



Relazione delle attività di ricerca per lo sviluppo del Piano d'Azione per l'Energia Sostenibile ed il Clima (PAESC) per il Comune di Prato

Piano di ricerca finalizzato alla valutazione dei rischi e delle vulnerabilità indotti dal cambiamento climatico e alla valutazione della potenzialità mitigativa del piano di azione sulla forestazione urbana della città di Prato

REPORT ATTIVITA' ANNO I

RESPONSABILE SCIENTIFICO

Dr. Beniamino Gioli

AUTORE

Dr. Lorenzo Brilli

CO-AUTORI

Federico Carotenuto, Marta Chiesi, Letizia Cremonini, Edoardo Fiorillo, Tommaso Giordano, Giovanni Gualtieri, Giulia Guerri, Ramona Magno, Francesca Martelli, Fabio Maselli, Marco Morabito, Marianna Nardino, Carolina Vagnoli, Alessandro Zaldei.

36 1. Introduzione

37 Nell'ambito del post emergenza COVID19, la commissione Europea ha approvato finanziamenti
38 straordinari per i paesi membri che permetteranno l'attuazione di misure fondamentali di
39 investimento e riforma per la ripresa e la resilienza quali il perseguimento verso la transizione verde
40 e digitale, il rafforzamento della resilienza economica e sociale e la coesione del mercato unico. Il
41 piano dell'Italia riserva il 37% della spesa totale a misure di sostegno agli obiettivi climatici, in cui
42 sono inclusi investimenti per finanziare un programma di ristrutturazioni per migliorare l'efficienza
43 energetica degli edifici, interventi per promuovere l'uso di fonti di energia rinnovabile, riduzione
44 delle emissioni di gas a effetto serra dei trasporti mediante investimenti nella mobilità urbana
45 sostenibile e nelle infrastrutture ferroviarie. Tali azioni si collocano in un momento storico
46 fondamentale per gli impegni alla lotta contro il cambiamento climatico, dove così come l'Unione
47 europea inserisce nel programma comune un impegno alla riduzione delle emissioni al 2030 del 55%
48 rispetto a quelle del 1990, anche le città italiane si muovono in questa direzione sottoscrivendo
49 la *Carta per la neutralità climatica delle green city*. La normativa europea prevede che tutti i Paesi
50 dell'Unione dovranno raggiungere la neutralità climatica al 2050 attraverso l'azzeramento delle
51 emissioni, gli investimenti nelle tecnologie verdi e la protezione dell'ambiente naturale. Anche per le
52 nostre città la sfida della neutralità climatica è un impegno decisivo per il loro futuro e un'occasione
53 di riqualificazione ecologica e di miglioramento del benessere dei cittadini. Tramite la Carta per la
54 neutralità climatica le città italiane (ad oggi 45 città hanno già sottoscritto tale carta) dovranno
55 individuare un pacchetto di misure per raggiungere i cinque obiettivi strategici di seguito riportati:

56 a) *Promuovere un nuovo protagonismo delle città per la transizione alla neutralità climatica,*
57 *attraverso l'utilizzazione al meglio delle risorse del PNRR con misure per una vivibilità delle*
58 *città, in particolare per la qualità dell'aria, la rigenerazione urbana, la riqualificazione del*
59 *patrimonio edilizio esistente, la mobilità sostenibile, la gestione ecologica delle acque e lo*
60 *sviluppo delle infrastrutture verdi, la riduzione del consumo di risorse e di energia nella*
61 *produzione e nei consumi.*

62 b) *Aumentare l'impegno per l'efficienza energetica e le fonti rinnovabili, riducendo i consumi*
63 *complessivi di energia entro il 2030 di almeno il 15% a quelli pre-pandemia e tagliando di*
64 *circa il 40% i consumi di combustibili fossili, con le rinnovabili che dovranno coprire a fine*
65 *decennio il 70% della produzione. Per rispettare questo trend le città dovranno, tra l'altro,*

definire programmi di riqualificazione energetica degli edifici pubblici e privati, definire misure contro gli sprechi di energia, promuovere l'uso di apparecchiature ed elettrodomestici ad alta efficienza energetica, promuovere sistemi solari attivi, termici e fotovoltaici di nuova generazione.

c) Puntare su una mobilità urbana più sostenibile, meno dipendente dall'auto. Il trasporto stradale è responsabile del 90% delle emissioni. Le città dovranno definire un piano per la mobilità sostenibile precisando gli obiettivi, con particolare riferimento alla riduzione dell'uso dell'auto privata, favorendo la sharing mobility; estendere le zone pedonalizzate e le Ztl a pagamento; facilitare la riduzione degli spostamenti ricorrendo allo smart working; estendere le reti di piste ciclabili e percorsi pedonali; promuovere l'elettrificazione; riorganizzare la distribuzione urbana delle merci.

d) Promuovere l'economia circolare de carbonizzata attraverso la diffusione tra i cittadini di consumi consapevoli che non danneggino il clima; promuovere la diffusione di pratiche agro-ecologiche e biologiche; ridurre la produzione di rifiuti anche attraverso obiettivi avanzati di raccolta differenziata e di riciclo di tutti i rifiuti, potenziando la raccolta di quelli organici.

e) Aumentare gli assorbimenti di carbonio nei suoli, nei sistemi forestali e nelle infrastrutture verdi, che dovrebbero almeno raddoppiare entro il 2050 rispetto ai livelli attuali, per compensare le emissioni incompressibili e consentire un bilancio di emissioni nette pari a zero. Quindi valorizzare la biodiversità nelle città puntando all'incremento dei parchi e dei giardini, delle dotazioni di alberature stradali, dei sistemi di orti urbani; promuovere l'impiego di materiali atti alla cattura, sequestro e stoccaggio della CO₂ attraverso "l'azione di rinnovati involucri architettonici, coperture edilizie, pavimentazioni".

Con delibera n.79 del 24/10/2019, il Consiglio Comunale del Comune di Prato ha condiviso e approvato la proposta formulata dalla Commissione Europea del "Patto dei Sindaci per il Clima e l'Energia". Tale proposta è finalizzata al coinvolgimento delle comunità locali alla realizzazione di iniziative per ridurre nelle città le emissioni di CO₂ e contrastare gli effetti e le vulnerabilità del cambiamento climatico attraverso l'attuazione di un Piano d'Azione per l'Energia Sostenibile e il Clima (PAESC). In tale ottica il Comune di Prato in accordo con i ricercatori del Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per la BioEconomia (CNR-IBE), ha pertanto sottoscritto una convenzione proponente lo sviluppo di un piano di attività di ricerca finalizzato alla valutazione dei rischi e delle

96 vulnerabilità indotti dal cambiamento climatico sul territorio comunale. Tale attività risulterebbe
97 difatti propedeutica e necessaria per la successiva definizione del Piano d'Azione per l'Energia
98 Sostenibile ed il Clima (PAESC) attraverso l'individuazione di azioni integrate negli aspetti di
99 mitigazione e adattamento al cambiamento climatico, con l'obiettivo della riduzione delle emissioni
100 di gas serra ed inquinanti in atmosfera in accordo con il nuovo Patto dei Sindaci e il target 2030 e
101 aumentando nel contempo la resilienza del territorio agli eventi climatici estremi.
102 Entro tale convenzione sono state quindi proposte attività legate al ruolo dei sistemi biologici e delle
103 Nature Based Solutions (NBS), ed alle tecnologie più innovative di monitoraggio delle emissioni e
104 degli assorbimenti di gas serra, sfruttando la sinergia con il progetto europeo UIA-PUJ (Urban
105 Innovation Actions – Prato Urban Jungle) attualmente in corso nel comune di Prato. Le attività, come
106 previsto dalla convenzione tra Comune di Prato e CNR-IBE si sono rivolte a quattro grandi aree
107 tematiche:

108

- 109 i. *vulnerabilità climatica*
- 110 ii. *assorbimento di carbonio*
- 111 iii. *modello Digital-Twin*
- 112 iv. *super-sito per la misura degli scambi di CO₂*

113

114 Nel presente documento sono stati riportati i materiali e le metodologie adottate (sezione 2) e i risultati
115 preliminari (3). Nella sezione 4 sono invece indicati possibili sviluppi futuri delle attività sinora
116 condotte. Tutte le sezioni sono riferite al primo anno di lavoro, pertanto alcune di esse dovranno
117 ancora essere completate.

118

119

120 2. Materiali e Metodi

121 Al fine di raggiungere gli obiettivi preposti, il gruppo di lavoro del CNR-IBE ha utilizzato e
122 sviluppato diversi approcci metodologici. L'integrazione dei diversi approcci utilizzati, insieme ai
123 diversi materiali messi in campo, ha permesso di ottenere risultati integrati che hanno fornito una
124 panoramica completa della situazione all'interno del comune di Prato. Di seguito è stata riportata una
125 breve descrizione degli approcci metodologici utilizzati:

126

a) Dato inventariale e rilievi in campo

Il dato inventariale delle misure del verde urbano comunale, fornito dal comune stesso e comprensivo di localizzazione, tipo di specie e circonferenza della pianta, è stato necessario per ottenere una prima panoramica della situazione del verde urbano. Partendo da tale database, una prima analisi ha consistito nella creazione di curve ipsometriche per la stima del volume arbore tramite la relazione esistente tra C-stock/diametro (3.1). Benché recentemente aggiornato, il database ha previsto misure aggiuntive di analisi per la differenziazione di tale relazione tra le diverse specie.

b) Remote sensing

Immagini da satellite ottenute da database presenti, liberamente scaricabili, e analisi con procedure software sono state utilizzate come dati di input e driver modellistici. L'elaborazione ha consistito nell'estrazione di indici vegetazionali di diverso tipo, i quali hanno permesso un'ottimizzazione della parte modellistica necessaria per valutare dinamiche e stock di carbonio.

c) Sistemi informativi geografici

Lo strumento GIS è stato utilizzato per evidenziare i confini del Comune ed individuare al suo interno macrocategorie necessarie allo svolgimento delle analisi. Nello specifico, sono state discriminate le superfici urbane, agricole e forestali. Di queste ultime, sono state suddivise ulteriori aree inquadrando per macrocategorie al fine di ottenere informazioni che potessero permettere la validazione modellistica. Le macrocategorie forestali discriminate dall'analisi sono state: i) pineta (area forestale); ii) macchia querceta (area forestale); iii) latifoglie sempreverdi (area urbana); iv) latifoglie decidue (area urbana); v) conifere (area urbana); vi) oliveti (area agricola).

d) Modellistica

L'approccio modellistico consta dell'utilizzo di tre modelli diversi. Il modello "C-Fix" è stato utilizzato per ottenere una stima diretta della produzione primaria lorda (GPP) con fPAR; il modello "Biome-BGC" è stato utilizzato per ottenere la capacità di immagazzinamento degli ecosistemi in termini di NEE grazie alla sua capacità di riprodurre i principali processi degli ecosistemi forestali validato in diversi ecosistemi; ed infine il modello fluidodinamico ENVI-met, un modello microclimatico tridimensionale non idrostatico (Bruse and Fleer, 1998) in grado di simulare le

157 interazioni superficie-pianta-aria in ambiente urbano con una risoluzione spaziali di 0.5-10 m e una
158 risoluzione temporale di 10 sec.

159

160

161 3. Risultati

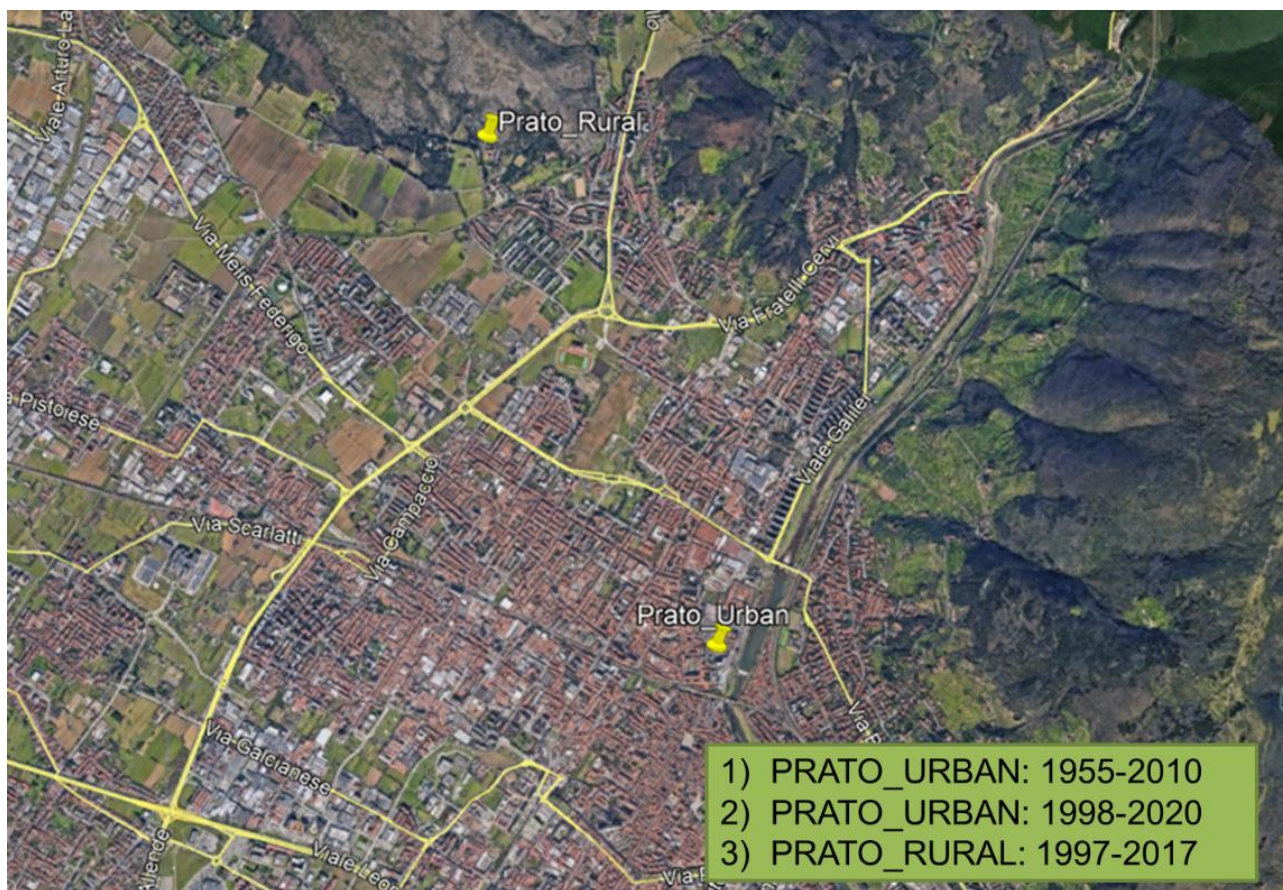
162 3.1. *Vulnerabilità climatica*

163 I cambiamenti climatici, correlabili a fattori antropici, come sostenuto dalla comunità scientifica
164 internazionale, hanno impatti di dimensioni crescenti sugli equilibri ecosistemici, in particolare, sulla
165 regolazione e sulla disponibilità di risorse idriche. Nelle aree mediterranee, gli impatti negativi sono
166 principalmente associati a un innalzamento delle temperature medie e massime, a un'aumentata
167 frequenza di precipitazioni intense e concentrate in brevi periodi, alternate a lunghi periodi di siccità.
168 A fronte di tale situazione si registra una diminuzione delle precipitazioni medie e dei volumi di corsi
169 d'acqua superficiali. Tali preoccupazioni hanno indotto l'Unione Europea a intraprendere una serie
170 di iniziative che, ad aprile 2013, si sono concretizzate con l'adozione della "Strategia europea per i
171 cambiamenti climatici" e con le successive Conclusioni del Consiglio del 13 giugno 2013. La
172 Strategia Nazionale di Adattamento ai cambiamenti climatici (SNAC) conferma quanto già indicato
173 nei documenti elaborati dall'International Panel on Climate Change (IPCC) e dall'European
174 Environmental Agency (EEA) sulle vulnerabilità dell'Italia nel contesto dell'area mediterranea con
175 particolare riferimento alle ondate di calore e alla gestione delle acque e ai rischi connessi causati da
176 fenomeni meteorologici estremi.

