Approcci integrati di Osservazione della Terra per il monitoraggio della qualità dell'aria e del comfort termico in ambiente urbano

Alberto Vavassori[1], Vasil Yordanov[1], Sadra Zahed Kachaee[1], Claudia Isabela Saud Mino[1], Matej Žgela[1], Afshin Moazzam[1], Maria Antonia Brovelli[1]

[1] Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Politecnico di Milano,
(alberto.vavassori, vasil.yordanov, matej.zgela, afshin.moazzam, maria.brovelli)@polimi.it,
(sadra.zahed, claudiaisabela.saud)@mail.polimi.it

Abstract. Gli ambienti urbani sono sempre più esposti all'inquinamento atmosferico e agli effetti dell'isola di calore urbana, il che rende necessari approcci di monitoraggio integrati. Il presente lavoro illustra alcune attività svolte nell'ambito del progetto Space It Up! per lo studio della qualità dell'aria e del comfort termico, che combinano dati di Osservazione della Terra e metodi di machine learning.

Parole chiave: Osservazione della Terra, Qualità dell'aria, Isola di calore urbana, Machine learning.

1 Introduzione

Gli ambienti urbani sono sempre più esposti a molteplici fattori di pressione ambientale, tra loro interagenti, che richiedono approcci di monitoraggio integrati in grado di combinare informazioni atmosferiche e climatiche georeferenziate. Nell'ambito del progetto "Space It Up!", finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) e dal Ministero dell'Università e della Ricerca (MUR), sono state sviluppate specifiche attività di ricerca per affrontare tali sfide mediante tecnologie avanzate di Osservazione della Terra (OT) e metodi basati sui dati (*data-driven*).

Questo lavoro presenta le attività svolte nell'ambito dei Task 7.4.1 e 7.4.2, dedicati rispettivamente al monitoraggio della qualità dell'aria e dell'isola di calore urbana e del comfort termico. Tali ambiti sono analizzati attraverso linee di ricerca complementari che comprendono l'analisi di dati satellitari di OT, l'integrazione di dati geospaziali multisorgente e la modellazione dell'ambiente urbano ad alta risoluzione. Le attività relative alla qualità dell'aria affrontano due aspetti complementari: la stima delle concentrazioni di inquinanti prossime al suolo mediante l'integrazione di dati satellitari, meteorologici e misure in situ, e lo screening del metano attraverso osservazioni satellitari a diversa risoluzione spaziale e frequenza di rivisitazione. Quelle relative al comfort termico si concentrano invece sulla caratterizzazione e sulla modellazione dell'ambiente termico urbano in termini di temperatura dell'aria e delle superfici.

In particolare, nell'ambito della qualità dell'aria sono presentati due contributi complementari. Il primo propone mappe bivariate derivate da Sentinel-5P per lo screening del metano, combinando la frequenza dei superamenti di una soglia con la disponibilità di osservazioni valide e confrontando tali informazioni con gli eventi di pennacchio registrati da Carbon Mapper. Il secondo sviluppa una procedura riproducibile per integrare misure al suolo, rianalisi meteorologiche e osservazioni satellitari a scala europea, applicandola a Milano per la stima delle concentrazioni giornaliere di SO_2 con metodi di machine learning e modelli fondazionali (*foundational models*) per serie temporali.

La ricerca sul clima urbano comprende invece la modellazione della temperatura dell'aria ad alta risoluzione e la mappatura delle zone climatiche locali (*Local Climate Zones*, LCZ), finalizzate all'analisi della variabilità spaziale dell'isola di calore urbana e della sua relazione con la morfologia urbana. Un'ulteriore analisi della composizione delle superfici mediante dati iperspettrali permette di approfondire il ruolo dei materiali urbani nella distribuzione della temperatura superficiale.

Pur essendo sviluppate in modo indipendente, queste linee di ricerca contribuiscono nel loro insieme a una comprensione più completa dei processi ambientali urbani. Nelle sezioni seguenti sono illustrate le principali attività sviluppate nei due ambiti, delineandone l'approccio metodologico e il ruolo all'interno di un più ampio quadro di monitoraggio ambientale integrato.

