

## IL RUOLO DELLE AREE VERDI NELLA REGOLAZIONE DELLE TEMPERATURE A BRESCIA

MATTEO RUZZON<sup>1,2</sup>, STEFANO ARMIRAGLIO<sup>3,2</sup>

*Parole chiave* – Temperatura a livello del suolo, isola di calore urbano, regolazione del clima, servizi ecosistemici.

*Key words* – Land Surface Temperature, Urban Heat Island, Climate Regulation, Ecosystem Services.

*Riassunto* – Con più della metà della popolazione mondiale che vive nelle città, appaiono sempre di maggiore importanza i servizi ecosistemici che le aree verdi nei centri urbani possono offrire per migliorare il benessere dei cittadini, in particolare la loro capacità di mitigare l'effetto "isola di calore" delle superfici urbanizzate, attraverso l'evapotraspirazione delle piante, facendo delle aree verdi "isole di raffreddamento urbano". Nel presente articolo, a partire da una serie di immagini satellitari riportanti la temperatura a livello del suolo, si caratterizza il fenomeno dell'isola di calore urbano nel Comune di Brescia e si valuta l'efficacia di alcune aree verdi nel mitigarlo. Questi effetti si manifestano nel periodo estivo, durante l'attività vegetativa delle piante, mentre durante la stagione invernale, con il riposo vegetativo, gli effetti sono del tutto ininfluenti. L'entità della capacità di mitigazione varia al variare dell'uso del suolo, e decresce dalle aree boscate e seminaturali, a quelle agricole e infine alle aree verdi urbane. Indipendentemente della loro superficie, queste aree di regolazione hanno un raggio di influenza che si estende anche alle aree costruite circostanti, mentre la capacità di mitigazione si riduce in genere proporzionalmente alle dimensioni dell'area stessa, ma anche all'eterogeneità delle aree che circondano quest'ultime. I risultati misurano per la prima volta l'entità del fenomeno dell'"isola di calore" nel Comune di Brescia, e sottolineano l'importanza che le aree verdi considerate hanno nel mitigare le temperature della città.

*Abstract* – *The green infrastructure role in temperature regulation in the Municipality of Brescia.* With more than half of the world's population living in cities, the ecosystem services that green areas in urban centers can offer to improve citizens' well-being are increasingly important, in particular their ability to mitigate the "heat island effect," of soiled surfaces through the evapotranspiration of plants, making green areas "urban cooling islands". In this paper, starting from a series of satellite images showing the temperature at ground level, the urban heat island phenomenon in the Municipality of Brescia and the effectiveness of some green areas in mitigating are assessed. These mitigating effects occur in the summer, during the vegetative activity of the plants, while during the winter season, with the vegetative rest, the effects are completely irrelevant. The extent of the mitigation capacity varies with changes in land consumption, and decreases from wooded and semi-natural areas, to agricultural areas and to urban green areas. Regardless of their surface, these regulation areas have a range of influence that also extends to the surrounding built areas, while the mitigation capacity is generally reduced in proportion to the size of the area itself, but also to the heterogeneity of the areas surrounding these areas. The results assess for the first time the extent of the "heat island" phenomenon in the Municipality of Brescia, and underline the importance that the considered green areas have in mitigating the temperatures of the city.

### INTRODUZIONE E SCOPI

Ad oggi, secondo le fonti ufficiali, più di metà della popolazione mondiale vive nelle città; la tendenza è confermata considerando l'Europa e l'Italia, con percentuali rispettivamente del 74,5% e del 70,4%, in Italia quindi pari a 42 milioni di persone concentrate nelle città (NAZIONI UNITE, 2018). La crescita delle città ha chiari benefici per l'uomo, ma anche conseguenze negative sotto numerosi punti di vista, tra cui quello ecologico e quello della salute dei cittadini (XU *et al.*, 2009; PHELAN *et al.*, 2015). Con l'obbiettivo di mantenere buona la qualità della vita per il numero sempre crescente di esseri umani, diventa sempre più importante proteggere e promuovere gli ecosistemi urbani e i servizi che essi sono in grado di fornire (BRZOSKA & SPÄGE, 2020; NAZIONI UNITE, 2018).

Sempre maggior interesse suscitano le aree non urbanizzate all'interno dei centri urbani, note anche come

*Green Infrastructure* (GI), definite come "una rete pianificata di aree naturali e semi-naturali e altri elementi ambientali creata e gestita per restituire un'ampia gamma di servizi ecosistemici" (NAUMANN *et al.*, 2011; COMMISSIONE EUROPEA, 2013), argomento al quale negli ultimi anni è dedicato un numero crescente di pubblicazioni (BRZOSKA & SPÄGE, 2020). Tra i servizi ecosistemici (Ecosystem Services, ES) che le aree ricoperte di vegetazione garantiscono ai territori circostanti ricordiamo: sequestro del carbonio, riduzione di inquinamento e polveri nell'aria, controllo delle acque di scorrimento superficiale, habitat per flora e fauna, riduzione del rumore e del vento e mitigazione del clima (GÓMEZ-BAGGETHUN & BARTON, 2013; ANDERSSON *et al.*, 2014).

Già nella prima metà del 1800 viene osservato come le temperature nelle città siano maggiori che nei territori circostanti, meno costruiti (HOWARD, 1833). Questo fenomeno, denominato isola di calore urbano (*Urban heat*

<sup>1</sup> Museo Civico di Scienze Naturali di Brescia, via Ozanam 4, 25128 Brescia. Progetto Dote Comune 2019

<sup>2</sup> Centro Studi Naturalistici Bresciani, c/o Museo Civico di Scienze Naturali di Brescia, via Ozanam 4, 25128 Brescia

<sup>3</sup> Museo Civico di Scienze Naturali di Brescia, sez. di Botanica, via Ozanam 4, 25128 Brescia - ✉ sarmiraglio@comune.brescia.it

*Island*, UHI), è un'anomalia termica osservabile in tutti gli insediamenti umani, piccoli o grandi che siano (OKE, 1982). Sebbene le città siano soggette a emissioni di calore di natura umana, in particolar modo legate a processi industriali e alle centrali elettriche, la causa prima dell'effetto UHI va ricercata nel *soil sealing* (PHELAN *et al.*, 2015). Il *soil sealing* è la conversione di spazi naturali o comunque vegetati in superfici totalmente o parzialmente impermeabili (MORABITO *et al.*, 2018). I materiali principali da costruzione che determinano l'impermeabilizzazione del suolo, come cemento e asfalto, sono caratterizzati da bassa albedo e alte capacità di assorbire, immagazzinare e quindi rilasciare il calore (PHELAN *et al.*, 2015). Di conseguenza, entro le aree urbane, si riduce l'effetto dell'evapotraspirazione mentre aumenta l'assorbimento e l'accumulo della radiazione solare rispetto alle aree rurali circostanti (GRIMMOND, 2007).

L'intensità dell'UHI, cioè la differenza tra le temperature della città e quelle delle aree circostanti, varia in base a numerosi parametri, tra cui stagionalità e latitudine, ma è in genere massima nelle ore immediatamente successive al tramonto (OKE, 1982). Dalle osservazioni effettuate, nelle grandi città l'effetto UHI aumenta le temperature in media di 6,5°C, dai 4°C osservati per Atene e Sidney, con picchi di 12°C per le megalopoli come Tokyo (PHELAN *et al.*, 2015).

È in questo scenario che la capacità delle piante di regolare le temperature dell'ambiente circostante può risultare particolarmente utile. Principale motivo di questa caratteristica è l'evapotraspirazione: una pianta è in grado di utilizzare parte della propria energia per far evaporare l'acqua nelle proprie foglie, raffreddandole, per poi espellere il vapore acqueo prodotto dagli stomi, limitando il riscaldamento dell'aria attorno alla pianta stessa (VAZ MONTEIRO *et al.*, 2019). Questo fenomeno porta al cosiddetto effetto "isola di raffreddamento urbano" (UCI, *Urban Cooling Island*): non solo una GI è in media più fredda di 1°C rispetto alle aree circostanti, ma questa mitigazione supera spesso i confini della GI stessa, raffreddando anche il tessuto urbanizzato limitrofo (BOWLER *et al.*, 2010; YU *et al.*, 2015). Secondo alcuni studi, le aree alberate garantiscono il maggiore effetto UCI, seguite dalle zone a cespugli e infine dai prati (KONG *et al.*, 2014). A causa delle differenti modalità di acquisizione dei dati e dei diversi metodi utilizzati nei vari studi sull'argomento, non è ad oggi possibile stimare con accuratezza quanto parametri quali dimensione, forma, struttura e distribuzione della copertura vegetale influiscano sull'effetto UCI (YU *et al.*, 2017), ma è possibile stabilirne la presenza, oltre che l'intensità.