177

178 3.1.1. **Analisi storica delle successioni climatiche sul territorio del Comune di** 179 **Prato**

180 L'analisi delle serie storiche dei dati climatici disponibili per la città di Prato è stata effettuata su due
181 siti: Prato_Urban e Prato_Rural (Figura 1) al fine di vedere la differenza tra area urbanizzata e area
182 rurale. Il set di dati di Prato_Urban era differenziato in quanto la stazione è stata spostata nel 2010.
183 Si è quindi proceduto ad un'omogeneizzazione dei dati al fine di avere la serie storica più lunga
184 possibile: 1955-2019.



185

186

187

188

Figura 1. Geolocalizzazione delle due stazioni di misura Prato_Urban e Prato_Rural utilizzate per l'analisi delle condizioni climatiche nella città di Prato (immagine da Google Earth).

189

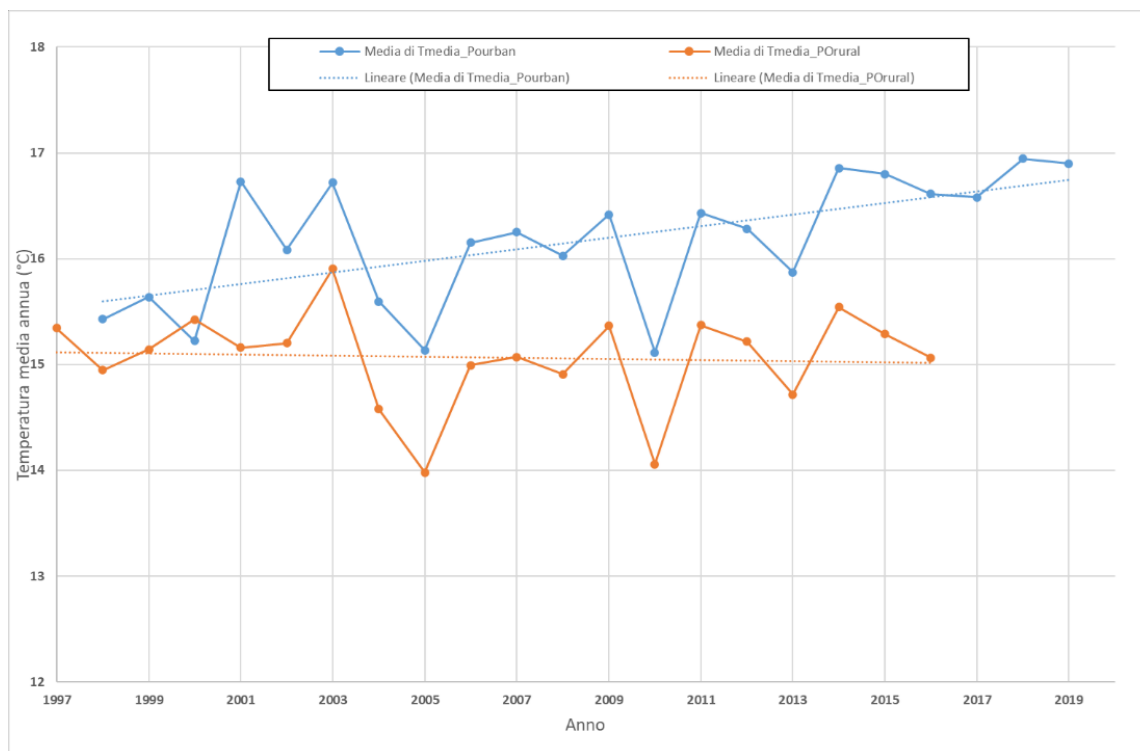
190

191

192

193

I dati della temperatura dell'aria media annua per i due siti (Figura 2) mostrano una differenza di circa un grado centigrado tra i due siti a dimostrazione della ben nota isola di calore urbana che si sviluppa all'interno di un'area urbana a causa delle superfici non permeabili e dell'immagazzinamento e ri-emissione di calore da parte degli edifici. La cosa interessante è notare come l'aumento negli anni della temperatura sia più evidente per l'area urbana rispetto all'area rurale.

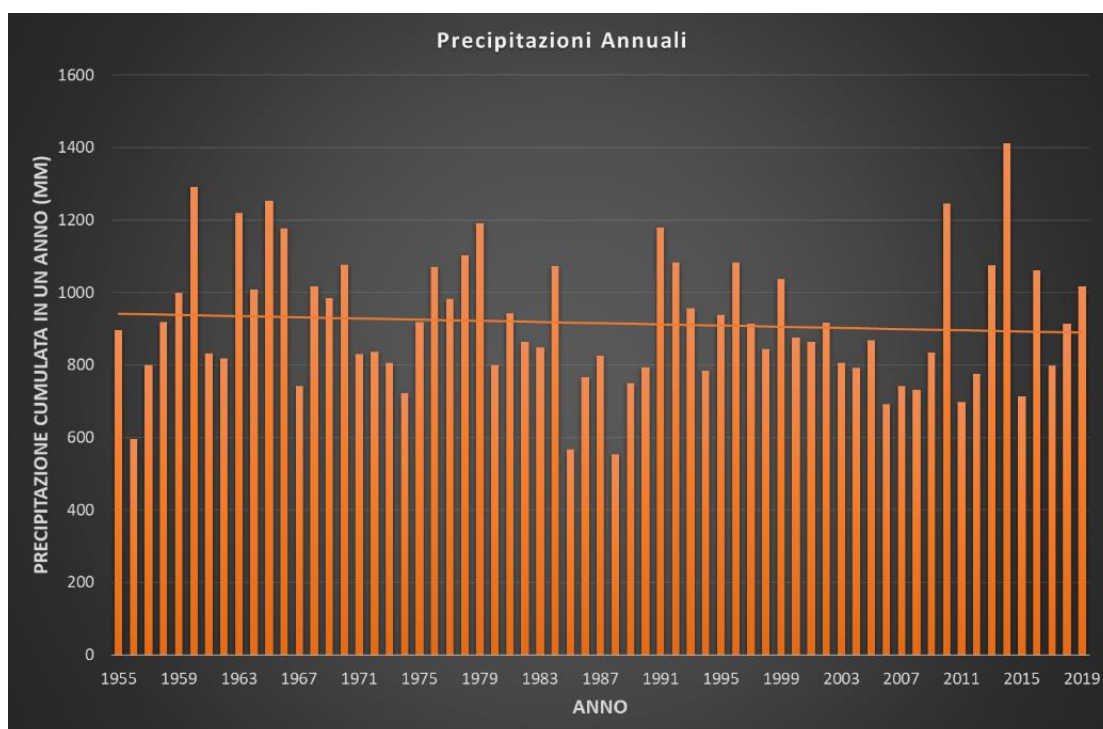


194

195 **Figura 2.** Media annuale della temperatura dell'aria per Prato_urban e Prato_rural con le loro linee di tendenza dal
 196 1997 al 2019.

197

198 Il trend di precipitazione (Figura 3) nella la stazione Prato_urban non mostra particolari variazioni
 199 durante gli anni dando conferma del fatto che le variazioni date dai cambiamenti climatici sono sulla
 200 frequenza e l'intensità delle piogge e non sul valore cumulato annuale.

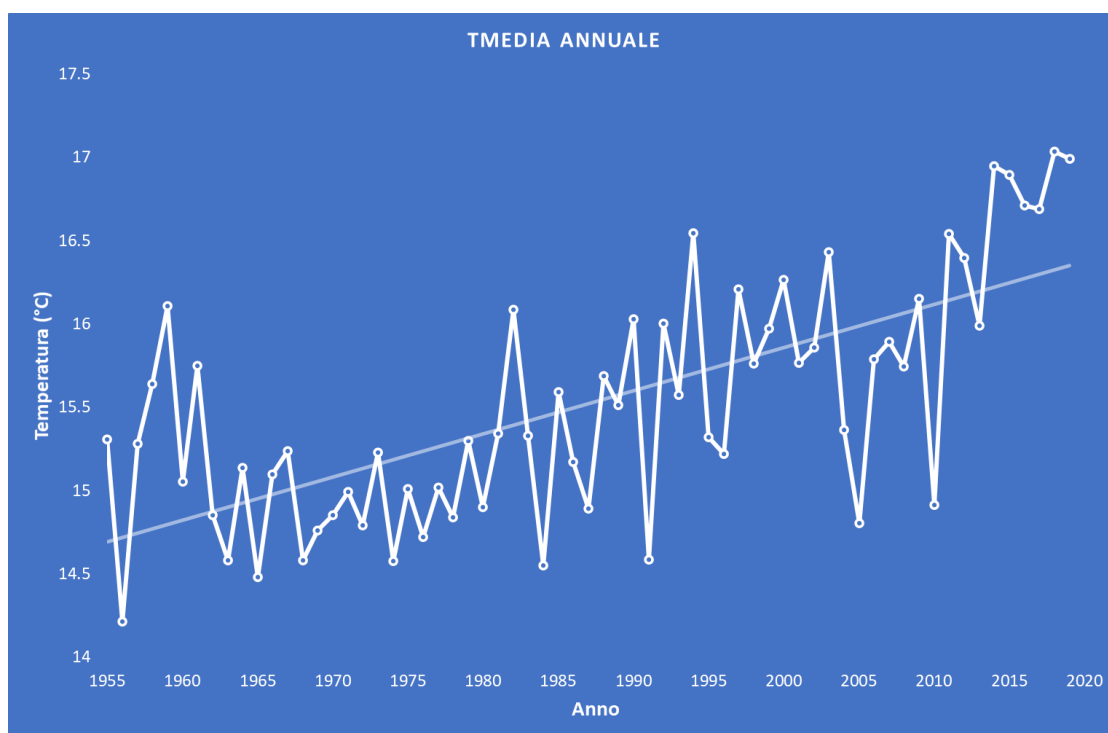


201

202 **Figura 3.** Precipitazione cumulata annuale per Prato_urban con linea di tendenza dal 1955 al 2019.

203

204 In figura 4 è riportata la temperatura media annua per la serie storica 1955-2019 nella stazione
205 Prato_urban: l'incremento mostrato dalla linea di tendenza mostra quello che si riscontra a livello
206 globale relativamente ai cambiamenti climatici e al riscaldamento globale ovvero che negli ultimi
207 50 anni la temperatura dell'aria media annua è aumentata



208

209 **Figura 4.** Temperatura media annua per Prato_urban con linea di tendenza dal 1955 al 2019.

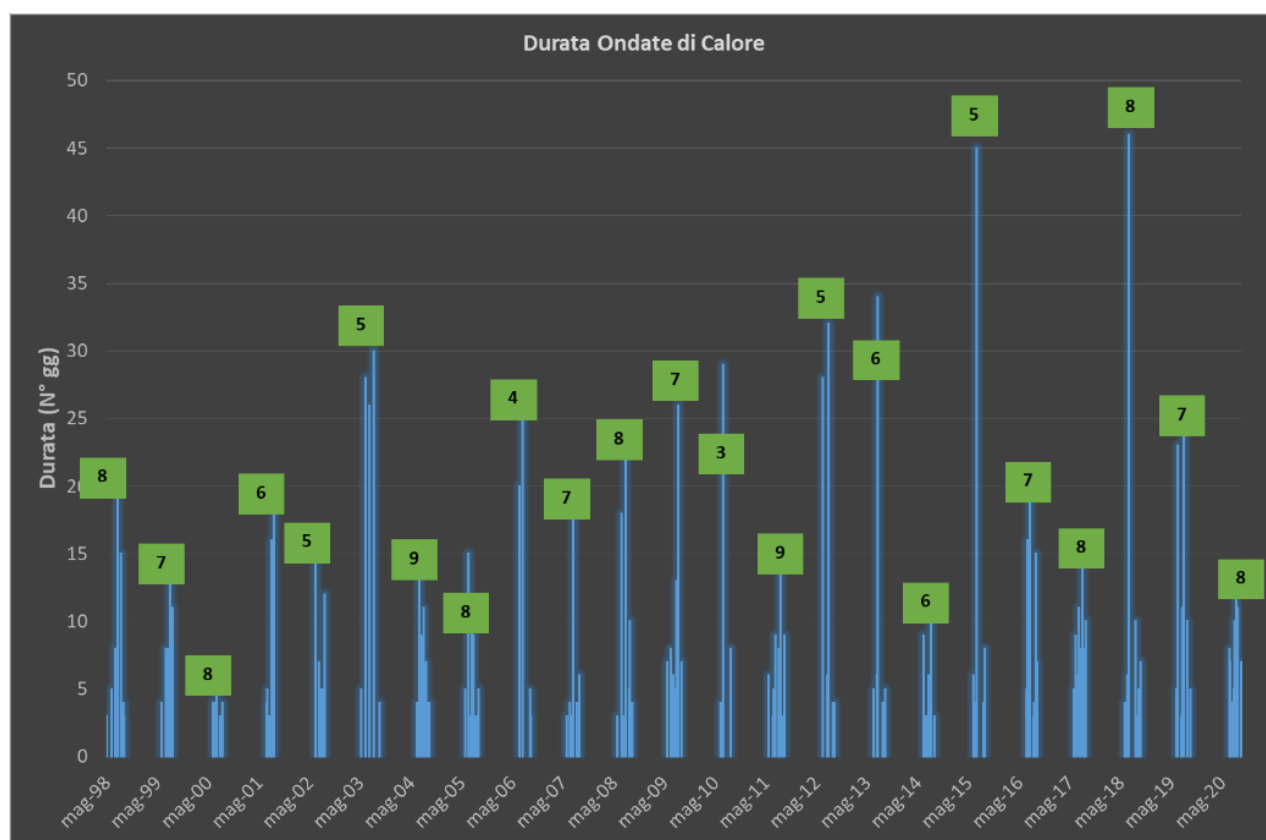
210

211 3.1.2. Identificazione e valutazione delle vulnerabilità del territorio ai principali 212 effetti climatici estremi (ondate di calore, precipitazioni estreme, siccità)

213 L'aumento di temperatura dell'aria fa sì che le ondate di calore siano sempre più frequenti e che i
214 problemi legati alla salute della popolazione, soprattutto quella caratterizzata dalle fasce deboli, siano
215 di maggiore interesse sia da un punto di vista medico, ma anche da un punto di vista di progettazione
216 e rigenerazione urbanistica. Un'ondata di calore, in meteorologia, è un periodo di tempo atmosferico
217 durante il quale la temperatura è insolitamente elevata rispetto alle temperature medie usualmente
218 sperimentate in una data regione, in quel periodo e con caratteristiche di persistenza. La definizione
219 di ondata di calore è relativa ad un dato clima nel senso che ciò che è percepito dalla popolazione
220 come una temperatura eccessiva in un clima temperato può non esserlo in un'area dal clima
221 maggiormente caldo. Nell'estate 2003 nel nostro paese si è osservato come l'onda di calore patologica

222 per la salute umana fosse “un periodo di almeno tre giorni con temperatura massima dell’aria
 223 superiore a 30°C (Ministero della Salute)”. Da questa definizione per la città di Prato, attraverso i dati
 224 orari della serie storica disponibile 1998-2020, sono state studiate e analizzate le ondate di calore. In
 225 Figura 5 sono riportate le ondate di calore in funzione del numero di giorni della durata di ogni singola
 226 ondata di calore. Per ogni anno sono poi riportati (nel quadrato in verde) i numeri di eventi che si
 227 sono avuti. Il grafico mostra che non vi è tanto un incremento del numero di ondate di calore per anno
 228 bensì vi è un aumento della durata di ogni singola ondata di calore come si evidenzia meglio dalla
 229 Figura 6.

