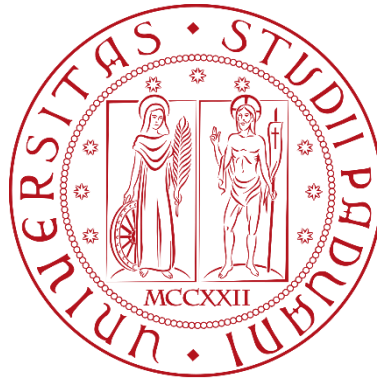


**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA**

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE ED AMBIENTALE**

**Corso di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente ed il Territorio**



**Isole di calore a Padova nell'estate 2023: mappatura “dal basso” e valutazione del fenomeno mediante l'utilizzo di  
MeteoTracker**

**Relatore:** Prof. Salvatore Pappalardo

**Correlatore:** Dott. Carlo Zanetti

**Laureanda:** Lisa Rubert

**ANNO ACCADEMICO 2022 - 2023**



## Abstract:

Nelle ultime decadi il fenomeno delle isole di calore urbano (comunemente note come *Urban Heat Islands*, UHI) - ovvero l'aumento di temperatura misurato nelle aree metropolitane rispetto alle aree rurali – a causa dell'aumento di frequenza, magnitudo e durata degli eventi meteo-climatici estremi, si è accentuato. Questo fenomeno è il risultato di una serie di interazioni complesse tra l'ambiente urbano e le condizioni meteorologiche. Esso è associato a diversi fattori, tra cui la tipologia di uso del suolo, la morfologia urbana e l'albedo. Le aree urbane, caratterizzate da una maggiore densità di edifici e di superfici cementificate che assorbono e immagazzinano calore, sono le aree nelle quali ondate ed isole di calore impattano maggiormente. Il fenomeno delle UHI può quindi avere un impatto significativo sulla qualità della vita nelle città e sulla salute dei cittadini, aumentando il rischio di patologie legate agli eventi di caldo estremo. Inoltre, le temperature elevate in un contesto urbano possono determinare un aumento del consumo di energia per il raffreddamento degli ambienti interni, costituendo una criticità sia per le infrastrutture che per il microclima urbano.

L'obiettivo del presente studio intende indagare, attraverso rilievi sul territorio urbano, le anomalie termiche in diversi quartieri della città di Padova, in orari diversi (pomeriggio e sera) ed in diverse condizioni meteorologiche, tramite l'utilizzo di *device low-cost* per il *mobile mapping*, diffusi attualmente sul mercato, come il dispositivo *MeteoTracker*<sup>®</sup>. La prima fase della sperimentazione si è orientata nell'analisi spazio-temporale dei dati raccolti nel periodo luglio-settembre 2023, in condizioni “*real-world*”. Ciò è servito a identificare, cartografare e valutare le UHI nelle aree considerate. Inizialmente sono state studiate le caratteristiche dei singoli percorsi; successivamente le misurazioni sono state aggregate ed analizzate al fine di stimare le temperature mediate su tutti i percorsi. In particolare, sono state analizzate le seguenti relazioni: i) analisi comparativa tra temperature dell'aria e l'uso del suolo; ii) analisi spaziale tra i valori di temperatura dell'aria e quelli dell'indice *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). Nella seconda parte di ricerca si è voluto indagare la relazione tra il parametro *Land Surface Temperature*, derivato ed elaborato tramite l'acquisizione delle immagini satellitari termiche (banda TIRS) di Landsat 8, e la temperatura dell'aria campionata con il dispositivo *MeteoTracker*<sup>®</sup>. Si è voluto quindi verificare se il parametro individuato può essere rappresentativo anche della condizione termica dell'aria. Per poter fare ciò sono state svolte delle sessioni di rilevamento tramite *sniffer bike* in concomitanza del passaggio mattutino del satellite Landsat 8.

I risultati delle analisi territoriali del presente studio evidenziano la necessità di monitorare e di mappare il fenomeno delle UHI nelle aree fortemente impermeabilizzate della città, adottando un approccio integrato tra dati di temperatura tramite *mobile mapping* e quelli derivati da piattaforme satellitari.



## Indice

1	Introduzione.....	1
1.1	Ondate ed isole di calore urbano .....	1
1.2	La <i>Citizen Science</i> .....	2
1.2.1	Il ruolo della <i>Citizen Science</i> .....	2
1.2.2	Dispositivi mobili per il monitoraggio ambientale: le <i>Sniffer Bikes</i> .....	3
1.3	Obiettivi .....	4
2	Materiali e Metodi .....	5
2.1	Materiali.....	5
2.1.1	Dispositivo mobile MeteoTracker <sup>©</sup> .....	5
2.1.2	Carta di copertura del suolo .....	8
2.1.3	Dati satellitari <i>open</i> : il satellite Landsat 8 .....	9
2.1.4	<i>Software</i> per l'elaborazione dei dati .....	12
2.2	Metodi.....	13
2.2.1	Area di studio .....	13
2.2.2	<i>Mobile Mapping</i> .....	14
2.2.3	Elaborazione ed analisi dei dati .....	15
3	Risultati e discussione.....	27
3.1	Temperature massime e minime rilevate .....	27
3.2	Singolo percorso pomeridiano e serale.....	30
3.3	Media dei percorsi pomeridiani e serali.....	45
3.3.1	Analisi <i>Fishnet</i> delle rilevazioni pomeridiane .....	45
3.3.2	Analisi <i>Fishnet</i> delle rilevazioni Serali.....	54
3.4	Relazione tra LST e la temperatura dell'aria .....	63
4	Conclusioni.....	75
5	Ringraziamenti.....	77
	Bibliografia.....	79
	Sitografia.....	81
	Allegato 1.....	83



# 1 Introduzione

La tesi si propone di analizzare il fenomeno delle isole di calore urbano nella città di Padova, amplificate dagli impatti locali dei cambiamenti climatici come gli eventi meteorologici estremi (ondate di calore), e la possibilità di monitorarle tramite l'utilizzo di dispositivi *low-cost* per il *mobile mapping*.

## 1.1 Ondate ed isole di calore urbano

Secondo quanto afferma il Ministero della Salute Italiano le ondate di calore (*Heat Waves*, HWs) sono condizioni meteorologiche estreme che si verificano quando si registrano temperature molto elevate per più giorni consecutivi. Queste condizioni sono spesso associate a tassi elevati di umidità, forte irraggiamento solare e assenza di ventilazione, rappresentando un rischio per la salute della popolazione. Un'ondata di calore è definita in relazione alle condizioni climatiche di una specifica città e non è quindi possibile individuare una temperatura-soglia di rischio valida a tutte le latitudini.

Il complesso di fenomeni responsabili di un microclima significativamente più caldo nelle aree urbane rispetto alle zone periferiche e rurali è noto come "isola di calore urbano" (*Urban Heat Islands*, UHI) (Oke, 1978). Questa situazione è caratterizzata da una serie di fattori che causano notevoli differenze di temperatura nelle aree urbane, talvolta fino a 8-10 gradi in più rispetto alle aree rurali periferiche. La definizione appena fornita comprende una moltitudine di fattori, tra cui la distribuzione spaziale tra aree verdi e strutture edilizie nelle città, la presenza di edifici ad altezza elevata e l'uso di apparecchiature e strumenti che generano calore. Il fenomeno delle UHI è accentuato nei periodi delle ondate di calore.

Il sesto rapporto di valutazione dell'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) ha dichiarato che nei prossimi 20 anni la temperatura globale aumenterà di 1,5 °C o più. La frequenza delle temperature record aumenterà, saranno più intense e dureranno più a lungo a causa dei cambiamenti climatici (The Lancet, Volume 398, 2021). Con il progredire delle temperature, è molto probabile che nel prossimo decennio l'incidenza dei pericoli per la salute associati alle ondate di calore nelle aree urbane si accentuerà, impattando significativamente la salute ed aumentando la mortalità (Tong et al., 2021).

Recenti studi scientifici hanno identificato l'Europa come un importante *hotspot* per le ondate di calore. Infatti, rispetto ad altre regioni delle medie latitudini dell'emisfero settentrionale, si è stimata un'accelerazione nell'aumento della frequenza degli eventi da tre a quattro volte maggiore (Rousi et al., 2022). Questo fenomeno è fortemente influenzato dalla copertura/uso del suolo, dalla morfologia urbana e dell'albedo delle superfici (Koko et al., 2021). Inoltre, la riduzione delle aree vegetate e l'espansione urbana sono fattori che possono comportare l'aumento delle temperature, aggravando il fenomeno delle UHI (Palafox-Juárez et al., 2021; Koko et al., 2021). L'Europa, infatti, è il secondo continente per densità di popolazione (72,5 abitanti/km<sup>2</sup>) dopo l'Asia (95 abitanti/km<sup>2</sup>) ed è caratterizzata da ampie aree urbanizzate, che ospitano il 72% della popolazione totale (Banca Mondiale, 2023). A partire dalle intense e prolungate

HWs del 2003 che, secondo uno studio pubblicato su *Nature*, hanno causato circa 70.000 morti, si è cominciato a registrare un forte aumento di tali eventi meteorologici estremi (Robine et al., 2008). Nell'ultimo periodo, l'eccesso di mortalità in Europa ha raggiunto il +16% nel mese di luglio 2022 rispetto alla mortalità media dello stesso mese nel periodo 2016–2019, con punte del +25–37% nei paesi Mediterranei (Ballester et al., 2023). Lo stesso studio stima 62.862 decessi legati al caldo in Europa nel 2022, 61.672 dei quali si sono verificati tra il 30 maggio e il 4 settembre. I maggiori tassi di mortalità legati al caldo estivo sono stati riscontrati nei paesi vicini al Mar Mediterraneo, tra cui Italia, Grecia, Spagna e Portogallo, in particolare, in Italia sono stati stimati circa 18.000 decessi (Ballester et al., 2023).

Poiché, negli ultimi anni, il numero di persone nelle aree urbane sta aumentando, promuovere uno sviluppo resiliente ai cambiamenti climatici è essenziale, in modo da migliorare la qualità della vita e ridurre i rischi legati alle condizioni termiche avverse, come le ondate di calore, le quali accentuano il fenomeno delle isole di calore urbane.

## **1.2 La *Citizen Science***

La *Citizen Science*, nota anche come “scienza partecipativa” o “scienza collaborativa”, si riferisce a un approccio alla ricerca scientifica in cui un gruppo di persone non specializzate, spesso i cittadini comuni, partecipa attivamente alla raccolta di dati scientifici, all'osservazione di fenomeni naturali o all'analisi dei dati (Dickinson et al., 2010). Questa partecipazione di cittadini “non esperti” è solitamente coordinata da scienziati o organizzazioni di professionisti per affrontare questioni scientifiche o ambientali. Questo processo applicato al focus di questa tesi sul monitoraggio delle isole di calore in città, si traduce nella creazione e diffusione sul mercato di dispositivi per il *mobile mapping*, in grado di rilevare la temperatura dell'aria ed altre variabili meteorologiche, che vengono acquisite, generate e condivise direttamente dai cittadini.

### **1.2.1 Il ruolo della *Citizen Science***

Coinvolgere i cittadini è fondamentale quando si tratta di affrontare e di gestire gli impatti locali del cambiamento climatico per diverse ragioni. Innanzitutto, secondo quanto riportato nei dieci principi della *Citizen Science* stilati nel 2015 dall' *European Citizen Science Association*, coinvolgendo attivamente i cittadini si può aumentare la consapevolezza e la comprensione del fenomeno e dei suoi impatti; questa consapevolezza è essenziale per motivare azioni personali e collettive, favorendo la riduzione dell'impronta ecologica e carbonica. Infatti, la partecipazione e l'informazione generata stimolano nel cittadino la volontà di promuovere il risparmio energetico, la riduzione delle emissioni personali di carbonio, per esempio preferendo i mezzi pubblici alle automobili e la promozione di politiche ambientali e sostenibili (ECSA, 2015). L'opinione pubblica informata e impegnata, in aggiunta, è in grado di esercitare pressioni sui decisori politici affinché prendano misure più efficaci per mitigare il cambiamento climatico, favorendo i



processi locali di *decision making* (Rubio-Iglesias et al., 2020). Ciò può stimolare l'innovazione e lo sviluppo di tecnologie più pulite e sostenibili. Un altro motivo importante riguarda lo stimolo alla responsabilità collettiva: l'aumento delle temperature è una sfida globale che richiede una risposta collettiva, coinvolgendo i cittadini si promuove un senso di responsabilità e si incoraggia una maggiore coesione alla lotta al cambiamento climatico.

Tale idea, nata negli anni passati, sta prendendo sempre più piede principalmente all'estero e, recentemente, anche in Italia si stanno diffondendo gli approcci di *Citizen Science* aprendo nuove prospettive ed opportunità. Citando Blandino (2022): "Spesso lo standard nel mondo della ricerca è rappresentato da sensori ad altissima precisione e dal costo non irrisorio. Ma quando dal laboratorio si passa al mondo reale la sensoristica di alto livello non è per forza la soluzione ideale: la precisione dei dati raccolti potrebbe risultare eccessiva rispetto all'effettivo utilizzo che se ne fa, mentre i costi lieviterebbero a dismisura". L'autore prosegue menzionando l'ambito del monitoraggio ambientale, concentrandosi in particolare sulla raccolta di dati riguardanti la qualità dell'aria. Questo monitoraggio è attualmente gestito attraverso stazioni di rilevamento fisse, le quali impiegano sensori sofisticati e costosi per fornire dati precisi ma limitati a specifiche aree cittadine (Blandino, 2022). In alternativa a tali stazioni, viene proposto l'utilizzo di sensori *low cost* applicati alle biciclette per una mappatura più dettagliata dell'intera città (Blandino, 2022).

### **1.2.2 Dispositivi mobili per il monitoraggio ambientale: le *Sniffer Bikes***

Con il termine "*sniffer bikes*" si intendono i dispositivi che si possono installare sulle biciclette utilizzate per il monitoraggio del microclima e della qualità dell'aria nelle città. Queste biciclette sono equipaggiate con sensori in grado di misurare vari inquinanti atmosferici, l'umidità e la temperatura dell'aria. Il nome "*sniffer bike*" deriva dal fatto che queste biciclette "sniffano" l'aria, rilevando le sue caratteristiche mentre si spostano per le strade e le aree urbane. Esse nascono dall'idea e dalla necessità di integrare i *devices* per la raccolta dati nella vita di routine dei cittadini: i dispositivi *low cost* in questione sono progettati per essere montati sulle biciclette, rendendo possibile la raccolta dei campioni d'aria durante gli spostamenti quotidiani per la città, in modo da poterne monitorare le caratteristiche, in particolare, per questo studio, si è considerata la temperatura dell'aria. Ciò permette di coprire tante più parti della città quanti sono i dispositivi in movimento, garantendo una disponibilità di dati abbondante e pressoché quotidiana. I vantaggi derivanti da questo tipo di scelta sono vari, ad esempio: stimolare i ciclisti a scegliere strade e percorsi più temperati; aiutare i soggetti particolarmente sensibili ad evitare le aree calde, in determinati momenti della giornata, o scegliere zone della città più fresche; aiutare le amministrazioni locali e provinciali nel prendere decisioni dal punto di vista urbanistico, favorendo la presenza di parchi ed aree verdi; aiutare le organizzazioni di ricerca a raccogliere più dati per una migliore comprensione del fenomeno delle isole di calore urbano.

Tra gli aspetti negativi, emerge l'incapacità di produrre e fornire un elevato numero di strumenti ad alta precisione. Questo è dovuto sia ai costi elevati che ciò comporterebbe, sia al fatto che i cittadini coinvolti non sono professionisti, ma semplici appassionati. Di conseguenza i sensori non forniscono dati con elevata accuratezza, e ciò rende necessaria una successiva rielaborazione degli stessi per verificarne la bontà.

Per il seguente studio è stato utilizzato il dispositivo mobile MeteoTracker<sup>®</sup>, un sensore sviluppato dalla IoTopon srl; esso è in grado di campionare l'aria sulla base di una frequenza stabilita, ricavandone temperatura e umidità relativa. Può essere montato sia sulle biciclette, sia sul tettuccio delle automobili; esso si attiva tramite il movimento e comunica i dati tramite un'applicazione mobile. Nel 2021, anche i ricercatori del Politecnico di Torino si sono serviti di tale sensore per effettuare una campagna di raccolta dati all'interno della città metropolitana di Torino tra l'inizio di settembre e metà novembre 2021, attraverso misurazioni in bici ed in macchina, a diverse altitudini e con diverse condizioni meteorologiche (Antoniciello et al., 2021).

## 1.3 Obiettivi

L'obiettivo generale della presente tesi vuole indagare le condizioni termiche dell'aria in diversi quartieri della città di Padova, ad orari diversi (pomeriggio e sera) ed in diverse condizioni meteorologiche, tramite l'utilizzo del dispositivo mobile *low cost* MeteoTracker<sup>®</sup>. La prima fase della sperimentazione prevede l'analisi dei dati raccolti sul territorio urbano di Padova in un periodo di tre mesi (luglio - settembre 2023) in condizioni "*real-world*", con il fine di identificare, cartografare le UHI nelle aree rilevate. Inizialmente sono state studiate le caratteristiche dei singoli percorsi. Successivamente le misurazioni sono state aggregate in modo da poter effettuare delle stime di temperatura mediate su tutti i percorsi. In particolare, sono state analizzate le seguenti relazioni:

1. analisi comparativa tra temperatura dell'aria e l'uso del suolo.
2. confronto tra la temperatura dell'aria e l'indice di vegetazione *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI).

Nella seconda parte di ricerca si è voluto indagare la relazione tra il parametro *Land Surface Temperature* (LST), ricavato tramite elaborazione, calibrazione e modellizzazione delle immagini satellitari acquisite da Landsat 8, confrontando la temperatura del suolo con i valori di temperatura dell'aria misurata dal dispositivo MeteoTracker<sup>®</sup>. Quindi, si è voluto indagare se il parametro LST possa essere rappresentativo anche della condizione termica dell'aria. Per poter fare ciò sono state svolte delle sessioni di rilevamento tramite *sniffer bike* in concomitanza del passaggio mattutino del satellite Landsat 8 sopra la città di Padova.

# 2 Materiali e Metodi

## 2.1 Materiali

### 2.1.1 Dispositivo mobile MeteoTracker<sup>®</sup>

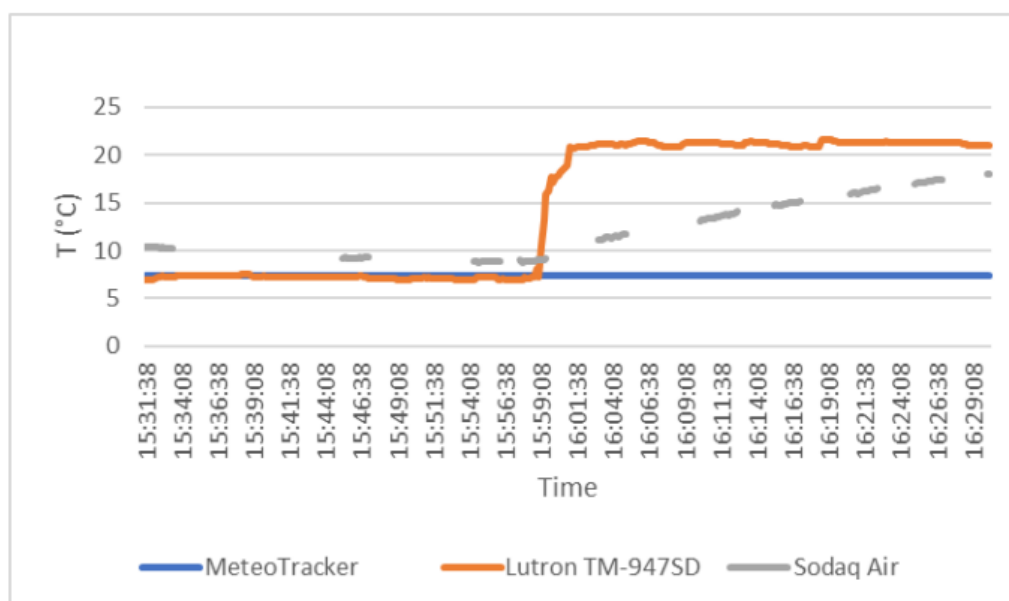
Il dispositivo MeteoTracker<sup>®</sup> è una mini-stazione meteorologica *low cost*, progettata dall'azienda italiana Topon srl, per le misurazioni in movimento, basata su una tecnologia brevettata RECS (*patented Radiation Error Correction System*) ed è associata ad un'applicazione per *smartphone* e ad un'infrastruttura basata su *cloud* (su sito web: <https://MeteoTracker.com>) che implementa una rete meteorologica mobile a livello mondiale (Antoniciello, 2021).

Di seguito sono riportate le sue specifiche tecniche e le funzionalità (dal manuale dell'utente fornito assieme al prodotto):

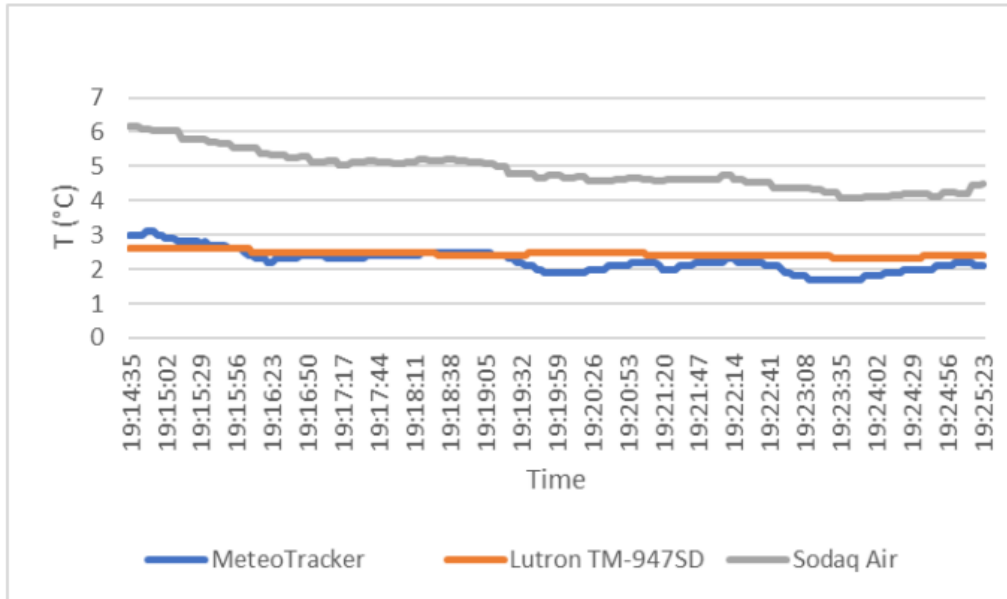
- versione: MeteoTracker<sup>®</sup> MT01.
- Componenti:
  - stazione mobile MeteoTracker<sup>®</sup>;
  - supporto per bicicletta;
  - cavo USB-C per la ricarica del dispositivo;
  - guanina di riserva.
- Frequenza di campionamento: la frequenza desiderata può essere impostata dalla App MeteoTracker<sup>®</sup>. In questo specifico caso la minima distanza tra due acquisizioni è di 100 m e il minimo intervallo tra due acquisizioni è di 3 secondi.
- Connettività: connessione all'applicazione per *smartphone* tramite *bluetooth*.
- Installazione: il dispositivo è dotato di una base a tre magneti per permettere l'installazione su superfici ferromagnetiche (per es. il tetto delle automobili); nella confezione è inoltre presente un supporto per assicurare il *device* mobile al manubrio della bicicletta.
- Parametri misurati: MeteoTracker<sup>®</sup> è in grado di rilevare temperatura, umidità relativa, pressione, temperatura di rugiada, altitudine, gradiente termico verticale e l'indicatore di intensità solare. Per il seguente studio ci si è concentrati sulla temperatura:
  - Unità di misura: °C.
  - Accuratezza: +/- 0,2 °C (typ, sensori) | +/- 0,5 °C (sottoesposizione al sole a velocità > 7 km/h, *patented Radiation Error Correction System RECS*).
  - Valori restituiti: misurazioni in tempo reale, massimi, minimi e medi della sessione.
  - Range operativo: da - 40 °C a 125°C.
  - Velocità di misura: 15 °C di variazione in 30 secondi a una velocità di 20 km/h.

- Visualizzazione dei dati:
  - APP:
    - visualizzazione in tempo reale su mappa, grafici ed in formato numerico;
    - visualizzazioni delle sessioni in archivio su mappa, grafici ed in formato numerico;
    - statistiche delle sessioni.
  - *Dashboard* (app.MeteoTracker.com)
    - visualizzazione in tempo reale su mappa, grafici ed in formato numerico;
    - visualizzazioni delle sessioni in archivio su mappa, grafici ed in formato numerico;
    - statistiche delle sessioni.
- Esportazione dati: l'esportazione dati e l'integrazione su piattaforme terze è possibile da dashboard e da App, è possibile scaricare le misurazioni in formato CSV e APIs.
- Certificazioni:
  - CE (ID: HTT202111418) E FCC (ID:2A6AH-MT01).
  - IP grade: water-resistant

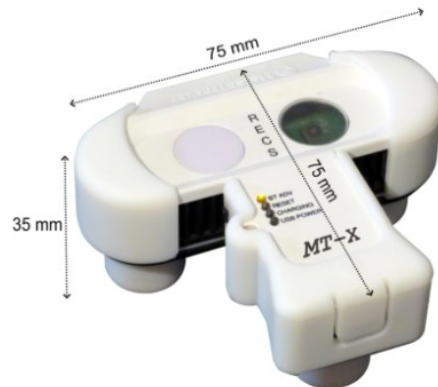
In un precedente studio condotto di Zanetti et al., (2023) è stato confrontato il dispositivo MeteoTracker<sup>®</sup> con un termometro calibrato Lutron TM-947SD ed è emerso che il *device* mobile restituisce valori di temperatura affidabili in condizioni dinamiche, con un'accuratezza di 0.1 °C. Viceversa, non è in grado di rilevare le variazioni di temperatura quando viene spostato all'interno di un edificio in condizioni statiche.



**Figura 1.** Temperatura dell'aria esterna e interna rilevata da Sodaq Air, MeteoTracker<sup>®</sup> e Lutron TM-947SD in modalità statica il 14 dicembre 2022 (Zanetti et al., 2023).



**Figura 2.** Temperatura dell'aria esterna rilevata da Sodaq Air, MeteoTracker<sup>®</sup> e Lutron TM-947SD in modalità dinamica il 20 dicembre 2022 (Zanetti et al., 2023).



**Figura 3.** Foto della stazione MeteoTracker<sup>®</sup> (fonte: <https://MeteoTracker.com>).



**Figura 4.** Foto della stazione MeteoTracker<sup>®</sup> e le componenti contenute nella confezione del prodotto.



**Figura 5.** Foto della stazione MeteoTracker<sup>®</sup> in funzione e applicazione per la visualizzazione in tempo reale su mappa, grafici ed in formato numerico delle misurazioni.

## 2.1.2 Carta di copertura del suolo

Con il termine copertura del suolo la direttiva 2007/2/CE definisce la copertura fisica e biologica della superficie terrestre, comprese le superfici artificiali, le zone agricole, i boschi e le foreste, le aree seminaturali, le zone umide ed i corpi idrici. L'identificazione delle diverse classi di copertura del suolo è effettuata attraverso la classificazione del progetto *Corine Land Cover* (CLC), nato a livello europeo per il

rilevamento e il monitoraggio delle caratteristiche di copertura e uso del territorio, con particolare attenzione alle esigenze di tutela ambientale.