2 Monitoraggio della qualità dell'aria

2.1 Screening del metano mediante osservazioni satellitari a scale differenti

Il monitoraggio satellitare del metano richiede di conciliare l'osservazione sistematica di vaste aree con l'identificazione di singoli pennacchi di emissione. Sentinel-5P/TROPOMI offre una rivisitazione quasi giornaliera, ma una risoluzione spaziale relativamente grossolana; Carbon Mapper fornisce invece osservazioni mirate a una maggiore risoluzione spaziale, senza una copertura altrettanto frequente e sistematica delle stesse località. Inoltre, i due sistemi descrivono grandezze diverse: Sentinel-5P misura la frazione molare del metano mediata sulla colonna atmosferica (XCH_4), mentre Carbon Mapper individua eventi di pennacchio e ne fornisce stime dei tassi di emissione. Per valorizzare tale complementarità è stato sviluppato un approccio di screening bivariato, nel quadro delle attività integrate di OT per il monitoraggio ambientale [1].

Lo studio ha interessato gli Stati Uniti continentali tra gennaio 2023 e dicembre 2025. Mediante Python e Google Earth Engine, le osservazioni di metano Sentinel-5P, corrette per il bias, sono state elaborate in 36 prodotti mensili. Per ogni cella sono stati calcolati sia il numero di osservazioni valide sia il numero di superamenti della soglia di 1.900 ppb, raggruppati negli intervalli 1-6, 7-12, 13-18 e ≥ 19. Le combinazioni sono state rappresentate mediante classi bivariate, distinguendo le celle con osservazioni valide ma senza superamenti da quelle prive di dati. I raster mensili sono stati prodotti

su una griglia di 0,01° e campionati in corrispondenza degli eventi di pennacchio Carbon Mapper osservati nello stesso mese.
Dei 5.261 eventi censiti, 4.869 (92,5%) sono stati associati a una classe bivariata mensile, mentre 392 ricadevano in celle senza dati. Tra gli eventi classificati, 4.704 corrispondevano a celle con almeno un superamento di soglia e 165 a celle senza superamenti (Fig. 1). I primi rappresentavano il 96,5% della somma dei tassi di emissione riportati per gli eventi classificati. L'associazione riscontrata conferma l'utilità delle mappe per contestualizzare le osservazioni ad alta risoluzione e orientare successive indagini, ma non costituisce una misura dell'accuratezza di rilevamento dei pennacchi, né una stima delle emissioni regionali complessive. Tra i limiti principali rientrano il campionamento mirato di Carbon Mapper, la dipendenza dei superamenti dalla disponibilità di osservazioni e la sensibilità della soglia fissa alle variazioni del fondo atmosferico e della stagionalità.

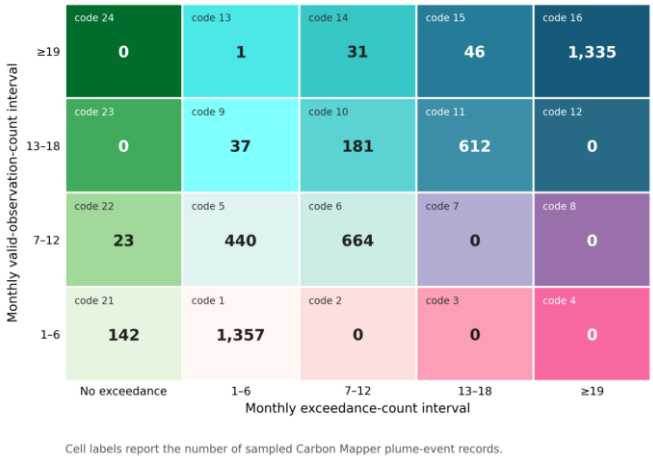

Fig. 1. Numero di eventi di pennacchio Carbon Mapper nelle classi mensili bivariate definite dal numero di osservazioni valide e dai superamenti della soglia in Sentinel-5P. I colori identificano le classi, non l'entità dei conteggi.

2.2 Integrazione multisorgente e modelli temporali per la stima del SO_2 al suolo

Le stazioni di monitoraggio forniscono misure dirette degli inquinanti al suolo, ma presentano una distribuzione territoriale disomogenea; le osservazioni satellitari garantiscono una copertura più estesa, pur descrivendo principalmente la colonna atmosferica e non le concentrazioni prossime alla superficie. Queste ultime dipendono anche dallo spessore dello strato limite planetario, dal trasporto e dal rimescolamento atmosferico. Il contributo è rilevante perché estende, attraverso un flusso di lavoro riproducibile e modelli avanzati per serie temporali, precedenti studi sulla stima delle concentrazioni al suolo di NO_2, SO_2 e CO mediante integrazione di dati satellitari, meteorologici e misure in situ [2-4].