230



231

232 **Figura 5.** Numero di ondate di calore dal 1998 al 2020 per la città di Prato in funzione della durata espressa in numeri di
 233 giorni consecutivi con temperature massime maggiori di 30 °C.



Figura 6. Numero delle ondate di calore durante i singoli anni in funzione della durata espressa in giorni consecutivi con temperature massime maggiori di 30°C.

La durata in termini di giorni di un'ondata di calore raggiunge anche valori di 45 giorni (nel 2018) oppure si hanno tre eventi di durata di 30 giorni come è accaduto nel 2003: questo fa sì che le patologie legate alla presenza di un'ondata di calore si siano negli anni aggravate in quanto la persistenza di clima torrido e molto umido per un periodo di tempo prolungato porta sicuramente a effetti più gravi sulla salute umana. Vista questa tendenza, e visto che è in aumento, diventa di fondamentale

244 importanza uno studio degli ambienti urbani durante questi eventi per comprendere sia i processi
245 fisici che si innescano, sia come le possibili soluzioni di rigenerazione urbana possano tenerne in
246 conto e dare migliorie. In meteorologia gli eventi precipitativi sono classificati in base all'intensità:

- 247 ➤ meno di 1mm/hr → pioviggine;
- 248 ➤ 1-2 mm/hr → pioggia debole;
- 249 ➤ 2-6 mm/hr → pioggia moderata;
- 250 ➤ 6-10 mm/hr → pioggia forte;
- 251 ➤ 10-30 mm/hr → rovescio;
- 252 ➤ oltre 30mm/hr → nubifragio.

253 In meteorologia un nubifragio è quindi una precipitazione piovosa particolarmente intensa, durante
254 la quale il tasso di pioggia caduta (rain rate) è uguale o superiore a 30 mm per ora [Giuliaci et al.,
255 2019]. Nonostante solitamente abbia una breve durata, data la sua intensità, questo fenomeno è in
256 grado di creare condizioni di allagamento e inondazioni, specie in zone predisposte. Si tratta di
257 fenomeni associati tipicamente a temporali particolarmente violenti e duraturi, spesso con forte vento,
258 in genere legati a celle temporalesche o a veri e propri violenti cicloni extratropicali. La serie storica
259 di precipitazioni per il sito Prato_urban ha permesso di effettuare un'analisi sulla quantità delle
260 precipitazioni intense avvenute a Prato dal 1997 al 2020. (Tabella 1). Possiamo notare come gli eventi
261 di rovesci (precipitazioni intense) aumenti la sua frequenza con il passare degli anni e che nel 2010
262 si è verificato un evento vicino a essere definito nubifragio. L'attenzione deve essere posta
263 sull'adattamento della rete idrica comunale a questi eventi estremi insieme al monitoraggio e a
264 soluzioni adatte per l'intercettazione dell'acqua piovana (NBS: Nature Based Solutions).

265

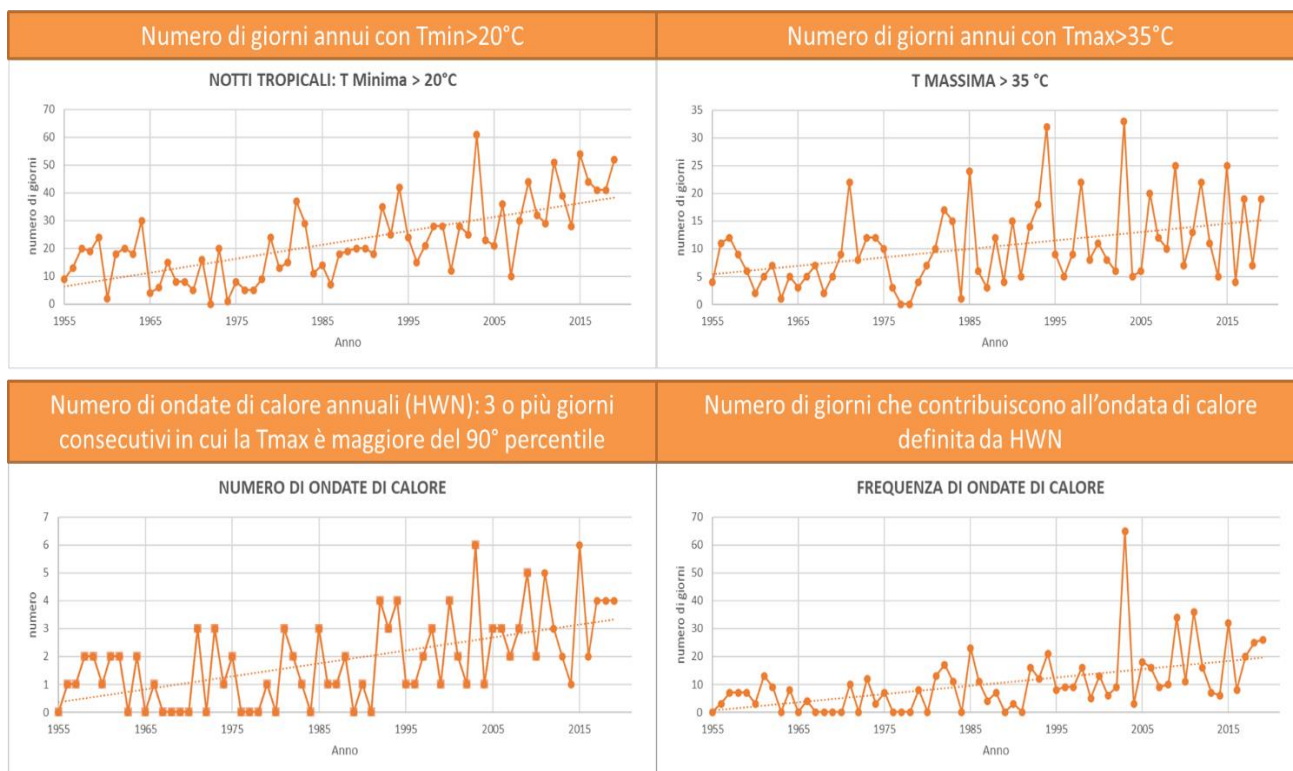
DATA	Precipitazione (mm)	Durata (ore)	tasso prec. (mm/hr)
27/08/1997	43.4	3	14.47
18/11/1999	93.6	6	15.60
09/05/2006	53.6	5	10.72
08/08/2007	64.4	5	12.88
05/10/2010	69.4	3	23.13
26/10/2011	41.2	4	10.30
19/09/2016	65	5	13.00

266

267 **Tabella 1.** Eventi di precipitazioni intense registrate dalla stazione Prato_urban dal 1997 al 2020.

268 Dai dati storici giornalieri è possibile calcolare indici in grado di dare informazioni sul sistema
269 climatico e gli effetti sui sistemi naturali con una particolare enfasi sugli eventi estremi. Questi indici
270 ci indicano la durata e l'ampiezza delle ondate di calore, l'intensità e la frequenza delle precipitazioni,
271 la misura di periodi estremamente umidi o secchi e caldi o freddi. Negli ultimi anni le procedure per
272 il calcolo di questi indici sono state implementate e lo sviluppo e l'analisi di questi indici ha dato un
273 contributo importante ai report di valutazione dell'IPCC. Per la finalità di questo studio sono stati
274 selezionati gli indici più rappresentativi ai fini della valutazione climatica in ambiente urbano. Il
275 rapporto ISPRA "Variazioni e tendenze degli estremi di temperatura e precipitazione in Italia" ha
276 definito un insieme di 27 indici, idonei a descrivere gli estremi di temperatura e precipitazione in
277 termini di frequenza, intensità e durata. Avendo a disposizione dati meteorologici della temperatura
278 massima, minima e media giornaliera e delle precipitazioni giornaliere per la stazione Prato_urban
279 dal 1955 al 2019 si può effettuare un'analisi delle serie storiche presenti e andare a determinare, per
280 il Comune di Prato, l'andamento delle ondate di calore e degli eventi estremi precipitativi sia in
281 termini di numero di eventi che di durata ed intensità. I dati sono stati processati con il software
282 ClimPACT2, update del software RclimDEX sviluppato da WMO CCI/WCRP/JCOMM Expert
283 Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI)
284 (https://epic.awi.de/id/eprint/49274/1/ClimPACTv2_manual.pdf).

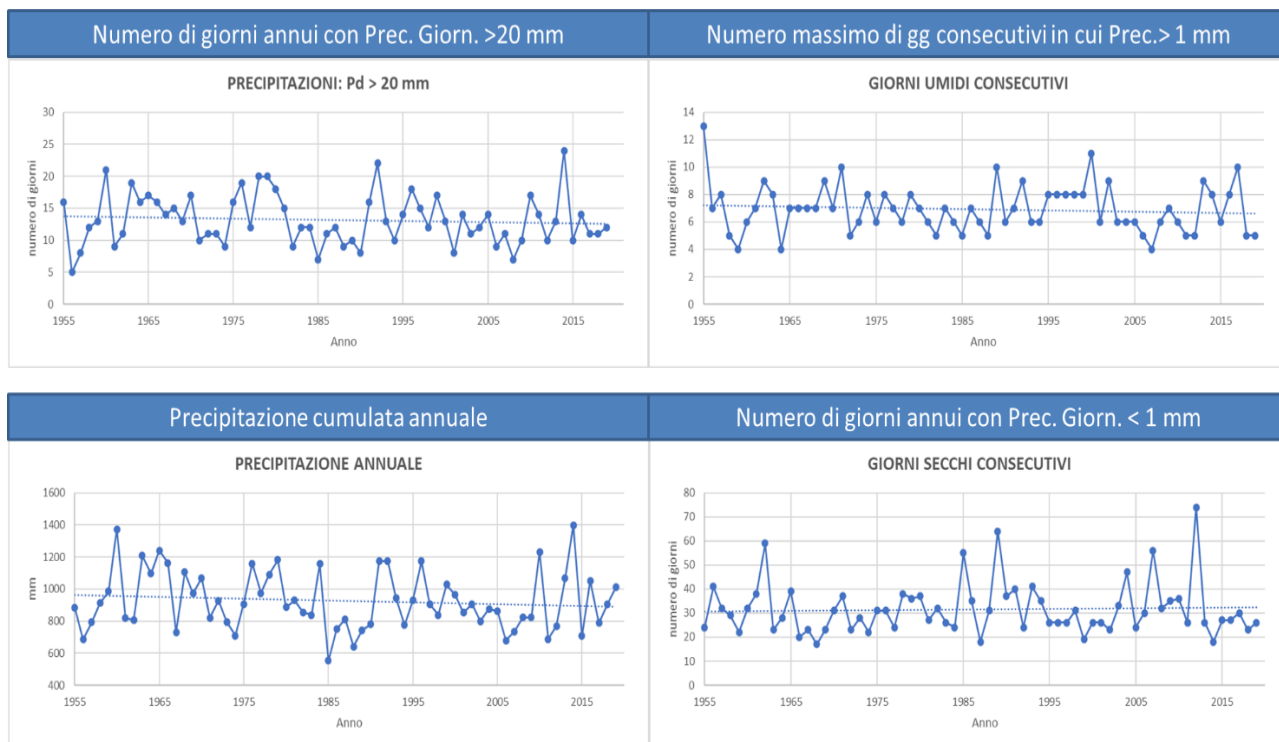
285 In Figura 7 sono riportati gli indici relativi all'aumento di giorni caldi e alle ondate di calore: possiamo
286 notare come la tendenza di tutti gli indici è un aumento sia delle notti tropicali ($T_{\text{minima}} > 20^{\circ}\text{C}$)
287 che dei giorni estremamente caldi ($T_{\text{massima}} > 35^{\circ}\text{C}$). Le ondate di calore in questo caso sono state
288 calcolate tenendo conto della climatologia media della città di Prato quindi ovviamente si ottiene un
289 numero diverso rispetto all'analisi precedente che utilizzava la definizione del Ministero della Salute.
290 Il risultato comunque mostra che sia il numero che la frequenza delle ondate di calore è in aumento
291 soprattutto negli ultimi 20 anni. In particolare, si nota come emerge l'atipicità del 2003 dove
292 all'ondata di calore hanno contribuito 60 giorni consecutivi con temperature elevate.



293

294 **Figura 7.** Andamento degli indici climatici notti tropicali, numero di giorni annui con temperatura massima > 35°C,
 295 numero di ondate di calore annuale e frequenza delle ondate di calore dal 1955 al 2019 per la stazione Prato_Urban.

296



297

298 **Figura 8.** Andamento degli indici climatici numero di giorni annui con precipitazione > 20mm, numero di giorni umidi
 299 consecutivi, precipitazione annuale e giorni secchi consecutivi dal 1955 al 2019 per la stazione Prato_Urban.

300 Per quanto riguarda le precipitazioni gli indici climatici relativi sono riportati in Figura 8: non si nota
301 un trend (le linee di tendenza sono piatte) né nella piovosità né nell'aumento di giorni secchi
302 consecutivi (precipitazione giornaliera < 1 mm) questo perché gli eventi estremi da considerare per
303 quanto riguarda le precipitazioni avvengono in poche ore e quindi non si possono evincere dai dati
304 giornalieri. Questa tendenza negli indici climatici delle precipitazioni è piuttosto comune per diverse
305 aree nell'Europa continentale mentre si hanno sostanziali variazioni nelle aree del Mediterraneo.

