

Analisi delle Zone Climatiche Locali e dell'Isola Urbana di Calore mediante tecniche geomatiche e dati PRISMA: il progetto LCZ-UHI-GEO

Alberto Vavassori¹, Maria Antonia Brovelli¹, Giovanna Venuti¹, Matej Zgela¹,
Patrizia Sacco², Deodato Tapete² e Pham Thi Mai Thy³

¹ Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Politecnico di Milano, (alberto.vavassori, maria.brovelli, giovanna.venuti, matej.zgela)@polimi.it

² Agenzia Spaziale Italiana (ASI), (patrizia.sacco, deodato.tapete)@asi.it

³ Ho Chi Minh City Space Technology Application Center (STAC), Vietnam National Space Center (VNSC), Vietnam Academy of Science and Technology (VAST), ptmthy@vnsc.org.vn

Abstract. Il sistema delle zone climatiche locali (*Local Climate Zone*, LCZ) è ampiamente utilizzato negli studi di climatologia urbana per quantificare l'intensità dell'isola di calore. Per la produzione di mappe di LCZ vengono utilizzati dati geospaziali e satellitari, tra cui, principalmente, immagini multispettrali. Recentemente, il progetto LCZ-ODC ha investigato i potenziali benefici delle immagini iperspettrali della missione PRISMA per la classificazione in LCZ, proponendo anche una procedura di mappatura basata sull'utilizzo combinato di dati PRISMA e strati informativi geografici descrittivi delle caratteristiche morfologiche urbane. Inoltre, le mappe prodotte sono state utilizzate per un'analisi di correlazione con dati di temperatura dell'aria, permettendo di quantificare l'entità dell'isola di calore. I risultati ottenuti mostrano che l'utilizzo delle immagini PRISMA permette di ottenere un miglioramento nell'accuratezza di classificazione sia rispetto alle immagini Sentinel-2 sia rispetto allo strumento LCZ Generator. Visti i risultati promettenti, ha preso avvio il progetto Italia – Vietnam LCZ-UHI-GEO, con l'obiettivo di replicare le metodologie sviluppate in LCZ-ODC e di testarle, anche in modo comparativo, sulle principali città italiane e vietnamite. Sfruttando la collaborazione bilaterale tra centri di ricerca italiani e vietnamiti, il progetto LCZ-UHI-GEO permetterà di approfondire ed espandere le metodologie implementate e valutarne la scalabilità a contesti urbani con caratteristiche climatiche e morfologiche diverse.

Parole chiave: Isola di calore urbana, zone climatiche locali, immagini satellitari iperspettrali, PRISMA.

1 Introduzione

Uno degli obiettivi di sviluppo sostenibile (*Sustainable Development Goal*, SDG) delle Nazioni Unite è quello di rendere le città inclusive, sicure, resilienti e sostenibili (SDG 11). Tuttavia, l'antropizzazione degli ambienti naturali e la crescente frequenza, durata e intensità delle ondate di calore stanno intensificando sempre di più il fenomeno dell'isola di calore urbana (*Urban Heat Island*, UHI). Questo fenomeno si manifesta quando la temperatura dell'aria nelle aree urbane e densamente costruite è maggiore di quella delle aree periurbane e rurali circostanti, con effetti negativi sulla salute dei

cittadini, sugli ecosistemi urbani e sulla domanda di energia nella stagione estiva. Per questo motivo la comunità scientifica ha sviluppato modelli fisici e concettuali in grado di misurare l'intensità del fenomeno e individuare le aree urbane più predisposte alla sua formazione.