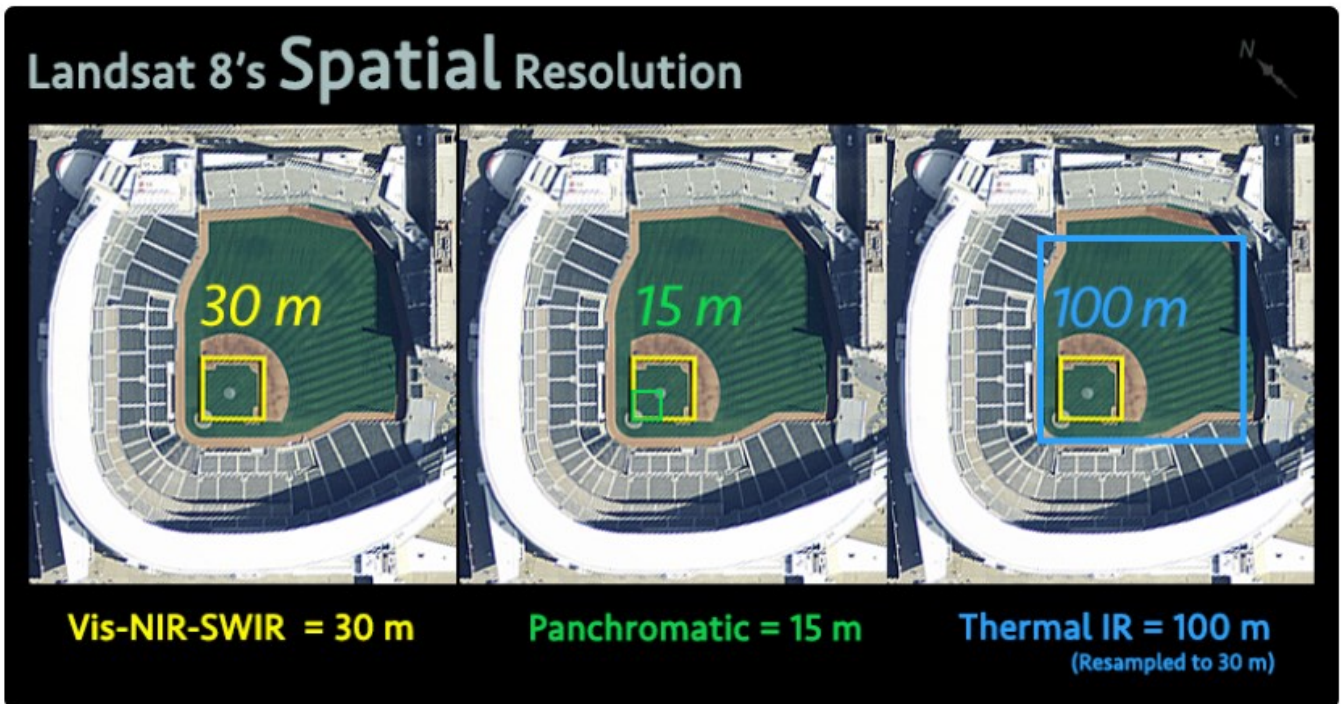
Per il confronto tra la temperatura dell'aria e l'uso del suolo è stata utilizzata la “Carta di copertura del suolo” di Padova, disponibile nella versione più recente relativa al 2018, acquisita dal Geoportale della Regione Veneto. In particolare, è stato utilizzato il primo livello di classificazione, che suddivide il territorio in cinque tipologie: superfici artificiali, superfici agricole utilizzate, territori boscati ed ambienti semi-naturali, zone umide e corpi idrici (isprambiente, Legenda del CORINE Land Cover 2000, 2018). Per una più chiara visualizzazione si è però preferito riclassificare in valori binari le diverse tipologie di uso del suolo: il suolo impermeabile, composto dalle superfici artificiali, e il suolo permeabile, composto dalle restanti aree.

### **2.1.3 Dati satellitari *open*: il satellite Landsat 8**

Per sviluppare le analisi comparative tra i dati rilevati dal dispositivo MeteoTracker<sup>®</sup>, il parametro LST e l'indice di vegetazione NDVI sono state elaborate le immagini satellitari acquisite da Landsat 8. In particolare, sono stati acquisiti i *dataset* relativi ai giorni 15 agosto e 8 settembre 2023 dal sito ufficiale di USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov>). Di seguito sono riportate le caratteristiche relative al satellite Landsat 8 individuate al sito Landsat *Science* (<https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/>).

Landsat 8 è un satellite lanciato in orbita l'11 febbraio 2013 dalla base aeronautica di Vandenberg, California, su un razzo Atlas-V 401. Il carico utile del satellite è costituito da due strumenti scientifici: l'*Imager* terrestre operativo (*Operational Land Imager*, OLI) ed il sensore termico a infrarossi (*Thermal Infrared Sensor*, TIRS). Questi due sensori forniscono una copertura stagionale della massa continentale globale con una risoluzione spaziale di 30 metri (visibile, NIR, SWIR), 100 metri (termico), e 15 metri (pancromatico), come rappresentato alla Figura 6.

Ai fini di questo studio sono state considerate le bande 4 (*Red*), 5(NIR) e 10 (TIR-1).



**Figura 6.** Risoluzione spaziale di Landsat 8 (Landsat Science, <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/>).

Landsat 8 è stato sviluppato dalla NASA in collaborazione con l'U.S. *Geological Survey* (USGS): la prima organizzazione ha guidato le fasi di progettazione, costruzione, lancio e calibrazione in orbita; il 30 maggio 2013, USGS ha rilevato le operazioni di routine ed il satellite è stato ufficialmente chiamato Landsat 8. Da quel momento, USGS guida le attività di calibrazione post-lancio, le operazioni satellitari, la generazione di prodotti dati e l'archiviazione dei dati presso il centro EROS (*Earth Resources Observation and Science*). Gli strumenti Landsat 8 rappresentano un progresso evolutivo nella tecnologia: OLI migliora i precedenti sensori Landsat utilizzando un approccio tecnico (ciò è stato dimostrato da un sensore fatto volare sul satellite sperimentale EO-1 della NASA). Esso è un sensore a scopa con un telescopio a quattro specchi e quantizzazione a 12 bit, inoltre ed è in grado di raccogliere dati per le bande spettrali dell'infrarosso visibile, del vicino infrarosso e delle onde corte, nonché per una banda pancromatica. La seguente tabella mette a confronto le bande spettrali OLI con le bande ETM+ di Landsat 7. Si può notare che il sensore OLI fornisce due nuove bande spettrali, una studiata appositamente per il rilevamento dei cirri e l'altra per le osservazioni delle zone costiere.



**Tabella 1.** Confronto tra Landsat 7 e Landsat 8 per quanto riguarda il sensore OLI (Landsat Science, <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/>).

Landsat-7 ETM+ Bands ( $\mu\text{m}$ )			Landsat-8 OLI and TIRS Bands ( $\mu\text{m}$ )		
			30 m Coastal/Aerosol	0.435 - 0.451	Band 1
Band 1	30 m Blue	0.441 - 0.514	30 m Blue	0.452 - 0.512	Band 2
Band 2	30 m Green	0.519 - 0.601	30 m Green	0.533 - 0.590	Band 3
Band 3	30 m Red	0.631 - 0.692	30 m Red	0.636 - 0.673	Band 4
Band 4	30 m NIR	0.772 - 0.898	30 m NIR	0.851 - 0.879	Band 5
Band 5	30 m SWIR-1	1.547 - 1.749	30 m SWIR-1	1.566 - 1.651	Band 6
Band 6	60 m TIR	10.31 - 12.36	100 m TIR-1	10.60 - 11.19	Band 10
			100 m TIR-2	11.50 - 12.51	Band 11
Band 7	30 m SWIR-2	2.064 - 2.345	30 m SWIR-2	2.107 - 2.294	Band 7
Band 8	15 m Pan	0.515 - 0.896	15 m Pan	0.503 - 0.676	Band 8
			30 m Cirrus	1.363 - 1.384	Band 9

TIRS raccoglie dati per due bande spettrali più strette nella regione termica precedentemente coperta da un'ampia banda spettrale sui satelliti Landsat 4 – 7. I dati di 100 m ottenuti vengono registrati nei dati OLI per creare prodotti a 12 bit radiometrici, geometrici e corretti del terreno.

Landsat 8 è programmato per restituire 400 scene al giorno all'archivio dati USGS (150 in più rispetto a quelle necessarie per l'acquisizione di Landsat 7), anche se ne acquisisce regolarmente 725 al giorno (mentre Landsat 7 acquisisce 438 scene al giorno), ciò aumenta la probabilità di catturare scene prive di nuvole. La dimensione della scena Landsat 8 è di 185 km per 180 km di percorso e l'altitudine nominale del veicolo spaziale è di 705 km.

### 2.1.3.1 Il parametro *Land Surface Temperature*

Il parametro LST è una stima della temperatura superficiale della terra: esso è fondamentale nella comprensione dei fenomeni di scambio energetico che avvengono all'interfaccia tra la superficie terrestre e l'atmosfera sovrastante. Per determinare questa grandezza sono necessari opportuni sensori sensibili alla radiazione termica infrarossa in grado di eseguire misure di radianza correlabili alla LST tramite l'equazione di trasferimento radiativo (RTE) (Pastore et al., 2014).

### 2.1.3.2 L'indice *Normalized Difference Vegetation Index*

L'NDVI è un indice di vegetazione che descrive il livello di vigoria di una coltura e si calcola come il rapporto tra la differenza e la somma delle radiazioni riflesse nel vicino infrarosso e nel rosso (Antognelli, 2018).

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Gli indici di vegetazione sono calcolati a partire da dati rilevati da satellite o drone, nel seguente studio sono stati utilizzati i *dataset* relativi a Landsat 8.

In genere i valori variano tra 0 e 1 e a ciascun valore corrisponde una diversa situazione agronomica, come è possibile osservare in Tabella 2.

**Tabella 2.** Interpretazione indice NDVI (Antognelli, 2018).

NDVI	INTERPRETAZIONE
< 0,1	Suolo nudo o nuvole
0,1 - 0,2	Copertura vegetale quasi assente
0,2 - 0,3	Copertura vegetale molto bassa
0,3 - 0,4	Copertura vegetale bassa con vigoria bassa o copertura vegetale molto bassa con vigoria alta
0,4 - 0,5	Copertura vegetale medio-bassa con vigoria bassa o copertura vegetale molto bassa con vigoria alta
0,5 - 0,6	Copertura vegetale media con vigoria bassa o copertura vegetale medio-bassa con vigoria alta
0,6 - 0,7	Copertura vegetale medio-alta con vigoria bassa o copertura vegetale media con vigoria alta
0,7 - 0,8	Copertura vegetale alta con vigoria alta
0,8 - 0,9	Copertura vegetale molto alta con vigoria molto alta
0,9 - 1,0	Copertura vegetale totale con vigoria molto alta

#### **2.1.4 Software per l'elaborazione dei dati**

Per l'analisi dei dati spaziali e per la rappresentazione cartografica dei risultati è stato utilizzato il *software* per l'analisi geografica QGIS 3.28 "Firenze", mentre per l'elaborazione dei modelli statistici è stato utilizzato il *software* Microsoft Excel<sup>®</sup>. Per il calcolo e la rappresentazione cartografica delle distanze tra due punti è stato utilizzato il *software* Google Earth Pro<sup>®</sup>.

## 2.2 Metodi

Di seguito verranno illustrate e discusse le modalità di elaborazione ed analisi dei dati ottenuti tramite la rilevazione “dal basso”, tramite rilievi mobili a terra.

### 2.2.1 Area di studio

Per l’acquisizione dei dati si sono considerate tre aree di studio differenti a seconda dell’orario di rilievo delle temperature tramite *mobile mapping*:

1. per quanto riguarda il campionamento pomeridiano, inizialmente si è considerato il tratto di Via Venezia, una delle strade più trafficate di Padova, che si protrae dal Piazzale della Stanga fino al negozio Decathlon, successivamente sono state percorse delle zone interne all’area commerciale di Padova in modo da poter raggiungere il canale Piovego e costeggiare il fiume in un percorso ciclabile ad anello che attraversa campi coltivati, parchi e zone verdi. la durata del percorso è di circa 39 minuti alla velocità media di 14 km/h. Alla figura 7 è rappresentata in giallo.
2. L’area di studio considerata per il campionamento serale è più vasta e comprende: Via Venezia, la prima parte di Via Gattamelata, una porzione di argine lungo il canale Piovego, la zona industriale di Padova, in particolare Corso Stati Uniti, il Ponte Darwin, le vie nei pressi della stazione ferroviaria, una porzione del centro di Padova esterna alle mura ed infine il quartiere Arcella. La durata del percorso è di circa 47 minuti alla velocità media di 38 km/h. Alla Figura 7 è rappresentata in blu.
3. Per verificare la relazione tra il parametro LST e la temperatura dell’aria è stata considerata un’area di studio relativamente contenuta, ma allo stesso tempo il più possibile eterogenea, in modo che fosse facilmente percorribile in bicicletta in circa quindici minuti prima e quindici minuti dopo lo scatto effettuato dal satellite. Essa comprende: il tratto di Via Venezia che si protrae dal Piazzale della Stanga fino al negozio Decathlon, le vie nei pressi del centro commerciale Centro Giotto, le zone interne all’area commerciale di Padova ed una porzione di argine lungo il fiume Piovego. La durata del percorso è di circa 30 minuti alla velocità media di 14,5 km/h. Alla Figura 7 è rappresentata in rosso.

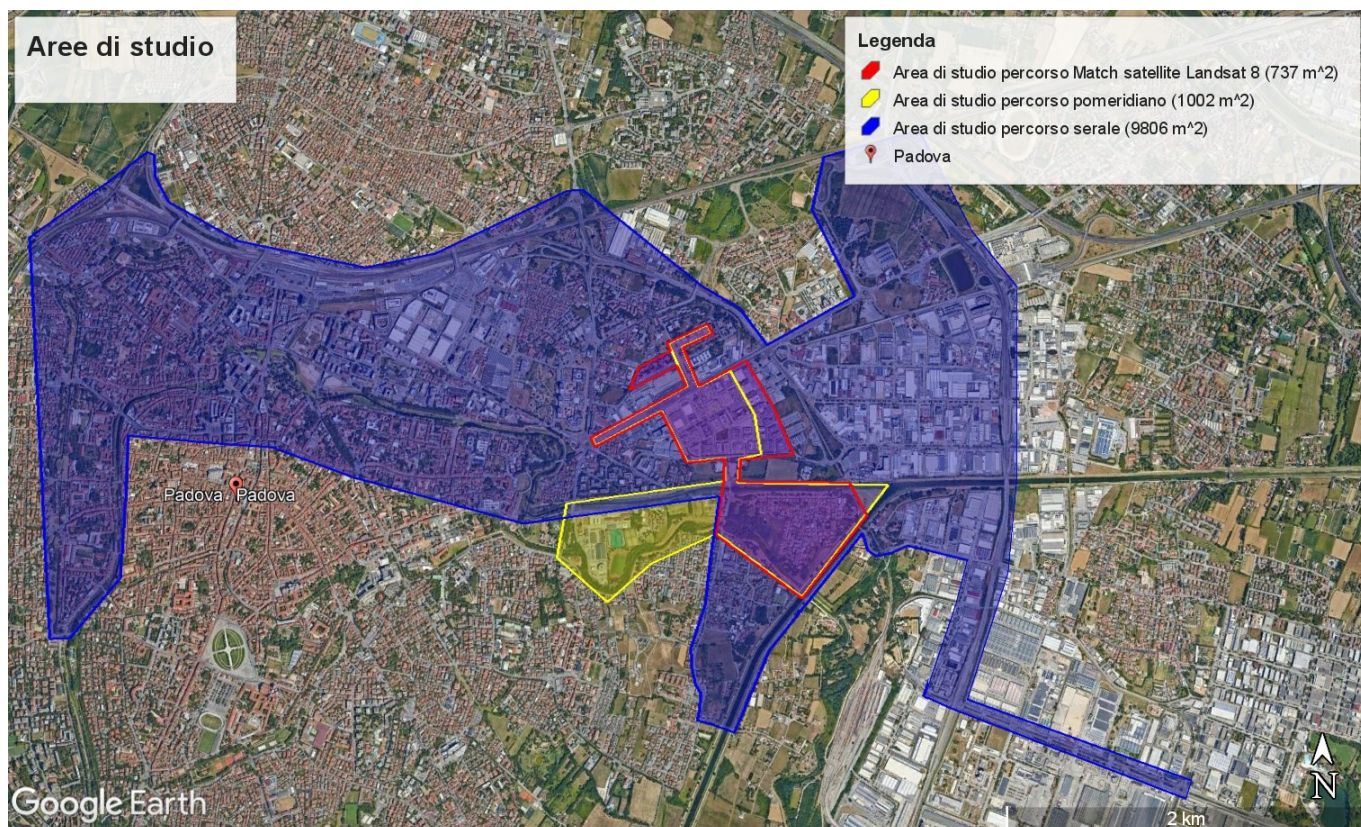


Figura 7. Aree di studio: mobile mapping delle temperature mediante dispositivo MeteoTracker©

### 2.2.2 Mobile Mapping

Per le rilevazioni “dal basso” è stato utilizzato il dispositivo MeteoTracker© agganciato al manubrio della bicicletta oppure attaccato al tetto di un’automobile, rispettivamente per le rilevazioni giornaliere (pomeridiane ed in concomitanza al passaggio di Landsat 8) e notturne.

Di seguito sono riportate le specifiche adottate per condurre gli studi e le caratteristiche dei percorsi:

Tabella 3. Specifiche adottate per condurre gli studi e caratteristiche dei percorsi.

	Percorso Pomeridiano	Percorso Serale	Relazione tra LST e temperatura dell'aria	Altri percorsi (non rilevanti ai fini della ricerca)
<b>Periodo di campionamento</b>	20/07/2023 - 14/09/2023	24/08/2023 - 11/09/2023	15/08/2023 e 08/09/2023	20/07/2023 - 14/09/2023
<b>Orario di campionamento</b>	16:30 - 18:30	22:15 - 00:00	11:40 - 12:20	-
<b>Rilevazioni effettuate</b>	26	7	2	9
<b>Mezzo utilizzato</b>	Bicicletta	Automobile	Bicicletta	Bicicletta/Automobile
<b>Durata media del percorso [min]</b>	39.0	46.7	30.0	Non rilevante
<b>Velocità media [km/h]</b>	14.1	38.2	14.5	Non rilevante
<b>Km percorsi [km]</b>	237.7	207.2	14.5	80.6
<b>Temperatura minima media [°C]</b>	28.7	23.3	27.3	Non rilevante
<b>Temperatura massima media [°C]</b>	31.4	27.3	29.9	Non rilevante

Temperatura minima rilevata [°C]	20.7	18.0	26.4	Non rilevante
Temperatura massima rilevata [°C]	37.6	30.5	30.9	Non rilevante

Km percorsi in totale	540.0
-----------------------	-------

Considerando tutti i tragitti svolti durante il mobile mapping, i chilometri percorsi in totale risultano essere 540.

### 2.2.3 Elaborazione ed analisi dei dati

In questa sezione vengono riportate la descrizione e le procedure per la realizzazione delle varie analisi dei dati raccolti e le rispettive rappresentazioni. La tesi si propone di indagare la relazione tra il parametro LST e la temperatura registrata da MeteoTracker<sup>®</sup>. Inoltre, si è voluto esaminare il fenomeno delle UHI in relazione al consumo di suolo e all'indice di vegetazione NDVI in vari momenti della giornata, utilizzando le metodologie della *GIScience* di seguito descritte.

#### 2.2.3.1 Stima delle caratteristiche dei percorsi

Per il calcolo dei chilometri totali è stato utilizzato un foglio di calcolo Excel in cui sono stati inseriti in una tabella la velocità media di percorrenza per ogni rilevamento, espressa in km/h, e la durata del campionamento, espressa in secondi, rispettivamente trovate nell'applicazione per *smartphone* e nella *dashboard* di MeteoTracker<sup>®</sup>. Successivamente è stata utilizzata la seguente equazione per stimare i chilometri percorsi durante ogni campionamento:

$$km\ percorsi\ [km] = \frac{velocità\ media\ [km/h] * durata\ [s]}{(60*60)[s/h]}$$

Infine, per trovare i km totali, i risultati ottenuti per ciascun percorso sono stati sommati con la funzione "SOMMA".

Per la stima della temperatura massima e minima media, il calcolo della velocità media e della durata media è stata utilizzata la funzione "MEDIA" di Excel.

Sono stati infine individuate la temperatura massima e minima rilevate con le operazioni "MIN" e "MAX", per ottenere questo risultato si sono considerate entrambe le colonne "temperatura minima [°C]" e "temperatura massima [°C]", in modo da non trascurare nessun valore di temperatura ottenuto.

**Tabella 4.** Caratteristiche dei singoli rilevamenti, percorsi pomeridiani.

<b>POMERIGGIO</b>					
<b>Giorno</b>	<b>Durata percorso [s]</b>	<b>velocità media [km/h]</b>	<b>km percorsi [km]</b>	<b>temperatura minima [°C]</b>	<b>temperatura massima [°C]</b>
20-lug	2545	12.9	9.1	31.4	35.4
24-lug	2385	13.7	9.1	27.8	30.6
27-lug	2506	13.9	9.7	25.1	27.8
14-ago	2256	14.8	9.3	30.2	33.2
15-ago	2229	15.1	9.3	31.1	33.6
16-ago	2402	14.1	9.4	31.4	33.5
17-ago	2516	13.0	9.1	29.2	32.1
18-ago	2466	13.3	9.1	31.0	33.5
19-ago	2070	15.5	8.9	31.7	34.1
20-ago	2080	15.5	9.0	32.1	34.2
21-ago	2215	14.7	9.0	33.5	36.2
23-ago	2160	14.8	8.9	33.9	37.6
24-ago	2396	13.7	9.1	34.1	36.5
25-ago	2355	14.0	9.2	32.0	35.0
26-ago	2292	14.2	9.0	31.9	35.4
28-ago	2474	13.3	9.1	22.9	25.7
30-ago	2527	13.1	9.2	20.7	23.3
31-ago	2303	14.2	9.1	23.8	25.9
01-set	2245	14.4	9.0	26.6	29.1
04-set	2532	13.4	9.4	26.3	28.8
05-set	2194	14.9	9.1	25.4	27.6
08-set	2297	14.5	9.3	28.2	30.7
10-set	2271	13.8	8.7	27.9	30.8
11-set	2358	14.1	9.2	28.6	31.4
13-set	2451	13.3	9.1	25.6	27.6
14-set	2306	14.5	9.3	24.7	27.5
<b>Durata media [min]</b>	39.0				
<b>Velocità media [km/h]</b>	14.1				
<b>km totali percorsi [km]</b>	237.7				
<b>temperatura minima media [°C]</b>	28.7				
<b>temperatura massima media [°C]</b>	31.4				
<b>temperatura minima rilevata [°C]</b>	20.7				
<b>temperatura massima rilevata [°C]</b>	37.6				

**Tabella 5.** Caratteristiche dei singoli rilevamenti, percorsi serali.

<b>SERA</b>					
<b>Giorno</b>	<b>Durata percorso [s]</b>	<b>velocità media [km/h]</b>	<b>km percorsi [km]</b>	<b>temperatura minima [°C]</b>	<b>temperatura massima [°C]</b>
24-ago	2102	35.6	20.8	27.0	30.5
25-ago	2796	38.3	29.7	26.3	29.1
26-ago	2832	38.1	30.0	25.3	29.2
27-ago	3679	32.4	33.1	25.9	28.0
03-set	2786	44.0	34.1	21.0	25.7
10-set	2724	39.5	29.9	18.0	24.1
11-set	2691	39.7	29.7	19.4	24.4
<b>Durata media [min]</b>	46.7				
<b>Velocità media [km/h]</b>	38.2				
<b>km totali percorsi [km]</b>	207.2				
<b>temperatura minima media [°C]</b>	23.3				
<b>temperatura massima media [°C]</b>	27.3				
<b>temperatura minima rilevata [°C]</b>	18.0				
<b>temperatura massima rilevata [°C]</b>	30.5				

**Tabella 6.** Caratteristiche dei singoli rilevamenti, relazione tra LST e temperatura dell'aria.

<b>Relazione tra LST e temperatura dell'aria</b>					
<b>Giorno</b>	<b>Durata percorso [s]</b>	<b>velocità media [km/h]</b>	<b>km percorsi [km]</b>	<b>temperatura minima [°C]</b>	<b>temperatura massima [°C]</b>
15-ago	1758	14.9	7.3	28.2	30.9
08-set	1843	14.1	7.2	26.4	28.8
<b>Durata media [min]</b>	30.0				
<b>Velocità media [km/h]</b>	14.5				
<b>km totali percorsi [km]</b>	14.5				
<b>temperatura minima media [°C]</b>	27.3				
<b>temperatura massima media [°C]</b>	29.9				
<b>temperatura minima rilevata [°C]</b>	26.4				
<b>temperatura massima rilevata [°C]</b>	30.9				

### 2.2.3.2 Il modello *Ordinary Least Square*

*Ordinary Least Square* (OLS) è un metodo impiegato nell'ambito della statistica per calcolare stime dei coefficienti di regressione all'interno di un modello di regressione lineare. Questo metodo è utilizzato per

analizzare la relazione tra una variabile dipendente (variabile risposta) ed una o più variabili indipendenti (variabili predittive). In questo modo, il modello OLS è in grado di determinare la retta che minimizza la somma dei quadrati dei residui, ovvero la differenza tra i valori osservati e quelli previsti dal modello. In particolare, per questo studio, è interessante osservare il risultato ottenuto in merito ad “R al quadrato”. Il coefficiente di determinazione R quadro è un valore statistico che permette di capire se un modello di regressione lineare può essere utilizzato al fine di compiere delle previsioni, esso valuta quanto le singole osservazioni si discostano dalla retta di regressione e, in generale, ad un coefficiente di determinazione maggiore corrisponde una minore discrepanza tra i valori osservati e quelli attesi (Pozzolo, 2020).

### 2.2.3.3 Singolo percorso pomeridiano e serale

Nel seguente paragrafo, l'obiettivo è fornire un riassunto dei procedimenti coinvolti nell'analisi della relazione tra la temperatura rilevata tramite il dispositivo MeteoTracker<sup>®</sup> e i dati contenuti nella Carta di Consumo del Suolo e l'indice NDVI di vigore vegetativo. Di seguito vengono riassunti i passaggi del flusso di lavoro identificato alla Figura 8:

1. Caricamento su QGIS delle misurazioni MeteoTracker<sup>®</sup> in formato CSV, la Carta di Copertura del Suolo (*Corine Land Cover*) del comune di Padova ed i file raster grezzi delle bande 4, 5 e 10 relativi al passaggio del 15 agosto 2023 del satellite Landsat 8.
2. Ritaglio delle bande 4, 5 e 10 con un *buffer* di 15 km dal centroide del comune di Padova, definendo in questo modo una zona cuscinetto.
3. Calcolo dell'indice NDVI tramite il procedimento individuato da Pappalardo et al. (2023) utilizzando i dati satellitari ritagliati al punto 2.
4. Per una più chiara distinzione del cambio di valore dell'indice NDVI, si è scelto di modificare la simbologia della rappresentazione passando da una visualizzazione “banda singola grigia” ad una “banda singola falso colore”: la condizione del terreno è stata suddivisa in 10 classi basate sui valori dei quantili, ad ogni categoria corrisponde un colore differente che parte dal viola, per un valore di NDVI minore, fino ad arrivare al verde passando per il bianco.
5. Rappresentazione dei punti contenenti le temperature rilevate dal dispositivo MeteoTracker<sup>®</sup>.
6. Per una più chiara visualizzazione del cambio di temperatura nel singolo percorso si è scelto di cambiare la simbologia della raffigurazione passando da una configurazione a “simbolo singolo” ad una graduata: la condizione termica rilevata in ogni punto del tragitto è stata quindi classificata in 10 categorie aventi *range* di valori della stessa ampiezza, ad ogni categoria corrisponde un colore differente che parte dal blu, per le temperature minori, fino ad arrivare al rosso passando per il bianco.
7. Eliminazione del primo minuto di rilevazioni dal singolo percorso in modo da evitare eventuali errori dovuti all'adattamento del dispositivo.

8. Creazione di un reticolo, esteso all'area di studio, composto da esagoni aventi spaziatura orizzontale e verticale di venti metri, nel caso del percorso pomeridiano, oppure cento metri, nel caso del percorso serale.
9. Calcolo dell'indice NDVI medio per ogni esagono appartenente al reticolo utilizzando la funzione "statistiche zonali" individuata alla voce "analisi raster" tra gli strumenti di *Processing* di QGIS.
10. Calcolo delle statistiche relative al percorso preso in considerazione (media, minimo, massimo, intervallo e maggioranza) per ogni esagono appartenente al reticolo, per ottenere questo risultato è stata usata la funzione "statistiche zonali" individuata alla voce "analisi raster" tra gli strumenti di *Processing* di QGIS. Da quest'ultimo esito sono state eliminate le componenti con valori nulli.
11. Intersezione tra la Fishnet contenente l'indice NDVI medio e quella contenente le statistiche dei percorsi. Da quest'ultimo esito sono state eliminate le componenti con valori nulli.
12. Intersezione tra la temperatura dell'aria e l'uso del suolo prendendo in considerazione la singola sessione *MeteoTracker*<sup>©</sup> e lo *shapefile* prodotto a partire dal *dataset* CLC, in questo modo è stato associato ad ogni punto della rilevazione il corrispondente uso del suolo.
13. Creazione di un grafico *Scatter Plot* a partire dall'intersezione ricavata al punto 11, avente l'indice NDVI medio sull'asse delle ordinate e la temperatura media dell'aria sull'asse delle ascisse, tramite l'utilizzo del *software* Microsoft Excel.
14. Creazione di un modello *Ordinary least Square*, a partire dall'intersezione ricavata al punto 11 tramite l'utilizzo dello strumento di analisi dei dati denominato "regressione" fornito dal *software* Microsoft Excel.
15. Creazione di due grafici, un *Violin Plot* ed un *Box Plot*, a partire dall'intersezione ricavata al punto 12, utilizzando il *Plugin* di QGIS *DataPloty*.
16. Rappresentazione su mappa di tre diverse situazioni: il singolo percorso, il tragitto a confronto con la Carta di Consumo del Suolo ed il percorso a confronto con l'indice NDVI.