306

307 **3.1.3. Definizione della fragilità microclimatica a scala comunale**

308 La determinazione della fragilità microclimatica del costruito, degli effetti sulla città e sul benessere
309 umano, nonché le implicazioni sulla regolamentazione urbanistica ed edilizia per garantirne il
310 miglioramento può essere definita attraverso una serie di parametri. All'interno della valutazione ad
311 ampio spettro della vulnerabilità climatica, la fragilità climatica a scala comunale è stata qui valutata
312 in accordo a 7 parametri riportati in tabella 2.

313

Elaborato cartografico	Periodo analizzato	Risoluzione spaziale	Fonte
a. Temperatura superficiale estiva	2015-2021	30 m	Immagini satellitari Landsat 8
b. Intensità dell'isola di calore urbana superficiale	2015-2021	30 m	Immagini satellitari Landsat 8
c. Anomalie termiche estive	2015-2021	30 m	Immagini satellitari Landsat 8
d. Indice vegetazionale NDVI estivo	2015-2021	10 m	Immagini satellitari Sentinel-2
e. Albedo superficiale estivo	2015-2021	10 m	Immagini satellitari Sentinel-2
f. Consumo di suolo	2017	10 m	Dati ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e Ricerca Ambientale
g. Copertura arborea	2017	10 m	Dati ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e Ricerca Ambientale
h. Fattore di ombreggiamento Sky View Factor	2007-2010	1 m	Dati LIDAR

314

315 *Tabella 2. Descrizione dei 7 parametri utilizzati per analizzare la fragilità climatica a scala comunale*

316

a. Temperatura superficiale diurna estiva

La temperatura superficiale terrestre (Land Surface Temperature, LST) rappresenta un importante parametro geofisico del comportamento termico, impiegato in numerosi studi per la valutazione degli effetti dell'isola di calore urbana (Grigoras et al., 2019; Guha et al., 2018; Morabito et al., 2018). La mappa della temperatura superficiale terrestre è stata ottenuta dalle immagini satellitari Landsat 8 con risoluzione spaziale 30 m, disponibili sul sito dell'Agenzia U.S. Geological Survey (<https://earthexplorer.usgs.gov>). Sono state selezionate le scene della stagione estiva (Giugno, Luglio, Agosto) del periodo 2015-2021 in orario diurno (circa 10:00 UTCI), con una copertura nuvolosa inferiore al 10% (Tab.3).

Data di acquisizione	Elevazione solare (°)	Azimuth solare (°)	Copertura nuvolosa (%)
2015-06-06	64.12	136.49	0.28
2015-07-24	60.86	136.50	1.16
2015-08-09	57.53	140.89	1.76
2016-06-24	64.33	134.08	0.17
2016-07-10	62.93	134.46	2.12
2016-08-27	52.59	147.30	0.32
2017-06-11	64.44	135.63	0.13
2017-07-29	59.85	137.98	1.88
2017-08-30	51.76	148.20	0.07
2018-06-30	63.89	133.58	1.47
2018-08-17	55.44	143.48	3.41
2019-06-17	64.52	134.82	2.43
2019-07-19	61.75	135.67	1.75
2019-08-20	54.77	144.67	0.04
2020-07-21	61.28	136.16	0.47
2020-08-22	54.00	145.57	0.21
2021-06-22	64.41	134.21	6.46

Tabella 3. Caratteristiche delle scene Landsat 8 del periodo 2015-2019.

Il calcolo della LST ha adottato la metodologia ufficiale sviluppata dall'Agenzia U.S. Geological Survey (2020) e impiegata in numerose ricerche in ambito internazionale (Sobrino, Rassouni, Li, 2001; Sobrino, Jiménez-Muñoz, Paolini, 2004; Mallick et al., 2012; Guha et al., 2018).

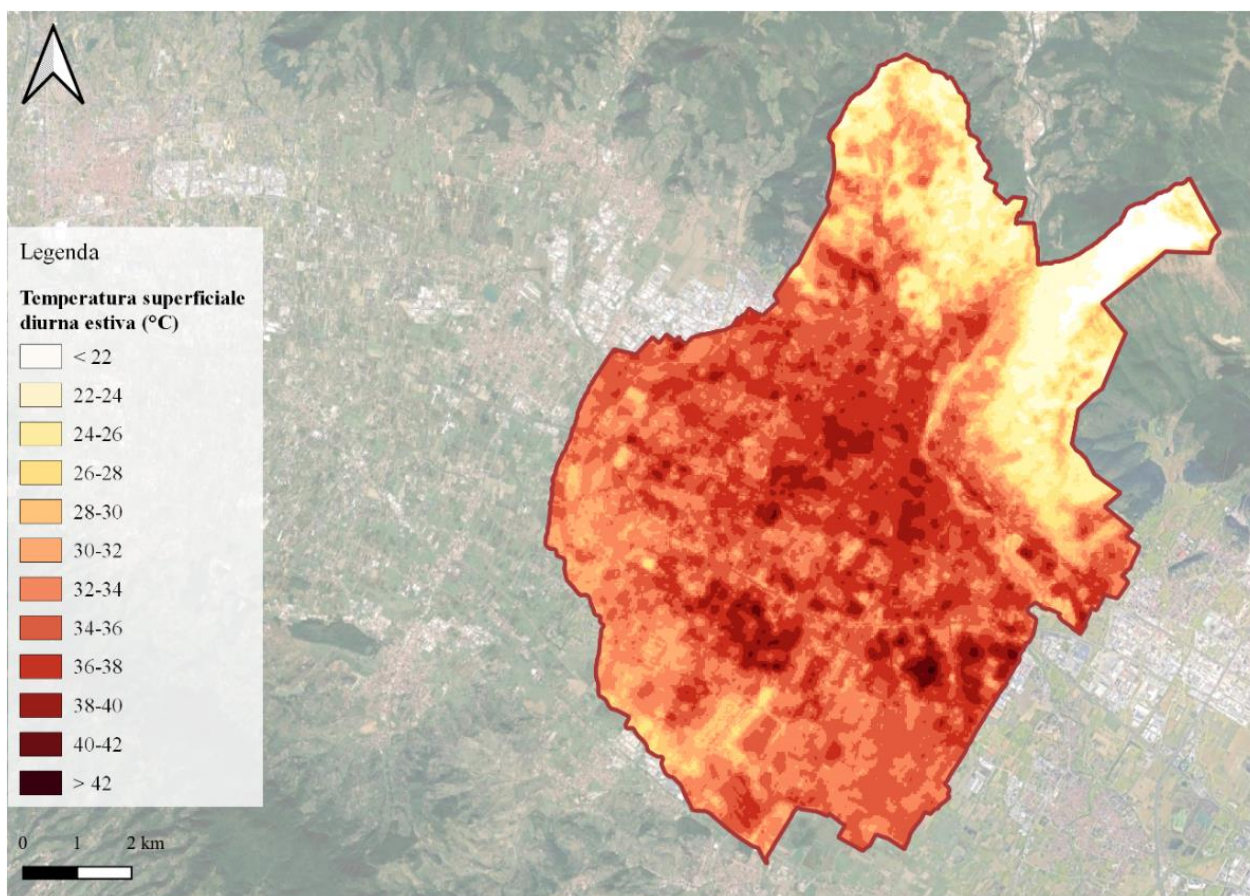


Figura 9. Mappa del comune di Prato in riferimento alla temperatura superficiale diurna estiva

b. Intensità dell'isola di calore urbana superficiale

L'intensità di calore urbana superficiale è stata valutata tramite *Urban Thermal Field Variance Index* (UTFVI). Tale indice è stato selezionato per quantificare l'impatto della temperatura superficiale sulla qualità della vita, con il fine di procedere alla valutazione ecologica delle condizioni termiche urbane estive (Guha et al, 2018). L'indice UTFVI è stato determinato dalla seguente formula:

$$\text{UTFVI} = (LST - LST_{\text{media}}) / LST_{\text{media}}$$

dove LST è la temperatura superficiale registrata in ciascun pixel e LST_{media} è il valore medio dell'area di studio relativo al periodo 2015-2019. Tale indice distingue 6 classi di valutazione ecologica e di intensità del fenomeno dell'isola di calore urbano superficiale (Surface Urban Heat Island, SUHI) (Renard et al., 2019) (Tab. 4).

Classi UTFVI	Valutazione ecologica	Intensità SUHI
< 0	Eccellente	Nessuna
0-0.005	Buona	Debole
0.005-0.010	Normale	Moderata
0.010-0.015	Negativa	Forte

Classi UTFVI	Valutazione ecologica	Intensità SUHI
0.015-0.020	Molto negativa	Molto forte
> 0.020	Gravemente negativa	Estrema

Tabella 4. Classi di UTFVI.

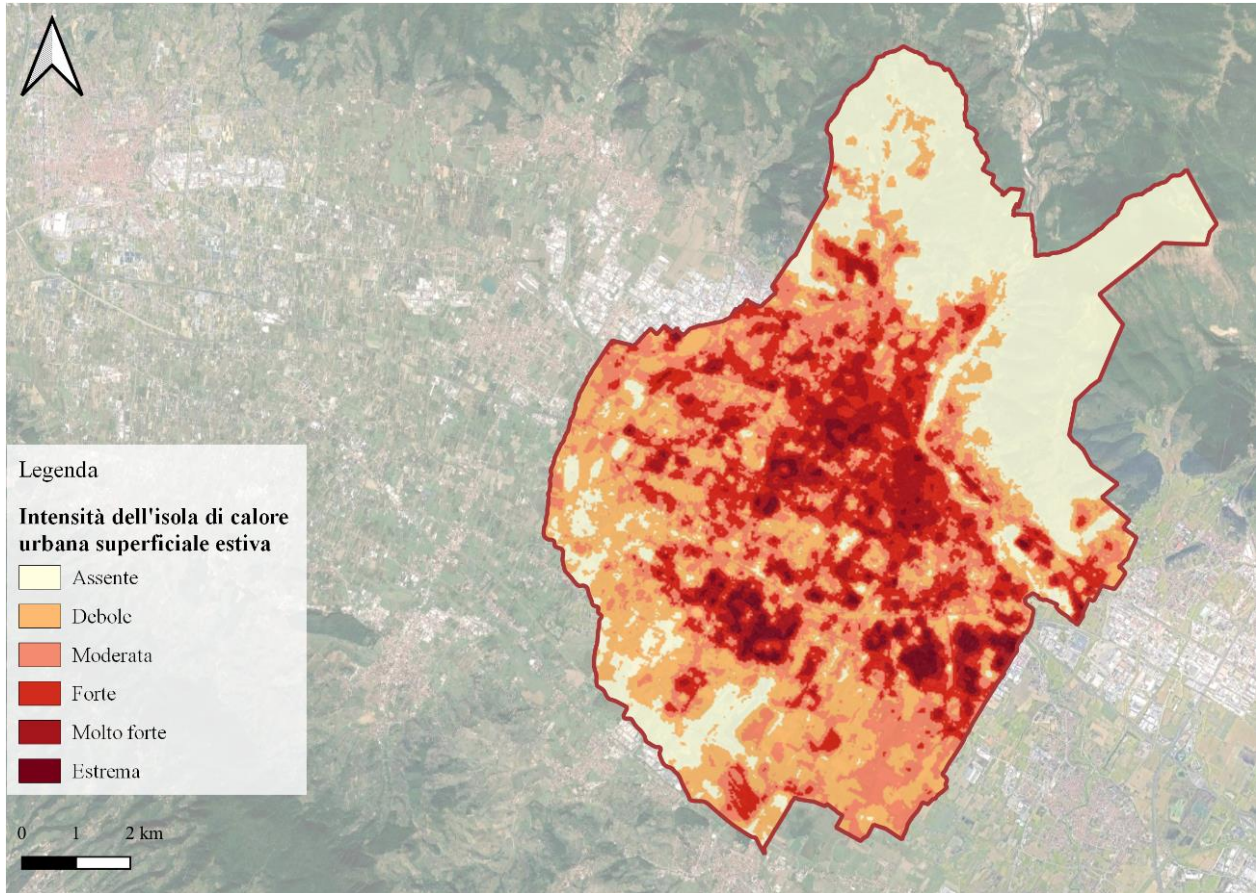


Figura 10. Mappa del comune di Prato in riferimento all'intensità dell'isola di calore urbana superficiale

c. Anomalie termiche superficiali estive

Le anomalie termiche superficiali sono state definite tramite l'applicazione di un metodo statistico di autocorrelazione spaziale di tipo locale (Getis-Ord G_i^*) al dataset di LST del periodo 2015-2021. Attraverso questo metodo, sono stati individuati spazialmente i *clusters* di punti caldi (*hot-spots*) e freddi (*cool-spots*) statisticamente significativi, intesi come punti caratterizzati da valori elevati (o bassi) e circondati da punti con valori simili, entro un raggio di ricerca definito dalla risoluzione spaziale del dato di input (Mavrakou et al., 2018). L'applicazione dell'algoritmo Getis-Ord G_i^* ha previsto una categorizzazione in 6 classi di *hot*- e *cool-spot* su 6 livelli in funzione di livelli di confidenza del 99%, 95% e 90%, in cui si registrano differenti soglie di LST media diurna estiva (tab. 3).