In questo contesto, il modello delle zone climatiche locali (*Local Climate Zone*, LCZ), formalizzato nel 2012, è diventato un riferimento per lo studio dell'isola di calore urbana e, più in generale, per le ricerche sulla climatologia urbana [1]. Questo modello distingue 17 classi, di cui 10 "costruite" (*built-up type*) e 7 "non costruite" o "naturali" (*land cover type*), in base alle caratteristiche morfologiche dell'area urbana e alla copertura del suolo. Ciascuna classe è caratterizzata da proprietà geometriche e fisiche ben definite, che costituiscono i cosiddetti parametri di morfologia urbana (*Urban Canopy Parameter*, UCP). Per la mappatura delle LCZ sono stati proposti e implementati diversi metodi basati sull'utilizzo di immagini satellitari e di dati geospaziali, come database geo-topografici, mappe di copertura del suolo e immagini fotografiche ottenute in situ [2]. Riguardo alle immagini satellitari, i dati più utilizzati in letteratura comprendono le immagini multispettrali Landsat e Sentinel-2 e le immagini SAR (*Synthetic Aperture Radar*) Sentinel-1. Alcuni studi hanno dimostrato che i dati satellitari iperspettrali possono essere utilizzati per migliorare l'accuratezza di classificazione delle LCZ, grazie ad una descrizione più dettagliata delle caratteristiche di riflettività delle superfici [3].

Recentemente, nell'ambito del progetto nazionale "Local Climate Zones in Open Data Cube" (LCZ-ODC), svolto in collaborazione tra il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale del Politecnico di Milano (POLIMI) e l'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) e parte del programma ASI "Innovation for Downstream Preparation for Science" (I4DP_SCIENCE), sono stati dimostrati i benefici derivanti dall'utilizzo di immagini iperspettrali della missione PRISMA per la mappatura delle LCZ. La metodologia e gli algoritmi sviluppati costituiscono il prototipo di un applicativo pre-operativo che consente la generazione sistematica di mappe di LCZ a supporto di analisi microclimatiche a cadenza regolare a scala urbana. Come tale, questo prototipo dimostra la fattibilità di una nuova applicazione geospaziale di *downstream* dei dati PRISMA in ambito urbano e per le isole di calore.

A partire dai risultati ottenuti nel progetto LCZ-ODC, ha preso avvio il progetto LCZ-UHI-GEO, finanziato dal Ministero degli Affari Esteri e della Cooperazione Internazionale (MAECI) e dal *Department of International Cooperation of the Ministry of Science and Technology of Vietnam* (MOST) del Vietnam e che vede la partecipazione di POLIMI, ASI e del *Vietnam National Space Center* (VNSC). LCZ-UHI-GEO ha l'obiettivo di replicare ed espandere le metodologie sviluppate in LCZ-ODC e di testarle, in modo anche comparativo, sulle principali città italiane e vietnamite. Il trasferimento e condivisione dell'esperienza italiana al contesto vietnamita faciliteranno l'adozione dei dati PRISMA e della metodologia LCZ-ODC anche da parte della comunità scientifica vietnamita. Potenzialmente, i risultati che si conseguiranno apriranno a un analogo sviluppo di applicazioni *downstream* per le isole urbane di calore in Vietnam, mettendo così a frutto la cooperazione internazionale fra enti accademici e di ricerca italiani e vietnamiti.

2 Metodologia del progetto LCZ-ODC e risultati ottenuti

Nell'ambito del progetto LCZ-ODC è stata sviluppata una metodologia per la produzione di mappe di LCZ e l'analisi della correlazione con dati di temperatura dell'aria misurati in situ. Il caso di studio considerato nel progetto è la Città Metropolitana di Milano, in Lombardia. Oltre alle immagini PRISMA – accessibili gratuitamente per scopi scientifici e di ricerca mediante stipula di licenza d'uso con ASI, sono stati utilizzati dati aperti (*open*), a copertura nazionale (come il database geotopografico), europea o globale. L'utilizzo di dati aperti e software *free* e *open source*, quali QGIS e Python, permette una facile replicabilità della procedura proposta ad altri casi di studio. Il codice sorgente è disponibile su GitHub [4, 5].

In questa sezione viene descritto il metodo impiegato e vengono illustrati sinteticamente i risultati ottenuti.

2.1 Metodo per la mappatura delle LCZ

Il metodo di mappatura delle LCZ consiste in una procedura ibrida basata sull'utilizzo di immagini satellitari PRISMA e Sentinel-2 e dati geospaziali ancillari per la descrizione delle caratteristiche morfologiche urbane. L'integrazione di immagini satellitari e dati geospaziali ancillari riflette la natura delle LCZ, che dipendono sia dalla copertura del suolo che dalla morfologia urbana. La procedura è schematizzata in Fig. 1 e prevede, in sintesi, i seguenti passaggi, descritti più dettagliatamente in [6].