È stata sviluppata una procedura di preparazione dei dati a scala europea che armonizza le misure al suolo dell'Agenzia Europea dell'Ambiente (EEA), le rianalisi meteorologiche ERA5, i dati di composizione atmosferica CAMS e le osservazioni Sentinel-5P estratte mediante Google Earth Engine. La procedura include la ricostruzione dei metadati delle stazioni, il filtraggio per inquinante e qualità del dato, l'associazione spaziale delle sorgenti e la sincronizzazione su una base temporale giornaliera comune in UTC, con finestre di estrazione coerenti con il passaggio satellitare.

La pipeline è stata applicata a Milano per la stima delle concentrazioni giornaliere di SO_2 su 992 osservazioni tra febbraio 2019 e ottobre 2023. Sono state confrontate, attraverso sei versioni progressive, tecniche tradizionali di machine learning e modelli ensemble (tra cui Random Forest e metodi di *boosting*), modelli previsionali basati sulla sola serie storica di SO_2 e modelli fondazionali per serie temporali con covariate ambientali, tra cui Chronos-2, adattato anche mediante fine-tuning LoRA. Le variabili comprendevano valori ritardati, statistiche mobili, indicatori ciclici di calendario e informazioni meteorologiche e satellitari. Per contenere la dispersione delle informazioni tra periodi di addestramento e verifica è stata adottata una suddivisione strettamente cronologica dei dati (64% addestramento, 16% validazione e 20% test).

I modelli che utilizzano soltanto la serie temporale di SO_2 hanno ottenuto valori negativi di R^2 (da -0,49 a -0,05); i metodi tradizionali, arricchiti con variabili temporali, hanno raggiunto $R^2 \approx 0{,}43$-$0{,}46$. L'integrazione completa delle covariate con Chronos-2 ha consentito di ottenere $R^2 = 0{,}92$ senza adattamento e $R^2 = 0{,}98$ dopo fine-tuning LoRA (RMSE = 0,134 µg/m³; NRMSE = 0,081) sul set di test (Fig. 2). Le informazioni più influenti sono risultate i valori precedenti di SO_2 e le medie mobili a sette giorni, seguite dalle variabili meteorologiche, dal SO_2 satellitare e dalla stagionalità. I risultati suggeriscono che, in questo caso di studio, i maggiori benefici derivano dall'inclusione del contesto atmosferico e dall'adattamento del modello, non dalla sola maggiore complessità degli algoritmi. La pipeline di integrazione costituisce inoltre una base riutilizzabile per ulteriori inquinanti e aree geografiche, per i quali resta necessaria una validazione specifica.

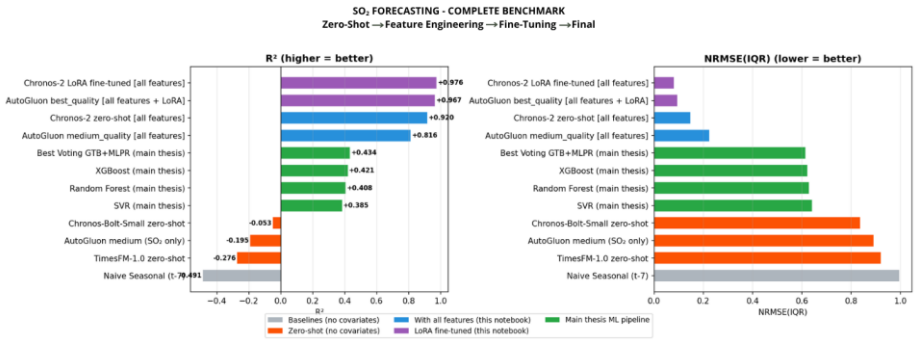

Fig. 2. Confronto delle configurazioni di previsione delle concentrazioni di SO_2 sul set di test, mediante R^2 e NRMSE.