L'efficienza dell'effetto UCI viene stimata a partire dalla quantificazione dell'effetto UHI in una città. Ciò si ottiene misurando la temperatura dell'aria nella fascia che va dal suolo ai tetti degli edifici. Questa misura tuttavia non è mai disponibile in forma spazialmente continua nella città, ma è limitata a un certo numero di siti di mo-

nitaggio. Per analizzare la distribuzione delle temperature su aree grandi, in maniera continua, si utilizza la temperatura rilevata al suolo dai satelliti (LST, *Land Surface Temperature*). Poiché l'LST è correlata alla temperatura dell'aria nel luogo in cui viene rilevata, è possibile partire dalla LST di un'area per stimarne l'effetto UHI, valutandolo però solamente a livello del suolo; si parla perciò di *SUHI* (*Surface Urban Heat Island*) (MARANDO *et al.*, 2019; SCHWARZ *et al.*, 2012). Il SUHI ha caratteristiche opposte all'UHI: è più intenso durante il giorno e subisce variazioni spaziali e temporali maggiori in estate rispetto all'UHI atmosferico (HU & BRUNSELL, 2013).

L'intensità dell'effetto UCI di una copertura vegetale viene indicata come la differenza di LST tra la GI e l'area urbanizzata che la circonda ( $\Delta LST$ ). Viene definita anche l'efficienza di una UCI, come una curva che mostra l'andamento della  $\Delta LST$  dai confini della GI al *turning point*, il punto in cui l'effetto UCI della GI smette di influenzare la LST urbana, ovvero la distanza in cui la  $\Delta LST$  smette di crescere (YU *et al.*, 2017; MARANDO *et al.*, 2019).

È già stata evidenziata la mancanza di studi sul fenomeno del SUHI nelle città italiane (MORABITO *et al.*, 2020), importanti per approfondirne la conoscenza e valutarne le variazioni in contesti geografici diversi.

Scopo primo del presente studio è caratterizzare il fenomeno dell'isola di calore per il Comune di Brescia ed evidenziare le differenti LST nelle varie categorie di uso del suolo. Viene anche indagato il ruolo che alcune GI cittadine hanno nel mitigare l'effetto isola di calore, evidenziandone l'effetto UCI.

## METODI

### Area di studio

L'area di studio coincide con i limiti amministrativi del Comune di Brescia (Fig. 1).

Brescia (45°32'20"N 10°13'13"E) è un comune italiano di circa 9030 ettari. Con circa 199.500 abitanti e una densità abitativa approssimativa di 2.115 abitanti/km<sup>2</sup>, è il secondo comune della Lombardia per popolazione dopo Milano (ISTAT, 2020). Collocata all'imbocco della Val Trompia, nell'alta Pianura Padana, Brescia è un territorio in larga parte pianeggiante, sebbene nel territorio comunale ricadano anche il versante sud e la cima del vicino Monte Maddalena (874 m s.l.m.), nonché il complesso colle di S. Anna, Monte Picastello e Monte Ratto. Nella porzione pianeggiante del comune il paesaggio è caratterizzato da un'intensa antropizzazione, che ha portato alla pressoché totale scomparsa dell'ambiente naturale di alta pianura. Ad ovest del centro storico è ben visibile la valle del fiume Mella, ad andamento N-S. Il clima dell'area di studio è temperato subcontinentale, con una temperatura media annua di 14°C e con precipitazioni annue di 935 mm (ARMIRAGLIO *et al.*, 2009). Secondo la mappa del cli-

ma d'Italia basata sullo schema Köppen-Geiger (KOPPEN, 1936), l'area di studio è inclusa nella "Regione prealpina e medio-appenninica con clima temperato caldo" (Cfa): clima temperato con assenza di una stagione arida e temperatura nel mese più caldo maggiore di 22°C.

Secondo le Destinazione d'Uso dei Suoli Agricolo e Forestale (DUSAF 6, 2018; Regione Lombardia) il 55% del territorio è costituito da zone urbanizzate e insediamenti produttivi, mentre circa il 24% è adibito alle prati-

che agricole. Il restante 21% è formato da territori boscati e ambienti seminaturali, quasi del tutto concentrati in corrispondenza del Monte Maddalena ad est e del colle S. Anna e del sistema Picastello-Ratto a nord-ovest.

Nel Comune di Brescia il 38,2% del territorio appartiene ad aree naturali protette, ben sopra la media nazionale dei comuni capoluogo (16,7%), tuttavia solamente il 5,65% del territorio è costituito da verde urbano, sebbene sempre superiore alla media nazionale di 3,03% (ISTAT, 2018).

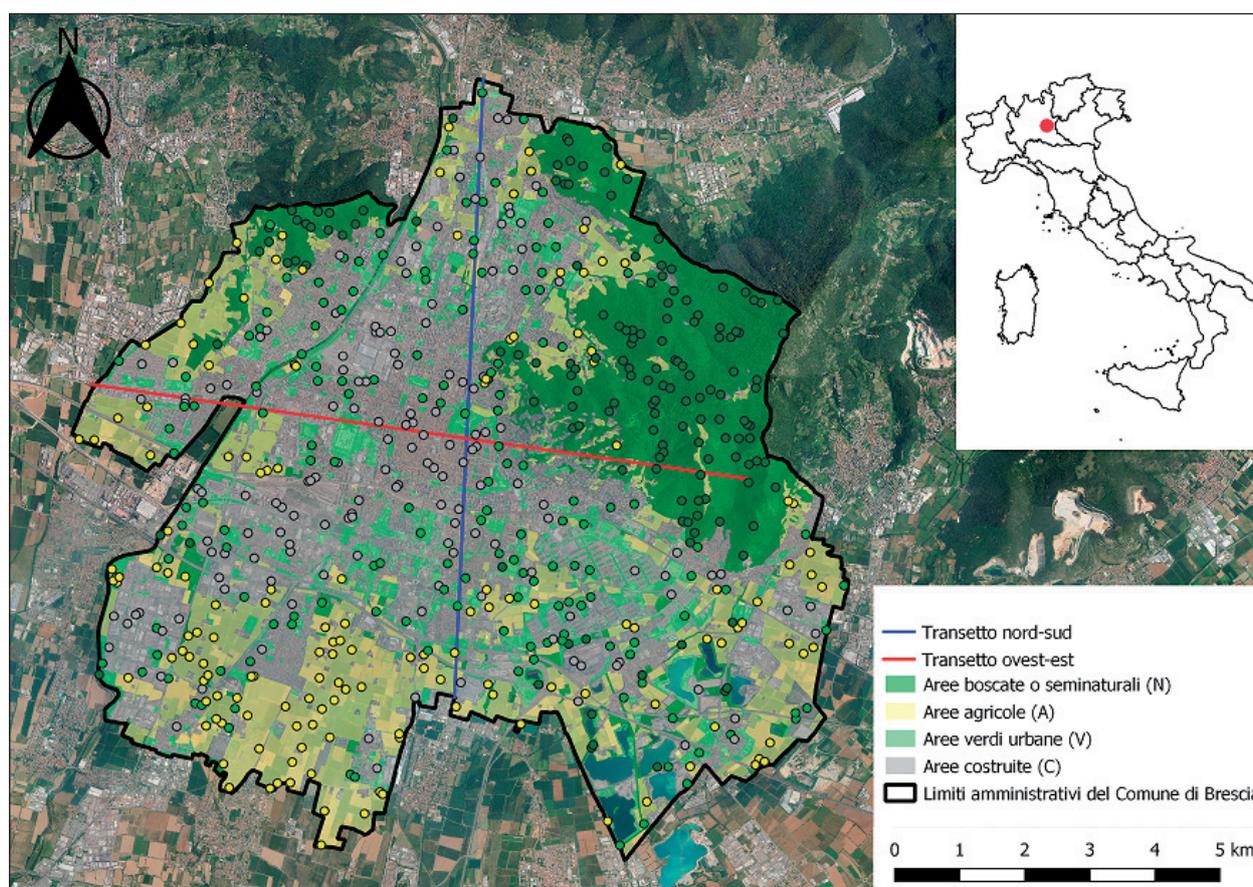


Fig. 1 – Comune di Brescia, mappa di uso del suolo realizzata incrociando le informazioni provenienti da DUSAF6 e il catasto del verde urbano del Comune di Brescia (Settore Verde, Parchi e reticolo idrico). In figura sono riportati anche i punti e i transetti generati per lo studio. Base cartografica [www.geoportale.lombardia.it](http://www.geoportale.lombardia.it), fonte Agea 2015 (Ortofoto 20cm/50cm©2015 Consorzio TeA).