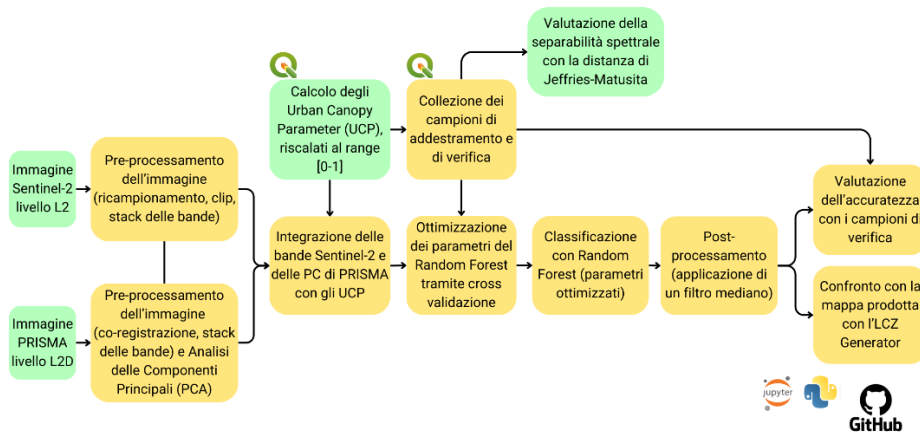


Fig. 1 Procedura per la generazione di mappe di LCZ sviluppata nel progetto LCZ-ODC.

- Pre-processamento delle immagini satellitari. L'immagine PRISMA viene co-registrata con l'immagine Sentinel-2 utilizzando il pacchetto Python GeFolki. Viene inoltre applicata un'Analisi delle Componenti Principali (*Principal Component Analysis*, PCA) all'immagine PRISMA.

- Calcolo degli UCP, in particolare fattore di vista del cielo, frazione di superficie impermeabile, frazione di superficie edificata, altezza della copertura arborea e altezza degli edifici. Gli UCP vengono normalizzati e riportati al range [0-1] in modo che siano confrontabili con i valori di riflettanza delle bande satellitari.
- Collezione di campioni di addestramento e di verifica. La distribuzione spaziale dei campioni di addestramento viene adattata per tener conto delle variazioni stagionali della vegetazione e dell'estensione spaziale delle immagini PRISMA nell'area di interesse. Viene inoltre valutata la separabilità spettrale delle LCZ tramite il calcolo della distanza di Jeffries-Matusita.
- Classificazione in LCZ attraverso l'algoritmo Random Forest. Il set di feature fornite in ingresso al classificatore è costituito dagli UCP e dalle bande satellitari di Sentinel-2 o dalle prime 10 Componenti Principali di PRISMA. Inoltre, i parametri del classificatore vengono ottimizzati tramite cross-validazione.
- Post-processamento della mappa classificata, attraverso l'applicazione di un filtro a mediana mobile di dimensione 3×3 pixel.
- Valutazione dell'accuratezza di classificazione tramite i campioni di verifica. Viene calcolata la matrice di confusione e alcune statistiche, tra cui accuratezza globale e, per ciascuna classe, accuratezza del produttore, accuratezza dell'utente e indice F1.

L'approccio descritto è stato utilizzato per produrre mappe di LCZ multi-temporali per la Città Metropolitana di Milano. Sono state generate mappe mensili da febbraio ad agosto 2023 con risoluzione di 30 m (da PRISMA) e 20 m (da Sentinel-2). Mentre le immagini Sentinel-2 sono state selezionate fra quelle acquisite con tempo di rivisitazione pari a 5 giorni secondo la programmazione predefinita della missione e contenute nell'archivio Copernicus dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA), nel caso di PRISMA il dataset utilizzato ha capitalizzato sia le immagini di archivio esistenti nel catalogo ASI sia acquisizioni appositamente programmate in collaborazione con ASI durante il progetto LCZ-ODC.

Un esempio di mappa di LCZ generata sulla Città Metropolitana di Milano a partire da un'immagine PRISMA relativa al mese di giugno 2023 è rappresentata in Fig. 2.