360

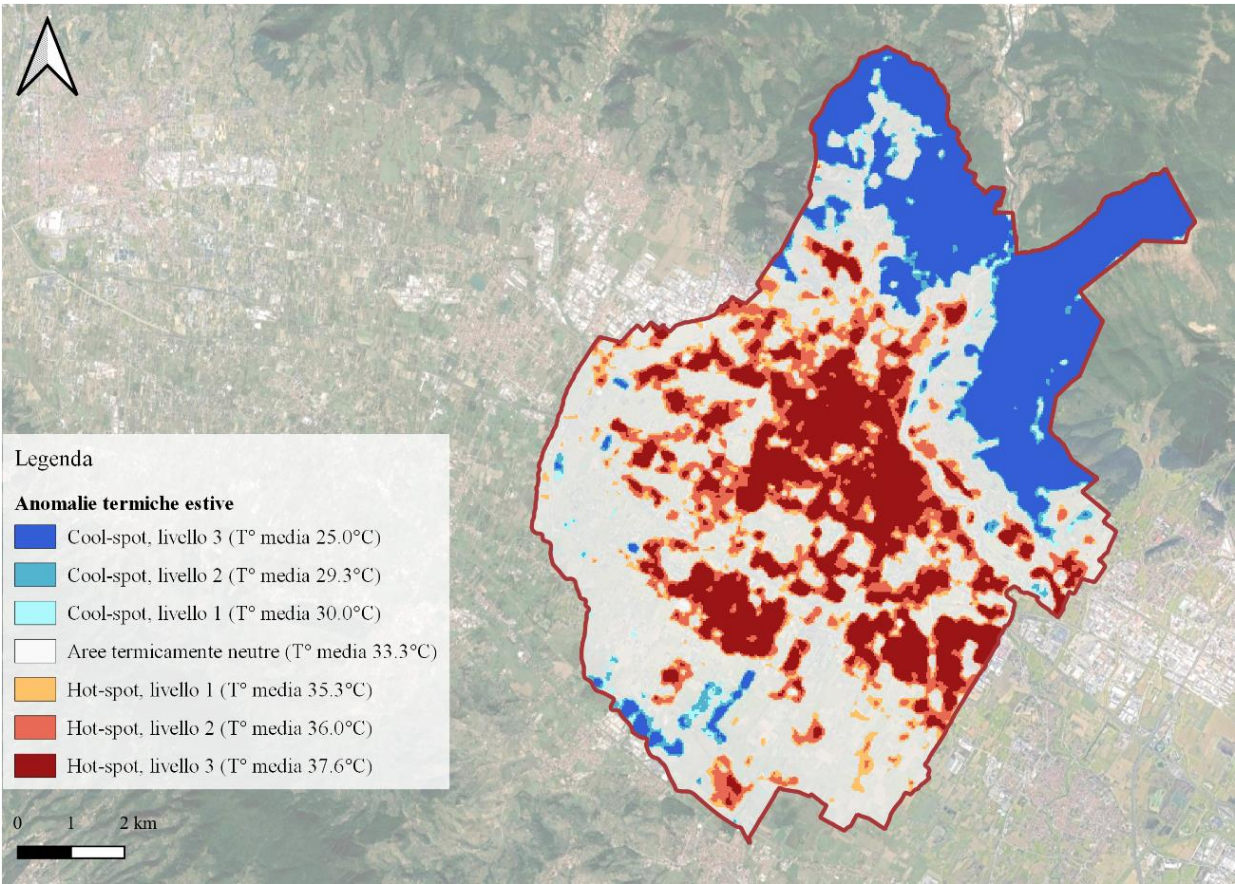
Classi	Livello di confidenza	LST media diurna (°C)	Area (ha) [%]*
Cool-spot, livello 3	99%	28.0	1872.3 [19.2]
Cool-spot, livello 2	95%	29.3	223.6 [2.3]
Cool-spot, livello 1	90%	30.0	134.6 [1.4]
Aree termicamente neutre	-	33.4	4346.3 [44.5]
Hot-spot, livello 1	90%	35.4	583.8 [6.0]
Hot-spot, livello 2	95%	36.1	1013.3 [10.4]
Hot-spot, livello 3	99%	37.0	1588.6 [16.3]

361

362 *Tabella 5. Classi di hot- e cool- spot termico estivo. *L'area % è riferita alla superficie comunale.*

363

364 Il territorio di Prato è interessato dal 55.5% (ha) di anomalie termiche: 32.6% (3185.7 ha) da hot-spot
365 e 22.8 % (2230.4 ha) da cool-spot, rispettivamente con temperature superficiali medie di 36.2 °C e
366 29.1 °C. Inoltre, considerando il livello estremo (livello 3) di hot- e cool-spot, viene registrata una
367 variazione di temperatura superficiale media pari a 9 °C.



368

369 *Figura 11. Mappa del comune di Prato in riferimento alle anomalie termiche superficiali estive*

370

d. Indice vegetazionale NDVI estivo

L'indice vegetazionale NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) rappresenta un importante indicatore negli studi volti a indagare gli effetti della vegetazione sul microclima urbano e il fenomeno SUHI (Ma et al., 2016; Guha et al., 2018). NDVI è un indice adimensionale che descrive la differenza tra la riflettanza visibile (RED) e vicina infrarossa (NIR) della copertura vegetale: i calcoli per ciascun pixel restituiscono valori compresi tra -1 e 1, in cui 0 significa assenza di vegetazione e vicino a +1 indica la massima densità possibile di foglie verdi.

La mappa di NDVI è stata ottenuta dalle immagini acquisite dal satellite Sentinel-2A del programma europeo Copernicus (*level-2A*) nel periodo estivo 2015-2021, dotate di una copertura nuvolosa inferiore al 10% e una risoluzione spaziale di 10 m. La formula applicata a ciascun dataset di immagini satellitari è la seguente: $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$

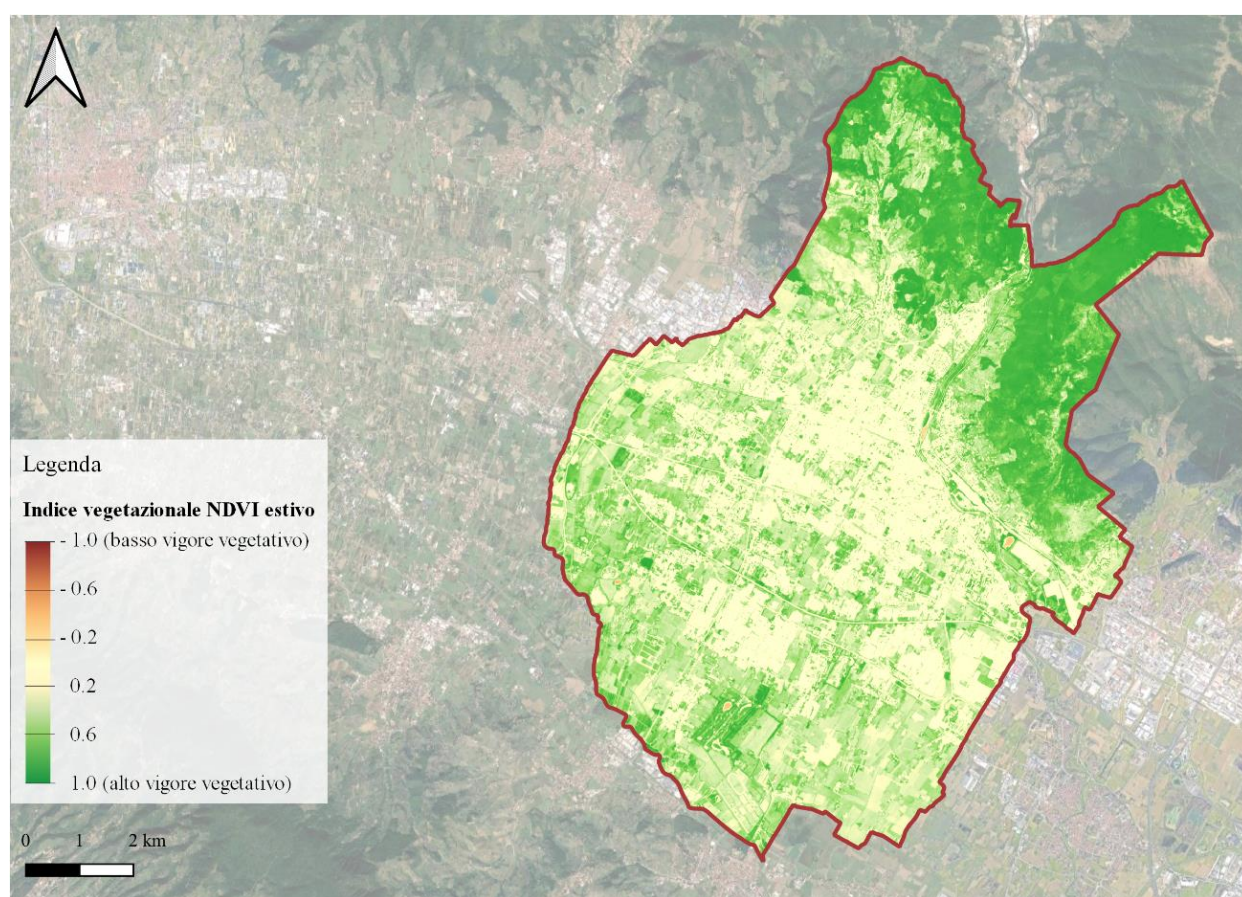
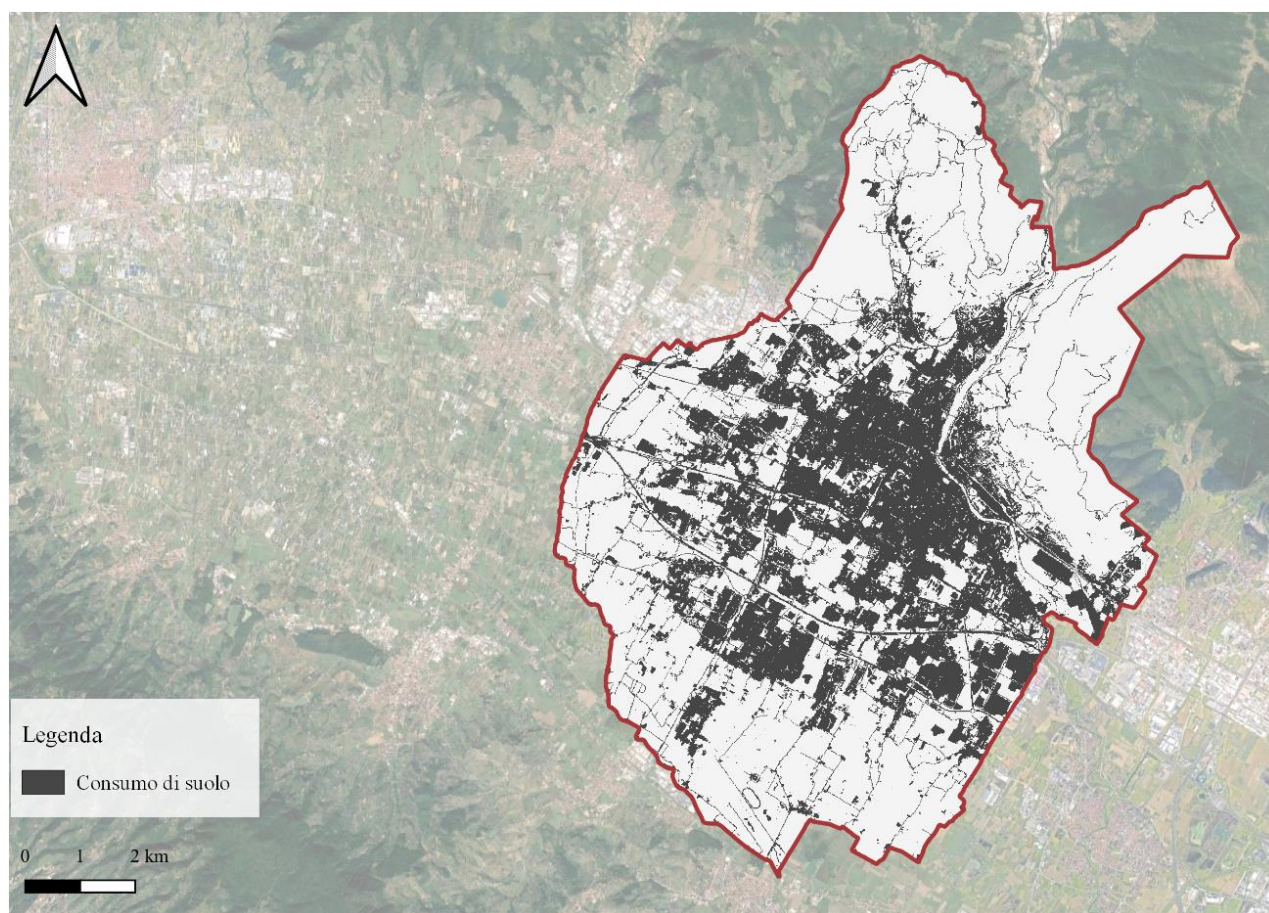


Figura 12. Mappa del comune di Prato in riferimento all'indice vegetazionale NDVI estivo

e. Consumo di suolo

L'indice di consumo di suolo ha evidenziato la concentrazione dell'area urbana, e nello specifico la presenza di costruzioni ed edifici, all'interno del comune di Prato. Il layer di suolo consumato è stato fornito dall'Istituto

389 Nazionale per la Protezione Ambientale e la Ricerca (ISPRA, www.isprambiente.gov.it), elaborato da dati aperti
390 relativi all'anno 2017 con una risoluzione spaziale di 10 m. È stato ottenuto convertendo il grado di
391 impermeabilità in un prodotto binario tramite la soglia del 30%, secondo una regola specifica: la soglia 0-29%
392 corrisponde alle superfici permeabili (valore = 0), mentre quella compresa tra 30% e 100% rappresenta le
393 superfici impermeabili (valore = 1) (Maucha, Büttner, Kosztra, 2011). Con questo dataset viene indicata la
394 presenza di volumi edilizi, infrastrutture stradali e ferroviarie, aree industriali e commerciali, aree ricreative,
395 cantieri, serre permanenti, aree minerarie, discariche e altre infrastrutture. Ulteriori informazioni sulla
396 metodologia di elaborazione sono disponibili nel report "Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi
397 ecosistemici" di ISPRA (Munafò, 2020) e in recenti pubblicazioni (Morabito et al., 2016; 2018; 2021).



398

399 **Figura 13.** *Mappa del comune di Prato in riferimento al consumo di suolo*

400

401 **f. Copertura arborea**

402 Il layer della copertura arborea è stato fornito da ISPRA e sviluppato nell'ambito del progetto in corso
403 "ASI Habitat Mapping" che si è occupato di redigere una mappa di copertura del suolo italiano ad
404 alta risoluzione. La copertura arborea è stata mappata dalle immagini acquisite nell'estate del 2017
405 dai satelliti delle missioni Sentinel-1 e Sentinel-2 del programma europeo Copernicus, elaborate

all'interno della piattaforma Google Earth Engine (Morabito et al., 2021). Il layer finale è un file raster binario in cui i valori 0 e 1 indicano rispettivamente le aree non coperte e coperte da alberature con una risoluzione spaziale di 10 m. Ulteriori specifiche informazioni sulla modalità di elaborazione del dato sono disponibili sulla piattaforma Zenodo (<https://zenodo.org/record/3898707#.Xux1vGgzZPY>, doi:10.5281/zenodo.3898707).