### 1. Analisi delle LST

Per l'analisi spaziale del fenomeno del SUHI nel Comune di Brescia sono state utilizzate 8 mappe della LST dell'area di studio ottenute dal sito "Remote Sensing Lab" ([rslab.gr/downloads\\_LandsatLST.html](http://rslab.gr/downloads_LandsatLST.html)), corrispondenti ad 8 giorni differenti, 4 estivi e 4 invernali, tra il 2013 e il 2019:

Periodo	Date di scatto delle immagini Landsat			
Mesi estivi:	25/07/2013	17/07/2016	05/08/2017	23/07/2018
Mesi invernali:	01/01/2014	04/01/2015	23/01/2016	15/01/2019

Queste mappe sono state generate automaticamente a partire da una serie di immagini catturate dal satellite Landsat-8 OLI/TIRS, con risoluzione 30 metri (PARASTA-

TIDIS *et al.*, 2017). Le mappe sono state scelte tra quelle disponibili basandosi in primo luogo sull'assenza di nubi sull'area di studio. Per garantire le migliori condizioni di luminosità, tutte le immagini vengono catturate dal satellite intorno alle 10:00 del mattino (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY, 2020).

Per evidenziare le differenze tra LST misurata nelle aree costruite e nelle differenti tipologie di aree verdi, è stata utilizzata una mappa dell'uso del suolo dell'area di studio. Anziché ricavare questa mappa direttamente dalle immagini satellitari (MARANDO *et al.*, 2019; MORABITO *et al.*, 2020), è stata costruita una mappa incrociando le informazioni provenienti da DUSAF6 e dal catasto del verde urbano del Comune di Brescia (Settore verde, parchi e reticolo idrico), per garantire un grado di dettaglio che

consentisse di valutare anche il ruolo dei parchi urbani, ma anche di aiuole, e alberature cittadine (Fig.1).

Dalla mappa risultante si è scelto di dividere l'uso del suolo in 4 categorie di utilizzo: "aree boscate e seminaturali" (N), "aree agricole" (A), "aree verdi urbane" (V), "aree costruite" (C). Questa categorizzazione è riconducibile in massima parte alle classi DUSAF6, in particolare:

- "aree boscate e seminaturali", classe 3 (territori boscati e ambienti seminaturali);
- "aree agricole", classe 2 (aree agricole);
- "aree verdi urbane", classe 14 (aree verdi non agricole), in cui sono stati inseriti anche i parchi urbani, le aiuole e le alberature del catasto del verde pubblico del Comune di Brescia;
- "aree costruite", classi: 11 (zone urbanizzate), 12 (insediamenti produttivi, grandi impianti e reti di comunicazione e 1423 (parchi divertimento).

Partendo da questa mappa sono stati generati, attraverso un campionamento casuale stratificato non proporzionale, 150 punti per ognuna delle 4 categorie di uso del suolo considerate, per un totale di 600 punti (Fig.1). Per l'individuazione dei punti l'unica condizione posta è stata che ricadessero in pixel in cui la LST registrata dal satellite in ognuna delle foto utilizzate fosse diversa da zero. Questo per escludere gli errori nella lettura della superficie, che possono essere causate dalla presenza di nubi, specchi d'acqua e superfici innevate, ghiacciate o particolarmente riflettenti (in special modo i tetti di alcuni capannoni industriali) (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY, 2020). Per evidenziare il fenomeno del SUHI nei vari usi del suolo, sono state ricavate le LST medie, minime e massime estive e invernali in ogni punto generato, in ogni anno considerato.

Uso del suolo	AREA (ha)	Quota media (m slm)	Quota media dei punti nel campione (m slm)
Aree boscate e seminaturali (N)	1.712,3	364 ± 180	368 ± 185
Aree agricole (A)	2.096,0	138 ± 55	132 ± 34
Aree verdi urbane (V)	984,6	138 ± 21	140 ± 23
Aree costruite (C)	4.106,9	142 ± 35	140 ± 18

Le temperature medie di ogni punto sono state utilizzate per realizzare un boxplot, per descrivere la distribuzione dei punti generati. In particolare il primo e il terzo quartile, ovvero i due valori entro cui ricadono la metà dei punti di ogni categoria "attorno" al valore di media della categoria stessa, ha aiutato a definire meglio le differenze di LST tra i vari usi del suolo.

## 2. Analisi delle LST lungo transetti

Analizzare in maniera spazialmente continua le LST rilevate dai satelliti in un'area permette di evidenziare le relazioni tra un'area urbana e gli ambienti circostanti (MARANDO *et al.*, 2019). Ciò è particolarmente utile nel-

lo studio del fenomeno dell'UHI, dove devono essere considerate sia le temperature cittadine che quelle delle aree meno urbanizzate che circondano la città (HEINL *et al.*, 2015). Per questo motivo le mappe delle temperature estive e invernali negli anni considerati sono state usate per quantificare la variazione di LST lungo due transetti (Fig.1), uno ad andamento ovest-est (lunghezza: 10,17 km), e uno ad andamento nord-sud (lunghezza: 9,57 km). L'andamento dei transetti è stato stabilito in modo da attraversare alcune GI e alcuni luoghi rappresentativi della città. I due transetti si incontrano in corrispondenza del Capitolium, tempio romano nel centro cittadino di Brescia.

L'uso del suolo attraversato dal transetto è stato rilevato incrociando le informazioni date dalla mappa realizzata per l'analisi delle LST basata sull'uso del suolo e l'osservazione dell'ortofoto dell'anno 2015 dell'area di studio.

Di seguito i punti di riferimento attraversati da ogni transetto: per il transetto ovest-est il Fiume Mella, il Cimitero Vantiniano, Piazza della Loggia, il Capitolium, la Val Carobbio; per il transetto nord-sud la fermata della metropolitana di Prealpino, il parco del Museo di Scienze Naturali, il Colle Cidneo, il Captiolium, la ferrovia, il parco Torri Gemelle e l'autostrada A4.

Dalle temperature ottenute dai transetti è stata poi calcolata la differenza di temperatura tra le aree non costruite incontrate (N, A, V) e le aree costruite (C) circostanti (entro i 300 m), per evidenziare l'effetto SUHI delle aree costruite (C).

## 3. L'effetto mitigante intorno alle aree verdi (GI)

Similmente a quanto svolto da MARANDO *et al.* (2019), per analizzare il ruolo di mitigazione delle temperature sono state scelte 7 GI, di estensioni e tipologie differenti, distribuite sul territorio del Comune di Brescia:

Aree agricole:

- Area agricola Caffaro (45°32'24.1"N 10°11'06.6"E; 995.888 m<sup>2</sup>). Parte settentrionale del SIN Brescia-Caffaro, posta a ovest del complesso industriale di via Milano, attraversata dal Fiume Mella.
- Area agricola S. Polo (45°31'09.8"N 10°14'30.9"E; 620.394 m<sup>2</sup>)

Aree verdi urbane:

- Colle Cidneo (45°32,33.6"N 10°13'30.6"E; 271.828 m<sup>2</sup>). Propaggine del Monte Maddalena che si estende fin dentro il centro storico, alla cui sommità è stato edificato il castello cittadino.
- Parco Tarello (45°31'37.4"N 10°13'02.9"E; 87.218 m<sup>2</sup>). Ampia area verde a sud della stazione ferroviaria, circondata da giardini pubblici e privati più piccoli distribuiti omogeneamente.
- Area alberata del Cimitero Vantiniano (45°32'32.0"N 10°12'09.1"E; 72.154 m<sup>2</sup>). Porzione settentrionale del Cimitero Vantiniano, che si affaccia su via Milano.
- Giardini Falcone-Borsellino (45°32'18.7"N

10°12'38.2"E; 13.920 m<sup>2</sup>). Giardini pubblici accanto alla vecchia cinta muraria, ad ovest del centro storico tra via dei Mille e via Ugoni.