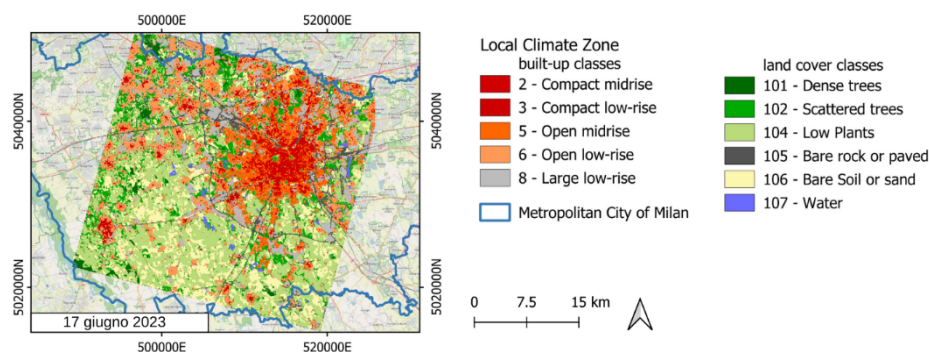


Fig. 2 Mappa di *Local Climate Zone* per la Città Metropolitana di Milano, generata da un'immagine iperspettrale PRISMA nell'ambito del progetto LCZ-ODC.

Le classificazioni ottenute utilizzando le prime 10 Componenti Principali di PRISMA sono risultate più accurate delle corrispondenti classificazioni ottenute utilizzando le immagini Sentinel-2, grazie al miglioramento della separabilità spettrale delle classi offerto dal dato iperspettrale. Considerando le mappe di febbraio e giugno, si è registrato un incremento medio dell'indice F1 pari al 13% per le classi costruite e al 4% per le classi naturali.

L'integrazione degli UCP con le bande satellitari ha portato un ulteriore miglioramento dell'accuratezza di classificazione, contribuendo a ridurre la confusione tra le LCZ costruite. In particolare, è stato ottenuto un incremento medio nell'indice F1 pari all'8% per le classi costruite e al 4% per le classi naturali usando PRISMA, e pari al 16% per le classi costruite e al 5% per le classi naturali usando Sentinel-2. Il maggiore incremento di accuratezza che si verifica nella classificazione delle immagini Sentinel-2 indica che il dato iperspettrale è in grado di compensare, almeno parzialmente, all'assenza di parametri aggiuntivi che descrivono la morfologia urbana, nonostante la minore risoluzione spaziale delle immagini PRISMA.

Infine, le mappe LCZ ottenute con l'approccio proposto sono state confrontate con le mappe generate utilizzando lo strumento LCZ Generator [7], che può essere attualmente considerato lo stato dell'arte. Il confronto delle mappe ha mostrato una migliore performance della procedura implementata nell'ambito del progetto LCZ-ODC, con un aumento medio dell'indice F1 pari al 13% per le classi costruite e al 21% per le classi naturali per le mappe ottenute dalla classificazione delle immagini PRISMA rispetto a quelle prodotte dall'LCZ Generator.

2.2 Analisi della temperatura dell'aria

Le mappe di LCZ ottenute sono state utilizzate per un'analisi di correlazione con i dati di temperatura dell'aria rilevati dalle stazioni ARPA (Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente) Lombardia. A ciascuna stazione situata nell'area di interesse è stata assegnata una LCZ in base alla distribuzione delle diverse classi all'interno di un raggio di 200 m dalla stazione. In particolare, a ciascuna stazione è stata assegnata come classe principale la LCZ che occupa almeno il 55% del buffer e come classe secondaria la LCZ che occupa almeno il 20% del buffer.

Successivamente, è stata analizzata la distribuzione della temperatura registrata da ciascuna stazione, distinguendo tra ore diurne e ore notturne. Le ore diurne corrispondono alle tre ore intorno all'istante in cui si registra la massima temperatura giornaliera, mentre le ore notturne comprendono un intervallo tra tre e cinque ore dopo il tramonto, quando l'isola di calore raggiunge la massima intensità. L'analisi è stata condotta mensilmente da febbraio ad agosto 2023, coerentemente con le mappe di LCZ prodotte.