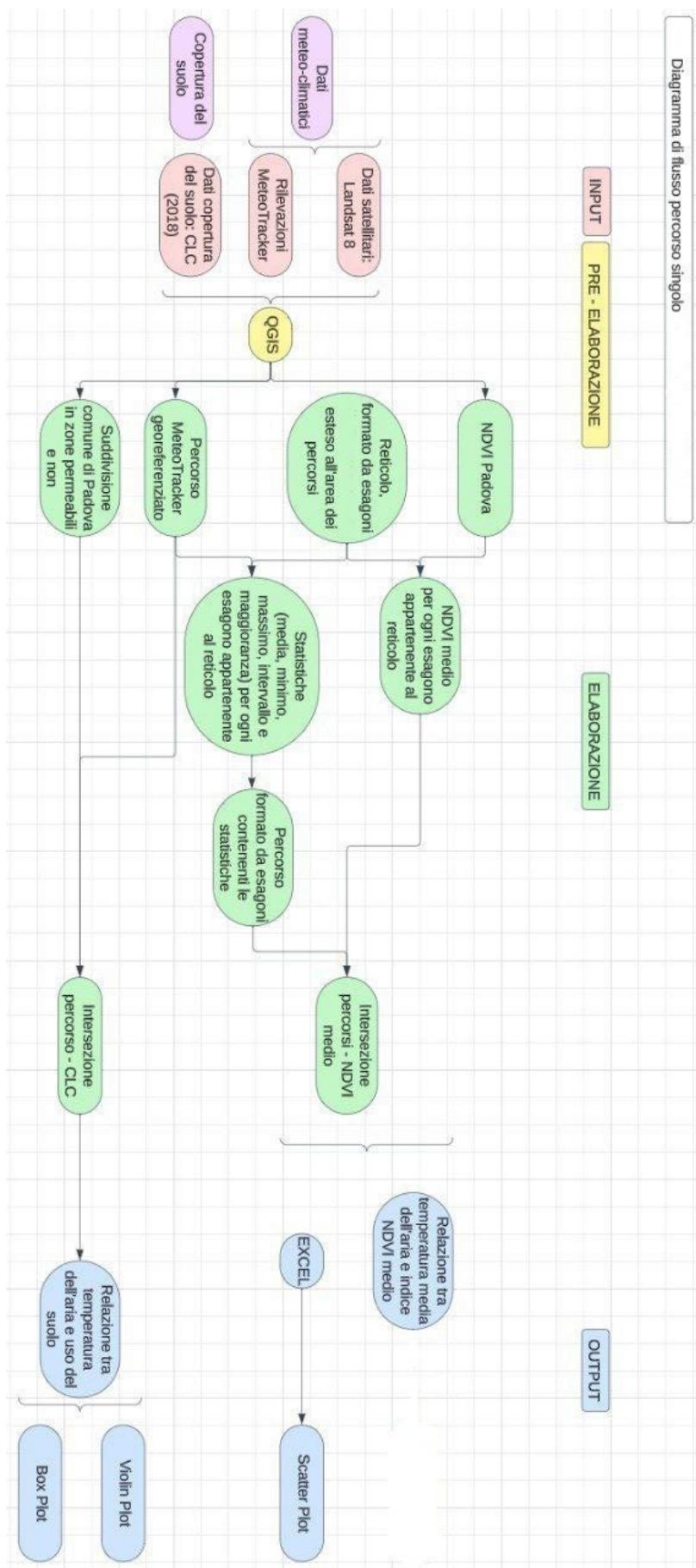


Figura 8. Diagramma di flusso per l'elaborazione dei dati relativi al singolo percorso, pomeridiano e serale.

#### 2.2.3.4 Media dei percorsi pomeridiani e serali

L'obiettivo del seguente paragrafo è riassumere i procedimenti svolti per analizzare la relazione tra la temperatura media dell'aria e la Carta di Consumo del Suolo e l'indice NDVI medio di vigore vegetativo.

Di seguito vengono riassunti i passaggi del flusso di lavoro identificato alla Figura 9:

1. Caricamento su QGIS delle misurazioni MeteoTracker<sup>®</sup> in formato CSV, la Carta di Copertura del Suolo (*Corine Land Cover*) del comune di Padova ed i file raster grezzi delle bande 4, 5 e 10 relativi al passaggio del 15 agosto 2023 del satellite Landsat 8.
2. Ritaglio delle bande 4, 5 e 10 con un *buffer* di 15 km dal centroide del comune di Padova, definendo in questo modo una zona cuscinetto.
3. Calcolo dell'indice NDVI tramite il procedimento individuato da Pappalardo et al. (2023) utilizzando i dati satellitari ritagliati al punto 2.
4. Per una più chiara distinzione del cambio di valore dell'indice NDVI, si è scelto di modificare la simbologia della rappresentazione passando da una visualizzazione “banda singola grigia” ad una “banda singola falso colore”: la condizione del terreno è stata suddivisa in 10 classi basate sui valori dei quantili, ad ogni categoria corrisponde un colore differente che parte dal viola, per un valore di NDVI minore, fino ad arrivare al verde passando per il bianco.
5. Rappresentazione dei punti contenenti le temperature rilevate dal dispositivo MeteoTracker<sup>®</sup>.
6. Per una più chiara visualizzazione del cambio di temperatura nel singolo percorso si è scelto di cambiare la simbologia della raffigurazione passando da una configurazione a “simbolo singolo” ad una graduata: la condizione termica rilevata in ogni punto del tragitto è stata quindi classificata in 10 categorie aventi *range* di valori della stessa ampiezza, ad ogni categoria corrisponde un colore differente che parte dal blu, per le temperature minori, fino ad arrivare al rosso passando per il bianco.
7. Eliminazione del primo minuto di rilevazioni dal singolo percorso in modo da evitare eventuali errori dovuti all'adattamento del dispositivo.
8. Creazione di un reticolo, esteso all'area di studio, composto da esagoni aventi spaziatura orizzontale e verticale di venti metri, nel caso del percorso pomeridiano, oppure cento metri, nel caso del percorso serale.
9. Calcolo dell'indice NDVI medio per ogni esagono appartenente al reticolo utilizzando la funzione “statistiche zonali” individuata alla voce “analisi raster” tra gli strumenti di *Processing* di QGIS.
10. Calcolo delle statistiche relative al singolo percorso preso in considerazione (media, minimo, massimo, intervallo e maggioranza) per ogni esagono appartenente al reticolo, per ottenere questo risultato è stata usata la funzione “statistiche zonali” individuata alla voce “analisi raster” tra gli strumenti di *Processing* di QGIS. Da quest'ultimo esito sono state eliminate le componenti con valori nulli. Questo passaggio è stato ripetuto per ogni rilevazione MeteoTracker<sup>®</sup>.

11. Fusione dei risultati ottenuti al punto 10 utilizzando la funzione “fondi vettori”: i *file* relativi alle sessioni pomeridiane sono stati raggruppati distintamente rispetto a quelli riguardanti le sessioni serali.
12. Calcolo della media di temperatura per ogni esagono appartenente al reticolo, basandosi sulla fusione ottenuta al punto 11. In questo modo ad ogni esagono ottenuto corrisponde un valore di temperatura medio calcolato considerando i valori medi identificati precedentemente per ogni singolo percorso. Da quest’ultimo esito sono state eliminate le componenti con valori nulli.
13. Pulizia dalle anomalie: dal risultato ottenuto al punto 12 sono state eliminate le figure contenenti meno di ventisei punti, nel caso delle rilevazioni pomeridiane, e meno di sette punti, nel caso di quelle notturne. In questo modo si considerano solo le zone in cui il rilevamento è stato effettuato per tutte le sessioni di analisi (è stato possibile identificare il numero di punti presenti in un determinato esagono grazie al valore statistico “numero” calcolato assieme alla media).
14. Fusione dei singoli percorsi MeteoTracker<sup>®</sup> utilizzando la funzione “fondi vettori”: le sessioni relative alle rilevazioni pomeridiane sono state raggruppate distintamente rispetto a quelle riguardanti le misurazioni serali.
15. Calcolo delle statistiche relative al percorso totale ottenuto al punto 14 (media, minimo, massimo, intervallo e maggioranza) per ogni esagono appartenente al reticolo, per ottenere questo risultato è stata usata la funzione “statistiche zonali” individuata alla voce “analisi raster” tra gli strumenti di *Processing* di QGIS. Da quest’ultimo esito sono state eliminate le componenti con valori nulli.
16. Intersezione tra la Fishnet contenente l’indice NDVI medio e quella ottenuta al punto 13. Da quest’ultimo esito sono state eliminate le componenti con valori nulli.
17. Intersezione tra la Fishnet contenente le statistiche relative al percorso totale, ottenuta al punto 15, e la Carta di Consumo del Suolo.
18. Creazione di un grafico *Scatter Plot* a partire dall’intersezione ricavata al punto 16, avente l’indice NDVI medio sull’asse delle ordinate e la temperatura media dell’aria sull’asse delle ascisse, tramite l’utilizzo del *software* Microsoft Excel.
19. Creazione di un modello OLS, a partire dall’intersezione ricavata al punto 16 tramite l’utilizzo dello strumento di analisi dei dati denominato “regressione” fornito dal *software* Microsoft Excel.
20. Creazione di due grafici, un *Violin Plot* ed un *Box Plot*, a partire dall’intersezione ricavata al punto 17, utilizzando il *Plugin* di QGIS DataPloty.
21. Rappresentazione su mappa di diverse situazioni: la fusione di tutti i percorsi, il confronto tra la fusione dei tragitti e *Corine Land Cover* e la fusione dei percorsi a confronto con l’indice NDVI.

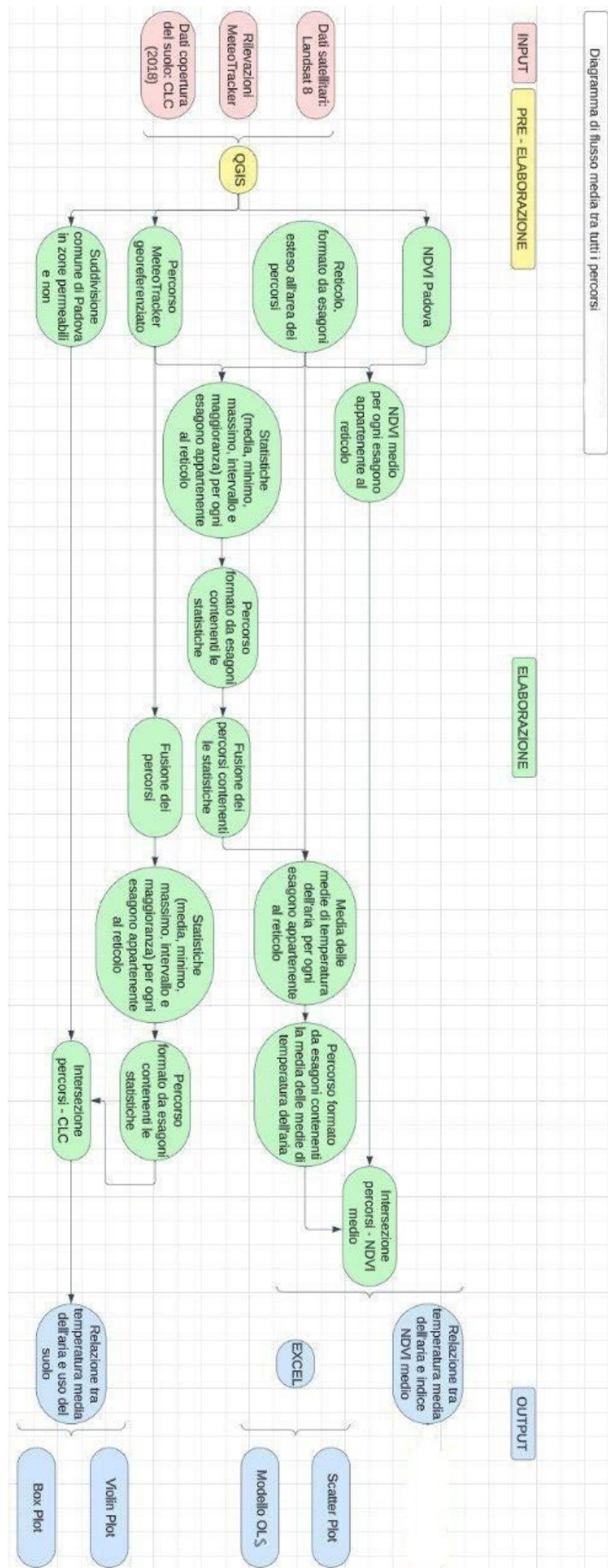


Figura 9. Diagramma di flusso per l'elaborazione dei dati relativi alla fishnet dei percorsi, pomeridiani e serali.

### 2.2.3.5 Relazione tra il parametro LST e la temperatura dell'aria (15/08/2023 e 08/09/2023)

Per quanto riguarda le rilevazioni svolte in concomitanza del passaggio mattutino del satellite Landsat 8, sono state considerate le misurazioni MeteoTracker<sup>®</sup> ottenute i giorni 15 agosto ed 8 settembre 2023, in quanto nelle altre giornate utili al confronto le condizioni meteorologiche sfavorevoli hanno rovinato le immagini satellitari rendendole inutili allo scopo della ricerca.

In questa parte di analisi si è voluto indagare la relazione tra il parametro LST, il quale rappresenta la temperatura del suolo, e la temperatura dell'aria individuata dal dispositivo MeteoTracker<sup>®</sup> in modo da poter verificare se il parametro individuato grazie alle immagini satellitari può essere rappresentativo anche della condizione termica dell'aria. Inoltre, è stata analizzata la relazione tra la temperatura dell'aria e la Carta di Consumo del Suolo.

Di seguito vengono riassunti i passaggi del flusso di lavoro identificato alla Figura 10:

1. Caricamento su QGIS delle misurazioni MeteoTracker<sup>®</sup> in formato CSV, la Carta di Copertura del Suolo (*Corine Land Cover*) del comune di Padova ed i file raster grezzi delle bande 4, 5 e 10, relativi al passaggio del 15 agosto ed 8 settembre 2023 del satellite Landsat 8.
2. Ritaglio delle bande 4, 5 e 10 con un *buffer* di 15 km dal centroide del comune di Padova, definendo in questo modo una zona cuscinetto.
3. Calcolo del parametro LST tramite il procedimento individuato da Pappalardo et al. (2023) utilizzando i dati satellitari ritagliati al punto 2.
4. Per una più chiara distinzione del cambio di temperatura legato al parametro LST, si è scelto di cambiare la simbologia della rappresentazione passando da una visualizzazione “banda singola grigia” ad una “banda singola falso colore”. La condizione termica è stata quindi suddivisa in 10 classi basate sui valori dei quantili, ad ogni categoria corrisponde un colore differente che parte dal blu, per un valore di LST minore, fino ad arrivare al rosso passando per il bianco.
5. Rappresentazione dei punti contenenti le temperature rilevate dal dispositivo MeteoTracker<sup>®</sup>.
6. Per una più chiara visualizzazione del cambio di temperatura nel singolo percorso si è scelto di cambiare la simbologia della raffigurazione passando da una configurazione a “simbolo singolo” ad una graduata: la condizione termica rilevata in ogni punto del tragitto è stata quindi classificata in 10 categorie aventi *range* di valori della stessa ampiezza, ad ogni categoria corrisponde un colore differente che parte dal blu, per le temperature minori, fino ad arrivare al rosso passando per il bianco.
7. Eliminazione del primo minuto di rilevazioni dal singolo percorso in modo da evitare eventuali errori dovuti all'adattamento del dispositivo.
8. Intersezione tra la temperatura dell'aria e il parametro LST, il quale rappresenta la temperatura del suolo. Le temperature sono associate in base alla posizione in cui sono state misurate. È importante

ricordare che il sensore termico del satellite Landsat 8 ha risoluzione spaziale di 100 m, di conseguenza il valore di temperatura ottenuto è una media calcolata su un pixel di 100x100m

9. Intersezione tra la temperatura dell'aria e l'uso del suolo prendendo in considerazione la singola sessione MeteoTracker<sup>©</sup> e lo *shapefile* prodotto a partire dal *dataset* CLC. In questo modo è stato associato ad ogni punto della rilevazione il corrispondente uso del suolo.
10. Creazione di un grafico *Scatter Plot* a partire dall'intersezione ricavata al punto 8, avente il parametro LST sull'asse delle ordinate e la temperatura dell'aria sull'asse delle ascisse, tramite l'utilizzo del *software* Microsoft Excel.
11. Creazione di un modello OLS, a partire dall'intersezione ricavata al punto 8 tramite l'utilizzo dello strumento di analisi dei dati denominato "regressione" fornito dal *software* Microsoft Excel.
12. Creazione di due grafici, un *Violin Plot* ed un *Box Plot*, a partire dall'intersezione ricavata al punto 9, utilizzando il *Plugin* di QGIS DataPloty.
13. Rappresentazione su mappa di diverse situazioni: il singolo percorso, il tragitto a confronto con la Carta di Consumo del Suolo ed il percorso a confronto con l'indice LST.

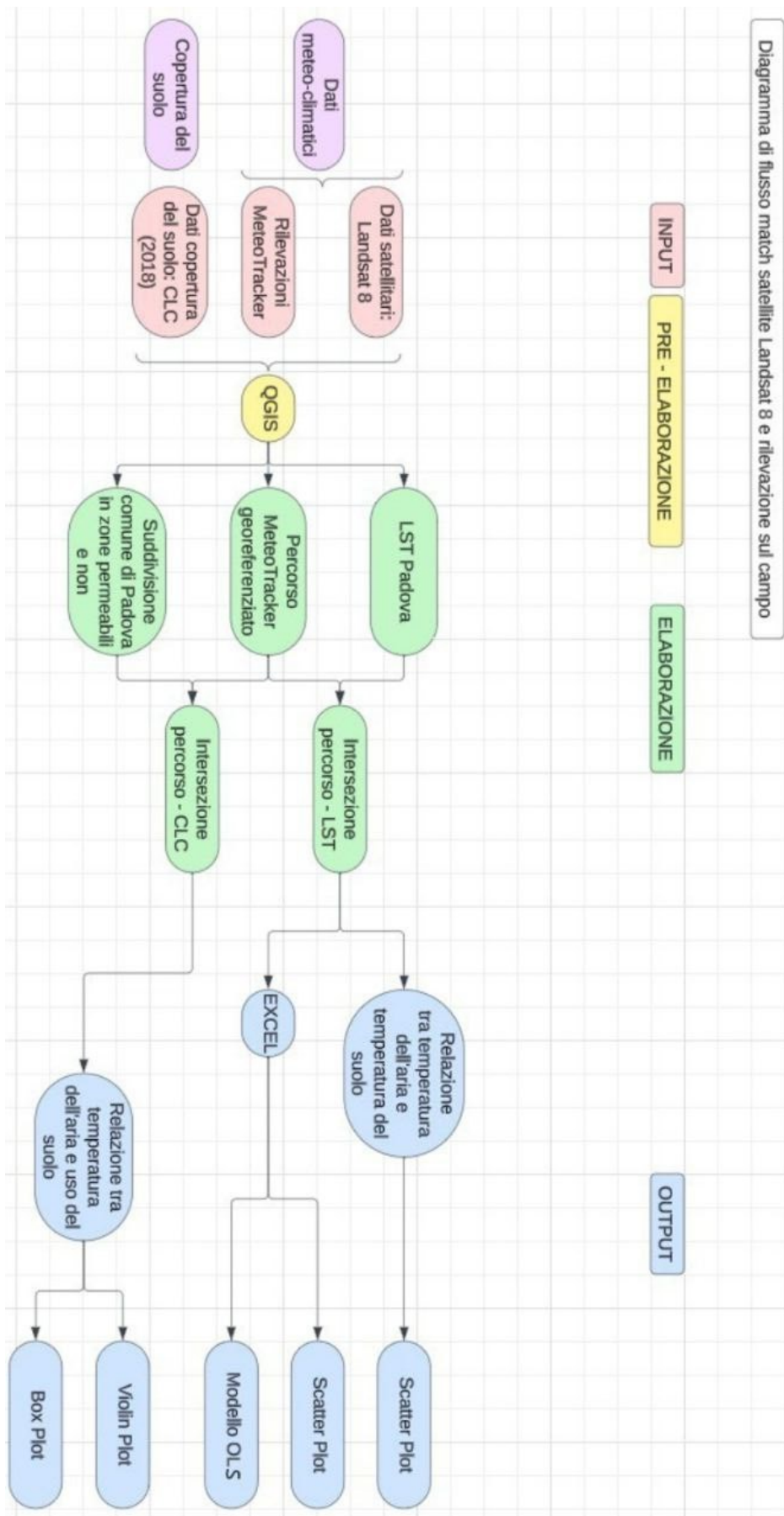


Figura 10. Diagramma di flusso per l'elaborazione dei dati relativi al match con il passaggio del satellite Landsat 8.





# 3 Risultati e discussione

## 3.1 Temperature massime e minime rilevate

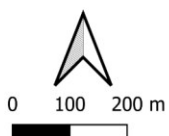
Dalle stime compiute a partire dalle analisi sul campo è emerso che le maggiori variazioni di temperatura si hanno durante il pomeriggio, raggiungendo una differenza massima di 3,9 °C tra il picco ed il valore minore il giorno 20 luglio; la distanza tra le due zone è di 1,20 km in linea d'aria, è possibile osservare quanto detto alle Figure 11 e 12.



Figura 11. Distanza tra zona calda e zona temperata.

PERCORSO\_20.07.2023

- 30.1 - 32.05
- 32.05 - 32.5
- 32.5 - 32.8
- 32.8 - 33
- 33 - 33.3
- 33.3 - 33.5
- 33.5 - 33.8
- 33.8 - 34.2
- 34.2 - 34.5
- 34.5 - 35.4



**Figura 12.** Percorso pomeridiano 20/07/2023, i valori di temperatura dell'aria [°C].

La temperatura maggiore è stata ottenuta il giorno 23 agosto, durante una sessione pomeridiana, con un valore di 37,6 °C nel corso di una condizione meteorologica che può essere considerata un'ondata di calore, come è possibile osservare alla Figura 13.

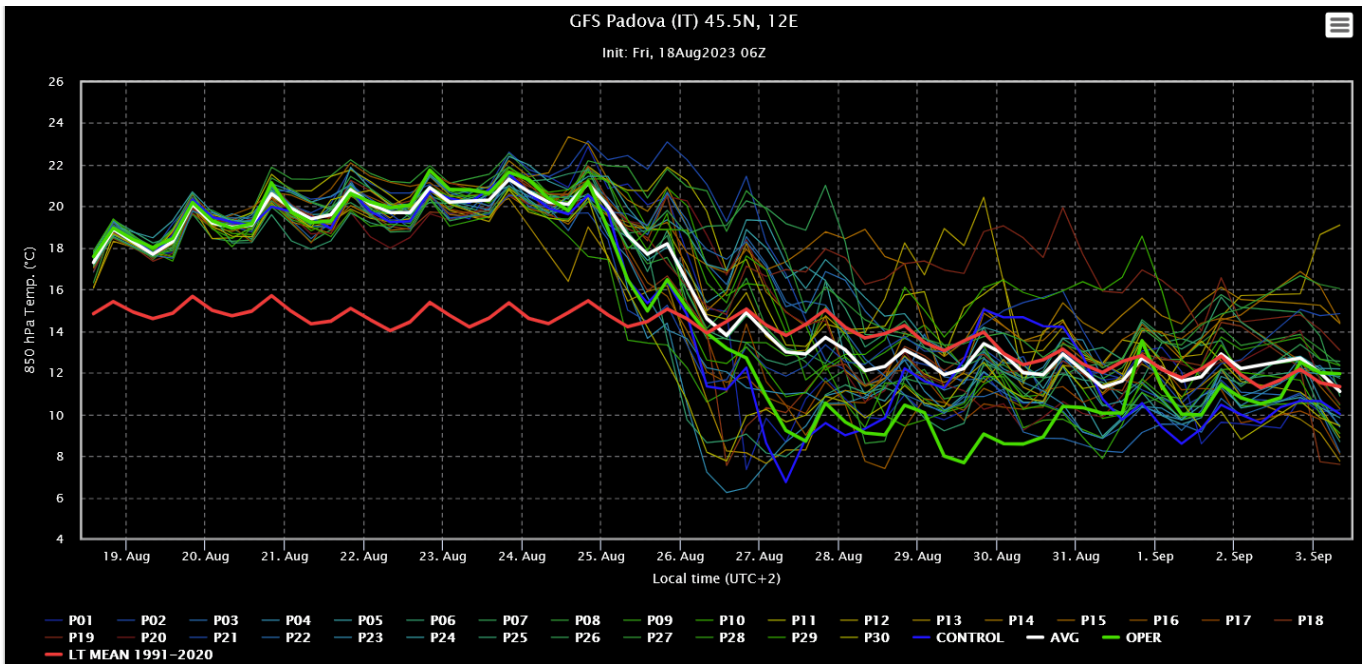


Figura 13. Condizioni metereologiche Padova 19 agosto - 3 settembre (<https://www.wetterzentrale.de>).

La temperatura più bassa, invece, è stata rilevata il giorno 10 settembre durante una rilevazione serale. Un altro picco di temperature, con anomalie positive sino a 5 °C rispetto alle medie climatiche, è stato rilevato tra il 4 settembre ed il 14 settembre; nella Figura 14 si può notare in particolare il picco relativo al 4 settembre.

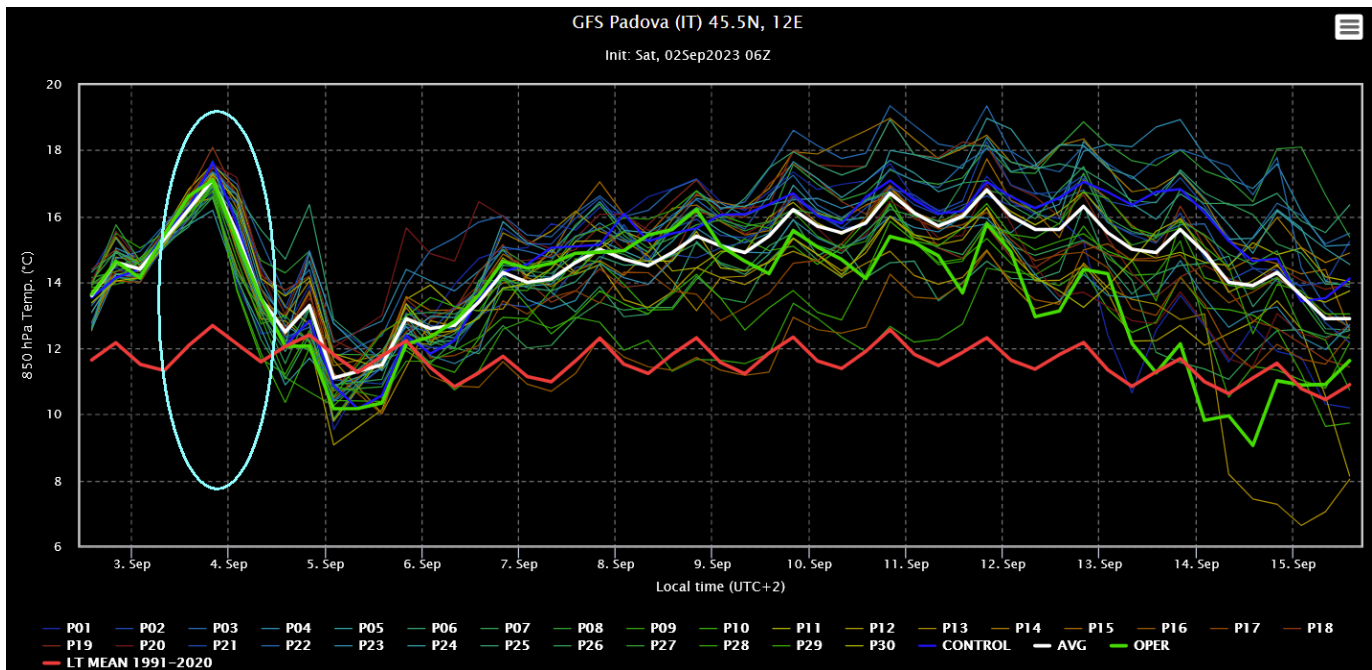


Figura 14. Condizioni metereologiche a Padova tra il 3 e 15 settembre (<https://www.wetterzentrale.de>).

## 3.2 Singolo percorso pomeridiano e serale

Di seguito sono analizzate le sessioni relative al giorno 25 agosto 2023, rilevazione pomeridiana e serale, in quanto considerate le più rappresentative. Per un maggior dettaglio circa la cartografia ed i grafici relativi agli altri campionamenti si veda l'Allegato 1.

Di seguito, alle Figure 15 e 16, sono riportate le rappresentazioni cartografiche dei rilievi effettuati mediante *mobile mapping*; è possibile osservare, in entrambi i momenti della giornata, come Via Venezia e l'area commerciale di Padova siano ad una temperatura maggiore, raggiungendo un massimo di 35 °C durante le rilevazioni diurne e 29,1 °C la sera, rispetto alle zone immediatamente periferiche, le quali scendono fino ad un minimo di 31,6 °C durante il pomeriggio e 26,3 °C alla sera. Inoltre, per quanto riguarda il campionamento serale, è possibile notare che le condizioni termiche più elevate si trovano anche in corrispondenza della zona industriale (in particolare Corso Stati Uniti) e del centro di Padova, arrivando a toccare i 28 °C in corrispondenza della stazione ferroviaria (Figura 16).