- Aiuola alberata di via F. Joli (45°31'28.7"N 10°13'39.9"E; 2.731 m<sup>2</sup>). Piccola aiuola alberata tra i binari della linea ferroviaria Brescia-Parma e via F. Joli.

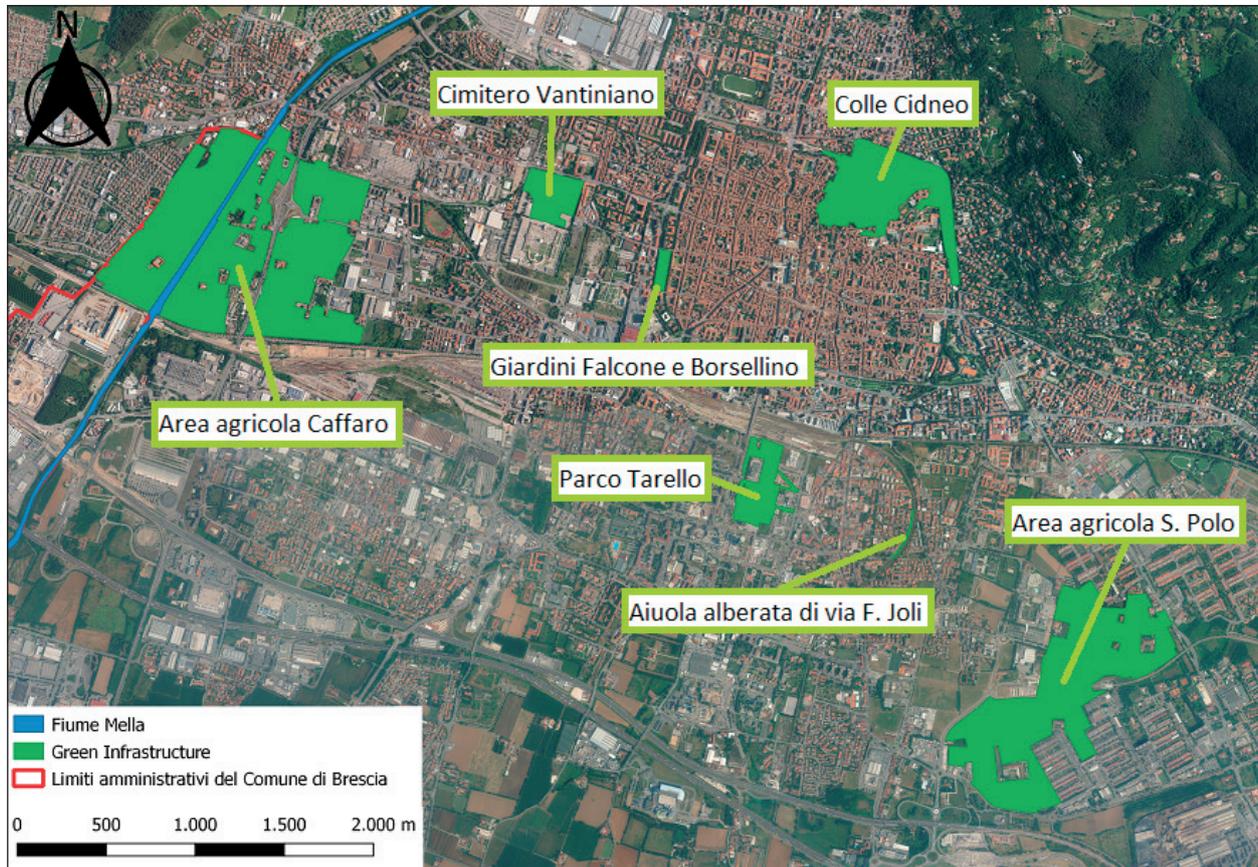


Fig. 2 – Mappa delle GI considerate nello studio. Base cartografica Ortofoto 2015, [www.geoportale.lombardia.it](http://www.geoportale.lombardia.it), fonte Agea 2015 (Ortofoto 20cm/50cm ©2015 Consorzio TeA).

L'estensione di ciascuna GI è stata ricavata dalla mappa di uso del suolo utilizzata nel presente lavoro.

La curva della  $\Delta LST$  di ogni GI, che descrive l'effetto UCI dell'area verde, è stata costruita grazie a un'analisi buffer. Dai confini di ogni entità scelta sono stati realizzati buffer consecutivi di larghezza 10 metri fino a 300 metri (MARANDO *et al.*, 2019). È stata poi calcolata la LST media in ciascun buffer di ogni GI, e poi la differenza tra questa e la LST media entro i confini della GI stessa. Questi valori sono stati poi messi a grafico per mostrare la relazione tra  $\Delta LST$  e distanza dai confini della GI. Le curve ottenute descrivono l'efficienza dell'effetto UCI per ogni GI considerata.

Infine la capacità massima di mitigazione del clima è stata valutata sottraendo al valore di LST al *turning point* quello della LST media al buffer 10 m, il più vicino alla GI disponibile.

## RISULTATI

### 1. Analisi delle LST

Le temperature medie estive e invernali per ciascun gior-

no di rilevamento e per ciascuna delle categorie di uso del suolo considerate sono riportate in Tab I.

LST medie annuali estive:

- “aree boscate e seminaturali” (N) temperature medie comprese tra  $25,0 \pm 2,5$  °C nel 2018 e  $30,8 \pm 2,2$  °C nel 2017.
- “aree agricole” (A) temperature medie comprese tra  $28,8 \pm 2,4$  °C nel 2018 e  $33,7 \pm 2,1$  °C nel 2017.
- “aree verdi urbane” (V) temperature medie comprese tra  $32,6 \pm 2,0$  °C nel 2018 e  $36,9 \pm 1,5$  °C nel 2016.
- “aree costruite” (C) temperature medie comprese tra  $35,7 \pm 1,7$  °C nel 2018 e  $39,4 \pm 1,4$  °C nel 2017.

LST medie annuali invernali:

- “aree boscate e seminaturali” (N) temperature medie comprese tra  $4,4 \pm 2,8$  °C nel 2014 e  $8,6 \pm 2,6$  °C nel 2015.
- “aree agricole” (A) temperature medie comprese tra  $4,2 \pm 1,0$  °C nel 2014 e  $7,4 \pm 1,4$  °C nel 2019.
- “aree verdi urbane” (V) temperature medie comprese tra  $4,5 \pm 0,8$  °C nel 2014 e  $7,3 \pm 0,8$  °C nel 2015.
- “aree costruite” (C) temperature medie comprese tra  $4,8 \pm 0,8$  °C nel e  $7,4 \pm 0,8$  °C nel 2015.

Temperature estive						
	n° punti	23/07/18	05/08/17	17/07/16	25/07/13	LST med (°C)
N	150	25,0 ± 2,5 °C	30,8 ± 2,2 °C	28,2 ± 3,5 °C	29,2 ± 2,9 °C	28,3 ± 2,8 °C
A	150	28,8 ± 2,4 °C	33,7 ± 2,1 °C	33,1 ± 3,3 °C	33,3 ± 2,9 °C	32,2 ± 2,2 °C
V	150	32,6 ± 2,0 °C	36,7 ± 1,5 °C	36,9 ± 2,0 °C	36,4 ± 1,8 °C	35,6 ± 1,8 °C
C	150	35,7 ± 1,7 °C	39,1 ± 1,4 °C	39,4 ± 1,7 °C	38,6 ± 1,4 °C	38,2 ± 1,5 °C
Temperature invernali						
		15/01/19	23/01/16	04/01/15	01/01/14	
N	150	7,3 ± 2,8 °C	4,9 ± 2,3 °C	8,6 ± 2,6 °C	4,4 ± 2,8 °C	6,2 ± 2,6 °C
A	150	7,4 ± 1,4 °C	5,1 ± 0,8 °C	7,0 ± 1,2 °C	4,2 ± 1,0 °C	6,0 ± 1,0 °C
V	150	6,9 ± 0,9 °C	5,0 ± 0,6 °C	7,3 ± 0,8 °C	4,5 ± 0,8 °C	5,8 ± 0,9 °C
C	150	7,2 ± 1,0 °C	5,3 ± 0,8 °C	7,4 ± 0,8 °C	4,8 ± 0,8 °C	6,1 ± 1,0 °C

Tab. I – Temperature medie estive e invernali per ciascuna categoria di uso del suolo

LST medie dei punti e ampiezza del loro intervallo:

Estate (Tab II, Fig.4a):

- le aree boscate o seminaturali (N) variano dai 23,0°C ai 36,0°C, con una media di 28,2°C;
- le aree agricole (A) variano dai 28,1°C ai 37,0°C, con una media di 31,8°C;
- le aree verdi urbane (V) variano dai 30,8°C ai 40,2°C, con una media di 35,8°C;
- le aree costruite (C) variano dai 35,1°C ai 40,8°C, con una media di 38,2°C.