La significatività delle differenze nella distribuzione di temperatura, osservate dalla rappresentazione tramite boxplot, è stata successivamente indagata tramite test statistici. In particolare, è stato adottato il test di Kruskal-Wallis per valutare la significatività statistica delle differenze di temperatura misurata dalle stazioni e il test post-hoc di Dunn per individuare tra quali coppie di stazioni si verificano differenze di temperatura statisticamente significative. Il test di Kruskal-Wallis è stato selezionato in

alternativa alla Analisi della Varianza (ANOVA), data la non-normalità della distribuzione di temperatura.

Considerando i mesi di febbraio e giugno, rappresentativi rispettivamente della stagione invernale ed estiva, sono state osservate differenze significative nella distribuzione di temperatura tra le stazioni sia per le ore diurne che per quelle notturne. Si evidenzia in particolare una differenza più marcata durante le ore notturne tra le stazioni urbane e quelle periurbane, corrispondenti a LCZ edificate, e tra le stazioni urbane e quelle situate in aree naturali, corrispondenti a LCZ non edificate. Inoltre, la differenza tra le temperature mediane registrate nelle ore notturne tra la classe *Compact Mid-Rise* (stazione di Milano v.Brera) e la classe *Low Plants* (stazione di Pogliano Milanese) è risultata pari a 4.71°C per febbraio e 2.54°C per giugno, valori che indicano l'intensità massima dell'isola di calore. I risultati ottenuti sono in accordo con la letteratura scientifica e dimostrano la maggiore intensità dell'isola di calore urbana durante le ore notturne, in particolare nelle zone più interne della città di Milano.

3 Il progetto LCZ-UHI-GEO

L'utilizzo di tecnologie e dati liberi e aperti permette di replicare le analisi effettuate nell'ambito del progetto LCZ-ODC ad altri casi di studio. A partire da questo presupposto, ha recentemente preso avvio il progetto LCZ-UHI-GEO, che ha come principale obiettivo quello di verificare la scalabilità della metodologia del progetto LCZ-ODC ed espandere le analisi includendo, tra i casi di studio, anche due centri urbani del Vietnam con estensione spaziale e caratteristiche morfologiche e climatiche molto diverse da quelle della città di Milano. Il progetto, avviato a gennaio 2024, ha una durata prevista di tre anni e vede la partecipazione di POLIMI, ASI e VNSC. Gli obiettivi fissati per il primo anno comprendono:

- la condivisione tra i partner del progetto dei software sviluppati e dei risultati ottenuti nel progetto LCZ-ODC per la generazione delle mappe di LCZ e l'analisi di correlazione con la temperatura dell'aria;
- l'approfondimento dello studio delle metodologie esistenti per l'analisi di dati satellitari iperspettrali e per le applicazioni di classificazione in LCZ e studio della temperatura dell'aria;
- la definizione delle aree di test e la raccolta dei dati necessari per la mappatura delle LCZ.

Per quanto riguarda la definizione dei casi di studio, il progetto si sta focalizzando su due aree di test in Italia e due in Vietnam. In particolare, sono state selezionate le città di Milano e di Roma come casi di studio italiani. La scelta di Milano è legata alla volontà di dare continuità alle analisi condotte nell'ambito del progetto LCZ-ODC, permettendo di monitorare l'evoluzione temporale delle mappe di LCZ e di approfondire l'analisi della temperatura dell'aria, con confronti mensili, stagionali e annuali. Roma è stata selezionata sia per le sue peculiari proprietà ambientali e urbane che per motivazioni di opportunità nell'ambito della cooperazione internazionale Italia-Vietnam. Da un punto di vista della struttura urbana, rispetto a Milano, oltre alla vicinanza del mare e l'orografia più complessa, Roma presenta una differente densità e distribuzione dei quartieri residenziali e delle aree verdi pubbliche. I primi riflettono