PERCORSO\_25.08.2023

- 31.6 - 32.4
- 32.4 - 32.6
- 32.6 - 32.8
- 32.8 - 33
- 33 - 33.3
- 33.3 - 33.5
- 33.5 - 33.8
- 33.8 - 34.3
- 34.3 - 34.5
- 34.5 - 35

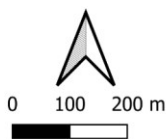
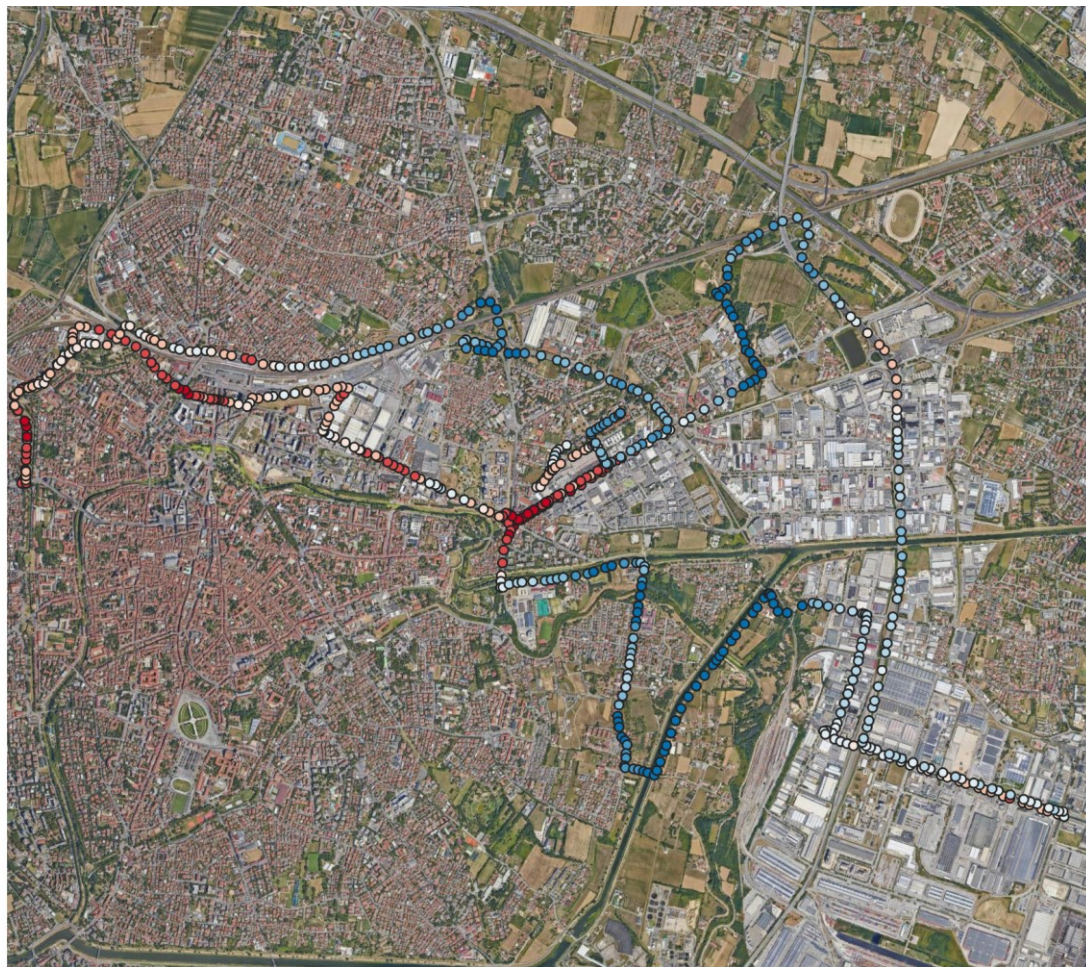
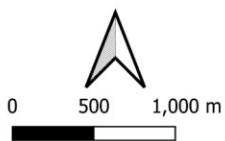


Figura 15. Percorso pomeridiano (17:15 – 17:56) 25/08/2023, i valori di temperatura dell'aria [°C].

PERCORSO\_25.08.2023

- 26.3 - 27.5
- 27.5 - 27.7
- 27.7 - 28
- 28 - 28.2
- 28.2 - 28.4
- 28.4 - 28.5
- 28.5 - 28.6
- 28.6 - 28.6
- 28.6 - 28.8
- 28.8 - 29.1



**Figura 16.** Percorso serale (22:15 – 23:03) 25/08/2023, i valori di temperatura dell'aria [°C].

Dal confronto tra la temperatura dell'aria e l'uso del suolo sono stati ottenuti una rappresentazione cartografica (Figure 17 e 18), un *Box Plot* (Grafici 1 e 2) ed un *Violin Plot* (Grafici 3 e 4) per ciascuna delle rilevazioni.

Considerando la rappresentazione cartografica di Figura 17 si può osservare come nelle aree classificate come “suolo impermeabile” le temperature siano superiori; per contro, su superfici permeabili la condizione termica dell'aria risulta essere notevolmente più bassa.



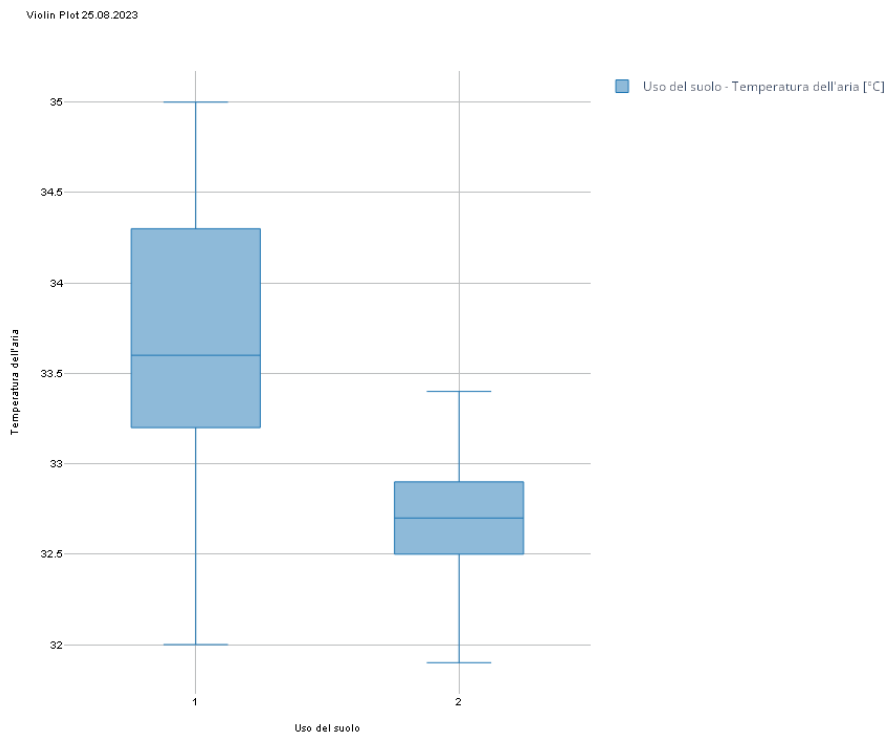
**Figura 17.** Percorso pomeridiano (17:15 – 17:56) 25/08/2023, i valori di temperatura dell'aria [°C] a confronto con la carta del consumo di suolo.

Per quanto riguarda la rilevazione serale rappresentata alla Figura 18, quanto affermato in precedenza è meno evidente: si possono notare delle zone con valori termici più bassi anche in corrispondenza delle aree impermeabili, questa anomalia è dovuta probabilmente alla presenza di viali alberati e di zone verdi in prossimità delle strade percorse, non segnalati nella carta del consumo di suolo, in grado di abbassare la temperatura dell'aria.



**Figura 18.** Percorso serale (22:15 – 23:03) 25/08/2023, i valori di temperatura dell'aria [°C] a confronto con la carta del consumo di suolo.

Nel Grafico 1 è rappresentato il *Box Plot* relativo al percorso pomeridiano ed è possibile distinguere i *range* di temperatura relativi al “suolo impermeabile” (1) ed al “suolo permeabile” (2): per quanto riguarda la prima zona l'intervallo è compreso tra 32 °C e 35 °C, mentre il secondo dato ha *range* compreso tra 31,9 °C e 33,4 °C. Considerando i valori medi, la media di temperatura relativa alla zona non permeabile è di 33,6 °C, mentre quella relativa all'area permeabile è di 32,7 °C, circa un grado inferiore.

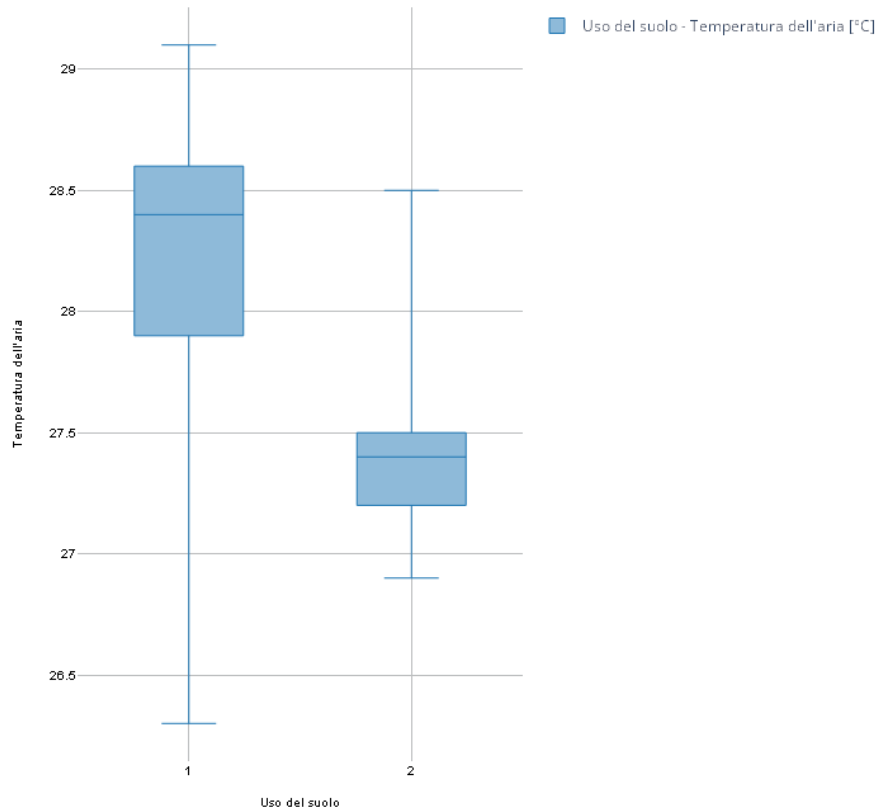


**Grafico 1.** *Box Plot* 25/08/2023 percorso pomeridiano (17:15 – 17:56), confronto tra uso del suolo (suolo impermeabile (1) e suolo permeabile (2) e temperatura dell'aria [°C].

Anche nel Grafico 2, relativo al *Box Plot* della sessione serale, si possono distinguere gli intervalli di temperatura associati alle zone impermeabili e permeabili: per quanto riguarda il primo tipo di suolo il *range* è compreso tra 25,3 °C e 29,1 °C, viceversa, la seconda zona è compresa tra 26,9 °C e 28,5 °C. Considerando i valori medi, la media di temperatura relativa al suolo impermeabile è di 28,4 °C, mentre quella relativa all'area permeabile è di 27,4 °C, anche in questo caso la differenza tra le due è di circa un grado.

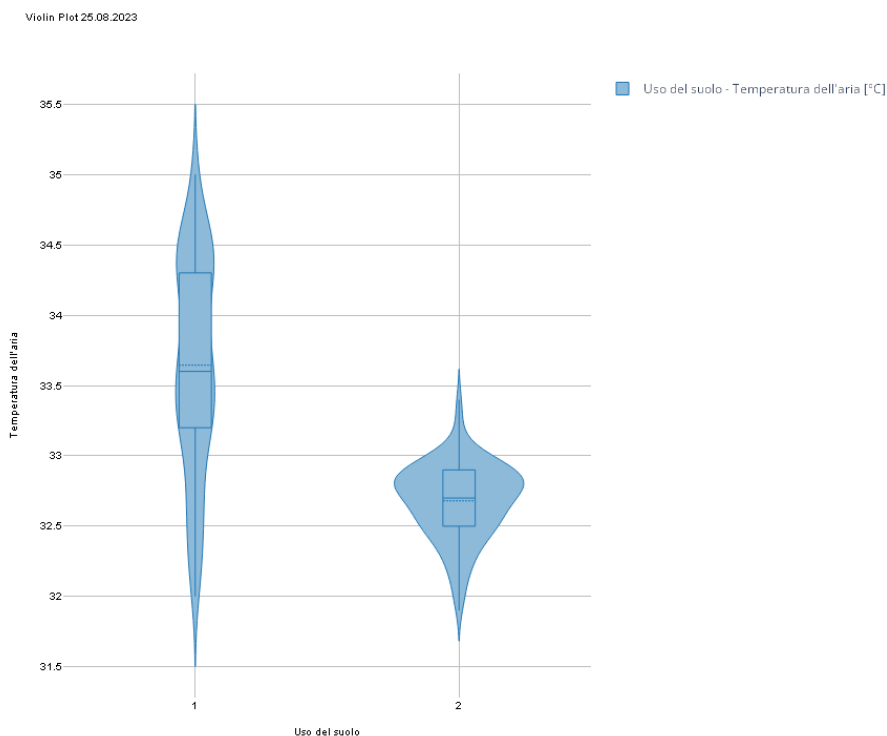


Box Plot 25.08.2023



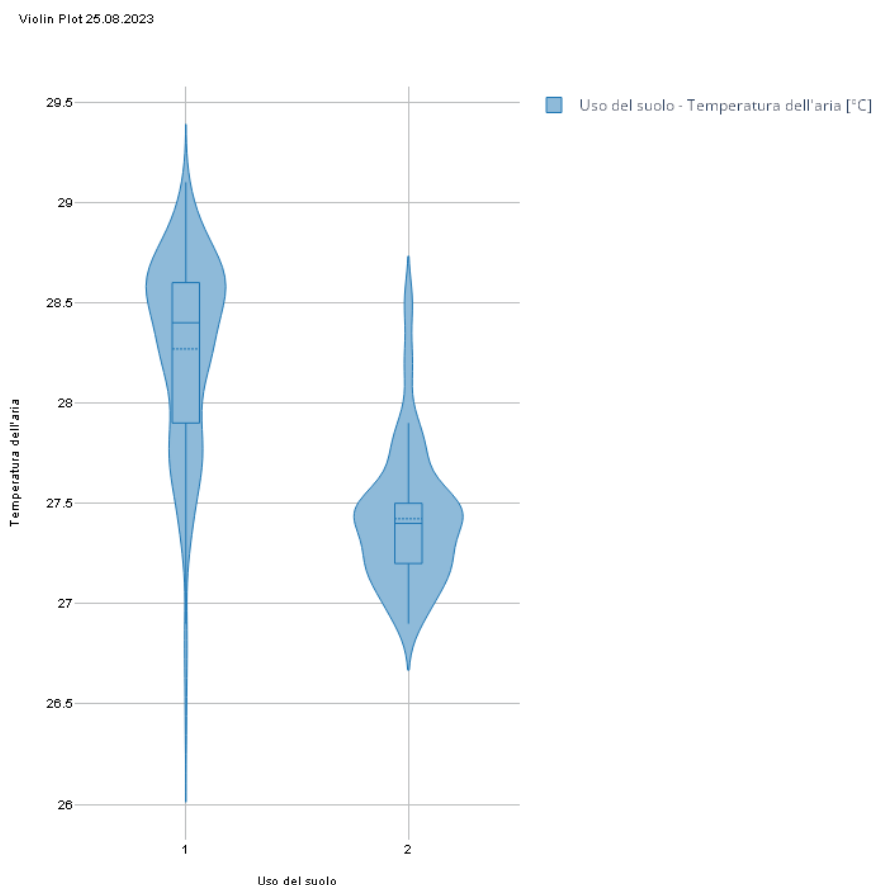
**Grafico 2.** Box Plot 25/08/2023 percorso serale (22:15 – 23:03), confronto tra uso del suolo (suolo impermeabile (1) e suolo permeabile (2) e temperatura dell'aria [°C].

Di seguito è riportato il *Violin Plot* relativo alla misurazione pomeridiana; in tale grafico è possibile notare, oltre a quanto è stato già osservato in merito al Grafico 1, che la forma del violino relativa al suolo impermeabile risulta più allungata rispetto a quella associata alla zona permeabile. Di conseguenza, è possibile dedurre che, per quanto riguarda le aree impermeabili, non esiste un valore ricorrente avente una maggiore frequenza, mentre, per le zone permeabili, le misurazioni che variano tra i 32,5 °C ed i 33 °C sono le più frequenti.



**Grafico 3.** *Violin Plot* 25/08/2023 percorso pomeridiano (17:15 – 17:56), confronto tra uso del suolo (suolo impermeabile (1) e suolo permeabile (2)) e temperatura dell'aria [°C].

Considerando il Grafico 4, ovvero il *Violin Plot* relativo alla misurazione serale, si può notare, oltre a quanto è stato già osservato in merito al Grafico 2, che la forma del primo violino risulta più “gonfia” in corrispondenza di 28,6 °C, mentre la seconda figura è più spessa in corrispondenza di 27,4 °C. A differenza di quanto osservato in precedenza, per il rilevamento serale esistono delle temperature più frequenti sia per il terreno impermeabile sia per quello permeabile.



**Grafico 4.** *Violin Plot* 25/08/2023 percorso serale (22:15 – 23.03), confronto tra uso del suolo (suolo impermeabile (1) e suolo permeabile (2)) e temperatura dell'aria [°C].

In generale è possibile affermare che entrambi i grafici, *Box Plot* e *Violin Plot*, individuano le temperature maggiori, per entrambi i momenti della giornata, in corrispondenza del suolo impermeabile (1), mentre i valori inferiori sono stati misurati in corrispondenza del suolo permeabile (2). Per quanto riguarda gli intervalli di temperatura, è possibile osservare che la rappresentazione relativa alle zone impermeabili copre un *range* più ampio, questo è probabilmente dovuto all'effetto di mitigazione legato alla presenza di vegetazione in prossimità delle aree impermeabilizzate. Un'altra considerazione generale che si può fare riguarda i grafici a violino: si può notare che, nelle aree permeabili, il grafico risulta più panciuto in corrispondenza del valore medio, questa caratteristica evidenzia che per i territori impermeabili le temperature sono più variabili mentre per quelli permeabili le condizioni termiche sono più concentrate attorno ad uno stesso valore.

Considerando l'indice NDVI sono state ottenute due rappresentazioni cartografiche, una per la rilevazione pomeridiana ed una per quella serale. In questo caso è possibile notare visivamente, basandosi sulla mappa, che le zone aventi un livello di vigoria inferiore presentano una condizione termica dell'aria superiore, viceversa ad aree più densamente vegetate corrisponde una temperatura più mite.

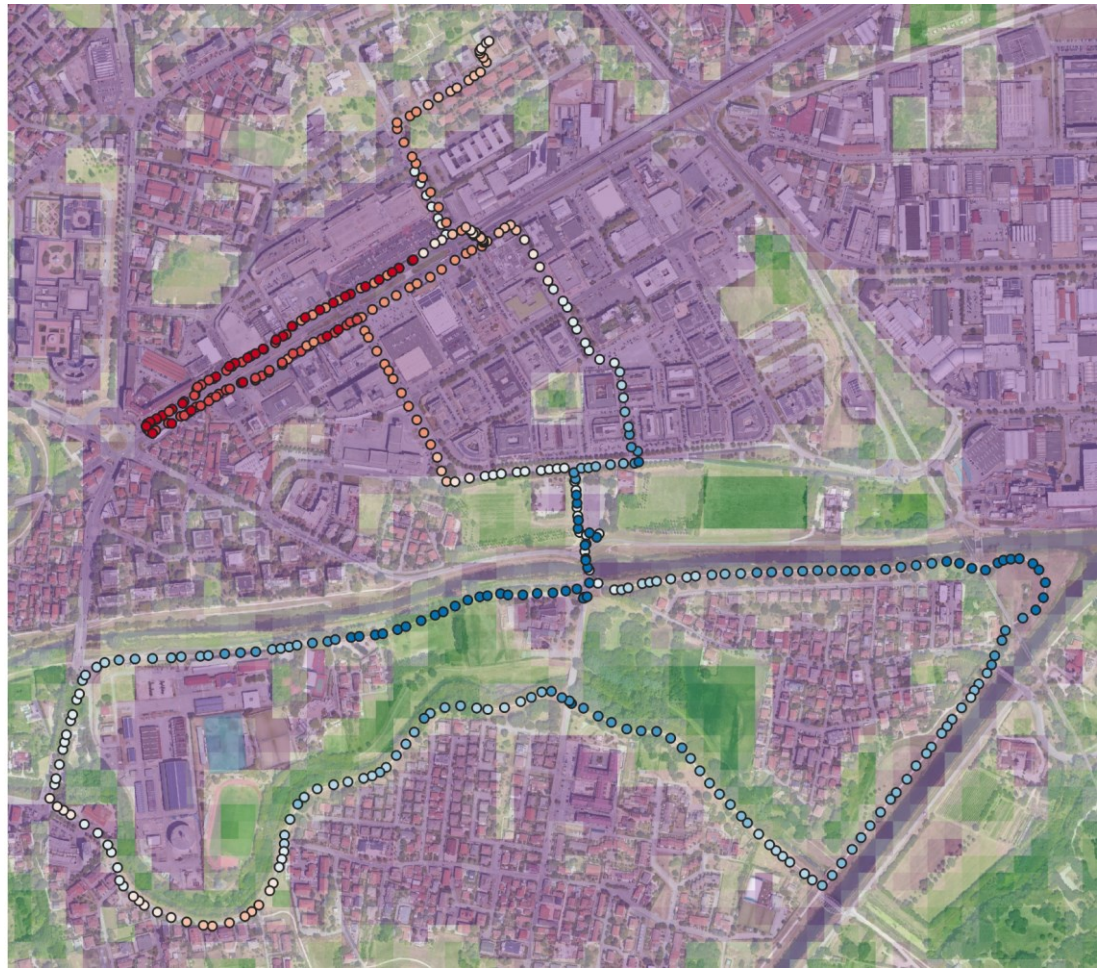
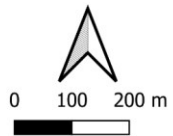
PERCORSO\_25.08.2023

- 31.6 - 32.4
- 32.4 - 32.6
- 32.6 - 32.8
- 32.8 - 33
- 33 - 33.3
- 33.3 - 33.5
- 33.5 - 33.8
- 33.8 - 34.3
- 34.3 - 34.5
- 34.5 - 35

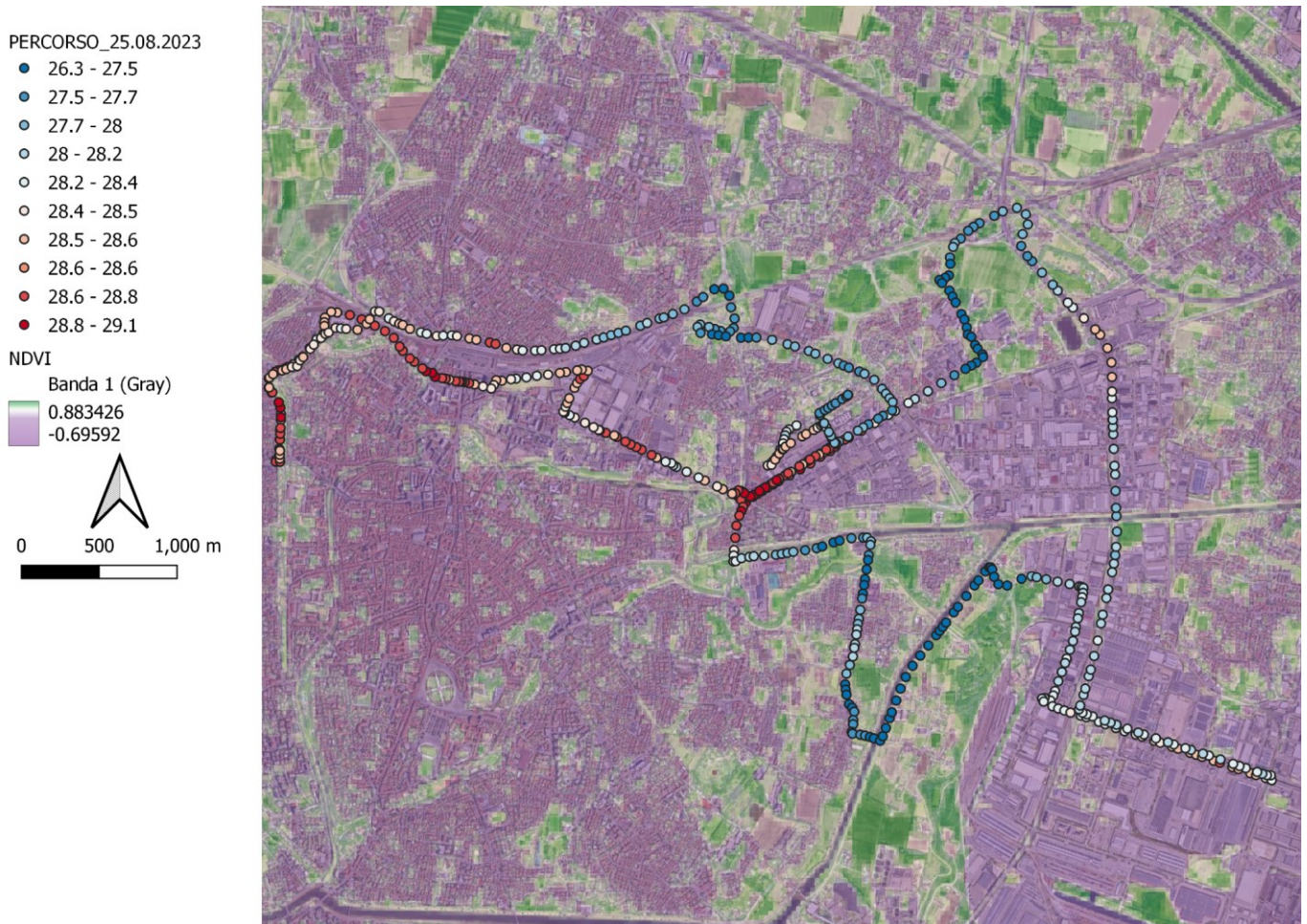
NDVI

Banda 1 (Gray)

- 0.883426
- -0.69592



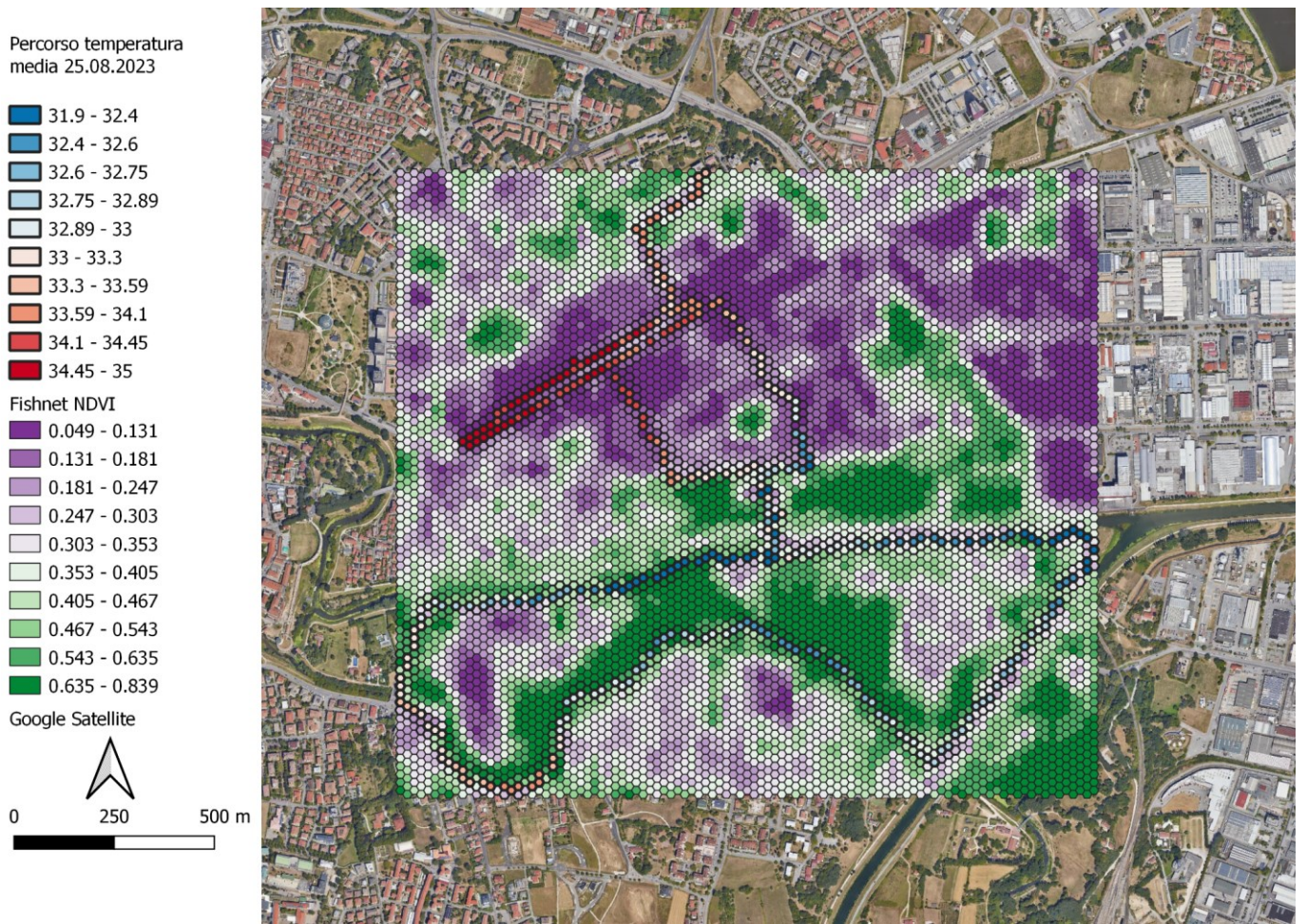
**Figura 19.** Percorso pomeridiano (17:15 – 17:56) 25/08/2023, i valori di temperatura dell'aria [°C] a confronto con l'indice NDVI.