Inverno (Tab II, Fig.4b):

- le aree boscate o seminaturali (N) variano dai 0,5°C ai 12,8°C, con una media di 6,2°C;
- le aree agricole (A) variano dai 4,0°C ai 7,8°C, con una media di 6,0°C;

- le aree verdi urbane (V) variano dai 4,2°C ai 7,1°C, con una media di 6,0°C;

- le aree costruite (C) variano dai 4,5°C ai 7,4°C.

Valori del primo e del terzo quartile estivi (Tab II, Fig.4a):

- 26,2°C e 30,2°C per le aree boscate o seminaturali (N);
- 30,6°C e 34,1°C per le aree agricole (A);
- 34,4°C e 36,9°C per le aree verdi urbane (V);
- 37,5°C e 39,2°C per le aree costruite (C).

Valori del primo e del terzo quartile invernali (Tab II, Fig.4b):

- 4,0°C e 8,0°C per le aree boscate o seminaturali (N);
- 5,4°C e 6,4°C per le aree agricole (A);
- 5,4°C e 6,3°C per le aree verdi urbane (V);
- 5,7°C e 6,6°C per le aree costruite (C).

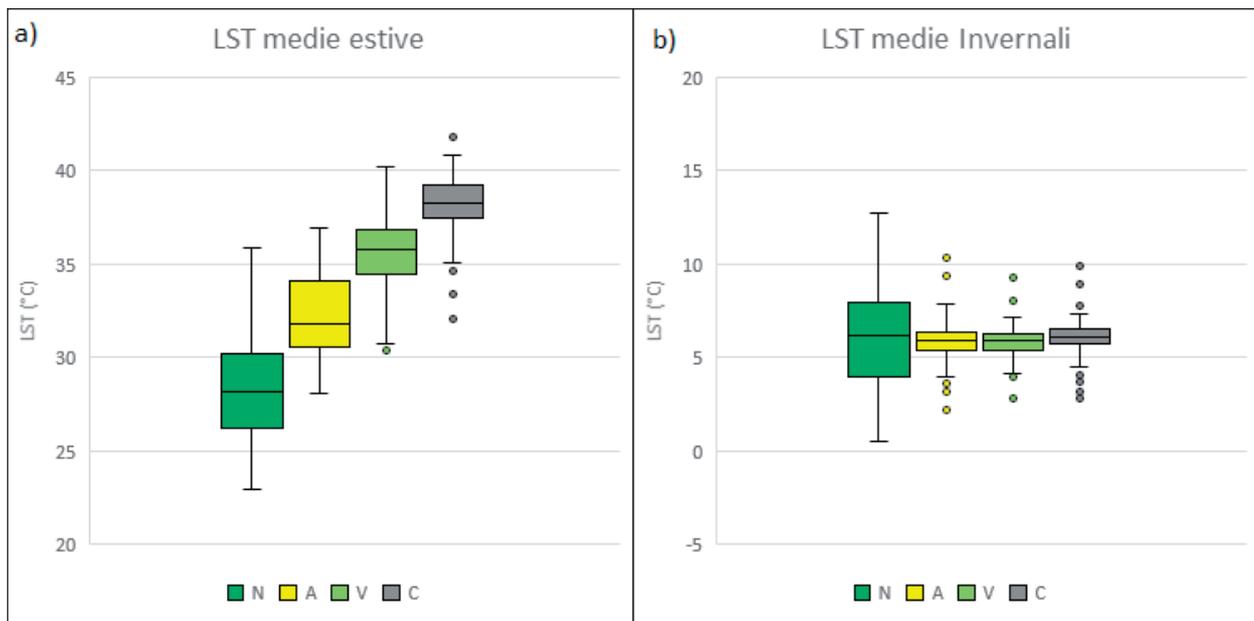


Fig. 3 – Box plot delle temperature medie estive (a) e di quelle invernali (b) a livello del suolo.

	LST MED (°C)	Intervallo LST MED (°C)	Valori del primo e del terzo quartile (°C)
<b>LST estive</b>			
N	28,2	23,0 – 36,0	26,2 – 30,2
A	31,8	28,1 – 37,0	30,6 - 34,1
V	35,8	30,8 - 40,2	34,4 - 36,9
C	38,2	35,1 - 40,8	37,5 - 39,2
<b>LST invernali</b>			
N	6,2	0,5 - 12,8	4,0 - 8,0
A	6,0	4,0 - 7,8	5,4 - 6,4
V	6,0	4,2 - 7,1	5,4 - 6,3
C	6,0	4,2 - 7,1	5,7 - 6,6

Tab. II – LST medie, ampiezza dell'intervallo e Valori del primo e del terzo quartile per ciascuna categoria di uso del suolo considerata.

**2. Analisi delle LST lungo i transetti**

**- Transetto nord-sud**

Questo transetto (Fig. 4) per il 18% della sua lunghezza attraversa aree agricole (A), per il 12% aree verdi urba-

ne (V) e per il 70% aree costruite (C). Le LST medie estive variano dai 31,8°C ai 40,1°C, con una media di 36,8°C, mentre le LST medie invernali variano dagli 0°C ai 7,7°C, con una media di 5,8°C.