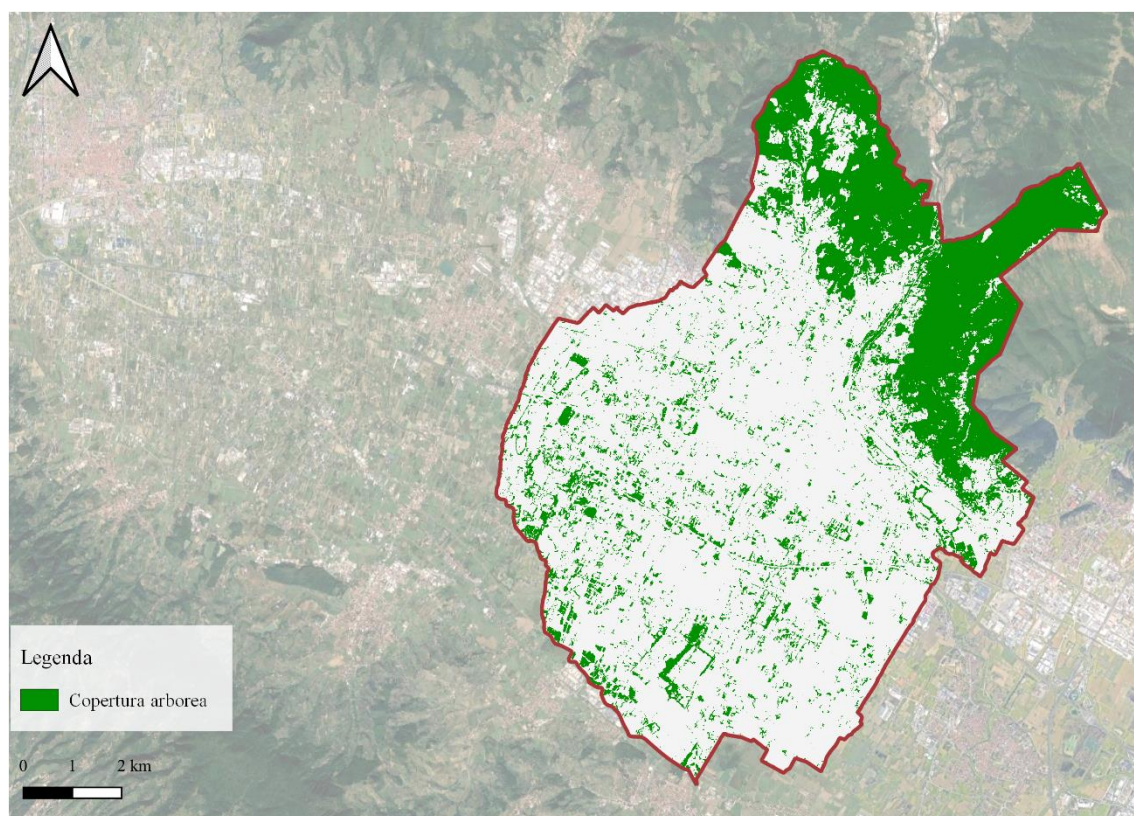


Figura 14. *Mapa del comune di Prato in riferimento alla copertura arborea*

g. Albedo superficiale estivo

L'albedo superficiale quantifica la frazione di luce solare riflessa della superficie terrestre e rappresenta il potere riflettente della stessa. I valori di albedo dipendono da vari parametri, quali il materiale e il colore della superficie, il tipo di suolo e il suo contenuto di acqua (Hatfield et al., 2005).

L'albedo superficiale può rappresentare un importante descrittore del microclima urbano ed è considerato tra i parametri più influenti sul bilancio radiativo della superficie terrestre (Bonafoni e Sekertekin, 2020). L'albedo viene generalmente espresso in un intervallo compreso tra 0 (nessuna riflessione) e 1 (massima riflessione, propria delle superfici bianche). La mappa di albedo è stata ottenuta con una risoluzione spaziale di 10 m dalle scene Sentinel-2 del periodo estivo 2015-2021, utilizzando le bande VNIR (B2, B3, B4, e B8) e SWIR (B11 e B12), seguendo la metodologia applicata in studi recenti (Bonafoni e Sekertekin, 2020; Toscano, 2020).

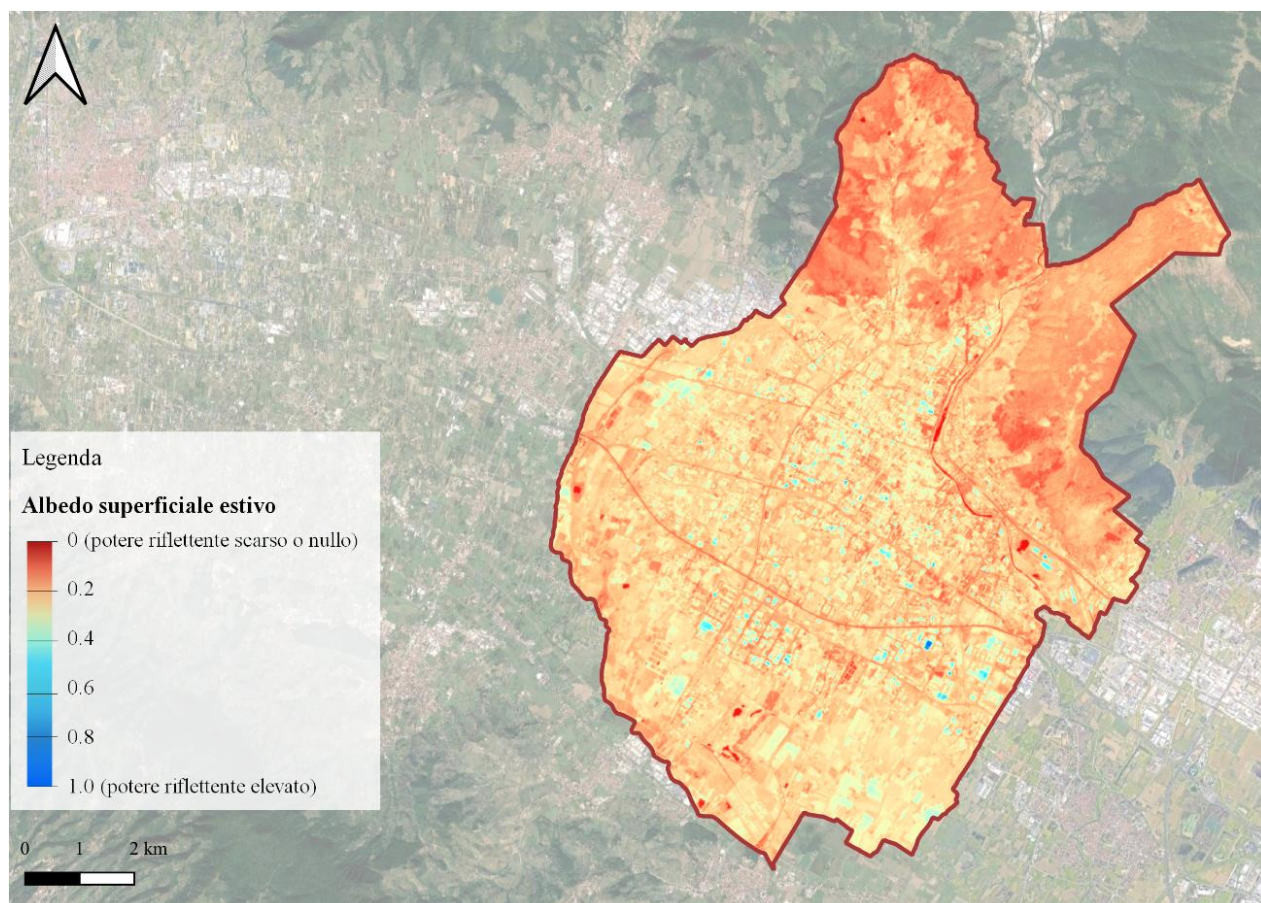


Figura 15. Mappa del comune di Prato in riferimento all'albedo superficiale estivo

h. Fattore di ombreggiamento Sky View Factor

Il fattore di vista del cielo o *Sky View Factor* (SVF) è un parametro adimensionale che restituisce, con valori compresi tra 0 e 1, il grado di esposizione di una superficie alla volta celeste, ovvero la porzione di cielo visibile da un determinato punto localizzato al livello del terreno (Oke, 1981).

Tale fattore è influenzato dalle componenti del tessuto urbano, dagli elementi di arredo stradale e dalla presenza o meno di alberi: valori prossimi a 1 corrispondono ad un'ampia porzione visibile, mentre valori vicini allo 0 indicano una visione del cielo limitata. SVF svolge un ruolo importante nella descrizione delle proprietà radiative urbane: quanto maggiore è il suo valore, tanto maggiore è l'incidenza della radiazione solare diretta (Jiao et al., 2019). SVF è stato calcolato dal *Digital Surface Model* (DSM), ottenuti dai rilievi LIDAR della Regione Toscana (degli anni 2007 e 2017) con risoluzione spaziale 1 m.

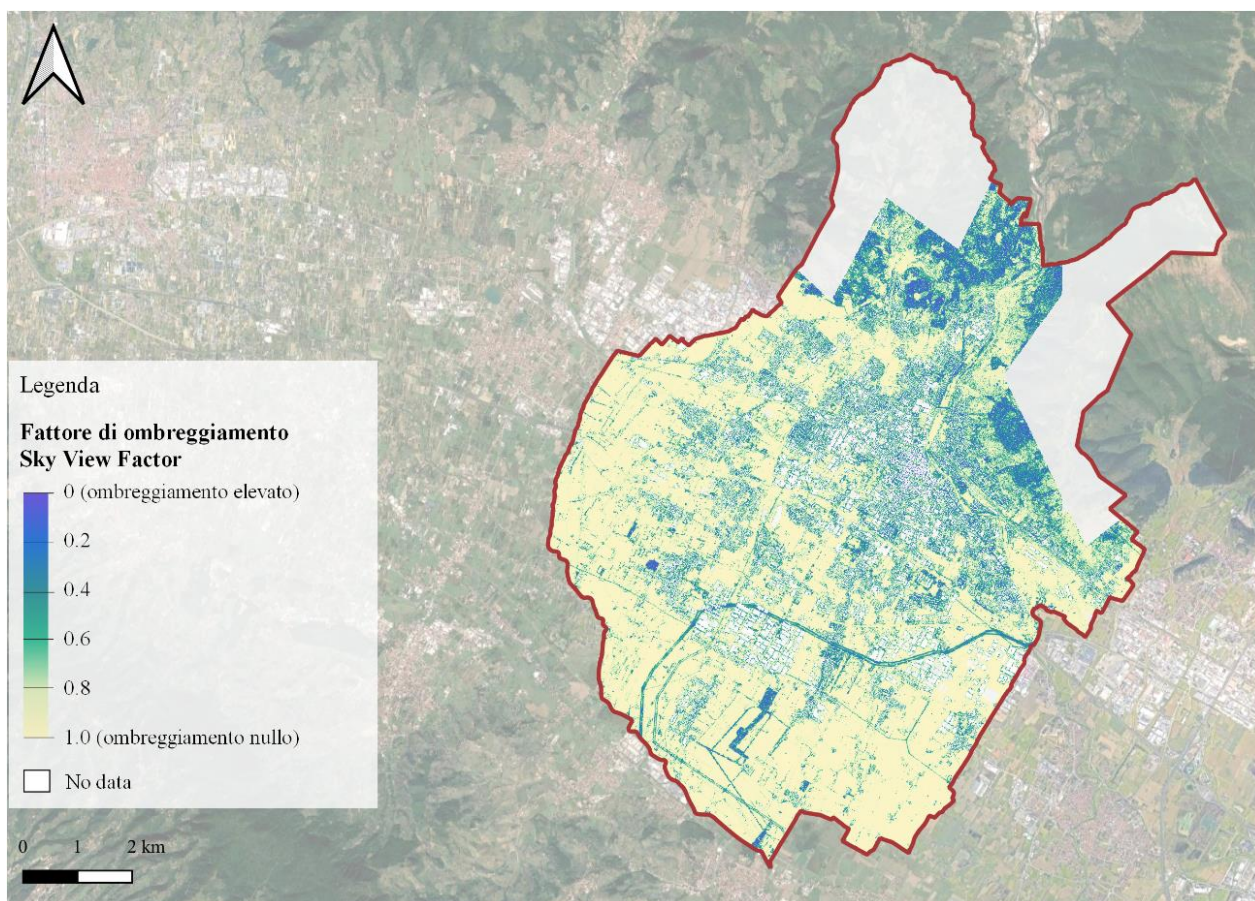


Figura 16. Mappa del comune di Prato in riferimento al fattore di ombreggiamento Sky View Factor

Estrazione delle caratteristiche urbane in ciascuna area di hot- e cool-spot.

Classi	Suolo consumato (ha) [%]*	Copertura arborea (ha) [%]*	NDVI medio	Albedo medio	SVF medio
Cool-spot, livello 3	65.6 [3.5]	1750.7 [93.5]	0.66	0.16	-
Cool-spot, livello 2	17.0 [7.6]	113.6 [50.8]	0.59	0.18	-
Cool-spot, livello 1	13.3 [9.9]	55.5 [41.2]	0.56	0.18	-
Aree termicamente neutre	857.5 [19.7]	702.8 [16.2]	0.45	0.21	0.82
Hot-spot, livello 1	263.1 [45.1]	29.7 [5.1]	0.33	0.22	0.77
Hot-spot, livello 2	653.8 [64.5]	32.5 [3.2]	0.28	0.23	0.76
Hot-spot, livello 3	1388.5 [87.4]	14.1 [0.9]	0.16	0.25	0.72

Tabella 6. Caratteristiche urbane in ciascuna area di hot- e cool-spot. *L'area % è riferita alla superficie del layer (suolo consumato o copertura arborea) rispetto all'area del relativo livello di hot- o cool-spot.

Il livello estremo di hot-spot (livello 3) è caratterizzato dalle distribuzioni più elevate di consumo di suolo (87.4%) e più basse di copertura arborea (0.9%), bassi valori di indice vegetazionale NDVI (0.16) e albedo superficiale (0.25), caratteristici delle aree impermeabili con alta capacità di accumulo termico (Bartesaghi et

449 al., 2019). Il livello estremo di cool-spot (livello 3) risulta interessato da elevate soglie di copertura arborea
450 (93.5%), di indice vegetazionale NDVI (0.66) e da basse concentrazioni di suolo consumato (3.5%). Il fattore
451 di ombreggiamento non può essere considerato in relazione alle aree di cool-spot in quanto il layer non assicura
452 una copertura completa per tali aree (dato Lidar mancante). Considerando le aree hot-spot, valori medi di SVF
453 compresi tra 0.72 e 0.77 indicano la prevalenza di spazi aperti e semi-aperti, risultando quindi particolarmente
454 esposti alla radiazione solare (Svenson, 2004; Baghaeipoor and Nashrollani, 2019).

455

456 **3.1.4. Mappa di vulnerabilità termica durante un'ondata di calore**

457 Come definito e riportato nell'analisi effettuata nel capitolo 3.1.2 le ondate di calore sono sempre più
458 frequenti e sta incrementando la loro durata. Diventa quindi necessario ottenere informazioni non
459 solo sulla temperatura superficiale della città, ma anche sulla temperatura dell'aria che è quella che
460 contribuisce principalmente al disagio termico e che può provocare danni specialmente alle fasce più
461 fragili della popolazione. In questo paragrafo verrà definito l'indice UHTI (Urban Heatwave Thermal
462 Index), ovvero un indice in grado di quantificare e mappare la variabilità termica dell'aria in ambiente
463 urbano durante un'ondata di calore. Lo scopo è quindi quello di dare informazioni sul microclima in
464 termini termici (di temperatura dell'aria e non di temperatura superficiale) dell'intera area comunale
465 al fine di identificare quali sono le zone più esposte durante un'ondata di calore. Questo servirà poi a
466 definire la fragilità, in termini di indice di comfort termico, per valutare in quali aree la popolazione
467 risente maggiormente un disagio termico.