**Figura 20.** Percorso serale (22:15 – 23:03) 25/08/2023, i valori di temperatura dell'aria [°C] a confronto con l'indice NDVI.

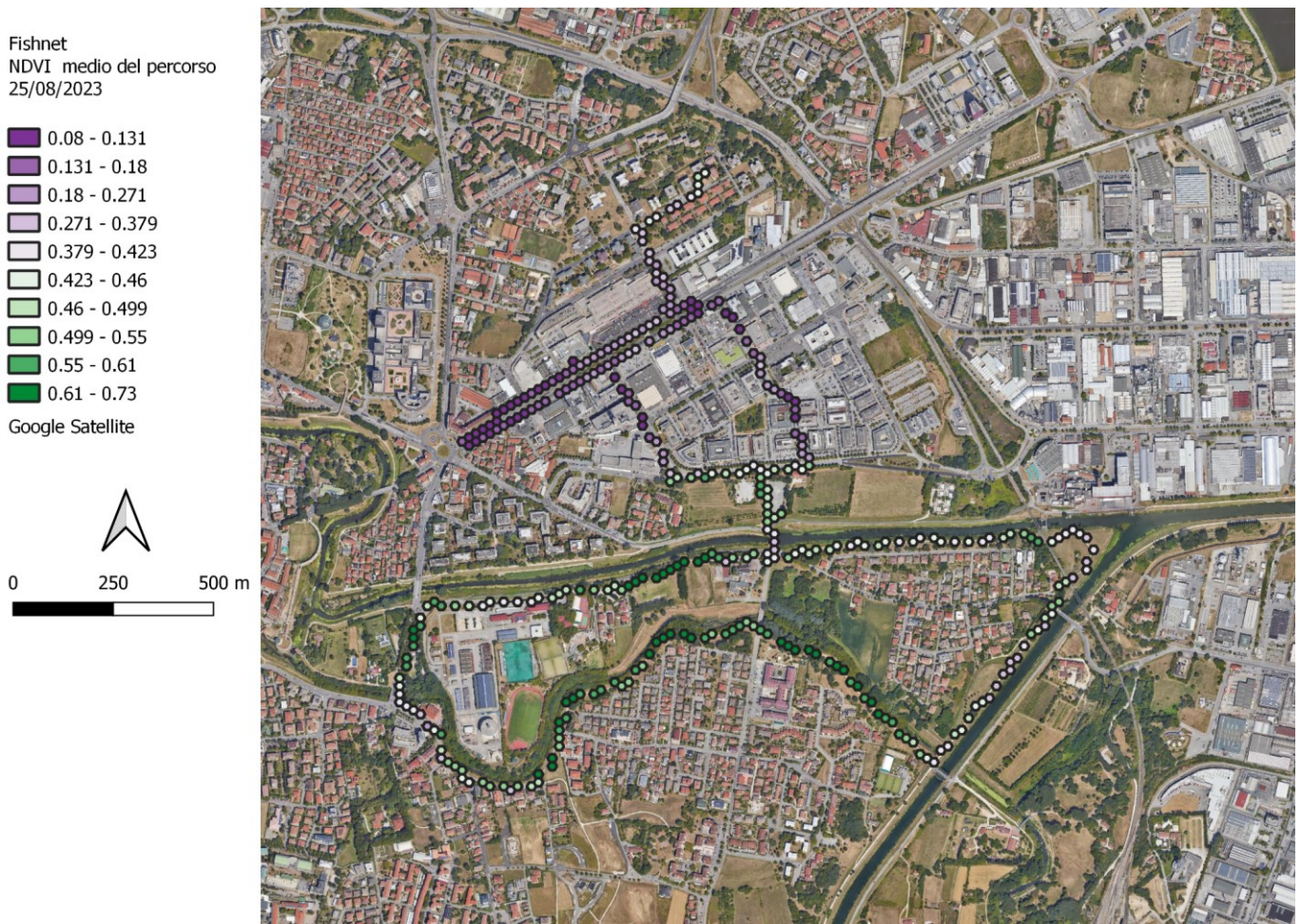
Per il confronto grafico tra l'indice NDVI e la temperatura dell'aria relativa alla singola sessione di rilevazione pomeridiana sono stati calcolati l'indice NDVI medio, determinato per ogni esagono avente ampiezze orizzontali e verticali pari a venti metri appartenente ad un reticolo, e la temperatura media dell'aria, anch'essa calcolata su aree esagonali di ampiezze venti metri.

Di seguito è riportata la rappresentazione cartografica della *Fishnet* raffigurante gli indici NDVI medi a confronto con il percorso pomeridiano del 25 agosto formato da esagoni, ognuno dei quali contiene la temperatura media su quell'area.



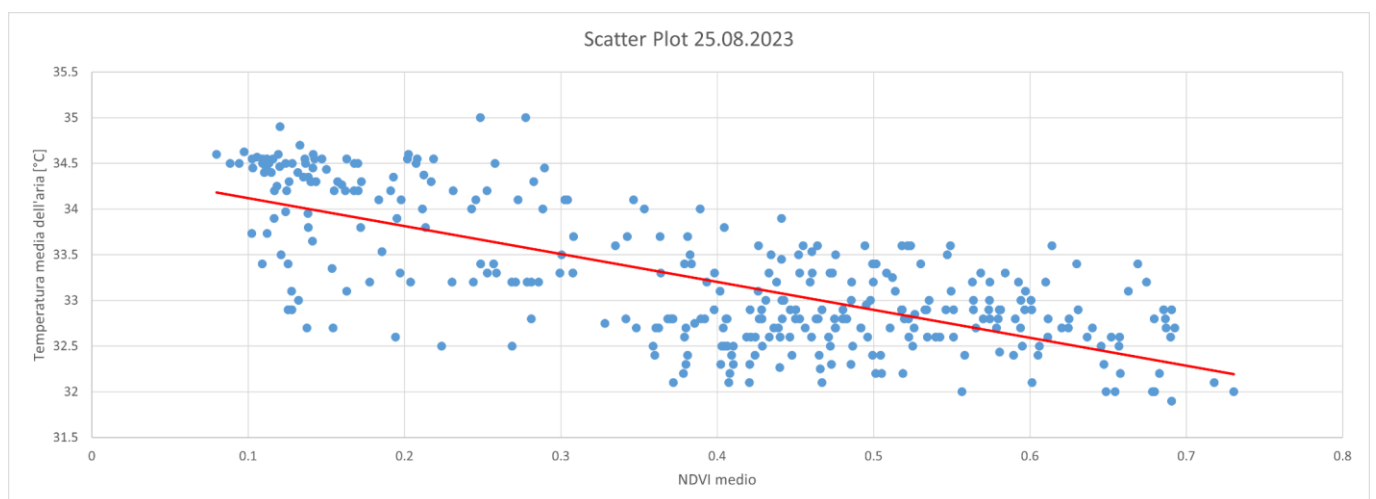
**Figura 21.** Confronto tra la *Fishnet* relativa alla media di temperatura del percorso pomeridiano (17:15 – 17:56) del 25/08/2023 e la *Fishnet* contenente l'indice NDVI medio.

Successivamente è stato ottenuto un nuovo percorso composto da esagoni contenenti sia la temperatura dell'aria media sia l'indice NDVI medio, quest' ultimo è rappresentato alla Figura 22.



**Figura 22.** Fishnet relativa all'indice NDVI medio esteso al percorso pomeridiano (17:15 – 17:56) del giorno 25/08/2023.

Di seguito è riportato il grafico a dispersione che raffigura il confronto tra l'indice NDVI medio e le temperature medie del singolo percorso pomeridiano, è possibile notare un andamento decrescente della temperatura all'aumentare dell'indice NDVI medio, ciò significa che all'aumentare della copertura vegetale (alberi, cespugli, parchi e coltivazioni agricole) la temperatura media risulta più mite. Di conseguenza, la linea di tendenza osservata ha un andamento decrescente.



**Grafico 5.** Scatter Plot 25/08/2023 percorso pomeridiano (17:15 – 17:56), confronto tra temperatura media dell'aria [°C] ed indice NDVI medio con linea di tendenza.

In Figura 23 è possibile visualizzare il modello *Ordinary Least Square* (OLS) relativo al percorso pomeridiano, in particolare è interessante osservare il risultato ottenuto in merito ad “R al quadrato”. Per questa sessione è stato ottenuto un valore di R quadro pari a 0,52. Però, bisogna tenere conto del fatto che la variabile dipendente analizzata (temperatura dell'aria) non dipende solo dall'indice di copertura vegetale ma anche da altri fattori.

Un altro risultato interessante riguarda il coefficiente di regressione (b) relativo a NDVI medio; in questo caso pari a -3,06, esso indica che ad ogni aumento di un valore di 0,1 di NDVI corrisponde mediamente un abbassamento di temperatura di 0,3 °C.

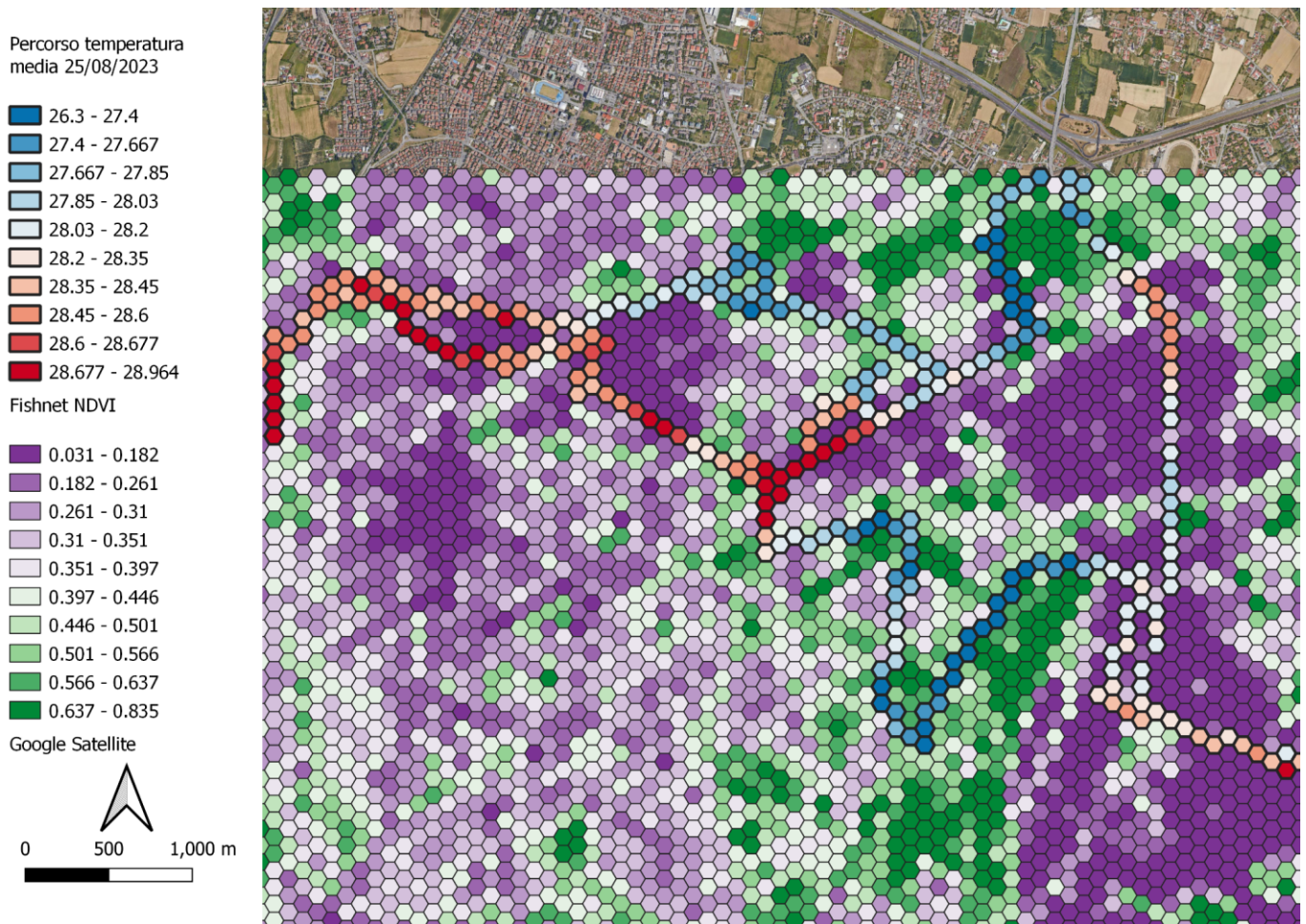
Statistica della regressione									
R multiplo	0.72								
R al quadrato	0.52								
R al quadrato corretto	0.52								
Errore standard	0.52								
Osservazioni	338.00								
<b>ANALISI VARIANZA</b>									
	<i>gdl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>Significatività F</i>				
Regressione	1.00	97.41	97.41	360.53	0.00				
Residuo	336.00	90.78	0.27						
Totale	337.00	188.20							
	<i>Coefficienti</i>	<i>Errore standard</i>	<i>Stat t</i>	<i>Valore di significatività</i>	<i>Inferiore 95%</i>	<i>Superiore 95%</i>	<i>Inferiore 95.0%</i>	<i>Superiore 95.0%</i>	
Intercetta	34.43	0.07	500.37	0	34.29	34.56	34.29	34.56	
NDVI medio	-3.06	0.16	-18.99	3.89818E-55	-3.37	-2.74	-3.37	-2.74	

**Figura 23.** Modello OLS 25/08/2023, percorso pomeridiano (17:15 – 17:56).

Analogamente a quanto svolto per il singolo percorso pomeridiano, per poter confrontare graficamente l'indice NDVI e la temperatura dell'aria relativa alla singola sessione serale, sono stati calcolati l'indice NDVI medio, determinato per ogni esagono avente ampiezze orizzontali e verticali di cento metri appartenente ad un reticolo, e la temperatura media dell'aria, anch'essa calcolata su aree esagonali di ampiezze cento metri.

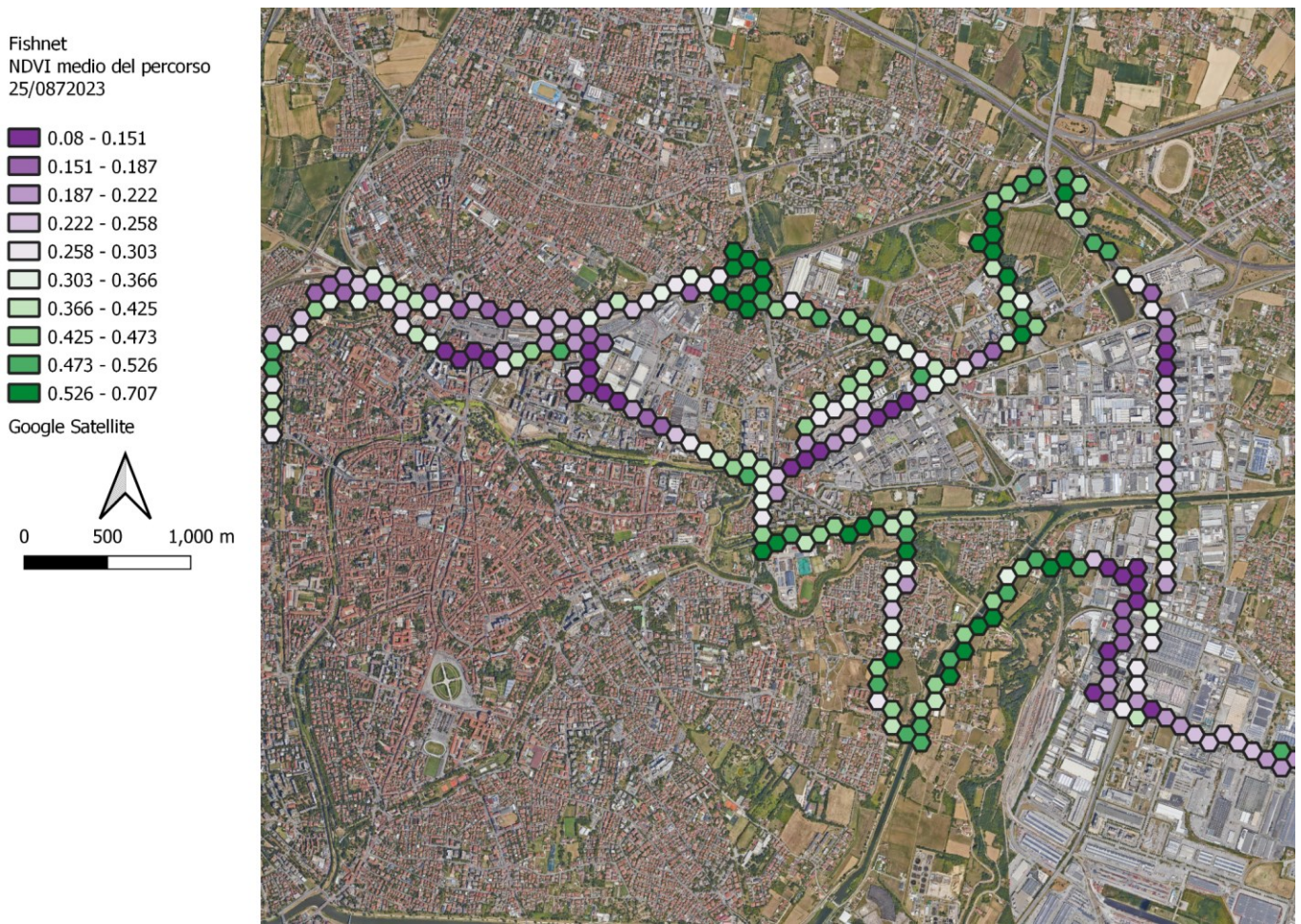
Di seguito è riportata la rappresentazione cartografica della *Fishnet* raffigurante gli indici NDVI medi a confronto con il percorso serale del 25 agosto formato da esagoni, ognuno dei quali contiene la temperatura media su quell'area.





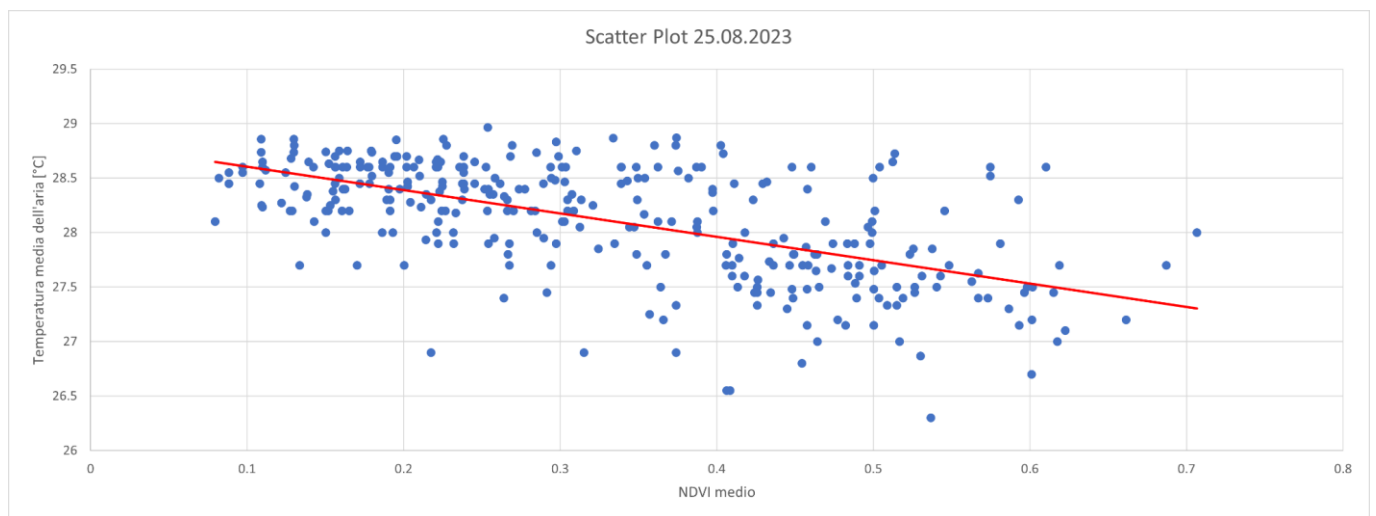
**Figura 24.** Confronto tra la *Fishnet* relativa alla media di temperatura del percorso serale (22:15 – 23:03) del 25/08/2023 e la *Fishnet* contenente l'indice NDVI medio.

Successivamente è stato ottenuto un nuovo percorso composto da esagoni contenenti sia la temperatura dell'aria media sia l'indice NDVI medio, quest' ultimo è rappresentato alla Figura 25.



**Figura 25.** Fishnet relativa all'indice NDVI medio esteso al percorso serale (22:15 – 23:03) del giorno 25/08/2023.

Il Grafico 6 rappresenta l'andamento decrescente della temperatura media del percorso serale all'aumentare dei valori dell'NDVI medio. Anche in questo caso la linea di tendenza ottenuta ha un andamento decrescente.



**Grafico 6.** Scatter Plot 25/07/2023 percorso serale (22:15 – 23:03), confronto tra temperatura dell'aria [°C] ed indice NDVI con linea di tendenza.

Infine, è stato ottenuto un modello OLS per la sessione serale, rappresentato in Figura 26; in questo caso è stato ottenuto un valore di R quadro pari a 0,36, un risultato inferiore a quanto rilevato per la sessione pomeridiana. Esso può essere considerato un valore poco rilevante in termini statistici; bisogna tenere conto, tuttavia, del fatto che la variabile dipendente analizzata (temperatura media dell'aria) può dipendere da molti fattori, non solo dall'indice di copertura vegetale, ma dalla morfologia degli edifici e da fattori legati alla micrometeorologia urbana. Una relazione tra temperatura media dell'aria ed indice NDVI medio sembra pertanto esistere, anche se può essere considerata meno rilevante per le sessioni notturne rispetto a quelle pomeridiane.

Un altro risultato interessante riguarda il coefficiente di regressione ( $\beta$ ) relativo a NDVI medio, in questo caso pari a -2,15; esso indica che ad ogni aumento di 0.1 del valore di NDVI corrisponde mediamente un abbassamento di temperatura di 0.2 °C.

Statistica della regressione									
R multiplo	0.60								
R al quadrato	0.36								
R al quadrato corretto	0.36								
Errore standard	0.42								
Osservazioni	326.00								
ANALISI VARIANZA									
	<i>gdl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>Significatività F</i>				
Regressione	1.00	32.16	32.16	184.79	0.00				
Residuo	324.00	56.39	0.17						
Totale	325.00	88.55							
	<i>Coefficienti</i>	<i>Errore standard</i>	<i>Stat t</i>	<i>Valore di significatività</i>	<i>Inferiore 95%</i>	<i>Superiore 95%</i>	<i>Inferiore 95.0%</i>	<i>Superiore 95.0%</i>	
Intercetta	28.82	0.06	509.07	0	28.71	28.93	28.71	28.93	
NDVI medio	-2.15	0.16	-13.59	1.29683E-33	-2.46	-1.84	-2.46	-1.84	

Figura 26. Modello OLS 25/08/2023, percorso serale (22:15 – 23:03).

## 3.3 Media dei percorsi pomeridiani e serali

### 3.3.1 Analisi *Fishnet* delle rilevazioni pomeridiane

Considerando la Figura 27 è possibile osservare la rappresentazione cartografica di tutti i percorsi svolti durante le sessioni pomeridiane. Si può notare che le zone più calde sono sempre quelle relative a Via Venezia e all'area commerciale della città, mentre le zone più miti sono quelle nell'immediata vicinanza del corso d'acqua e delle zone verdi. La temperatura massima misurata è 37,6 °C ed è stata raggiunta il giorno 23 agosto in prossimità del Piazzale della Stanga, mentre, la temperatura minima è di 20,7 °C, ottenuta il 30 agosto.



**Figura 27.** Percorsi pomeridiani dal 20 luglio al 14 settembre 2023, i valori di temperatura dell'aria [°C].

Osservando la Figura 28 si può notare la relazione tra le temperature maggiori dei percorsi e le zone classificate come impermeabili, mentre le temperature inferiori si trovano in corrispondenza delle aree caratterizzate da suolo permeabile.



**Figura 28.** Percorsi pomeridiani dal 20 luglio al 14 settembre 2023, i valori di temperatura dell'aria [°C] a confronto con la Carta di Consumo del Suolo.

Di seguito è riportata la *Fishnet* relativa ai percorsi pomeridiani a confronto con la carta del consumo del suolo. Essa rappresenta la media delle medie di temperatura ricavate per ogni singolo percorso, la media totale è calcolata su aree esagonali di dimensioni verticali e orizzontali di venti metri. In questo modo è stato ottenuto un risultato medio più attendibile rispetto a quello fornito dal singolo percorso. Anche in questo caso è possibile notare la relazione tra le temperature maggiori e le zone classificate come impermeabili e tra le zone temperate e le aree caratterizzate da suolo permeabile.

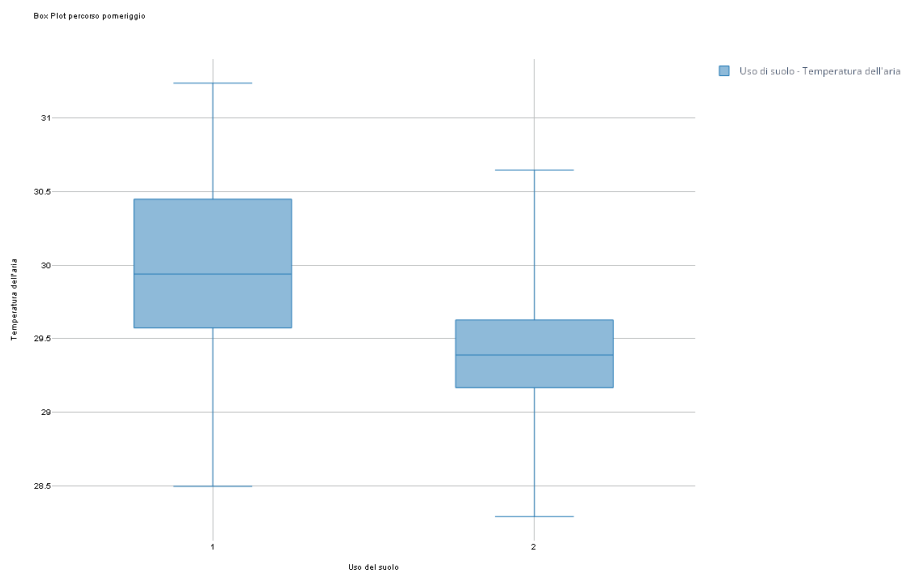


**Figura 29.** *Fishnet*: media di temperatura dell'aria dei percorsi pomeridiani.

Per verificare l'effettiva corrispondenza tra temperatura dell'aria ed uso del suolo sono stati ottenuti un *Box plot* (Grafico 7) ed un *Violin Plot* (Grafico 8) considerando le temperature medie, calcolate per ogni esagono appartenente alla *Fishnet*.