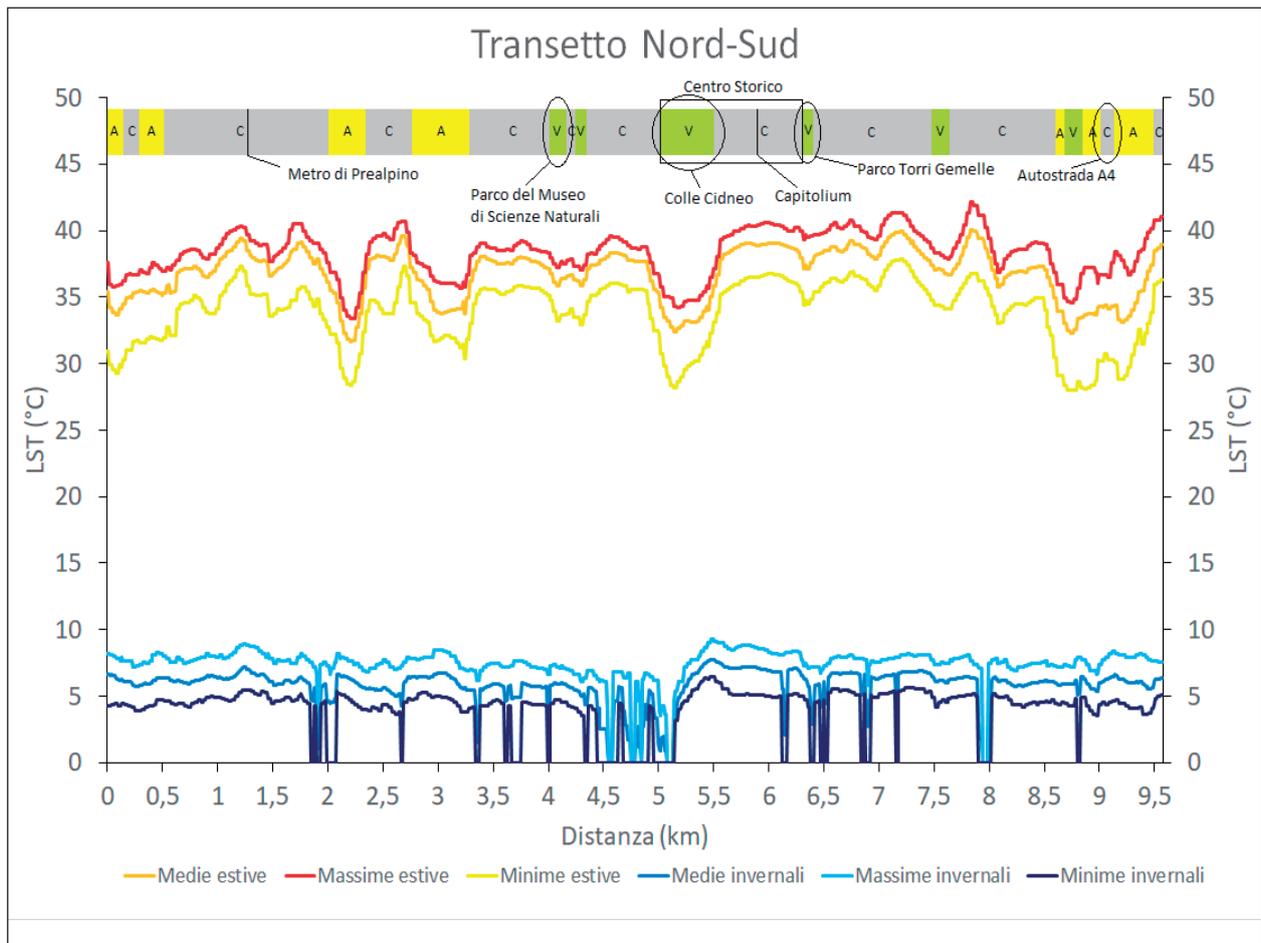


Fig. 4 – Transetto nord-sud. Valori di LST minime, medie e massime estive e invernali.

**- Transetto ovest-est**

Questo transetto (Fig. 5) per il 26% della sua lunghezza attraversa aree boscate o seminaturali (N), per il 4% aree agricole (A), per l'11% aree verdi urbane (V) e per

il 59% aree costruite (C). Le LST medie estive variano dai 26,3°C ai 40,9°C, con una media di 34,7°C, mentre le LST medie invernali variano dagli 0°C ai 11,7°C, con una media di 6,5°C.

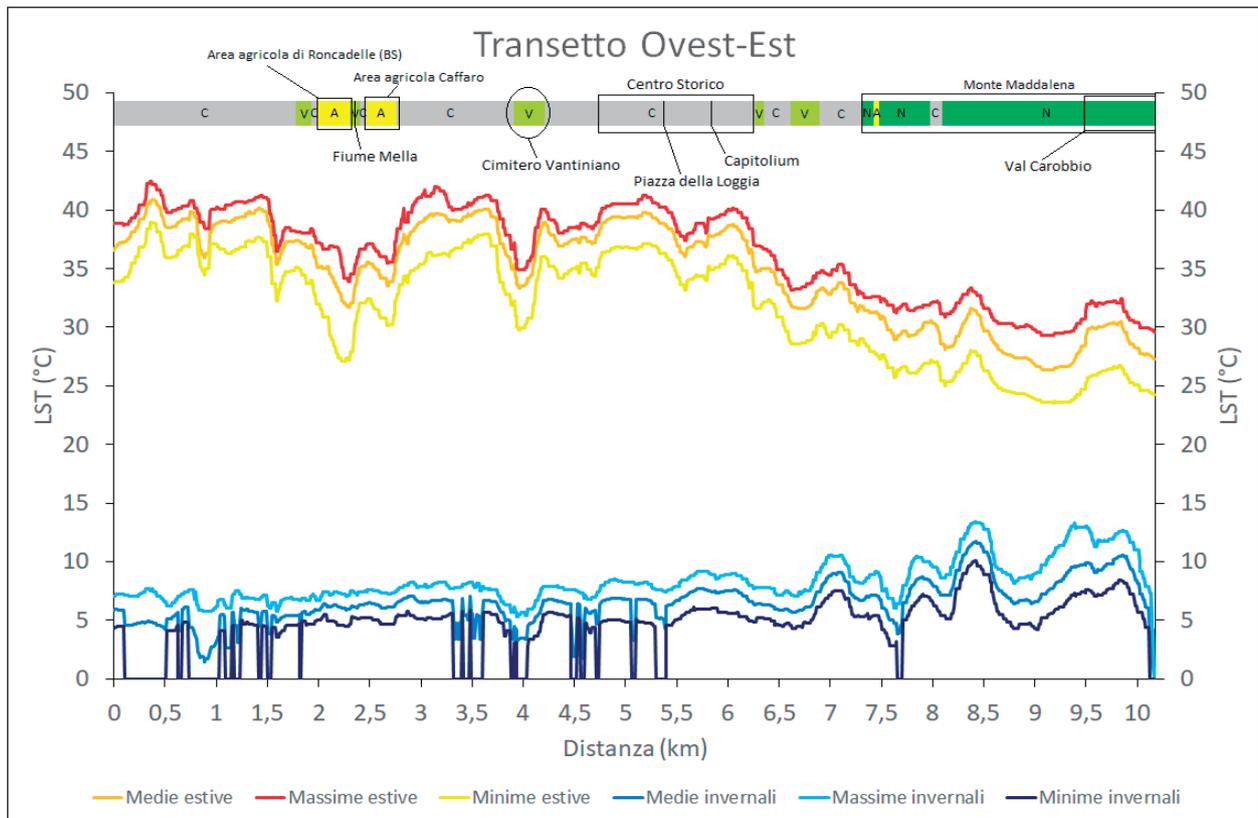


Fig. 5 – Transetto ovest-est. Valori di LST minime, medie e massime estive e invernali.

### 3. L'effetto mitigante intorno alle aree verdi (GI)

Vengono di seguito riportati in Tab. III i dati inerenti l'effetto UCI per le sette aree verdi considerate, di cui 2 aree agricole (A) e 5 aree verdi urbane (V).

GI	Area (ha)	LST med (°C)	Turning point (m)	Capacità massima di mitigazione (°C)
Area agricola Caffaro	99,59	33,4	200	3,5 - 4,8
Area agricola S. Polo	62,04	32,5	80	1,7 - 2,7
Colle Cidneo	27,18	33,7	80	1,6 - 2,1
Parco Tarello	8,72	34,8	90	1,6 - 2,8
Cimitero Vantiniano	7,22	35,3	120	0,9 - 1,3
Giardini Falcone e Borsellino	1,39	36,3	90	1,2 - 2,0
Aiuola di via F. Joli	0,27	35,7	100	0,8 - 1,1

Tab. III – Dati riferiti alle sette GI considerate per la determinazione dell'effetto mitigante.

#### Aree agricole (A):

- Area agricola Caffaro ( $45^{\circ}32'24.1''N$   $10^{\circ}11'06.6''E$ ;  $995.888\text{ m}^2$ ): la temperatura media estiva dell'area è di  $33,4^{\circ}\text{C}$ , il *turning point* si trova a 200 metri dai confini dell'area e la capacità mitigatrice massima della GI va da  $3,5^{\circ}\text{C}$  a  $4,8^{\circ}\text{C}$ .
- Area agricola S. Polo ( $45^{\circ}31'09.8''N$   $10^{\circ}14'30.9''E$ ;  $620.394\text{ m}^2$ ): la temperatura media estiva dell'area è di

$32,5^{\circ}\text{C}$ , il *turning point* minimo si trova a 80 metri dai confini dell'area (100 nel 2013) e la capacità mitigatrice massima della GI va da  $1,7^{\circ}\text{C}$  a  $2,7^{\circ}\text{C}$ .

#### Aree verdi urbane (V):

- Colle Cidneo ( $45^{\circ}32'33.6''N$   $10^{\circ}13'30.6''E$ ;  $271.828\text{ m}^2$ ): la temperatura media estiva dell'area è di  $33,7^{\circ}\text{C}$ , il *turning point* si trova a 80 metri dai confini dell'area e la capacità mitigatrice massima della GI va da  $1,6^{\circ}\text{C}$  a  $2,1^{\circ}\text{C}$ .
- Parco Tarello ( $45^{\circ}31'37.4''N$   $10^{\circ}13'02.9''E$ ;  $87.218\text{ m}^2$ ): la temperatura media estiva dell'area è di  $34,8^{\circ}\text{C}$ , il *turning point* minimo si trova a 90 metri (140 metri nel 2016 e nel 2017) dai confini dell'area e la capacità mitigatrice massima della GI va da  $1,6^{\circ}\text{C}$  a  $2,8^{\circ}\text{C}$ .
- Area alberata del Cimitero Vantiniano ( $45^{\circ}32'32.0''N$   $10^{\circ}12'09.1''E$ ;  $72.154\text{ m}^2$ ): la temperatura media estiva dell'area è di  $35,3^{\circ}\text{C}$ , il *turning point* minimo si trova a 120 metri (140 nel 2013) dai confini dell'area e la capacità mitigatrice massima della GI va da  $0,9^{\circ}\text{C}$  a  $1,3^{\circ}\text{C}$ .
- Giardini Falcone-Borsellino ( $45^{\circ}32'18.7''N$   $10^{\circ}12'38.2''E$ ;  $13.920\text{ m}^2$ ): la temperatura media estiva dell'area è di  $36,3^{\circ}\text{C}$ , il *turning point* si trova a 90 metri dai confini dell'area e la capacità mitigatrice massima della GI va da  $1,2^{\circ}\text{C}$  a  $2,0^{\circ}\text{C}$ .
- Aiuola alberata di via F. Joli ( $45^{\circ}31'28.7''N$   $10^{\circ}13'39.9''E$ ;  $2.731\text{ m}^2$ ): la temperatura media estiva dell'area è di  $36,7^{\circ}\text{C}$ , il *turning point* si trova a 100 metri dai confini dell'area e la capacità mitigatrice massima della GI va da  $0,8^{\circ}\text{C}$  a  $1,1^{\circ}\text{C}$ .