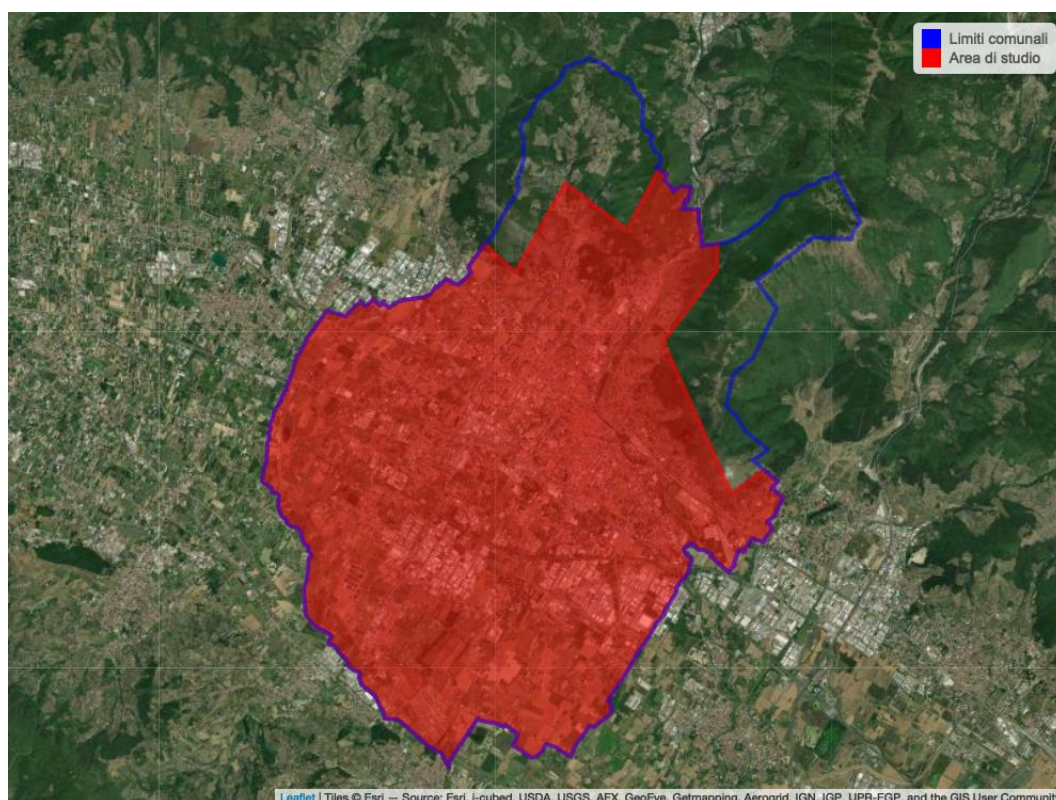
468 Il LST è uno dei prodotti satellitari oggi più comunemente utilizzati per monitorare la
469 temperatura superficiale e ricavare indicatori di benessere per la popolazione. L'indice LST registra
470 la temperatura superficiale del terreno e può differire in maniera più o meno sostanziale da quella
471 effettivamente percepita dalle persone. La temperatura percepita dipende d'altro canto in larga misura
472 dalla temperatura dell'aria e l'indice UHTI fornisce, a partire da dati telerilevati integrati con misure
473 di centraline termiche e output del modello ENVI-met, una misura più vicina, rispetto a quella
474 dell'LST, riguardo alla percezione fisiologica dell'ondata di calore.

475 Gli strati satellitari descritti nel paragrafo precedente sono stati utilizzati come input per avere una
476 caratterizzazione termica dell'intera area comunale attraverso una metodologia calibrata in sito che
477 tiene conto delle caratteristiche del tessuto urbano, dei materiali e della vegetazione presenti nella
478 città di Prato. Il modello utilizzato utilizza in input i tre seguenti strati informativi telerilevati:

479

- 480 • LST estivo 2015-2021 (riportato in figura 9) (ris. spaziale = 30 m)
- 481 • NDVI estivo 2015-2021 (riportato in figura 12) (ris. spaziale = 10 m)
- 482 • Sky View Factor (riportato in figura 15) (ris. spaziale = 1 m)

483 Gli strati di input sono stati ricampionati a una risoluzione spaziale di 10 m e alcune zone all'interno
484 dei limiti amministrativi comunali sono state escluse in quanto non sono disponibili i dati Lidar
485 utilizzati per la determinazione dello Sky View Factor; si tratta comunque di area collinare impervia
486 scarsamente abitata che non influenza l'analisi a scala urbana (Figura 17).



488
489 **Figura 17.** Area di studio relativa al comune di Prato.

490
491 L'indice NDVI è stato utilizzato per ricavare la mappa di copertura vegetale del territorio (Figura 17).
492 La copertura vegetale, espressa in percentuale, è stata calcolata a partire dall'NDVI medio del 2017
493 ricavato da immagini Sentinel 2 utilizzando l'indice Vegetation Fraction Cover (VFC, Gao et al.
494 2020). Il VFC è un parametro biofisico significativo degli ecosistemi terrestri ed è comunemente
495 utilizzato come indicatore per il monitoraggio e la valutazione delle variazioni della vegetazione (Li
496 et al., 2014). Tale indice è stato calcolato usando la seguente equazione:

$$VFC = \frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \quad [1]$$

499
500 Dove $NDVI_s$ e $NDVI_v$ sono rispettivamente il valore di riferimento di NDVI di suolo nudo (0.1) e
501 vegetazione verde (0.9).

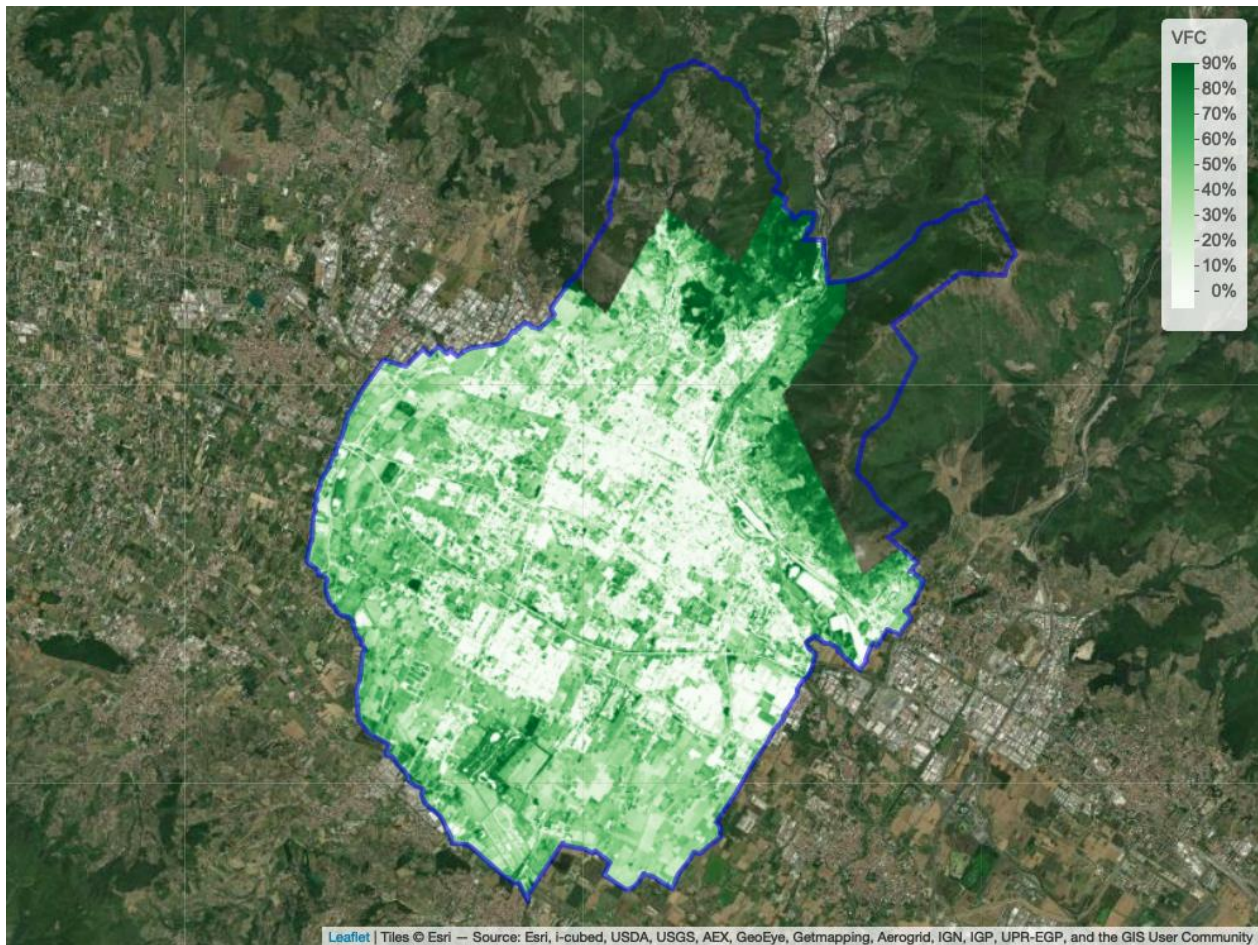


Figura 18. Mappa di copertura vegetale del territorio (espressa in percentuale) calcolata tramite l'indice VFC.

La disposizione ed il numero di stazioni meteorologiche sul territorio di Prato non sono adeguati per la determinazione della relazione fra temperatura dell'aria e indice VFC; è stata quindi utilizzata la relazione ottenuta in uno studio analogo per il Comune di Bologna (Figura 19). Considerato che la relazione fra LST e temperatura dell'aria è praticamente analoga per i due Comuni (equazione 3), tale assunzione è ritenuta accettabile.

$$T_{VFC} = -2.49VFC + 25.79 \quad [2]$$

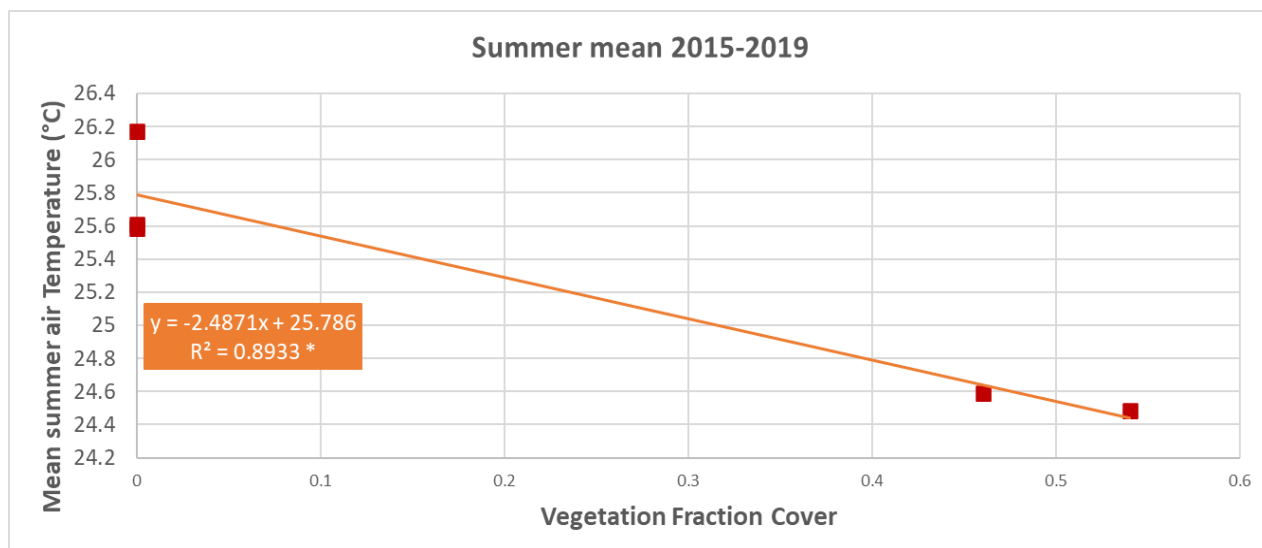


Figura 19. Relazione tra la temperatura dell'aria media estiva in diversi punti della città di Bologna e l'indice VFC ottenuto dall'equazione [1] (*pvalue<0.05).

Applicando quindi l'equazione 2 è stata ricavata una mappa con i valori della temperatura dell'aria ottenuti dai valori dell'indice di frazione di vegetazione (Figura 20).

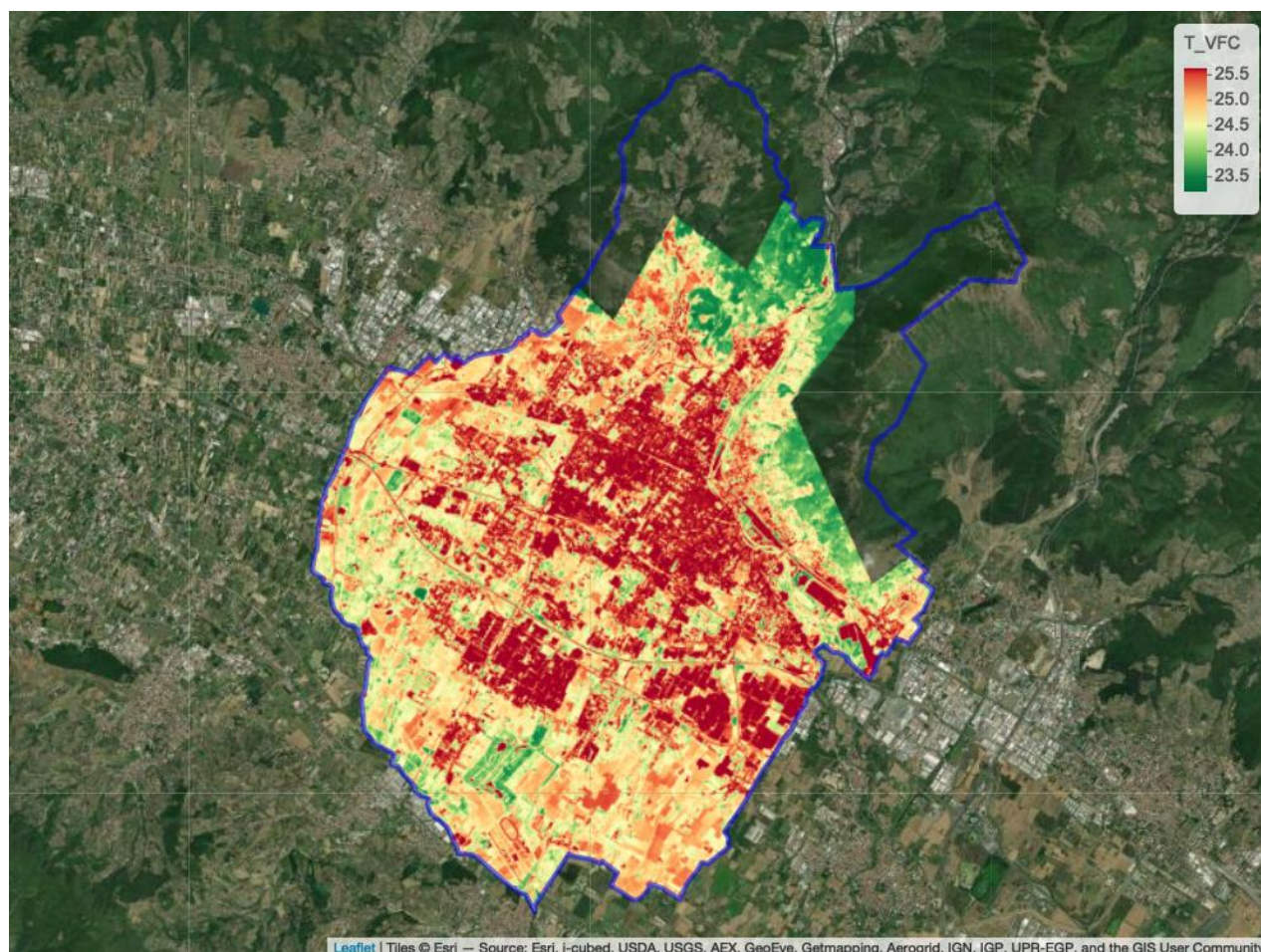


Figura 20. T_{VFC} per l'area di studio.