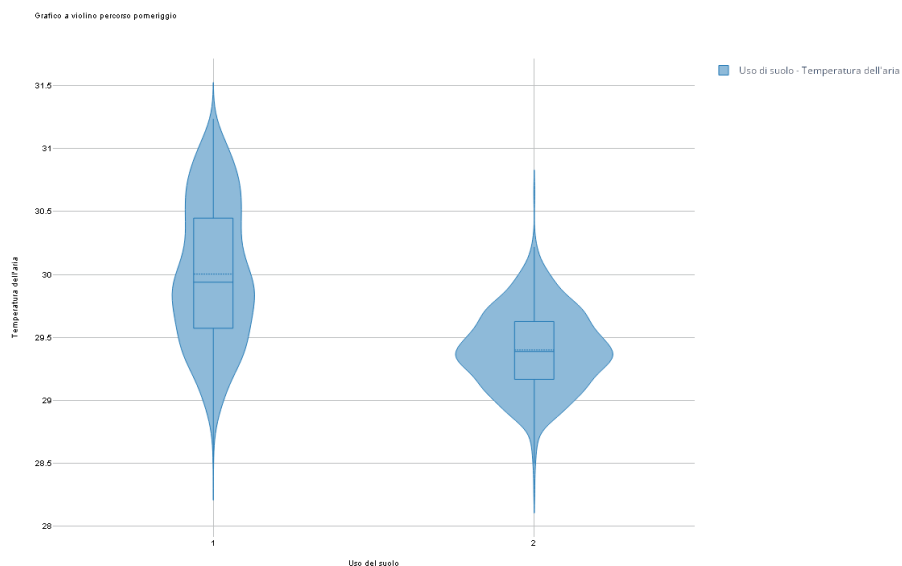
Analizzando il Grafico 7 è possibile notare che le temperature medie maggiori appartengono alle zone in cui la copertura del suolo è totale (1) con un *range* che parte da 28,5 °C fino ad arrivare a circa 31,2 °C. Invece, le condizioni termiche medie più miti sono localizzate nelle restanti aree, in questo caso il *range* di temperatura parte da 28,3 °C fino ad un massimo di circa 30,1 °C. Inoltre, è possibile notare che, a differenza di quanto osservato per l'analisi del singolo percorso, gli intervalli di temperatura per entrambi i tipi di suolo hanno ampiezze simili, questo risultato è dovuto al fatto che per questa analisi sono state considerate le medie di temperatura relative ad un reticolo, grazie al quale è stato possibile appianare i risultati ed eliminare le anomalie relative ai singoli percorsi.

Per quanto riguarda le temperature medie, si può notare che per il suolo impermeabile essa si aggira attorno a 29,9 °C, mentre la temperatura media nelle zone permeabili è di 29,4 °C, mezzo grado inferiore. Si può quindi affermare che la differenza di temperatura tra i due tipi di terreno esiste anche se è meno evidente rispetto al singolo percorso.



**Grafico 7.** Box Plot percorsi pomeridiani, confronto tra uso del suolo (suolo impermeabile (1) e suolo permeabile (2)) e temperatura media dell'aria [°C].

Un'ulteriore considerazione si può fare riguardo al grafico a violino: è possibile notare che, per quanto riguarda le aree permeabili, il grafico risulta più gonfio in corrispondenza del valore medio 29,4 °C, questo risultato sottolinea che per i territori impermeabili le temperature sono più variabili mentre per quelli permeabili le condizioni termiche sono più contenute intorno ad uno stesso valore.



**Grafico 8.** Violin Plot percorsi pomeridiani, confronto tra uso del suolo (suolo impermeabile (1) e suolo permeabile (2)) e temperatura media dell'aria [°C].

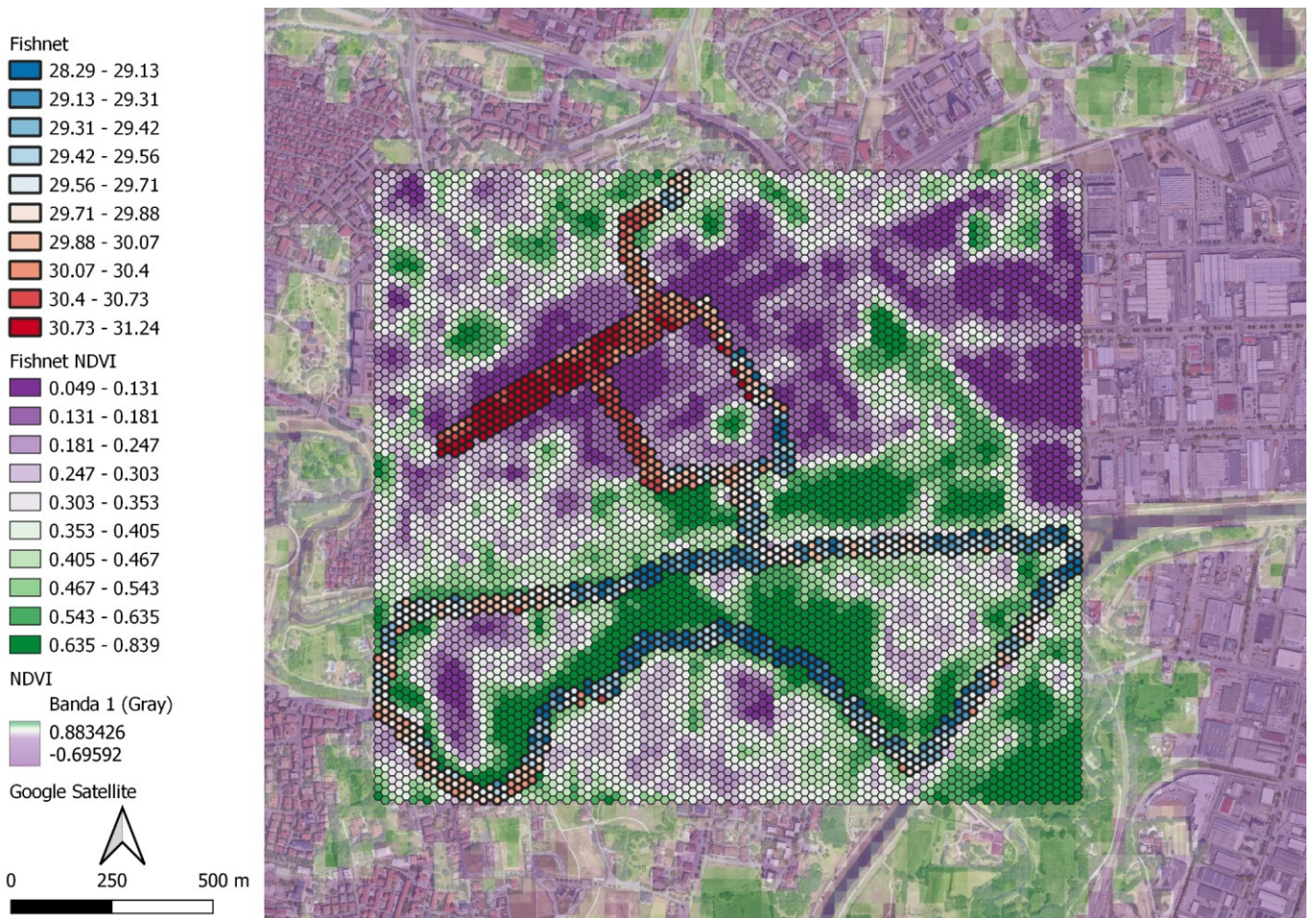
Basandosi sull' indice NDVI è possibile notare visivamente, alla Figura 30, che le zone aventi una copertura vegetale meno rigogliosa, ovvero le zone colorate di verde, presentano una condizione termica superiore, viceversa ad aree più densamente vegetate corrisponde una condizione termica con valori inferiori.



**Figura 30.** Percorsi pomeridiani dal 20 luglio al 14 settembre 2023, i valori di temperatura media dell'aria [°C] a confronto con l'indice NDVI medio.

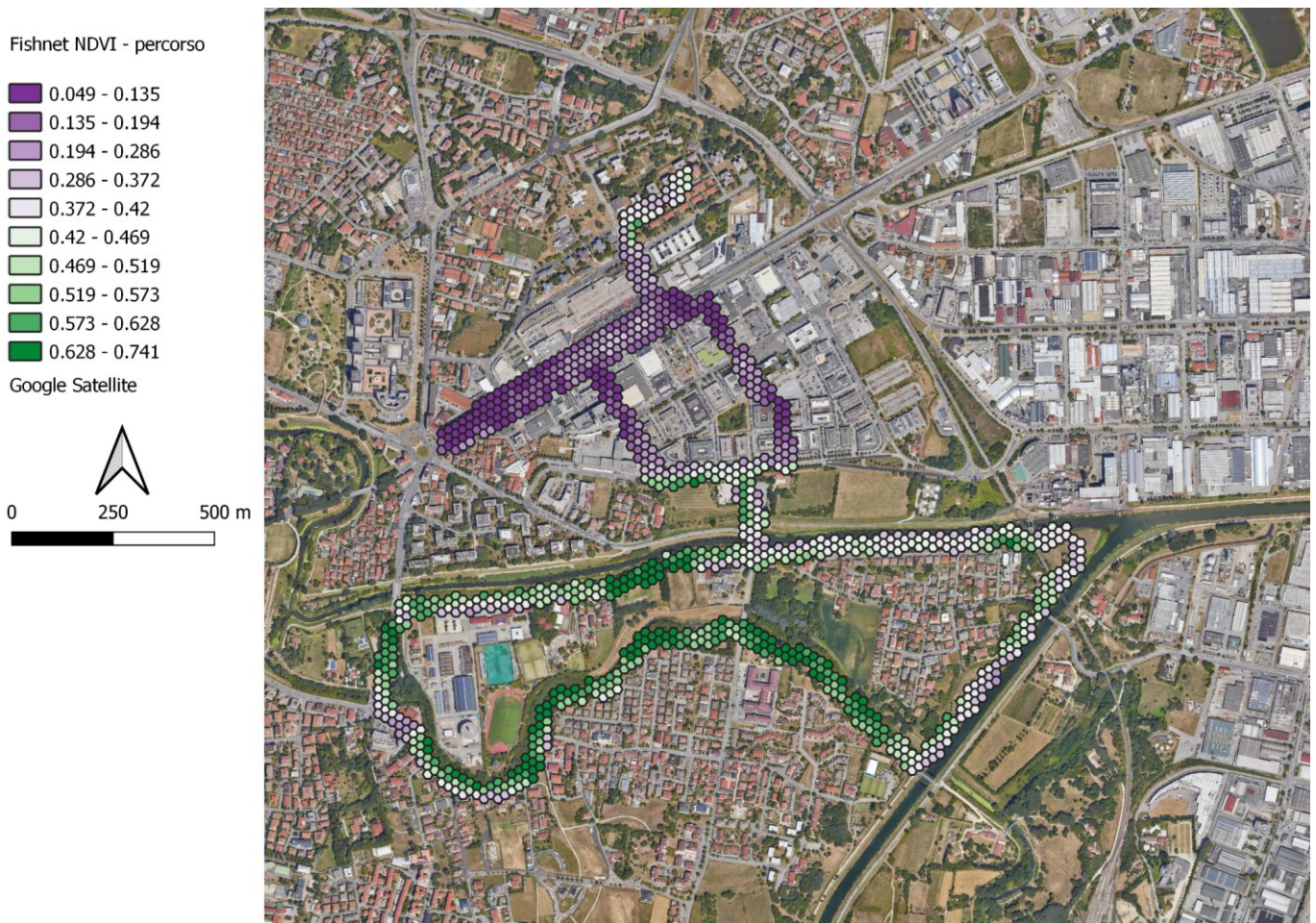
Di seguito è riportata la rappresentazione cartografica di confronto tra la *Fishnet* relativa ai percorsi pomeridiani e la *Fishnet* relativa all'indice NDVI. Quest'ultima rappresenta il livello di vigoria medio per ogni esagono avente ampiezze di venti metri, il reticolo è esteso all'area di indagine.





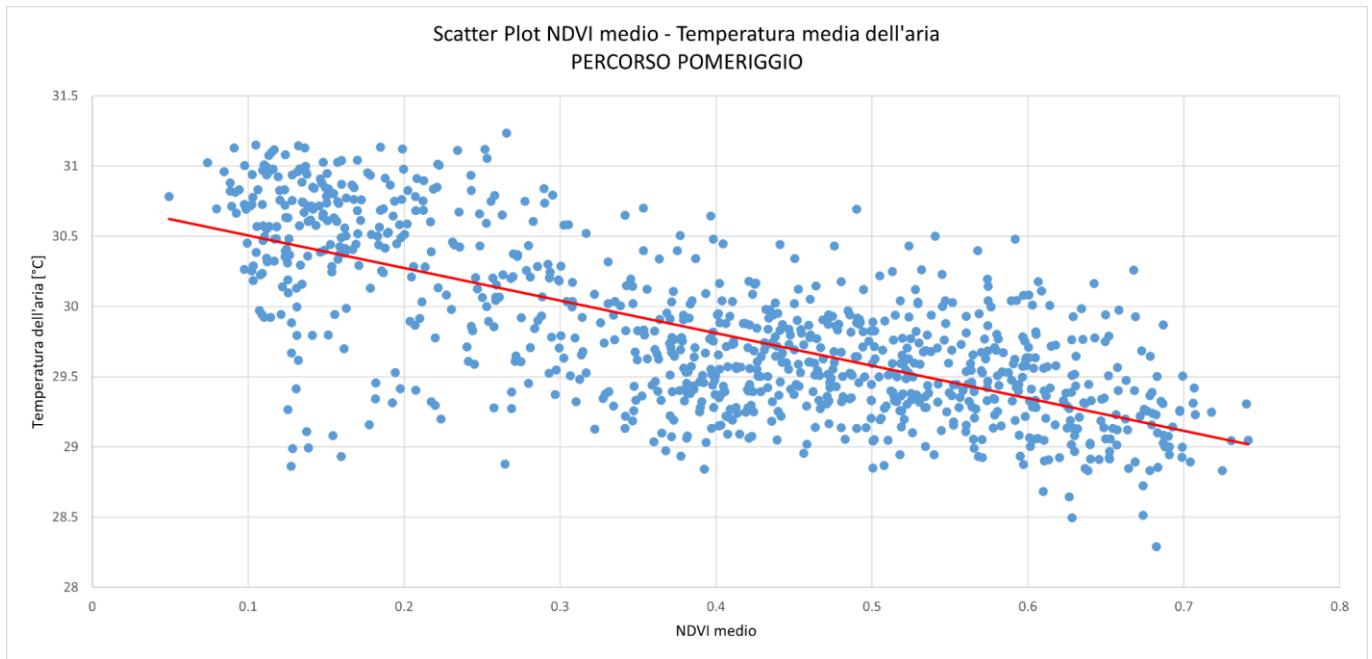
**Figura 31.** Confronto tra la *Fishnet* relativa alla media di temperatura dei percorsi pomeridiani e la *Fishnet* contenente l'indice NDVI medio.

Successivamente è stato ottenuto un nuovo percorso composto da esagoni contenenti sia la temperatura dell'aria media sia l'indice NDVI medio, rappresentato alla Figura 32.



**Figura 32.** Fishnet relativa all'indice NDVI medio esteso al percorso pomeridiano.

Basandosi su quest'ultimo risultato è stato possibile confrontare l'indice NDVI medio e la temperatura media dell'aria creando uno *Scatter Plot* (Grafico 9). Osservando il Grafico 9 è possibile notare l'andamento decrescente della temperatura all'aumentare dell'indice NDVI medio, ovvero all'aumentare della copertura vegetale del terreno, ciò è evidenziato anche dall'andamento decrescente della linea di tendenza.



**Grafico 9.** Scatter Plot percorsi pomeridiani, confronto tra temperatura media dell'aria [°C] ed indice NDVI medio con linea di tendenza.

Infine, è stato elaborato un modello OLS (Figura 33), che consente di valutare il risultato ottenuto in merito al coefficiente di determinazione  $R^2$ . In questo studio è stato ottenuto un valore di  $R^2$  pari a 0,50; esso può essere considerato un valore non molto rilevante in termini statistici. Tuttavia, la variabile dipendente analizzata (temperatura media dell'aria) può dipendere da molti fattori, non solo dall'indice di copertura vegetale.

Un altro risultato interessante riguarda il coefficiente di regressione ( $\beta$ ) relativo a NDVI medio, in questo caso uguale a -2,32, esso indica che ad ogni unità del valore NDVI medio (ovvero 0,1) corrisponde un abbassamento di temperatura medio di 2,31 °C.

Statistica della regressione									
R multiplo	0.70								
R al quadrato	0.50								
R al quadrato corretto	0.49								
Errore standard	0.42								
Osservazioni	941.00								
ANALISI VARIANZA									
	gdl	SQ	MQ	F	Significatività F				
Regressione	1.00	159.81	159.81	922.07	0.00				
Residuo	939.00	162.74	0.17						
Totale	940.00	322.55							
	Coefficienti	Errore standard	Stat t	Valore di significatività	Inferiore 95%	Superiore 95%	Inferiore 95.0%	Superiore 95.0%	
Intercetta	30.74	0.03	922.32	0	30.67	30.80	30.67	30.80	
NDVI medio	-2.32	0.08	-30.37	1.2036E-141	-2.47	-2.17	-2.47	-2.17	

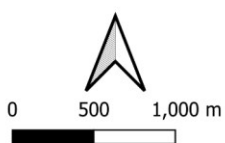
**Figura 33.** Modello OLS, percorsi pomeridiani.

### 3.3.2 Analisi *Fishnet* delle rilevazioni Serali

Osservando la rappresentazione cartografica alla Figura 34 è possibile visualizzare i percorsi svolti durante le sessioni serali. Si può notare che le zone più calde sono Via Venezia, l'area commerciale della città, la zona industriale (in particolare Corso Stati Uniti), il centro ed i dintorni della stazione ferroviaria, mentre le zone più miti sono quelle nell'immediata vicinanza del corso d'acqua e delle zone verdi.

#### PERCORSO SERALE

- 18 - 22.2
- 22.2 - 23.1
- 23.1 - 23.8
- 23.8 - 24.6
- 24.6 - 27
- 27 - 27.5
- 27.5 - 27.9
- 27.9 - 28.4
- 28.4 - 28.8
- 28.8 - 30.2



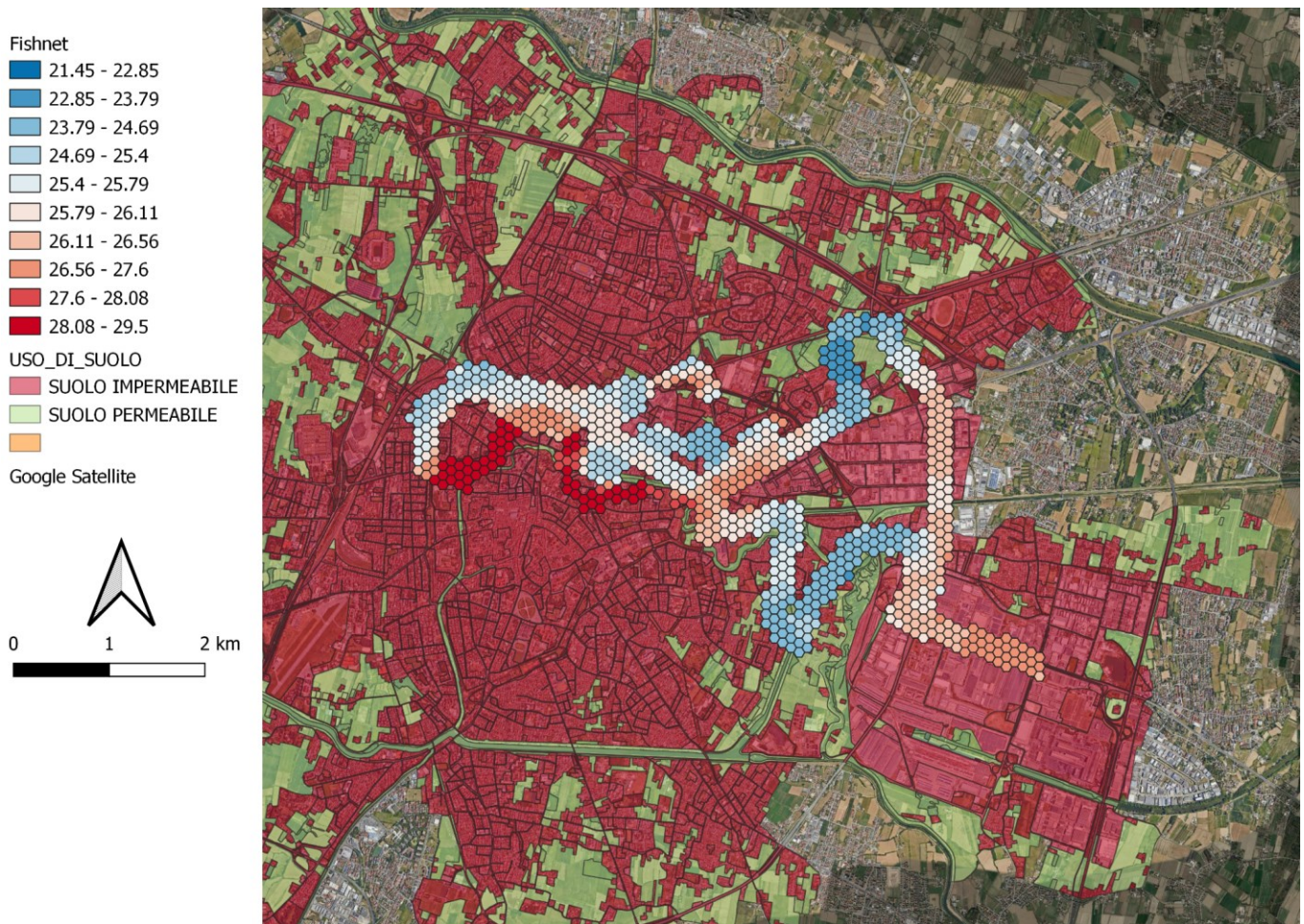
**Figura 34.** Percorsi serali dal 24 agosto al 11 settembre 2023, i valori di temperatura dell'aria [°C].

Considerando la Figura 35 è possibile visualizzare la relazione tra le temperature maggiori e le zone classificate "suolo impermeabile", mentre le temperature inferiori si trovano in corrispondenza delle aree permeabili.



**Figura 35.** Percorsi serali dal 24 agosto al 11 settembre 2023, i valori di temperatura dell'aria [°C] a confronto con la Carta di Consumo del Suolo.

Di seguito è riportata la *Fishnet* relativa ai percorsi serali a confronto con la carta di consumo del suolo. Essa rappresenta la media delle medie di temperatura ricavate per ogni singolo percorso, la media totale è calcolata su aree esagonali di dimensioni verticali e orizzontali di cento metri. In questo modo è stato ottenuto un risultato medio più attendibile rispetto a quello fornito dal singolo percorso. Anche in questo caso è possibile notare la relazione tra le temperature maggiori e le zone classificate come impermeabili e tra le zone temperate e le aree caratterizzate da suolo permeabile.



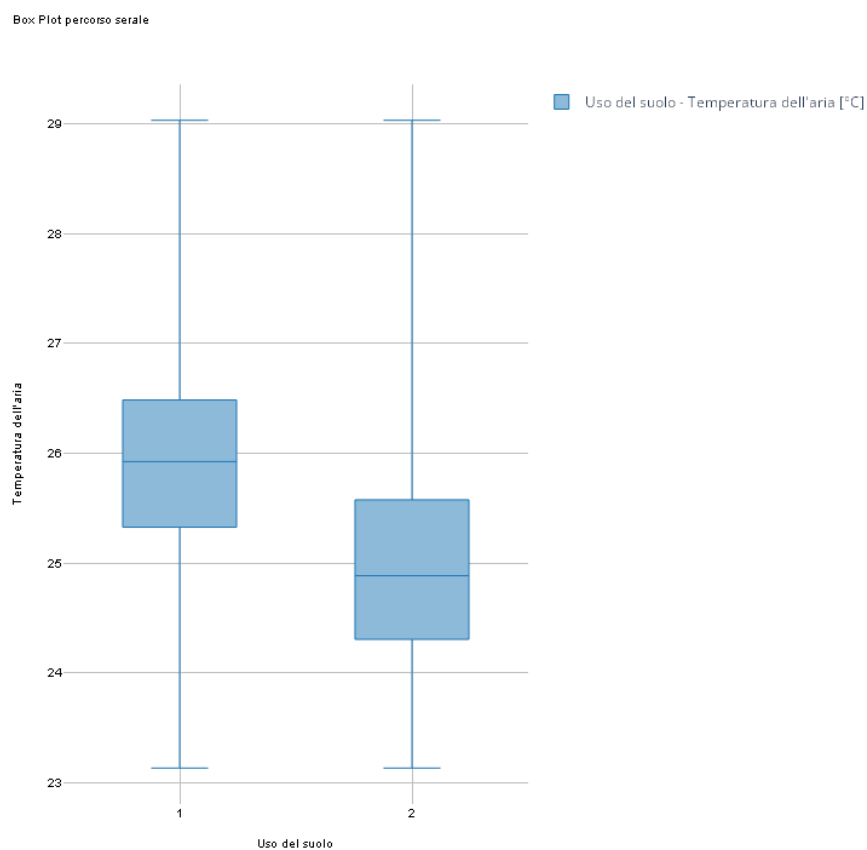
**Figura 36.** *Fishnet*: media di temperatura dell'aria dei percorsi pomeridiani.

Per verificare l'effettiva corrispondenza tra temperatura dell'aria ed uso del suolo sono stati ottenuti un *Box Plot* (Grafico 10) ed un *Violin Plot* (Grafico 11) considerando le temperature medie, calcolate per ogni esagono appartenente alla *Fishnet*.

Osservando il Grafico 10 è possibile notare che le temperature medie maggiori appartengono alle zone in cui la copertura del suolo è totale con un *range* che parte da 23,1 °C fino ad arrivare a 29,1 °C. Invece, le condizioni termiche medie più miti sono localizzate nelle restanti aree, anche in questo caso il *range* di temperatura parte da 23,1 °C fino ad un massimo di 29,1 °C. In questo caso gli intervalli di temperatura sono uguali, la differenza tra i due tipi di suolo risiede nel fatto che le medie di temperatura più basse si concentrano in corrispondenza del suolo permeabile; questa caratteristica del grafico è dovuta al fatto che le rilevazioni sono state svolte in macchina, limitando le misurazioni al passaggio nelle vicinanze di aree verdi e parchi senza poterli attraversare. In questo modo molti dei dati di temperatura inferiori sono stati associati dal *software* alle zone impermeabili. Questa imprecisione non è mutata nemmeno considerando la *Fishnet* contenente le temperature medie dell'aria.

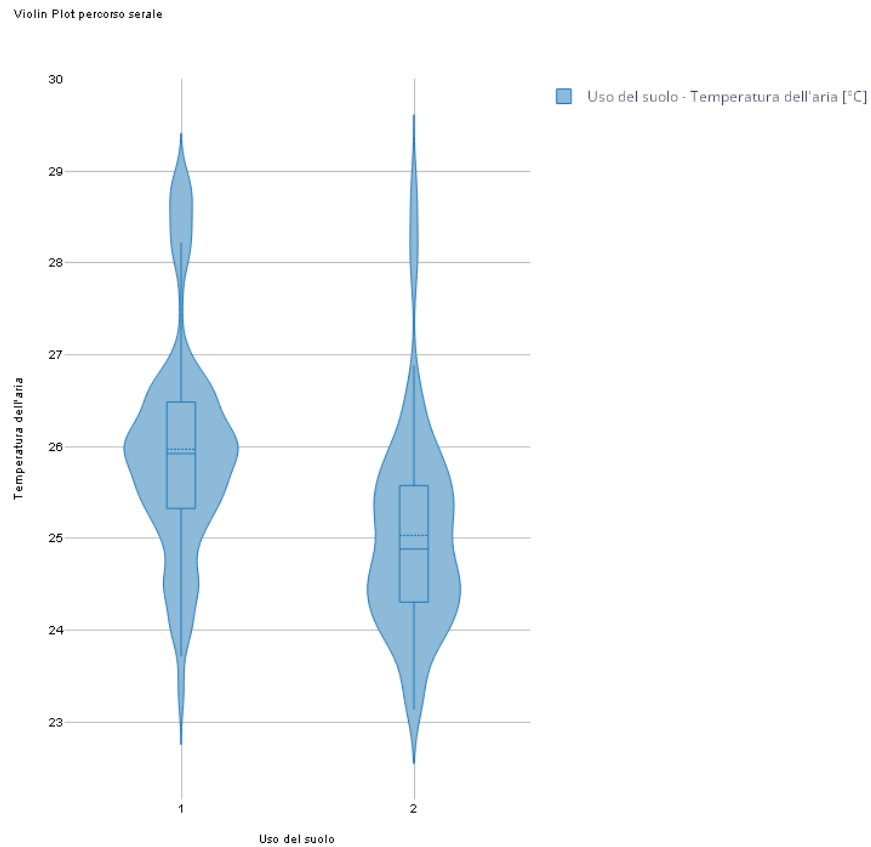
Per quanto riguarda le medie di temperatura ottenute nel grafico, si può notare che per il suolo impermeabile essa si aggira attorno a 25,9 °C, mentre la temperatura media nelle zone permeabili è di 24,9 °C, un grado

inferiore. Si può affermare, quindi, che la differenza di temperatura tra i due tipi di terreno esiste ed è conforme a quanto osservato per il singolo percorso serale.



**Grafico 10.** Box Plot percorsi serali, confronto tra uso del suolo (suolo impermeabile (1) e suolo permeabile (2)) e temperatura media dell'aria [°C].