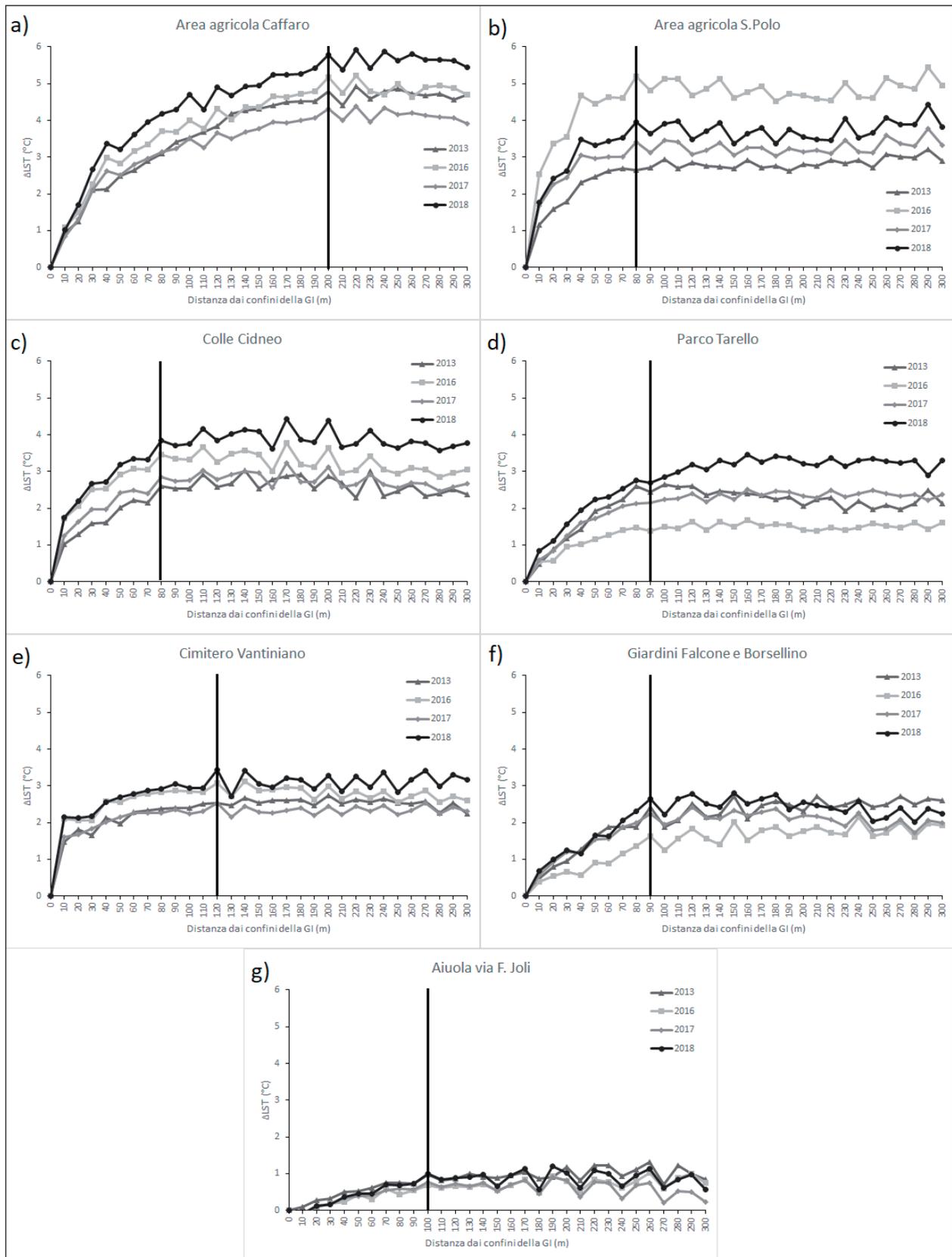


Fig. 6 – Capacità di mitigazione delle GI considerate nel periodo estivo: a) Area agricola Caffaro; b) Area agricola S. Polo; c) Colle Cidneo; d) Parco Tarello; e) Cimitero Vantiniano; f) Giardini Falcone e Borsellino; g) Aiuela alberata di via F. Joli. Ogni linea rappresenta la LST media estiva di ciascun giorno considerato tra ogni buffer consecutivo e la LST media della GI. La linea verticale in ogni grafico mostra il *turning point*.

### Considerazioni conclusive

La variazione delle LST all'interno dell'area di studio presenta un'ampia oscillazione, naturalmente legata alla stagionalità, se consideriamo i due periodi dell'anno. All'interno di ciascuna stagione l'ampiezza di tale oscillazione è molto differente. Nei rilievi estivi ha un valore medio di circa 10°C. In questo range le LST delle aree boscate e seminaturali (N) sono quelle inferiori, la LST aumenta progressivamente nelle aree agricole (A), nelle aree verdi urbane (V) e infine in quelle costruite (C). Le differenze delle LST medie tra ciascuna di queste categorie sono quantificabili con un massimo di 3,9 °C tra le aree naturali e quelle agricole e in un minimo di 2,6°C tra le aree verdi urbane e quelle costruite. Nei rilievi invernali l'ampiezza delle oscillazioni delle LST risulta molto contenuta e quantificabile con un valore medio pari a 0,4 °C, sensibilmente più contenute rispetto alle variazioni estive.

In ogni categoria le LST medie estive di ciascun punto mostrano una certa variabilità: maggiore per le aree boscate o seminaturali (N), con una oscillazione di 13°C. Tale variazione è probabilmente da attribuire alla eterogeneità degli ambienti compresi in questa categoria comunità vegetali a struttura sia arborea che erbacea ma anche all'ampia variabilità della quota (m s.l.m.). La variabilità è invece minore per le aree verdi urbane (V) e per le aree costruite (C), pari in entrambe le categorie e a 6°C. Nonostante la parziale sovrapposizione delle temperature medie tra i punti delle varie categorie di uso del suolo, gli scarti interquartili di ogni categoria non si sovrappongono mai tra loro, evidenziando una tendenza crescente nelle temperature al crescere dell'urbanizzazione delle aree circostanti i punti considerati.

Al contrario, le LST medie invernali dei punti di tutte le categorie di uso del suolo si attestano in media sui 6,1°C, mostrandosi costanti nelle differenti categorie. Le categorie A, V, C mostrano una bassa variabilità, intorno ai 3,5 °C circa, dove in più della metà punti si riduce a circa 1°C. Così come per le LST estive, anche le LST invernali delle aree boscate o seminaturali (N) hanno un'ampia variabilità, pari a 13°C; sebbene per la metà di questi valori si riduce a 4°C.

L'analisi spaziale ricavata dai transetti evidenzia il fenomeno del SUHI nella città di Brescia.