3 Comfort termico urbano

Le attività di ricerca sul comfort termico urbano si articolano in quattro linee principali: (i) l'analisi delle tendenze climatiche recenti e delle condizioni di stress termico in Italia; (ii) la mappatura delle LCZ mediante dati iperspettrali, multispettrali e parametri di morfologia urbana; (iii) la modellazione della temperatura dell'aria ad alta risoluzione; e (iv) l'analisi della composizione e della risposta termica delle superfici urbane mediante dati iperspettrali e termici. Nel presente contributo l'attenzione è rivolta alla modellazione della temperatura dell'aria e all'analisi della risposta termica delle superfici urbane, per le quali sono disponibili i più recenti sviluppi applicativi. Per un approfondimento sulle altre linee di ricerca si rimanda a [5] e [6].

3.1 Modellazione della temperatura dell'aria ad alta risoluzione

La modellazione della temperatura dell'aria prossima alla superficie integra misure provenienti da reti meteorologiche ufficiali e partecipative (*crowdsourced*) con predittori geospaziali e dati di OT. L'approccio impiega tecniche di machine learning per produrre mappe ad alta risoluzione della temperatura urbana e analizzarne la variabilità durante le ondate di calore [7].

Per la città di Milano sono state generate mappe con risoluzione di 20 m per l'anno 2022, considerando periodi di ondata di calore individuati mediante dati di rianalisi climatica e differenti ore della giornata. Il modello, basato su Random Forest, utilizza osservazioni di 97 stazioni meteorologiche e integra indici spettrali derivati da Sentinel-2 con metriche descrittive della morfologia urbana.

Le prestazioni variano nel corso della giornata e risultano migliori nel tardo pomeriggio e nelle ore notturne: il coefficiente di determinazione è compreso tra 0,33 e 0,37, mentre l'errore quadratico medio varia tra 0,7 e 1,4 °C. Nonostante le difficoltà intrinseche della modellazione della temperatura dell'aria a scala molto fine, soprattutto nelle ore diurne, le mappe restituiscono efficacemente l'eterogeneità termica urbana.

Durante le fasi di massima intensità dell'isola di calore, le aree centrali risultano fino a 3-5 °C più calde rispetto alle zone circostanti, mentre i parchi urbani mostrano un effetto di raffrescamento dell'ordine di 1-2 °C, come mostrato in Fig. 3. Confrontando le mappe di temperatura ottenute con la mappa di LCZ, si nota che le classi più compatte e densamente edificate, quali LCZ 2, LCZ 3 e LCZ 8, sono associate a temperature più elevate, mentre le classi meno dense e le superfici naturali presentano valori inferiori. Questi risultati mostrano il potenziale delle mappe ad alta risoluzione per individuare le aree maggiormente esposte al rischio termico.

È inoltre in corso un approfondimento a scala di dettaglio, finalizzato alla predizione della temperatura dell'aria a livello stradale. L'attività integra misure acquisite mediante rilievi mobili con strumenti MeteoTracker e dati aerei ad alta risoluzione, utilizzati anche nelle attività di validazione descritte nella sezione successiva. Questa integrazione consente di descrivere i pattern spaziali della temperatura con un ulteriore livello di dettaglio e di analizzare le microvariazioni associate alla geometria urbana, ai materiali delle superfici e alla presenza di vegetazione.

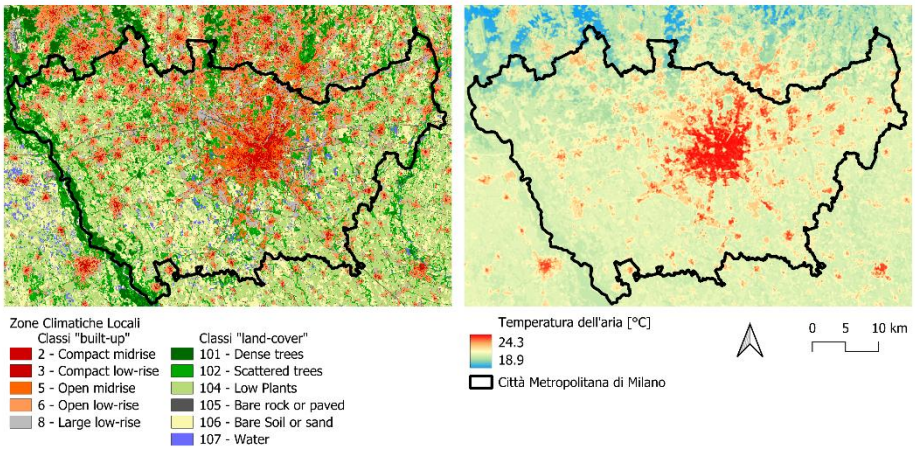

Fig. 3. Mappa delle zone climatiche locali di Milano per giugno 2022 (sinistra) e mappa della temperatura dell'aria durante la fase di massima intensità dell'isola di calore urbana, corrispondente a due ore prima dell'alba durante l'ondata di calore di giugno 2022 (destra).