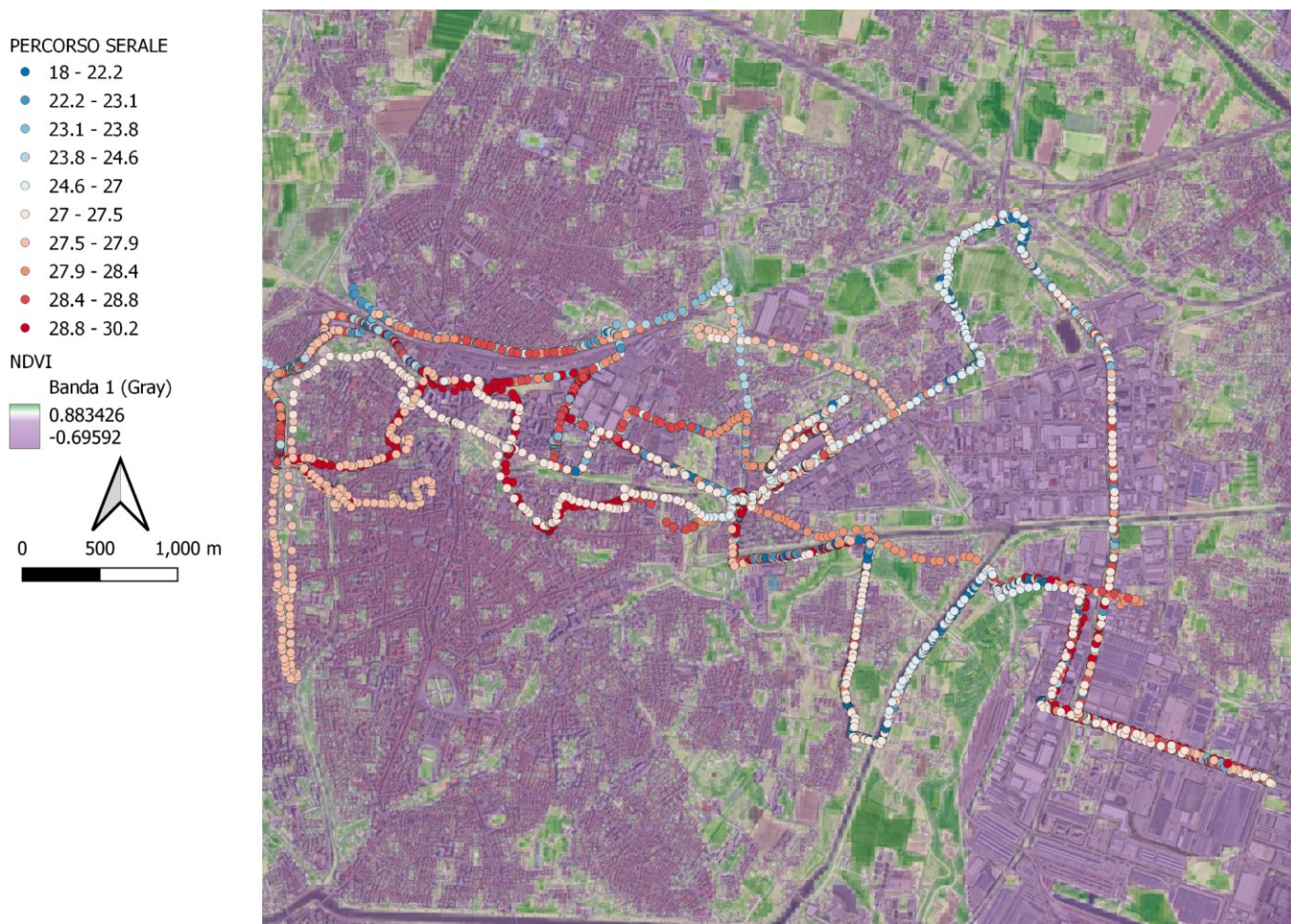
Un'ulteriore considerazione che si può fare riguarda il grafico a violino, è possibile notare che, per entrambe le zone impermeabili e permeabili, il grafico risulta più gonfio in corrispondenza del valore medio, ciò evidenzia che le condizioni termiche medie con maggiore frequenza sono contenute intorno ad uno stesso valore. Nel caso del suolo impermeabile (1) i valori di temperatura media dell'aria più frequenti si aggirano attorno ai 26 °C, mentre per le aree permeabili (2) le condizioni termiche medie più frequenti sono comprese tra 24 °C e 25 °C.



**Grafico 11.** *Violin Plot* percorsi serali, confronto tra uso del suolo (suolo impermeabile (1) e suolo permeabile (2)) e temperatura media dell'aria [°C].

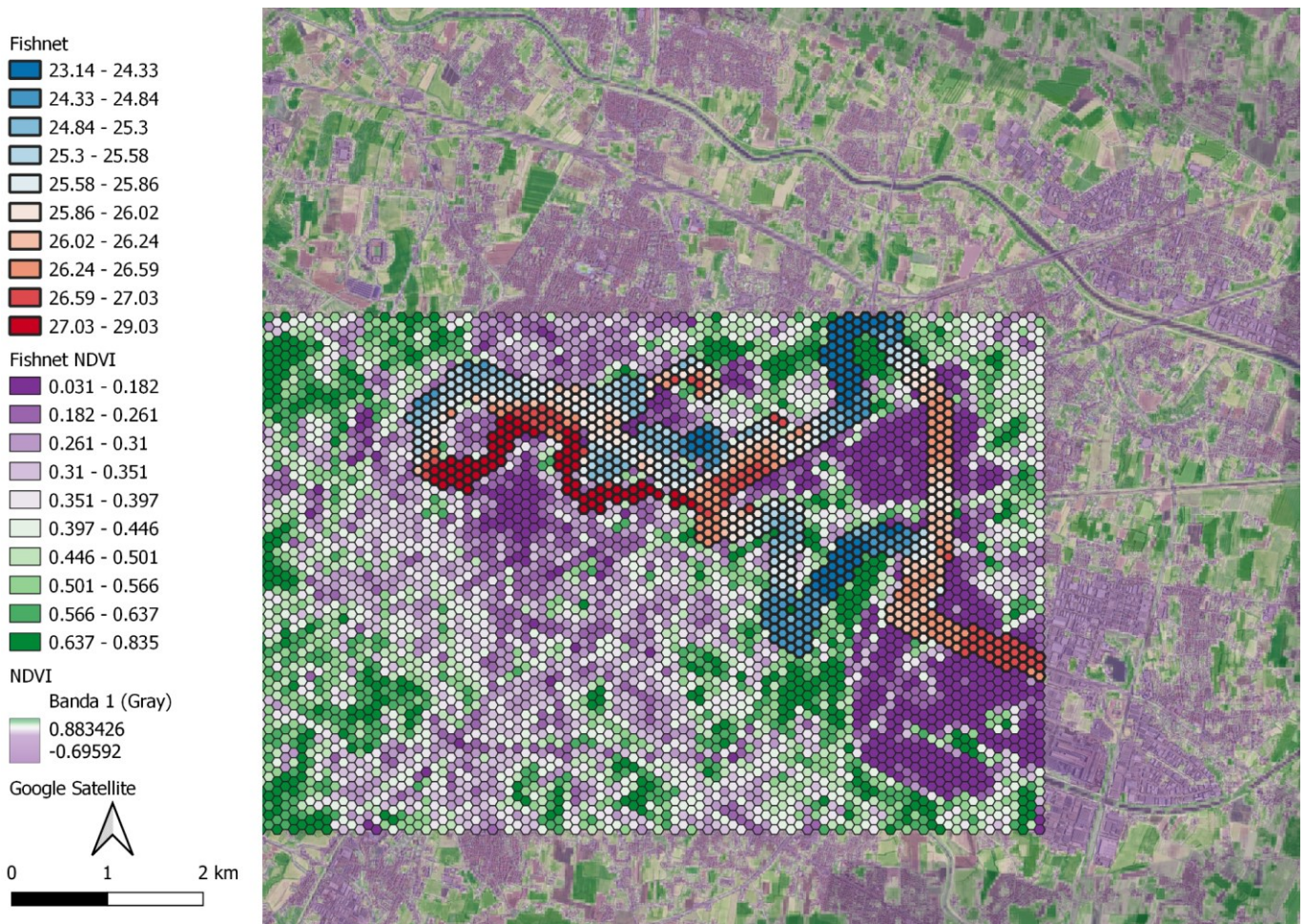
Basandosi sull'indice NDVI è possibile notare visivamente, alla Figura 37, che le zone aventi una copertura vegetale meno rigogliosa presentano una condizione termica superiore, viceversa ad aree più densamente vegetate corrisponde una condizione termica temperata.





**Figura 37.** Percorsi serali dal 24 agosto al 11 settembre 2023, i valori di temperatura media dell'aria [°C] a confronto con l'indice NDVI medio.

Di seguito è riportata la mappa cartografica di confronto tra la *Fishnet* relativa ai percorsi pomeridiani e la *Fishnet* relativa all'indice NDVI medio. Quest'ultima rappresenta il livello di vigoria medio per ogni esagono avente ampiezze di cento metri, il reticolo è esteso all'area di indagine.



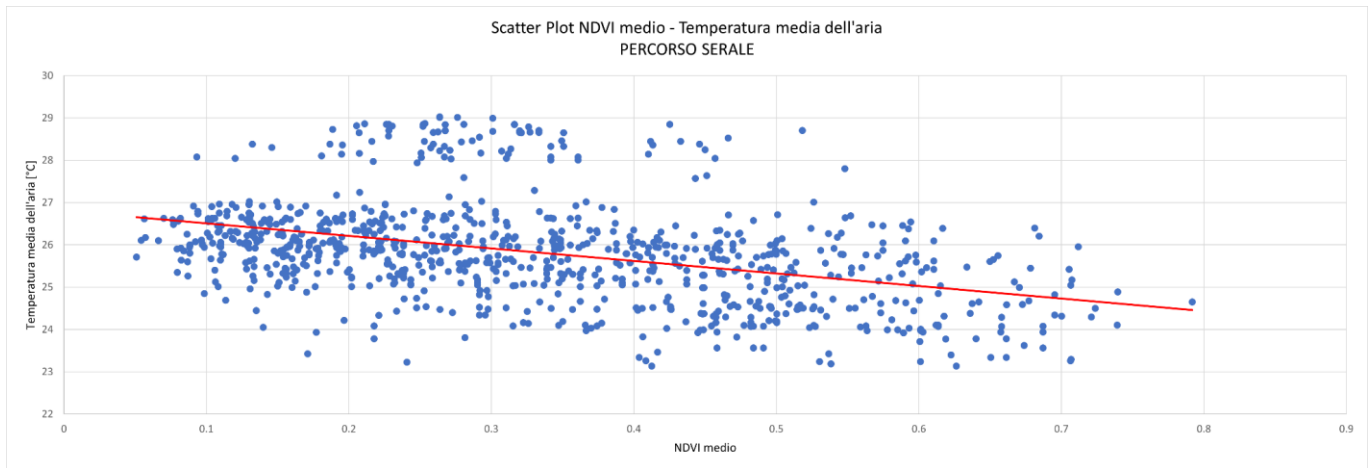
**Figura 38.** Confronto tra la *Fishnet* relativa alla media di temperatura dei percorsi serali e la *Fishnet* contenente l'indice NDVI medio.

Successivamente è stato ottenuto un nuovo percorso composto da esagoni contenenti sia la temperatura dell'aria media sia l'indice NDVI medio, rappresentato alla Figura 39.



**Figura 39.** *Fishnet* relativa all'indice NDVI medio esteso al percorso serale.

Basandosi su quest'ultimo risultato è stato possibile confrontare l'indice NDVI medio e la temperatura media dell'aria creando uno *Scatter Plot* (Grafico 12). Osservando il grafico seguente è possibile notare l'andamento decrescente della temperatura all'aumentare dell'indice NDVI medio, ovvero all'aumentare della copertura vegetale del terreno, ciò è evidenziato anche dall'andamento decrescente della linea di tendenza. Il risultato può essere considerato simile a quello ottenuto per la *Fishnet* relativa alle rilevazioni pomeridiane, anche se, in questo caso, si può notare una maggiore dispersione dei risultati ottenuti rispetto alla linea di tendenza.



**Grafico 12.** Scatter Plot percorsi serali, confronto tra temperatura media dell'aria [°C] ed indice NDVI medio con linea di tendenza.

Infine, è stato ottenuto un modello OLS (Figura 40), nel quale è stato ottenuto un valore di  $R^2$  pari a 0,16, un risultato molto inferiore a quanto rilevato per le sessioni pomeridiane.

Un altro risultato interessante riguarda il coefficiente di regressione relativo a NDVI medio, in questo caso circa pari a -2,97, esso indica che ad ogni aumento di 0,1 del valore NDVI corrisponde un abbassamento di temperatura medio di circa 2,97 °C. Questo risultato mette in luce il fatto che durante le ore notturne la diminuzione di temperatura, nelle zone caratterizzate da un'abbondante copertura vegetale, è più significativa rispetto al pomeriggio. Questo fenomeno è dovuto al fenomeno del consumo di suolo, ovvero l'incapacità del terreno di “respirare” legata alla totale impermeabilizzazione delle superfici. Letteralmente, è l'azione di “sigillare” il suolo, rendendolo impermeabile perché coperto da materiali edili (ISPRA, 2023). Cemento e asfalto, inoltre, assorbono molto più calore rispetto a un volume equivalente di terreno o di aria. Di conseguenza, un isolato denso di palazzi e strade, di giorno funziona come un'enorme spugna che assorbe calore e radiazioni solari per poi rilasciarli di notte. Per questo motivo in città l'escursione termica tra giorno e notte è molto contenuta, rispetto a quando ci troviamo in aperta campagna.

Statistica della regressione									
R multiplo	0.40								
R al quadrato	0.16								
R al quadrato corretto	0.16								
Errore standard	1.09								
Osservazioni	919.00								
ANALISI VARIANZA									
	gdl	SQ	MQ	F	Significatività F				
Regressione	1.00	211.40	211.40	178.55	0.00				
Residuo	917.00	1085.70	1.18						
Totale	918.00	1297.10							
	Coefficienti	Errore standard	Stat t	Valore di significatività	Inferiore 95%	Superiore 95%	Inferiore 95.0%	Superiore 95.0%	
Intercetta	26.81	0.08	327.95	0	26.65	26.97	26.65	26.97	
NDVI media	-2.97	0.22	-13.36	2.43576E-37	-3.40	-2.53	-3.40	-2.53	

**Figura 40.** Modello OLS, percorsi serali.

### 3.4 Relazione tra LST e la temperatura dell'aria

Per quanto riguarda le rilevazioni svolte in concomitanza con il passaggio del satellite Landsat 8, sono state prese in considerazione le sessioni svolte il 15 agosto e l'8 settembre 2023 in quanto, nelle altre giornate utili al confronto, le condizioni meteorologiche con presenza di copertura nuvolosa hanno reso non utilizzabili le immagini satellitari.

Dalle prime rappresentazioni cartografiche (Figure 41 e 42) si può notare che le zone più calde, aventi range 30,5 – 30,9 °C il 15 agosto e 28,5 – 28,8 °C l'8 settembre, sono, anche in questo caso, quelle relative al Piazzale della Stanga e all'area commerciale della città, mentre le zone più miti sono quelle nell'immediata vicinanza del canale Piovego e delle zone verdi, in queste zone le temperature sono scese fino a 28,2 °C ad agosto e fino a 26,9 °C a settembre. Inoltre, è possibile notare che il primo tratto di Via Venezia presenta delle temperature inferiori in contrasto con quanto osservato in precedenza, ciò è probabilmente dovuto al fatto che sono state percorse delle strade secondarie più fresche, in quanto vicine ad aree verdi e viali alberati, ed il *device* mobile doveva ancora abituarsi alle più elevate temperature di Via Venezia.

PERCORSO\_15.08.2023

- 28.2 - 29.3
- 29.3 - 29.5
- 29.5 - 29.8
- 29.8 - 29.9
- 29.9 - 30
- 30 - 30.2
- 30.2 - 30.3
- 30.3 - 30.4
- 30.4 - 30.5
- 30.5 - 30.9

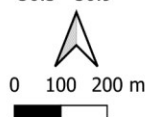
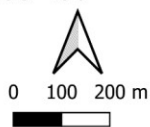


Figura 41. 15 agosto 2023, i valori di temperatura dell'aria [°C].

PERCORSO\_08.09.2023

- 26.9 - 27.4
- 27.4 - 27.6
- 27.6 - 27.7
- 27.7 - 27.8
- 27.8 - 27.9
- 27.9 - 28
- 28 - 28.2
- 28.2 - 28.3
- 28.3 - 28.5
- 28.5 - 28.8



**Figura 42.** 8 settembre 2023, i valori di temperatura dell'aria [°C].

Considerando il confronto tra la temperatura dell'aria ed il tipo di suolo è possibile notare visivamente, osservando le Figure 43 e 44, che molte delle aree più miti si trovano in corrispondenza del “suolo permeabile”; in questo caso, a differenza di quanto osservato negli studi precedenti, la differenza è meno evidente ed anche delle zone considerate dal sistema CLC impermeabili presentano delle temperature inferiori, ciò è dovuto alla presenza di aree classificate impermeabili nelle quali vi è una forte presenza di alberi ed aree verdi non segnalate nella classificazione *Corine Land Cover*.

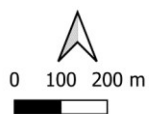
PERCORSO\_15.08.2023

- 28.2 - 29.3
- 29.3 - 29.5
- 29.5 - 29.8
- 29.8 - 29.9
- 29.9 - 30
- 30 - 30.2
- 30.2 - 30.3
- 30.3 - 30.4
- 30.4 - 30.5
- 30.5 - 30.9

USO\_DI\_SUOLO

■ SUOLO IMPERMEABILE

■ SUOLO PERMEABILE



**Figura 43.** 15 agosto 2023, i valori di temperatura dell'aria [°C] a confronto con la carta di consumo di suolo.



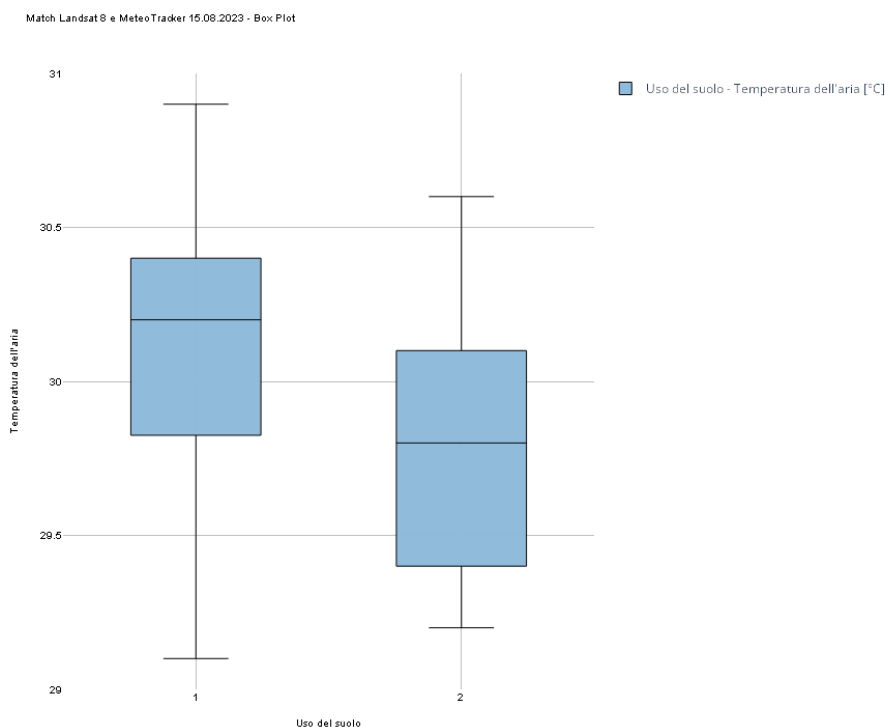
**Figura 44.** 8 settembre 2023, i valori di temperatura dell'aria [°C] a confronto con la carta di consumo di suolo.

La carta di consumo di suolo è stata confrontata graficamente con la temperatura dell'aria attraverso un *Box Plot* (Grafici 13 e 14) ed un *Violin Plot* (Grafici 15 e 16).

Analizzando il Grafico 13, ovvero il *Box Plot* relativo al 15 agosto, è possibile notare che le temperature maggiori appartengono alle zone in cui la copertura del suolo è totale (1) con un *range* che parte da 29,1 °C fino ad arrivare a circa 31,9 °C. Invece, le condizioni termiche più miti sono localizzate nelle restanti aree, in questo caso il *range* di temperatura parte da 29.2 °C fino ad un massimo di circa 30,6 °C.

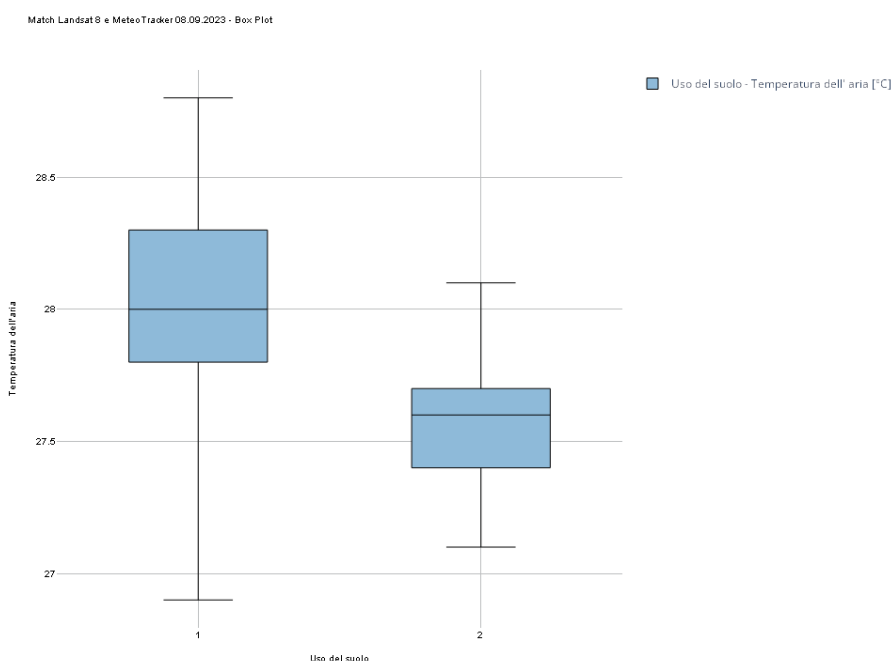
Per quanto riguarda le temperature medie, si può notare che per il suolo impermeabile essa si aggira attorno a 30,3 °C, mentre la temperatura media nelle zone permeabili è di 29,8 °C, mezzo grado inferiore. Si può quindi affermare che la differenza di temperatura tra i due tipi di terreno esiste anche se è meno evidente rispetto a quanto osservato per i percorsi pomeridiani e serali.





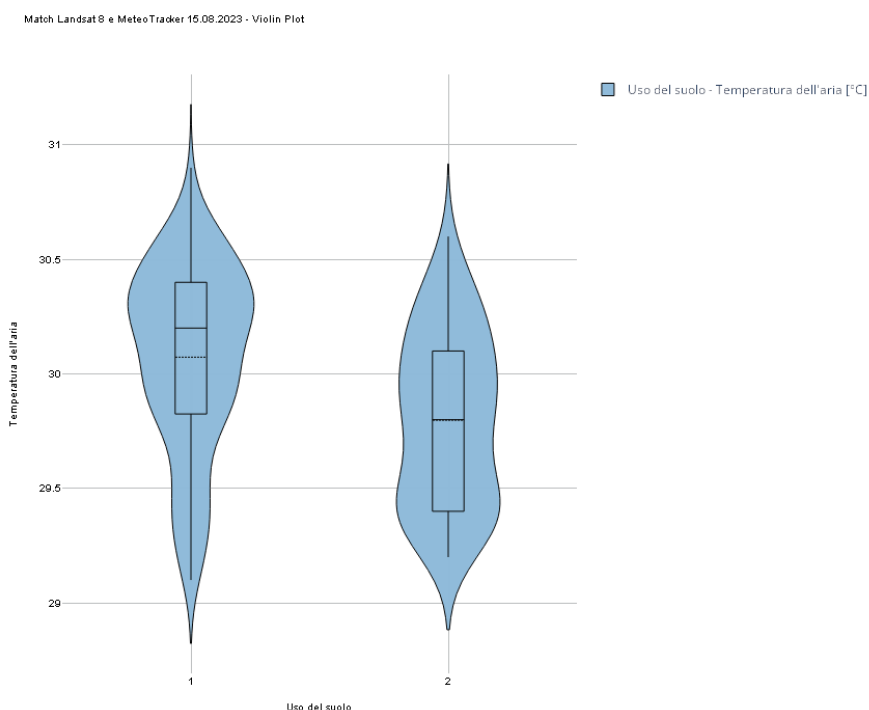
**Grafico 13.** Box Plot 15/08/2023, confronto tra uso del suolo (suolo impermeabile (1) e suolo permeabile (2)) e temperatura media dell'aria [°C].

Anche al Grafico 14, relativo al *Box Plot* della sessione del 8 settembre, si possono distinguere gli intervalli di temperatura associati alle zone impermeabili e permeabili: per quanto riguarda il primo tipo di suolo il *range* è compreso tra 26,9 °C e 28,8 °C, viceversa, la seconda zona è compresa tra 27,1 °C e 28,1 °C. Considerando i valori medi, la media di temperatura relativa al suolo impermeabile è di 28,0 °C, mentre quella relativa all'area permeabile è di 27,6 °C, in questo caso la differenza tra le due è di poco meno di mezzo grado.



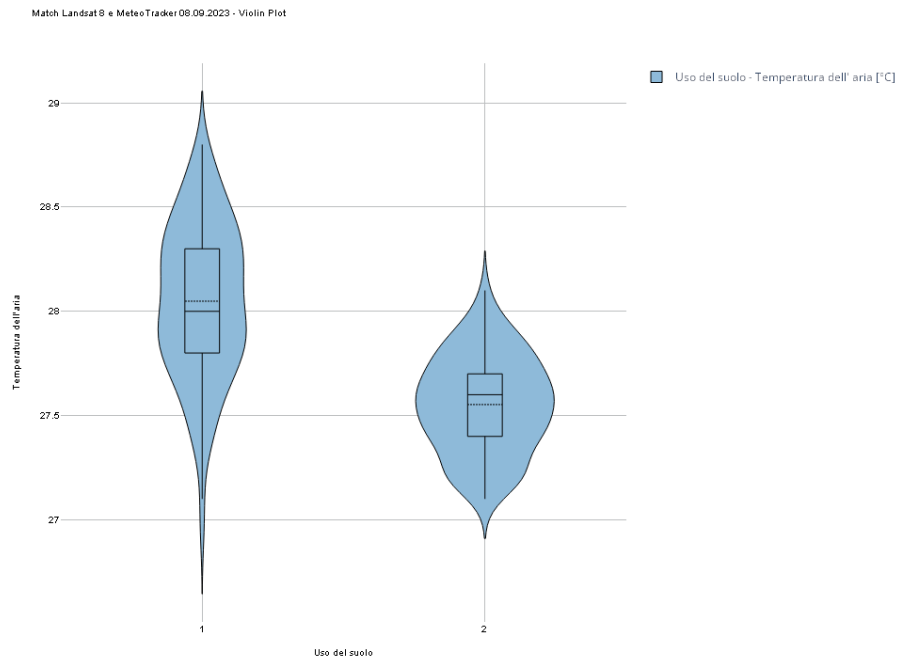
**Grafico 14.** Box Plot 08/09/2023, confronto tra uso del suolo (suolo impermeabile (1) e suolo permeabile (2)) e temperatura media dell'aria [°C].

Di seguito è riportato il *Violin Plot* relativo alla misurazione del 15 agosto, in esso è possibile notare, oltre a quanto è stato già osservato in precedenza, che la forma del violino relativa al suolo impermeabile risulta allungata inferiormente e panciuta nella parte superiore, viceversa la figura associata al terreno permeabile risulta allungata nella parte superiore e più spessa nella parte inferiore. In base ai risultati, è possibile dedurre che, per quanto riguarda le aree impermeabili, i valori di temperatura misurati con maggior frequenza sono quelli più elevati, compresi tra i 30 °C ed i 30,5 °C, mentre, per le zone permeabili, le misurazioni più frequenti sono quelle che variano tra i 29,3 °C ed i 29,5 °C.



**Grafico 15.** Violin Plot 15/08/2023, confronto tra uso del suolo (suolo impermeabile (1) e suolo permeabile (2)) e temperatura media dell'aria [°C].

Considerando il Grafico 16, ovvero il *Violin Plot* relativo alla misurazione del 8 settembre, si può notare, oltre a quanto è stato già osservato in precedenza, che la forma del primo violino risulta più gonfia in corrispondenza della temperatura media 28,0 °C, mentre la seconda figura copre un *range* poco ampio ed è molto spessa, in particolare in corrispondenza della temperatura media pari a 27,6 °C. La figura a Violino relativa al terreno permeabile in questo caso si rivela contenuta e concentrata attorno ai valori più frequentemente misurati.



**Grafico 16.** *Violin Plot* 08/09/2023, confronto tra uso del suolo (suolo impermeabile (1) e suolo permeabile (2)) e temperatura media dell'aria [°C].

Successivamente è stato analizzato il confronto tra le temperature rilevate sul campo e le temperature misurate dal satellite per verificare se ci fosse una corrispondenza tra i due risultati.