non solo le diverse fasi costruttive che si sono alternate, quasi senza soluzione di continuità, nei diversi secoli, con l'ultima grande espansione avvenuta nel periodo del Dopoguerra, ma anche la conformazione del fiume Tevere e delle aree alluvionali e di rilievo. Le aree pubbliche verdi includono non solo aree ricreative alberate di piccola dimensione nel centro storico e nei quartieri più storici, ma anche grandi parchi, in origine privati e legati a ville patrizie, oggi ampi spazi pubblici extra-murari (es. Parco di Villa Borghese, Parco di Villa Doria Pamphilj, Parco di Villa Ada, Parco di Villa Torlonia). A questi si aggiungono parchi archeologici e naturalistici (es. Parco degli Acquadotti e Parco della Caffarella a sud, Parco regionale urbano del Pineto a nord-ovest). Ne consegue quindi una distribuzione di pattern di "aree fresche" rispetto alle aree di UHI, che rende la città un ottimo caso studio. Infine, nella collaborazione bilaterale, Roma si appaia ad Hanoi al fine di ricomprendere le due capitali.

Riguardo le città vietnamite, sono state selezionate Hanoi e Ho Chi Minh City, le due città più popolate del Vietnam, caratterizzate da notevoli differenze morfologiche e climatiche rispetto alle città italiane. La morfologia urbana delle città vietnamite si distingue infatti per un tessuto urbano molto eterogeneo e dunque per un numero più elevato di LCZ rispetto a quelle identificabili nelle città di Milano e Roma, il che offre una base di confronto interessante per l'applicazione della metodologia di studio. Il fenomeno dell'UHI sta diventando sempre più evidente sia ad Hanoi che a Ho Chi Minh, a causa della rapida urbanizzazione, dell'elevata densità di popolazione e delle significative riduzioni degli spazi verdi. Ad Hanoi, la temperatura media superficiale è aumentata sensibilmente, passando da 26,4°C nel 1996 a 42,9°C nel 2016 [8]. Allo stesso modo, Ho Chi Minh City ha registrato un aumento da 27,1°C a 30,1°C [9] nello stesso periodo. Questi cambiamenti sono in gran parte attribuibili a fattori come la proliferazione di veicoli alimentati da combustibili fossili, che contribuiscono all'aumento dei livelli di calore nelle aree urbane [10]. Al contrario, le città italiane come Roma e Milano mostrano un effetto UHI differente ma altrettanto preoccupante. L'ampio uso di superfici impermeabili e l'elevato consumo energetico sia negli edifici residenziali che in quelli commerciali aggravano ulteriormente le temperature locali. Queste considerazioni mettono anche in luce la complessa interazione tra design urbano, infrastrutture e fattori ambientali nel determinare l'UHI in diversi contesti urbani.

I dati geospaziali utilizzati per il calcolo degli UCP nell'ambito del progetto LCZ-ODC possono essere impiegati anche per la città di Roma, considerando che si tratta di dataset a copertura nazionale, europea o globale. Per le città del Vietnam verranno invece impiegati dati a copertura globale o, se disponibili, dati locali più dettagliati. Per l'analisi della temperatura dell'aria, verranno utilizzati dati provenienti da fonti ufficiali, quali le agenzie regionali dedicate (ad esempio ARPA Lombardia e ARPA Lazio per i casi di studio italiani), e possibilmente dati provenienti da reti amatoriali.

Infine, per la classificazione in LCZ delle aree di studio, verranno utilizzate immagini PRISMA multi-temporali acquisite ad-hoc nell'ambito del progetto LCZ-UHI-GEO, in modo da mappare l'evoluzione stagionale delle mappe di LCZ in tutte le aree di test. Il piano di acquisizione è già in corso su tutte e quattro le città per la costruzione di dataset che includano, al netto della copertura nuvolosa, almeno un'immagine utile per stagione. Per ciascuna acquisizione PRISMA verranno inoltre

utilizzate le corrispondenti immagini Sentinel-2 più vicine nel tempo, in modo da effettuare la co-registrazione dell'immagine PRISMA e per eventuali confronti finali tra le classificazioni risultanti.