3.2 Analisi della risposta termica delle superfici urbane

È stata inoltre analizzata la relazione tra la composizione delle superfici urbane e il comportamento termico mediante tecniche di *unmixing* spettrale. Le immagini iperspettrali delle missioni PRISMA e DESIS sono utilizzate per stimare la frazione di materiali artificiali e naturali che costituiscono ciascun pixel; tali informazioni vengono quindi messe in relazione con la temperatura superficiale (*Land Surface Temperature*, LST) derivata dai dati termici Landsat 8 e Landsat 9.

L'*unmixing* spettrale è vincolato affinché le frazioni dei materiali siano non negative e la loro somma sia pari a uno per ogni pixel. Sono considerate superfici artificiali, quali asfalto, tegole e metallo, nonché componenti naturali quali suolo nudo, vegetazione arborea ed erbacea e acqua.

I risultati mostrano che l'aumento delle frazioni di asfalto e tegole è associato a temperature superficiali più elevate, con un effetto più marcato per l'asfalto. Al contrario, la vegetazione riduce la temperatura superficiale; la vegetazione arborea evidenzia un contributo di raffrescamento leggermente maggiore rispetto a quella erbacea, verosimilmente per l'azione combinata di ombreggiamento ed evapotraspirazione (Fig. 4).

L'analisi consente quindi di approfondire il contributo dei materiali ai processi di riscaldamento e raffrescamento delle superfici e di interpretarne la relazione con la temperatura dell'aria prossima al suolo. Sono in corso attività di validazione mediante dati iperspettrali e termici ad alta risoluzione acquisiti durante un rilievo aereo su Milano il 15 e 16 agosto 2025, integrati con dati multispettrali quasi simultanei e dataset geospaziali di riferimento.

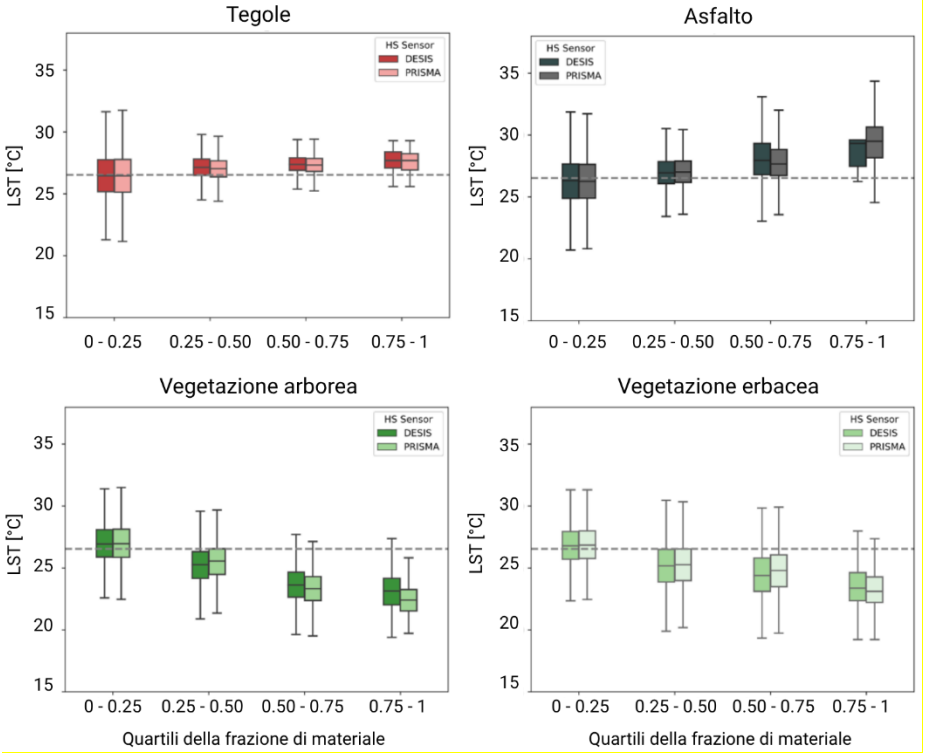

Fig. 4. Distribuzione della temperatura superficiale per classi di abbondanza dei materiali, derivate da immagini PRISMA e DESIS; le distribuzioni sono organizzate per quartili di abbondanza; la linea orizzontale grigia indica il valore medio della temperatura superficiale.