In entrambi i transetti estivi si osserva un chiaro abbassamento delle LST in corrispondenza delle aree vegetate (N, A e V) rispetto alle aree costruite (C), indipendentemente dalla distribuzione di queste ultime, siano queste periferiche o centrali rispetto alla città. Nel transetto nord-sud si osservano diminuzioni delle LST di diversi gradi in corrispondenza di alcune aree agricole a nord degli Spedali Civili di Brescia, del Colle Cidneo e delle aree agricole a sud della città. Un picco di LST, nella seconda metà del transetto, è dovuto alla presenza di un campo da calcio in erba sintetica. Anche nel transetto ovest-est dopo un'iniziale porzione caratterizzata da

complessi industriali, si osserva un primo abbassamento delle temperature in corrispondenza dell'area agricola Caffaro, caratterizzata anche dalla presenza del Fiume Mella. Analogamente le temperature diminuiscono passando attraverso l'area alberata del Cimitero Vantiniano, per poi proseguire più o meno costanti fino al quartiere residenziale dei Ronchi, posto ai piedi del Monte Maddalena. Da qui in poi si osserva una forte e costante diminuzione fino alla fine del transetto, nelle aree boscate della Val Carobbio.

Nei giorni invernali la temperatura si mostra pressoché costante per tutta la lunghezza di entrambi i transetti. Non vi è chiara differenza di temperature tra le varie categorie di uso del suolo. Le zone in cui la temperatura registrata è pari a zero sono da considerarsi superficiali per la gran parte innevate. Nell'ultimo tratto orientale del transetto ovest-est, in corrispondenza delle pendici del Monte Maddalena, si può osservare una tendenza di aumento delle temperature, inversa rispetto al raffreddamento osservato nei mesi estivi, che evidenzia un probabile fenomeno di inversione termica.

Le 7 GI considerate mostrano diverse capacità di "raffreddare" le aree circostanti, sia dal punto di vista della diminuzione di temperature, sia dal punto di vista della distanza massima dove è possibile osservare questo tipo di raffreddamento. L'area agricola Caffaro, la GI più grande tra quelle considerate (circa 100 ha), sebbene non sia quella con la temperatura media più bassa, presenta il maggiore effetto UCI, che si estende per circa 200 m nelle aree circostanti, con capacità di mitigazione superiore ai 3°C. Le altre GI hanno un raggio di influenza dell'effetto UCI che varia tra i 120 e i 80 metri e la capacità di mitigazione che varia tra 1 e 2°C.

Sulla base delle precedenti considerazioni appare comunque evidente come la regolazione della temperatura sia marcata nel periodo estivo, coincidente con il periodo di attività vegetativa delle piante presenti nelle aree verdi, mentre durante la stagione invernale, coincidente con il riposo vegetativo, l'effetto è fortemente attenuato.

Sebbene il Comune di Brescia è densamente costruito e non è possibile delimitare nettamente i confini dell'isola di calore della città, se non nella porzione orientale della città in corrispondenza dei versanti boscati del Monte Maddalena. Grazie all'azione di regolazione delle piante è tuttavia possibile osservare importanti diminuzioni della temperatura in corrispondenza delle aree agricole periferiche. Tali aree, in condizioni topografiche particolari, come ad esempio la vicinanza a corsi d'acqua, possono avere un effetto di regolazione molto marcata, sia in termini di diminuzione di temperatura, sia di influenza rispetto alle aree circostanti. Questi effetti sono comunque evidenti anche per le aree agricole cittadine e per quelle verdi urbane, che indipendentemente dalla loro estensione hanno un raggio di influenza che si estende anche alle aree costruite circostanti, mentre la capacità di mitigazio-

ne si riduce in genere proporzionalmente alle dimensioni dell'area stessa, ma anche all'eterogeneità delle aree che la circondano.

*Ringraziamenti* – Si desidera ringraziare i colleghi del Comune di Brescia – Settore Verde Parchi e Reticolo Idrico per aver condiviso e messo a disposizione i dati sulle aree verdi comunali indispensabili per la realizzazione di questo lavoro.

## BIBLIOGRAFIA

- ANDERSSON E., BARTHEL S., BORGSTRÖM S., COLDING J., ELMQVIST T., FOLKE C. & GREN, Å., 2014. Reconnecting cities to the biosphere: stewardship of green infrastructure and urban ecosystem services. *Ambio*, 43(4), 445-453.
- ARMIRAGLIO S., CACCIANIGA M., MICHELI M., A. CAPRETTI, 2009. Analisi preliminari sulla dinamica della vegetazione nel SIN Brescia-Caffaro. In: Atti del Convegno “Le foreste di pianura: dinamica e ripristino ambientale”, Società Italiana di Scienza della Vegetazione Natura Bresciana, 36:263-267.
- BOWLER D. E., BUYUNG-ALI L., KNIGHT T. M. & PULLIN A. S., 2010. Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and urban planning*, 97(3), 147-155.
- BRZOSKA P., & SPÄGE A., 2020. From City-to Site-Dimension: Assessing the Urban Ecosystem Services of Different Types of Green Infrastructure. *Land*, 9(5), 150.
- EUROPEAN COMMISSION, 2013. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: Green Infrastructure - Enhancing Europe's Natural Capital. Publications Office of the European Union, Brussels.
- GÓMEZ-BAGGETHUN E. & BARTON D. N. 2013. Classifying and valuing ecosystem services for urban planning. *Ecological economics*, 86, 235-245.
- GRIMMOND S. U., 2007. Urbanization and global environmental change: local effects of urban warming. *Geographical Journal*, 173(1), 83-88.
- HEINL M., HAMMERLE A., TAPPEINER U. & LEITINGER G., 2015. Determinants of urban-rural land surface temperature differences—A landscape scale perspective. *Landscape and Urban Planning*, 134, 33-42.
- HOWARD L. 1833. The climate of London: deduced from meteorological observations made in the metropolis and at various places around it (Vol. 3). Harvey and Darton, J. and A. Arch, Longman, Hatchard, S. Highley [and] R. Hunter.
- HU L. & BRUNSELL N. A., 2013. The impact of temporal aggregation of land surface temperature data for surface urban heat island (SUHI) monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 134, 162-174.
- ISTAT, 2020. Bilancio demografico anno 2020. Comune di Brescia. Aggiornato al 21/10/2020.
- ISTAT, 2018. Verde Urbano. Aggiornato al 21/10/2020.
- KONG F., YIN H., JAMES P., HUTYRA L. R. & HE H. S., 2014. Effects of spatial pattern of greenspace on urban cooling in a large metropolitan area of eastern China. *Landscape and Urban Planning*, 128, 35-47.
- KOPPEN W., 1936. Das geographische System der Klimate, in: Handbuch der Klimatologie. Koppen, W. and Geiger, G., 1. C. Gebr, Borntraeger, p. 1–44.
- MARANDO F., SALVATORI E., SEBASTIANI A., FUSARO L. & MANES F., 2019. Regulating ecosystem services and green infrastructure: assessment of urban heat island effect mitigation in the municipality of Rome, Italy. *Ecological Modelling*, 392, 92-102.
- MORABITO M., CRISCI A., GEORGIADES T., ORLANDINI S., MUNAFÒ M., CONGEDO L., ... & ZAZZI M., 2018. Urban imperviousness effects on summer surface temperatures nearby residential buildings in different urban zones of Parma. *Remote Sensing*, 10(1), 26.
- NAUMANN S., MCKENNA D., KAPHENGST T., PIETERSE M., RAYMENT M., 2011. Design, implementation and cost elements of Green Infrastructure projects. Final report to the European Commission, DG Environment, Contract no. 070307/2010/577182/ETU/F.1, Ecologic institute and GHK Consulting.
- NAZIONI UNITE, 2020. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420); 2019, United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division: New York, NY, USA.
- OKE T. R. 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1-24.
- PARASTATIDIS D., MITRAKA Z., CHRYSOULAKIS N. & ABRAMS M., 2017. Online global land surface temperature estimation from Landsat. *Remote sensing*, 9(12), 1208.
- PHELAN P. E., KALOUSH K., MINER M., GOLDEN J., PHELAN B., SILVA III H. & TAYLOR R. A., 2015. Urban heat island: mechanisms, implications, and possible remedies. *Annual Review of Environment and Resources*, 40, 285-307.
- 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.
- XU H., DING F. & WEN X., 2009. Urban expansion and heat island dynamics in the Quanzhou region, China. *IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, 2(2), 74-79.
- YU Z. W., GUO Q. H. & SUN R. H., 2015. Impacts of urban cooling effect based on landscape scale: a review. *Ying yong sheng tai xue bao = The journal of applied ecology*, 26(2), 636-642.
- YU Z., GUO X., JØRGENSEN G. & VEJRE H., 2017. How can urban green spaces be planned for climate adaptation in subtropical cities?. *Ecological Indicators*, 82, 152-162.
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY, 2020, <https://www.usgs.gov/>