Visivamente (Figure 45 e 46) è possibile affermare che effettivamente a temperature del suolo superiori corrispondono anche temperature dell'aria superiori.

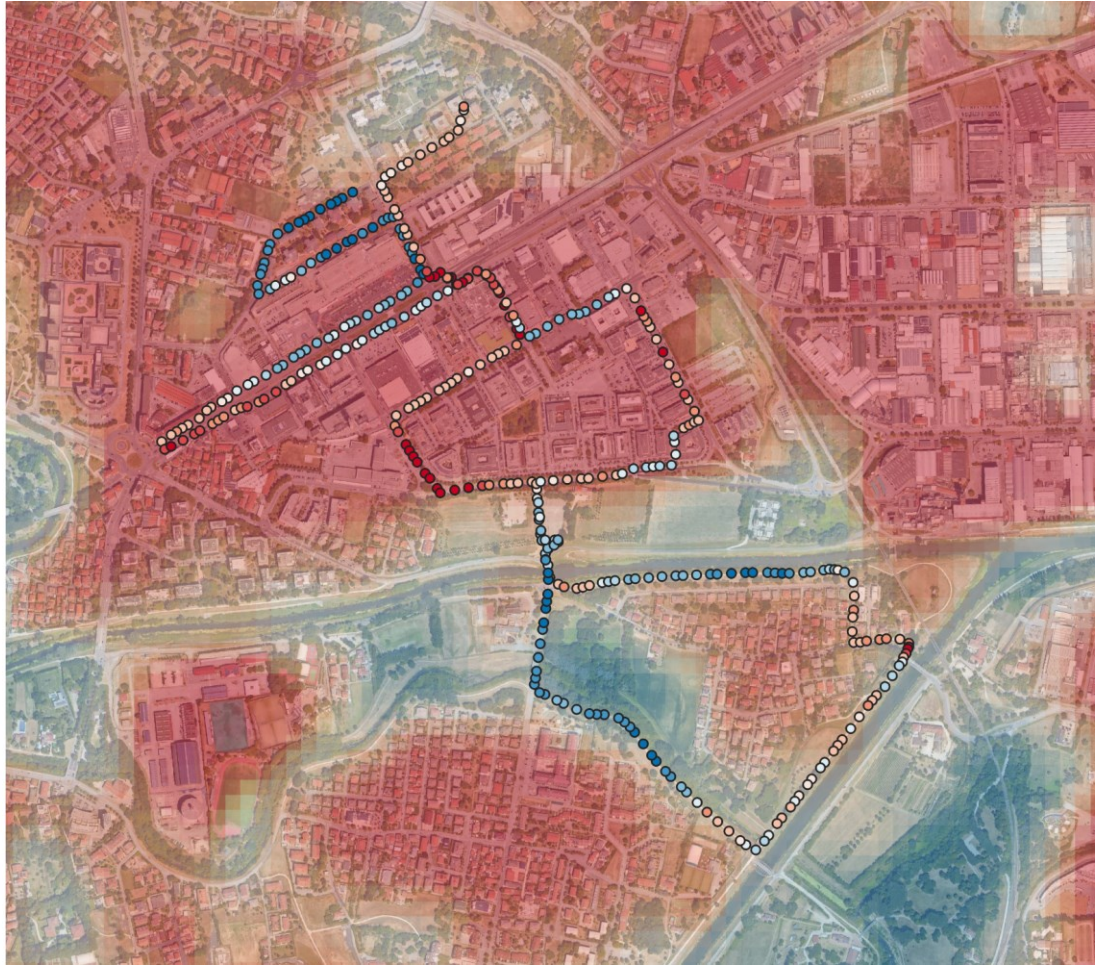
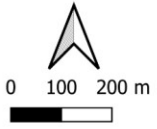
PERCORSO\_15.08.2023

- 28.2 - 29.3
- 29.3 - 29.5
- 29.5 - 29.8
- 29.8 - 29.9
- 29.9 - 30
- 30 - 30.2
- 30.2 - 30.3
- 30.3 - 30.4
- 30.4 - 30.5
- 30.5 - 30.9

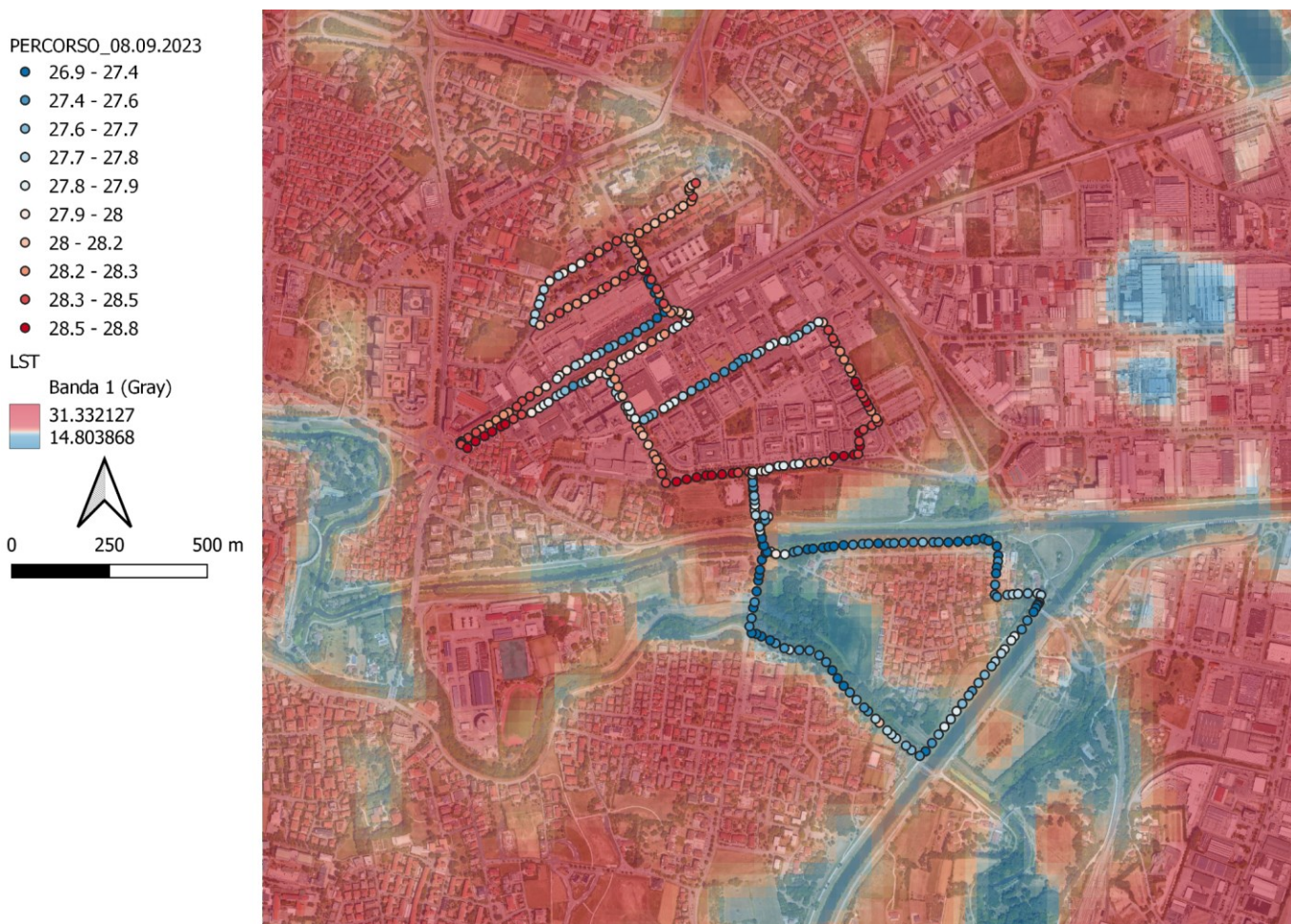
LST

Banda 1 (Gray)

- 38.456726
- 23.547279



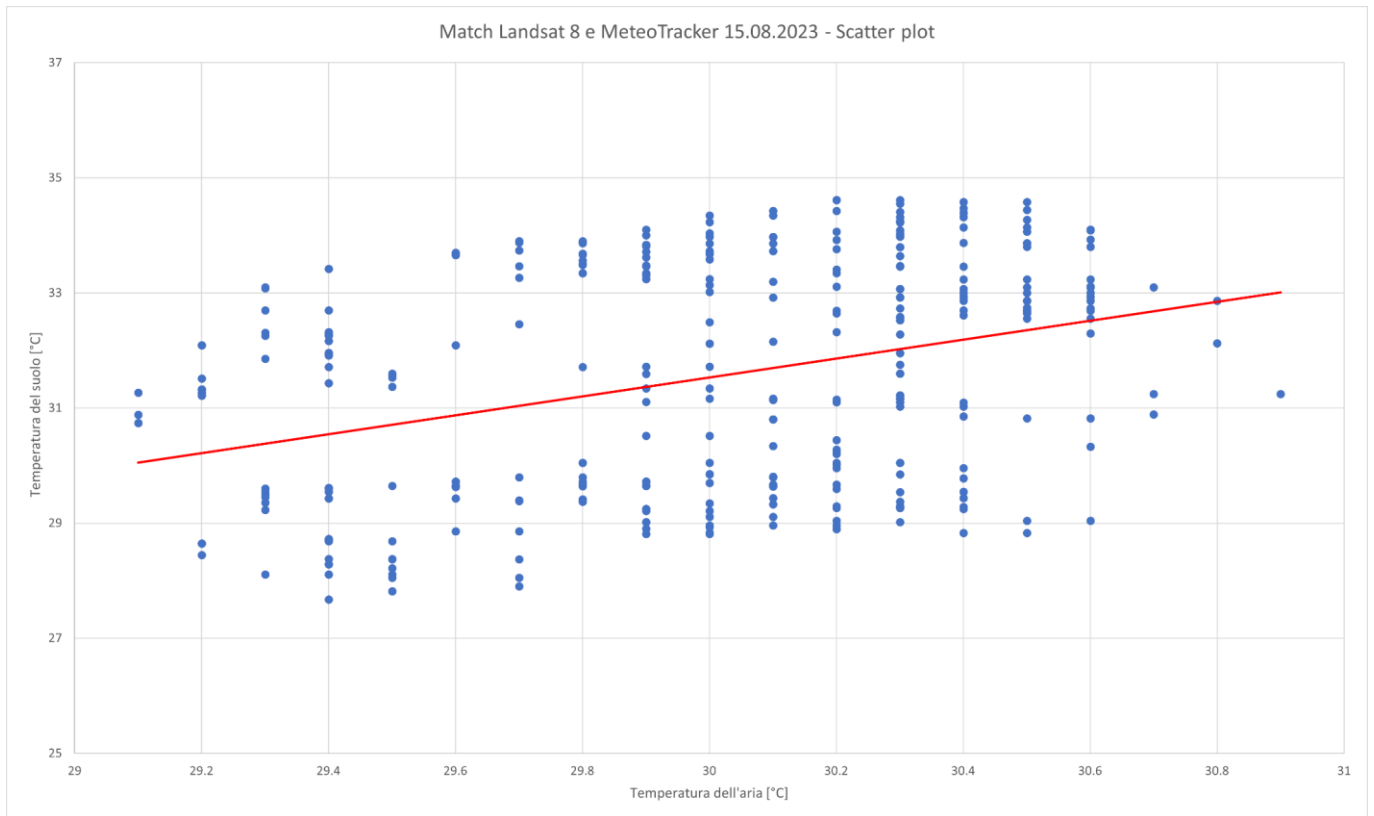
**Figura 45.** 15 agosto 2023, i valori di temperatura dell'aria [°C] a confronto con il parametro LST.



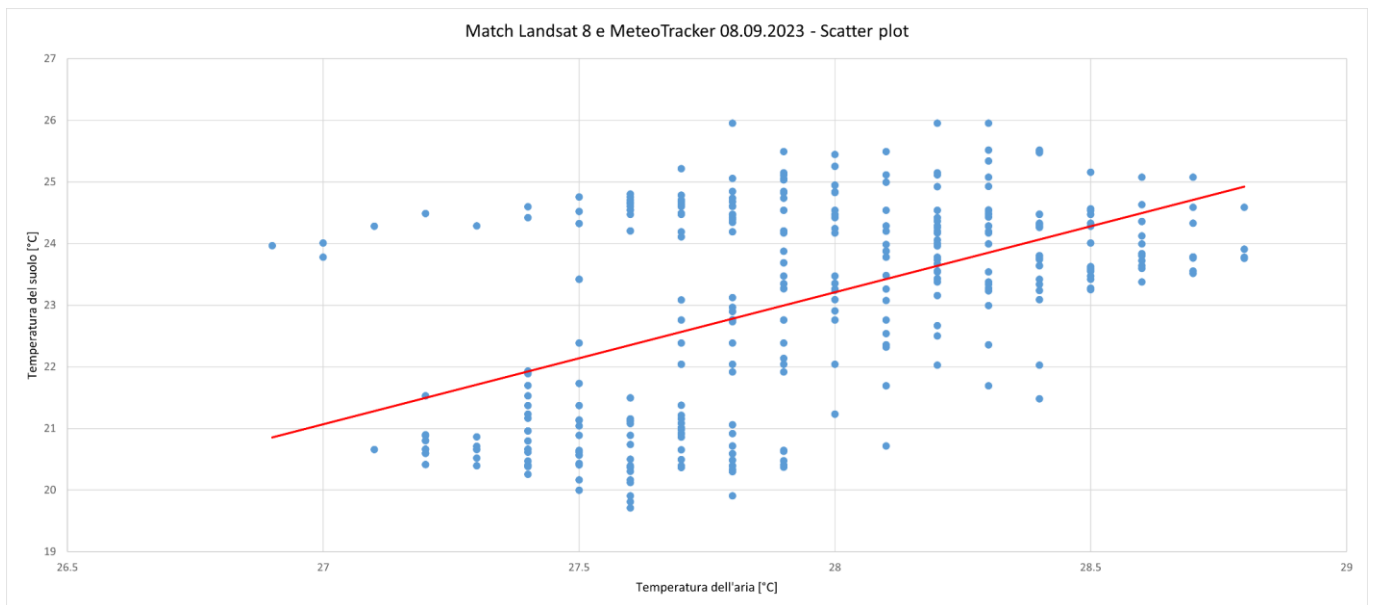
**Figura 46.** 8 settembre 2023, i valori di temperatura dell'aria [°C] a confronto con il parametro LST.

I Grafici 17 e 18 rappresentano gli Scatter Plot relativi alle sessioni del 15 agosto e del 8 settembre. Si può notare un andamento crescente della temperatura dell'aria, rilevata puntualmente dal *device* *MeteoTracker*<sup>®</sup>, all'aumentare della temperatura del suolo, rappresentata dal parametro LST; tuttavia, si osserva una grande dispersione dei risultati rispetto alla linea di tendenza. Questa differenza tra i due risultati è legata a vari motivi:

1. Il dispositivo *MeteoTracker*<sup>®</sup> rileva puntualmente la temperatura dell'aria;
2. il parametro LST (*Land Surface Temperature*) è una stima della temperatura superficiale della terra e, per determinare questa grandezza, sono necessari opportuni sensori sensibili alla radiazione termica infrarossa in grado di eseguire misure di radianza correlabili alla LST. Considerando il fatto che il sensore termico del satellite Landsat 8 ha risoluzione spaziale di 100 m, il valore di temperatura ottenuto è una media calcolata su un pixel di 100x100m;
3. Le sessioni con il *device* mobile sono distribuite nel tempo, circa 15 minuti prima e 15 minuti dopo l'acquisizione satellitare;
4. Le immagini satellitari sono acquisite istantaneamente.



**Grafico 17.** Scatter Plot 15/08/2023, confronto tra temperatura dell'aria [°C] e parametro LST con linea di tendenza.



**Grafico 18.** Scatter Plot 08/09/2023, confronto tra temperatura dell'aria [°C] e parametro LST con linea di tendenza.

Per quanto riguarda il modello OLS è possibile fare le seguenti considerazioni: per il giorno 15 agosto è stato ottenuto un valore di  $R^2$  pari a 0,12, mentre per il giorno 8 settembre  $R^2$  risulta 0,27, i risultati possono essere considerati valori poco rilevanti in termini statistici. Però, bisogna tenere conto del fatto che la variabile dipendente analizzata (temperatura dell'aria) può dipendere da molti fattori, non solo dalla temperatura al suolo, di conseguenza si può affermare che esista una relazione tra la temperatura rilevata

sul campo e la temperatura rilevata dal satellite anche se non è così accentuata. Tra i due casi la corrispondenza più evidente è quella relativa all'8 settembre. Un altro risultato interessante riguarda il coefficiente relativo alla temperatura del suolo, in questo caso circa pari a 0,07 ad agosto e a 0,12 a settembre, esso indica che ad ogni unità del valore LST (ovvero 0,1) corrisponde un innalzamento di temperatura dell'aria medio di circa 0,07 °C nel primo caso e circa 0,12 °C nel secondo caso. Basandosi su quest'ultimo risultato si può affermare che ad agosto la temperatura del suolo aumenta più velocemente rispetto alla temperatura dell'aria, al variare della zona analizzata, mentre durante le rilevazioni di settembre sono i valori ottenuti sul campo che sono aumentati più velocemente rispetto ai dati satellitari.

Statistica della regressione									
R multiplo	0.34								
R al quadrato	0.12								
R al quadrato corretto	0.12								
Errore standard	0.39								
Osservazioni	367.00								
ANALISI VARIANZA									
	gdl	SQ	MQ	F	Significatività F				
Regressione	1.00	7.34	7.34	49.03	0.00				
Residuo	365.00	54.62	0.15						
Totale	366.00	61.96							
	Coefficienti	Errore standard	Stat t	Valore di significatività	Inferiore 95%	Superiore 95%	Inferiore 95.0%	Superiore 95.0%	
Intercetta	27.73	0.33	85.31	3.6572E-243	27.09	28.37	27.09	28.37	
Temperatura del suolo [°C]	0.07	0.01	7.00	1.21644E-11	0.05	0.09	0.05	0.09	

Figura 47. Modello OLS, 15/08/2023.

Statistica della regressione									
R multiplo	0.52								
R al quadrato	0.27								
R al quadrato corretto	0.27								
Errore standard	0.35								
Osservazioni	367.00								
ANALISI VARIANZA									
	gdl	SQ	MQ	F	Significatività F				
Regressione	1.00	15.96	15.96	133.13	0.00				
Residuo	365.00	43.77	0.12						
Totale	366.00	59.73							
	Coefficienti	Errore standard	Stat t	Valore di significatività	Inferiore 95%	Superiore 95%	Inferiore 95.0%	Superiore 95.0%	
Intercetta	25.04	0.25	100.14	1.5576E-267	24.55	25.53	24.55	25.53	
Temperatura del suolo [°C]	0.12	0.01	11.54	1.80753E-26	0.10	0.15	0.10	0.15	

Figura 48. Modello OLS, 08/09/2023.





## 4 Conclusioni

In seguito alle considerazioni fatte in merito ai diversi rilevamenti ed elaborazioni si può affermare che le temperature più elevate e quelle più miti sono state individuate sempre nelle stesse zone, sia durante le sessioni notturne sia durante i rilevamenti diurni, ovvero quelli pomeridiani e quelli mattutini in concomitanza del passaggio del satellite Landsat 8. Le aree più calde corrispondono a Via Venezia, l'area commerciale di Padova, la zona industriale (in particolare Corso Stati Uniti), il centro di Padova esterno alle mura ed in prossimità della stazione ferroviaria. Per contro, le zone aventi una condizione termica con valori più bassi corrispondono alla periferia, alle aree confinanti con campi coltivati, corsi d'acqua e parchi. Inoltre, le temperature più elevate sono state rilevate durante il giorno, in particolare durante le sessioni pomeridiane, mentre quelle più miti durante le uscite serali.

Per quanto riguarda il confronto con la carta di consumo di suolo è emerso che ad aree considerate impermeabili, perché densamente urbanizzate, in genere corrispondono temperature più elevate, mentre nelle zone classificate come "suolo permeabile" le condizioni termiche sono più temperate, raggiungendo differenze di 4 °C tra le due zone durante la stessa rilevazione; sono tuttavia presenti delle eccezioni durante i rilevamenti mattutini in concomitanza del passaggio del satellite, ciò è dovuto alla presenza di alberi lungo la strada in grado di mitigare la temperatura dell'aria. Dal confronto con l'indice NDVI è emerso che ad aree aventi un basso indice NDVI, quindi con scarsa presenza di vegetazione, corrispondono temperature maggiori. Sulla base di questi risultati, si può quindi concludere che la presenza di parchi, aree verdi, coltivazioni e corsi d'acqua è rilevante in termini di abbassamento della temperatura, soprattutto durante il pomeriggio. Inoltre, si è osservato che durante le ore notturne la diminuzione di temperatura, influenzata dall'aumento dell'indice NDVI di copertura vegetale, è più significativa rispetto al pomeriggio, ciò è dovuto al rilascio termico delle superfici. È per questo motivo che, per i tragitti effettuati nel pomeriggio, si registra in media una diminuzione della temperatura di circa mezzo grado in meno.

Infine, considerando il parametro LST, il quale rappresenta la condizione termica del suolo, e la temperatura dell'aria è emerso che le due temperature non corrispondono nei valori; è comunque possibile osservare che all'aumentare della temperatura del suolo aumenta anche quella dell'aria misurata con il *device* mobile. Inoltre, alle aree aventi una condizione termica del suolo superiore corrispondono i valori rilevati maggiori. Infine, è di fondamentale importanza rilevare l'utilità di tali dispositivi per il mobile mapping dei microclimi urbani nel coinvolgimento attivo dei cittadini; tale elemento è importante non solo per aumentare la consapevolezza e la comprensione del fenomeno e dei suoi impatti, ma anche per poter ricavare una più elevata quantità di dati su base giornaliera. Inoltre, il contributo dei cittadini è utile per poter analizzare una porzione più vasta del territorio, aumentando i dispositivi in movimento aumentano anche le aree analizzate.



## 5 Ringraziamenti

Per prima cosa, vorrei ringraziare il mio relatore il prof. Salvatore Pappalardo, per avermi proposto e reso partecipe di questo ambizioso progetto di tesi, per i suoi preziosi consigli e per la sua disponibilità. Non meno importante è stato l'aiuto del mio correlatore il dottor Carlo Zanetti, grazie per avermi sempre consigliato nei momenti di bisogno, per avermi fornito spunti fondamentali nella stesura di questo lavoro e per avermi indirizzato nei momenti di indecisione. Ringrazio infinitamente i miei genitori, Laura e Loris, e mio fratello Alessandro che mi hanno sempre motivato a dare il meglio e mi hanno sostenuto durante tutto il mio percorso scolastico ed universitario. Vorrei estendere questo grazie a tutta la mia famiglia, con i miei zii e nonni che sono stati partecipi insieme a me di ogni tappa di questo viaggio, un grazie speciale va ai miei zii Giorgio e Francesca, i miei primi sostenitori e tifosi in ogni momento, ed al signor Lidio. Un grazie a tutti i miei amici ed amiche, che hanno alleggerito i momenti più pesanti e mi hanno spronato a dare sempre di più, soprattutto grazie a tutti i miei colleghi della terza fila, per avermi incoraggiato fin dall'inizio del percorso universitario. Un ultimo grazie dal cuore va a Niccolò per avermi trasmesso tutta la forza ed il coraggio che mi serviva, grazie per tutto il tempo che mi hai dedicato e grazie perché ci sei sempre stato.



# Bibliografia

- Antognelli S. (29 Maggio 2018). Indici di vegetazione NDVI e NDMI: istruzioni per l'uso. Agricolus.
- Antoniciello G. (2021). MeteoTracker©, una piccola ma promettente stazione meteo portatile. NIMBUS 86.
- Ballester J., Quijal-Zamorano M., Méndez Turrubiates R. F., Pegenaute F., Herrmann F. R., Robine J. M., Basagaña X., Tonne C., Antó J. M., Achebak H. (2023). *Heat-related mortality in Europe during the summer of 2022*. 10 luglio 2023. Nature Medicine.
- Blandino G. (2022). Monitorare le polveri sottili, grazie alle bici: sensori *low cost* più *bikesharing* per ampliare le rilevazioni sull'inquinamento in città. Eurac Research. <https://www.eurac.edu/it/magazine/monitoraggio-ambientale-polveri-sottili-bici>.
- Dickinson J. L., Zuckerberg B., Bonter D. N. (2010). *Citizen Science as an Ecological Research Tool: Challenges and Benefits*. 2010. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics
- DIRETTIVA 2007/2/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 14 marzo 2007 che istituisce un'infrastruttura per l'informazione territoriale nella Comunità europea (Inspire). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:02007L0002-20190626&from=HR>.
- European Citizen Science Association, ECSA. (2015). Dieci principi di Citizen Science. 1° settembre 2015. <https://eu-citizen.science/resource/88>.
- IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; IPCC: Londra, UK; New York, NY, USA, 2021.
- Isprambiente, APAT (Agenzia per la protezione dell'ambiente e i servizi tecnici). (2018). Legenda del CORINE Land Cover 2000. 2018. <https://www.isprambiente.gov.it/files/legendacorine.pdf>.
- Koko A. F.; Yue W., Abubakar G. A., Alabsi A. A. N., Hamed R. (2021). *Spatiotemporal Influence of Land Use/Land Cover Change Dynamics on Surface Urban Heat Island: A Case Study of Abuja Metropolis, Nigeria*. ISPRS Int. J. Geo-Inf, 2021.
- Oke T. R. (1978). *Boundary layer climates*. London. 1978.
- Palafox-Juárez E. B., López-Martínez J. O., Hernández-Stefanoni J. L., Hernández-Nuñez H. (2021). *Impact of Urban Land-Cover Changes on the Spatial-Temporal Land Surface Temperature in a Tropical City of Mexico*. ISPRS Int. J. Geo-Inf, 2021.
- Pappalardo S. E., Zanetti C., Todeschi V. (2023). *Mapping urban heat islands and heat-related risk during heat waves from a climate justice perspective: A case study in the municipality of Padua (Italy) for inclusive adaptation policies*. ScienceDirect, Landscape and Urban Planning.

Pastore F., Tarantino E., Fratino U. (2014). Stima della Temperatura Superficiale Terrestre del territorio di Taranto da dati di Landsat 8. ASITA 2014.

Pozzolo P. (2020). R quadro: il coefficiente di determinazione. Paola Pozzolo, la tua statistica. <https://paolapozzolo.it/coefficiente-determinazione-r-quadro/>.

Robine J. M., Cheung S. L. K., Le Roy S., Van Oyen H., Griffiths C., Michel J. P., Herrmann F. R. (2008). *Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003*. Febbraio 2008. Comptes Rendus Biologies.

Rousi E., Kornhuber K., Beobide-Arsuaga G., Luo F., Coumou D. (2022) *Accelerated western European heatwave trends linked to more-persistent double jets over Eurasia*. *Nat. Commun.* 2022.

Rubio-Iglesias J. M., Edovald T., Grew R., Kark T., Kideys A. E., Peltola T., Volten H. (2020). *Citizen Science and Environmental Protection Agencies: Engaging Citizens to Address Key Environmental Challenges*. *Frontiers in Climate*, Vol. 2. doi: 10.3389/fclim.2020.600998.

The Lancet. (2021). *Health in a world of extreme heat*. The Lancet, Volume 398, Issue 10301, **2021**. [https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736\(21\)01860-2/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736(21)01860-2/fulltext).

Tong S., Prior J., McGregor G., Shi X., Kinney P. (2021). *Urban heat: An increasing threat to global health*. *BMJ* **2021**.

Zanetti C., Carraro M., De Marchi M., Pappalardo S. E. (2023). *Volunteered geographic information for mapping urban climate and air quality: testing and assessing 'sniffer bikes' with low-cost sensors*. *International Symposium on Mobile Mapping Technology (MMT 2023), 24–26 May 2023, Padua, Italy*.

# Sitografia

<https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL>

<https://earthexplorer.usgs.gov/>

<https://idt2.regione.veneto.it/portfolio/webgis-carta-copertura-del-suolo-regione-del-veneto/>

<https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/>

<https://www.arpa.veneto.it/>

<https://www.isprambiente.gov.it/it/attivita/suolo-e-territorio/suolo/copertura-del-suolo/corine-land-cover>

<https://www.salute.gov.it/portale/caldo/dettaglioFaqCaldo.jsp?lingua=italiano&id=98#:~:text=Le%20ondate%20di%20calore%20sono,rischio%20per%20la%20salute%20della>

<https://www.wetterzentrale.de>

[www.MeteoTracker.com](http://www.MeteoTracker.com)





# Allegato 1

Di seguito è riportato il link per accedere al documento Google contenente i risultati relativi ad ogni singolo percorso pomeridiano e serale:

**[https://docs.google.com/document/d/1MOK5e9Xm0ny0Jibr0\\_ZX9fECWDYcCh2SDx5pn\\_bIVs4/edit?usp=sharing](https://docs.google.com/document/d/1MOK5e9Xm0ny0Jibr0_ZX9fECWDYcCh2SDx5pn_bIVs4/edit?usp=sharing)**