4 Conclusioni

Questo lavoro presenta alcune linee di ricerca sul monitoraggio integrato della qualità dell'aria e del comfort termico in ambiente urbano, sviluppate all'interno di un comune quadro progettuale ma basate su approcci metodologici distinti. La procedura di integrazione di dati al suolo, meteorologici e satellitari costituisce una base riproducibile per la modellazione degli inquinanti; nel caso di Milano, l'inclusione delle covariate ambientali e l'adattamento di Chronos-2 hanno migliorato la stima giornaliera di SO_2 rispetto alle configurazioni basate soltanto sulla serie storica. Per il metano, l'analisi congiunta della frequenza di superamento e della disponibilità di osservazioni Sentinel-5P, confrontata con gli eventi Carbon Mapper, ha mostrato il potenziale delle mappe bivariate come supporto allo screening territoriale, senza attribuire loro capacità di rilevamento diretto dei singoli pennacchi.

Parallelamente, le attività sul clima urbano evidenziano la marcata variabilità spaziale delle condizioni termiche all'interno delle città. La modellazione della temperatura dell'aria ad alta risoluzione permette di descrivere l'isola di calore urbana e la sua relazione con le LCZ, mentre l'analisi iperspettrale della composizione delle

superfici fornisce ulteriori elementi sul ruolo dei materiali nel determinare i pattern di temperatura superficiale.

Sebbene sviluppate separatamente, queste linee di ricerca contribuiscono a una più ampia comprensione delle dinamiche ambientali urbane, nelle quali sia la composizione atmosferica sia i processi termici sono influenzati dalla struttura spaziale della città e dalle condizioni ambientali. I futuri sviluppi potranno concentrarsi sul rafforzamento della valutazione quantitativa dei metodi proposti e sull'estensione delle applicazioni a ulteriori contesti geografici.

5 Ringraziamenti

Studio condotto nell'ambito del Progetto Space It Up finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana, ASI, e dal Ministero dell'Università e della Ricerca, MUR - Contratto n. 2024-5-E.0 - CUP n. I53D24000060005.

Riferimenti bibliografici

1. Yordanov, V., Vavassori, A., Zahed Kachaee, S., Saud Mino, C. I., Žgela, M., Moazzam, A., Brovelli, M. A.: Integrated Earth Observation and Data-Driven Approaches for Urban Air Quality and Thermal Environment Monitoring. International Conference on Contemporary Theory and Practice in Construction 17, 25–37 (2026).
2. Cedeno Jimenez, J. R., Brovelli, M. A.: NO2 Concentration Estimation at Urban Ground Level by Integrating Sentinel 5P Data and ERA5 Using Machine Learning: The Milan (Italy) Case Study. Remote Sensing 15(22), 5400 (2023).
3. Brovelli, M. A., Cedeno Jimenez, J. R., Moazzam, A., Yordanov, V., Vavassori, A.: Remote Sensing and Machine Learning for Urban Air Quality and Heat Island Monitoring. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLVIII-4/W14-2025, 3–10 (2025).
4. Liang, Z., Cedeno Jimenez, J. R., Yordanov, V., Brovelli, M. A.: Estimating Ground-Level Carbon Monoxide Concentrations Using Machine Learning Techniques: The Metropolitan City of Milan Case Study. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLVIII-4/W18-2025, 241–248 (2026).
5. Vavassori A., Žgela, M., Brovelli, M.A.: Recent (1981–2024) climatic trends in Italy from high-resolution reanalysis data and station-based observations. Applied Geomatics 18, 84 (2026).
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. Žgela, M., Vavassori, A., Brovelli, M.A.: Predicting Air Temperature Patterns in Milan Using Crowdsourced Measurements and Earth Observation Data. Remote Sensing 17, 3520 (2025).