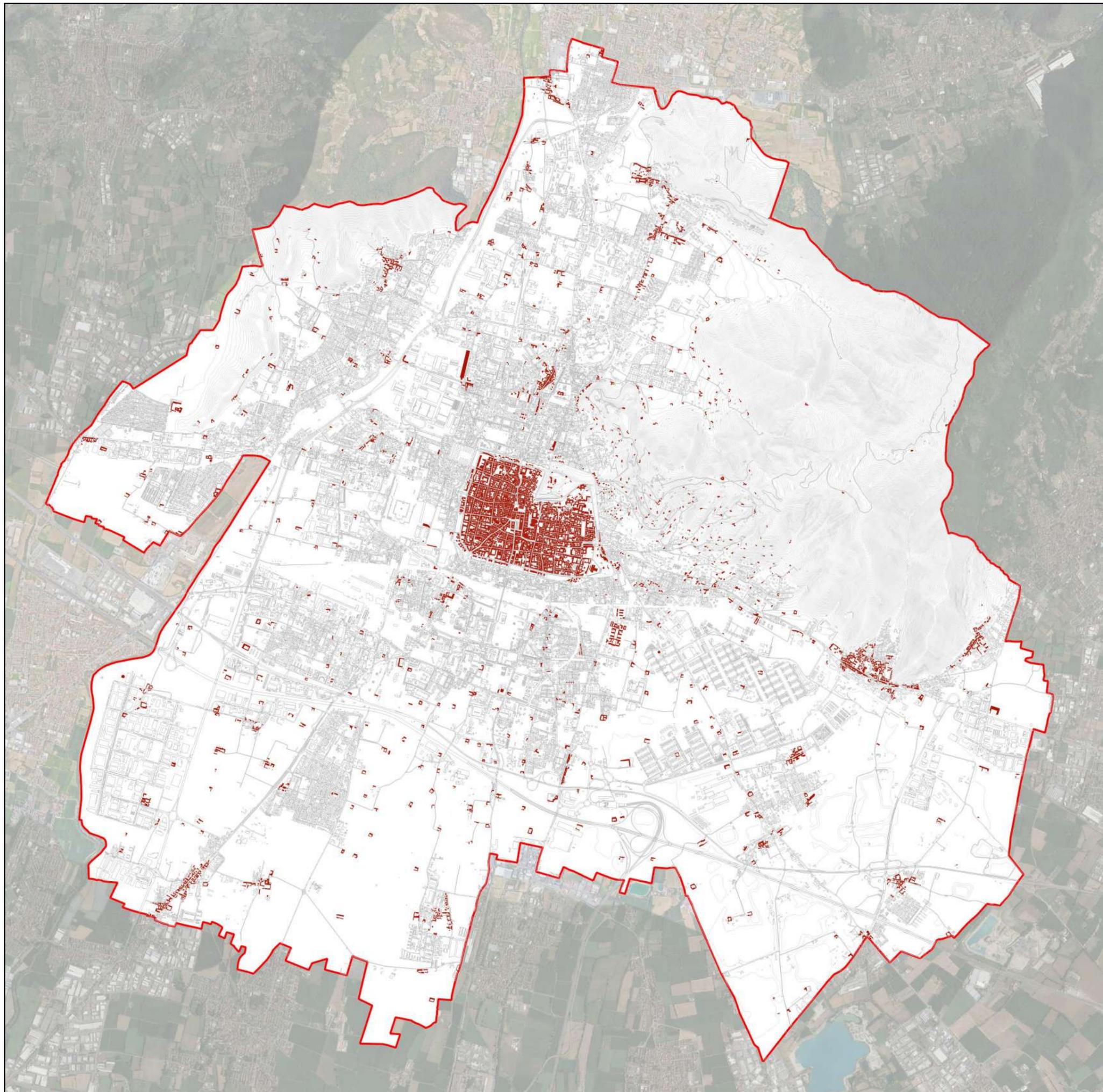
Supervisore:
Cl. ma Prof.ssa Michela TIBONI, Ph.D.
Co-supervisore:
Ing. Ilaria FUMAGALLI, Ph.D.

Dottoranda:
Ing. Stefania BOGLIETTI

**TAVOLA
14a**

Tetti piani





Legenda

- Confine amministrativo
Comune di Brescia
- Edifici di valore storico e architettonico



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE,
DELLA COOPERAZIONE INTERNAZIONALE E DI MATEMATICA

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/20

XXXVI CICLO

**IL CONTRIBUTO DEGLI STRUMENTI DI GOVERNO DEL TERRITORIO
PER L'ADATTAMENTO DELLE CITTÀ AI CAMBIAMENTI CLIMATICI**

Supervisore:
Cl. ma Prof.ssa Michela TIBONI, Ph.D.
Co-supervisore:
Ing. Ilaria FUMAGALLI Ph.D.

Dottoranda:
Ing. Stefania BOGLIETTI

**TAVOLA
14b**

Edifici di valore storico e architettonico