4 Conclusioni

L'articolo descrive gli obiettivi, le prime attività previste e i risultati attesi nell'ambito del progetto LCZ-UHI-GEO, recentemente avviato in collaborazione tra POLIMI, ASI e VNSC. LCZ-UHI-GEO si identifica come sviluppo, in chiave internazionale e di cooperazione bilaterale, del progetto LCZ-ODC, recentemente conclusosi, il quale ha prodotto risultati promettenti per la classificazione delle LCZ proponendo l'integrazione dei dati iperspettrali della missione PRISMA e diverse fonti di dati geospaziali per il calcolo dei parametri di morfologia urbana.

Oltre a replicare ed espandere le metodologie proposte per la classificazione in LCZ e lo studio dell'isola di calore urbana, valutandone la scalabilità a contesti urbani differenti, LCZ-UHI-GEO rappresenta un'opportunità per rafforzare la collaborazione tra gruppi di ricerca internazionali dei paesi Italia e Vietnam, attraverso la condivisione di conoscenze e competenze tecniche diverse. Inoltre, si propone anche come progetto di divulgazione e disseminazione attraverso l'organizzazione di workshop ed eventi formativi rivolti agli stakeholder del progetto. Questo tipo di attività permetterà anche di aumentare la consapevolezza rispetto al problema dell'isola di calore urbana, presentando gli strumenti che possono essere utilizzati per attuare strategie di mitigazione.

5 Ringraziamenti

Questo articolo è stato scritto nell'ambito del progetto LCZ-UHI-GEO (ID PGR12284), finanziato dal Ministero degli Affari Esteri e della Cooperazione Internazionale (MAECI) e dal *Department of International Cooperation of the Ministry of Science and Technology of Vietnam* (MOST) del Vietnam. Il progetto LCZ-ODC, di cui sono mostrati la metodologia e alcuni risultati, è stato finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana (accordo n. 2022-30-HH.0) nell'ambito del programma "Innovation for Downstream Preparation for Science" (I4DP_SCIENCE).

Riferimenti bibliografici

1. I. D. Stewart, I. D., Oke, T. R.: Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93 (12), 1879–1900 (2012).
2. Aslam, A., Rana I. A.: The use of local climate zones in the urban environment: A systematic review of data sources, methods, and themes. *Urban Climate* 42, 101120 (2022).
3. Vavassori, A., Giuliani, G., Brovelli, M. A.: Mapping Local Climate Zones in Lausanne (Switzerland) with Sentinel-2 and PRISMA imagery: comparison of classification performance using different band combinations and building height data. *International Journal of Digital Earth* 16 (2), 4790-4810 (2023).

4. GitHub Repository of the LCZ-ODC project, <https://github.com/gisgeolab/LCZ-ODC>, ultimo accesso 2024/09/27.
5. Capizzi, E., Vavassori, A., & Cedeno, R. (2024). Processing, co-registration, and classification in LCZ of PRISMA and Sentinel-2 imagery (v1.0). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.13884806>
6. Vavassori, A., Oxoli, D., Venuti, G., Brovelli, M. A., Siciliani de Cumis, M., Sacco, P., Tapete, D.: A combined Remote Sensing and GIS-based method for Local Climate Zone mapping using PRISMA and Sentinel-2 imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 131, 103944 (2024).
7. Demuzere, M., Kittner, J., Bechtel, B.: LCZ Generator: A Web Application to Create Local Climate Zone Maps. *Frontiers in Environmental Science* 9, 637455 (2021).
8. Tien Nguyen, Thanh, Landsat Time-series Images-based Urban Heat Island Analysis: The Effects of Changes in Vegetation and Built-up Land on Land Surface Temperature in Summer in the Hanoi Metropolitan Area, Vietnam. In *Environment and Natural Resources Journal* 18 (2), 177–190 (2020).
9. Son, Nguyen-Thanh et al. Assessment of urbanization and urban heat islands in Ho Chi Minh City, Vietnam using Landsat data. In *Sustainable Cities and Society* 30, 150–161 (2017).
10. Doan, Q., Kusaka, Hiroyuki and Nguyen, Truong M. Roles of past, present, and future land use and anthropogenic heat release changes on urban heat island effects in Hanoi, Vietnam: Numerical experiments with a regional climate model. In *Sustainable Cities and Society* 47 (13), 101479 (2019).