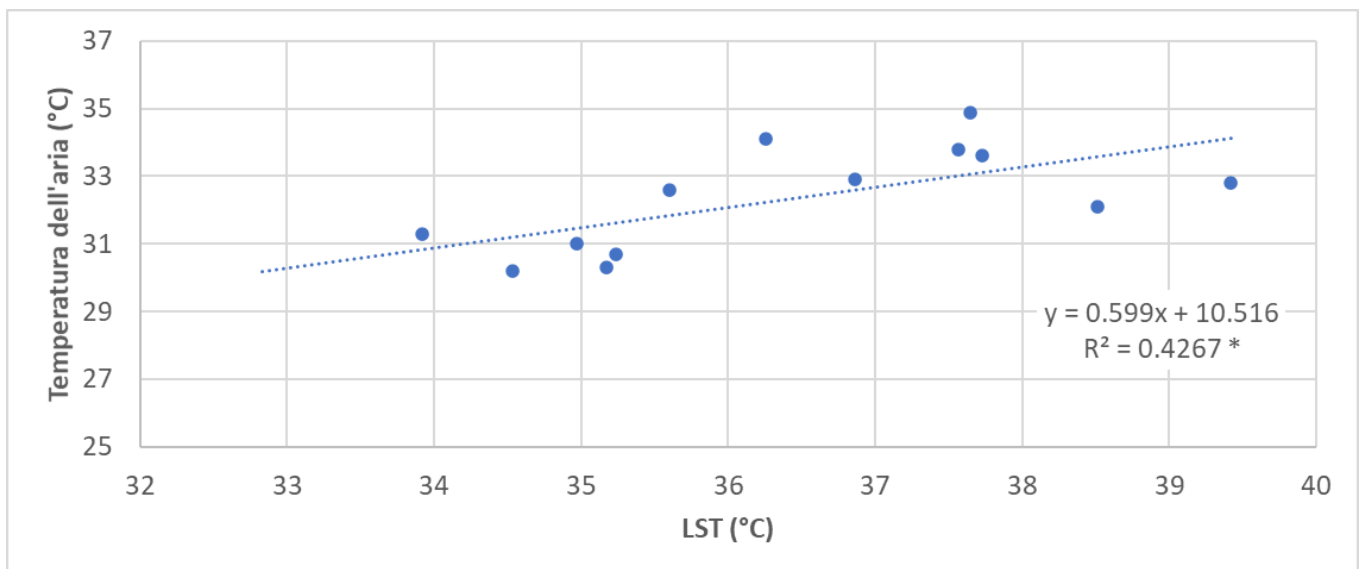
523

524 La mappa mostra chiaramente come i valori di temperatura dell'aria maggiori si ottengano nelle zone
525 prive di vegetazione: questa relazione mette in evidenza non solo l'influenza della presenza di
526 vegetazione sulla temperatura dell'aria, ma anche della sua stessa composizione. L'effetto mitigatore
527 della vegetazione, come auspicato, è infatti maggiore in zone caratterizzate da copertura arborea
528 (boschi e parchi) e più contenuta per aree a copertura erbacea (coltivazioni e prati).

529 Per la relazione fra LST e temperatura dell'aria, sono stati utilizzati i dati di temperatura dell'aria
530 corrispondenti allo stesso giorno e ora delle singole scene Landsat 8 del periodo 2015-2020 (elencate
531 in tabella 3) utilizzate per il calcolo dell'LST. Questi dati di temperatura dell'aria sono stati poi messi
532 in relazione con i valori di LST estratti per i pixel corrispondenti alla posizione della stazione
533 meteorologica. La relazione ottenuta è riportata in Figura 21: il coefficiente di determinazione non è
534 particolarmente alto ($R^2=0.43$) a causa della dispersione dei dati, ma risulta comunque significativo
535 ($pvalue<0.05$) ed accettabile per i fini di questa parametrizzazione.

536 In generale la temperatura dell'aria non è direttamente calcolabile dalla temperatura superficiale a
537 causa dei moti di avvezione che si creano nel primo strato di atmosfera e che già dai primi metri di
538 altezza influenzano il valore della temperatura dell'aria. Questa analisi però è effettuata durante
539 un'ondata di calore meteorologica, quando la temperatura dell'aria registrata è maggiore di 30 °C:
540 questo fa sì che il moto convettivo verticale predomini rispetto all'influenza del vento trasversale,
541 che in questi casi è comunque basso.

542



543

544

545 **Figura 21.** relazione tra la temperatura dell'aria della stazione meteorologica Prato_Urban e i valori di LST ottenuti
546 dalle immagini Landsat 8 (* $pvalue<0.05$).

547

548 Si ottiene quindi la seguente relazione:

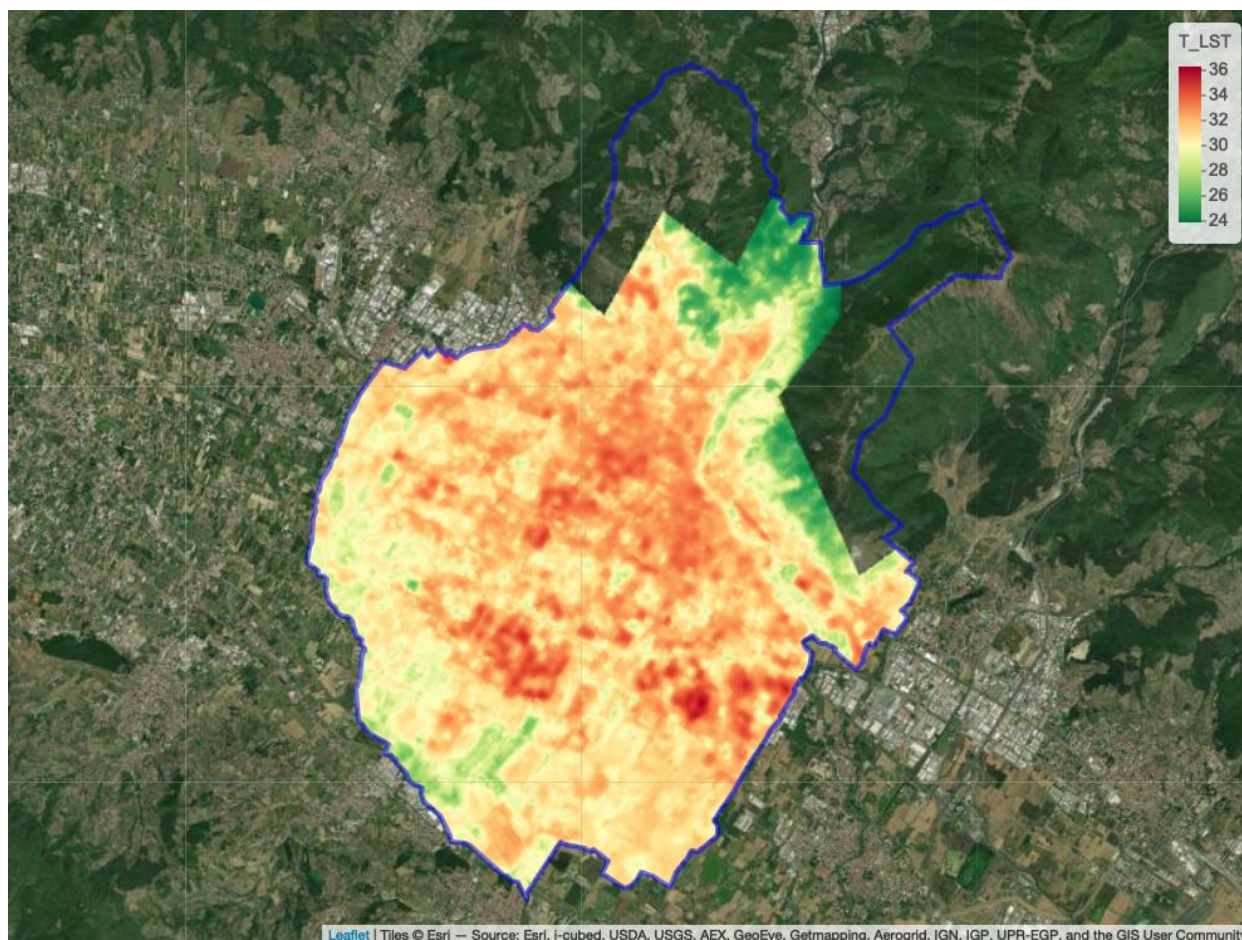
549

550
$$T_{LST}=0.599 (LST)+10.516 \quad [3]$$

551

552 Tale relazione è stata utilizzata per la determinazione della temperatura dell'aria ottenuta dai valori
553 della temperatura superficiale rilevati da satellite (Figura 22).

554



555

556 **Figura 22.** T_{LST} per l'area di studio.

557

558 In questo caso la temperatura dell'aria risente fortemente della tipologia dei materiali (dei tetti e delle
559 superfici) che il satellite registra da remoto dando valori maggiori di LST sulle superfici di asfalto o
560 cemento che, essendo caratterizzati da un basso albedo superficiale, riflettono solo una bassa
561 percentuale della radiazione solare che li colpisce.

562 Per quanto riguarda lo Sky View Factor (SVF) esistono diverse parametrizzazioni che riportano come
563 la temperatura dell'aria varia al variare di questo parametro: Oke (1981) ha parametrizzato con una
564 relazione inversa il variare della temperatura dell'aria notturna in funzione dello SVF. Durante il
565 giorno, al contrario, l'effetto di ombreggiamento che hanno gli edifici in un canyon urbano stretto

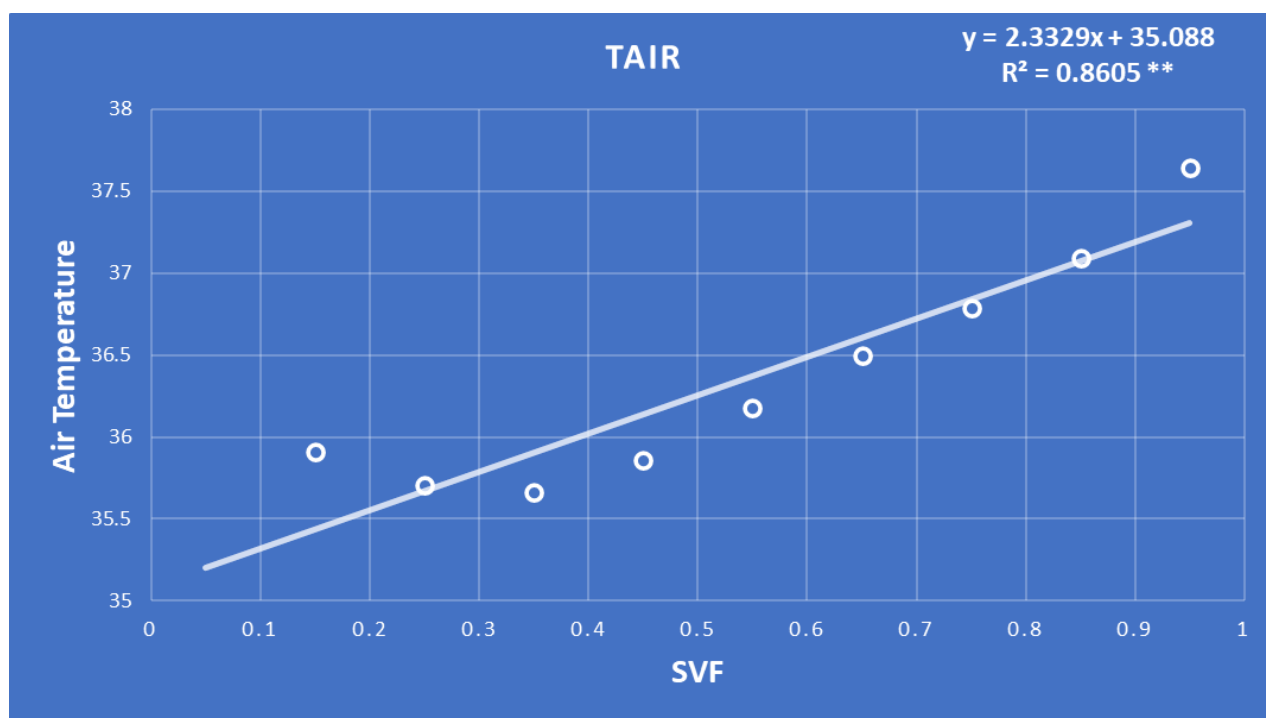
566 (SVF basso) causa una diminuzione della temperatura dell'aria. Attraverso le simulazioni
 567 fluidodinamiche effettuate con il modello ENVI-met (Par. 3.3) sulle tre aree della città di Prato è stato
 568 estratto il valore di SVF calcolato dal modello e messo in relazione con la temperatura dell'aria a 1.8
 569 m di altezza alle ore 12:00.

570 In Figura 23 è riportato il valore medio di temperatura dell'aria per intervalli di 0.1 di SVF: la
 571 relazione tra le due variabili è di proporzionalità diretta e la relazione ottenuta è stata quindi utilizzata
 572 per calcolare la temperatura dell'aria per tutto il comune di Prato partendo dallo strato iniziale SVF
 573 (Lidar):

574

$$575 \quad T_{SVF} = 2.33(SVF) + 35.09 \quad [4]$$

576



577

578 **Figura 23.** Relazione tra la media della temperatura dell'aria a 1.8 m alle ore 12:00 ottenuta dal modello ENVI-met per
 579 intervalli di 0.1 dello SVF (**pvalue<0.01)

580

581 L'equazione 4 è stata quindi utilizzata per ricavare lo strato informativo T_{SVF} (Figura 24).

582 In questo caso le aree i cui valori di temperatura dell'aria sono maggiormente influenzati dall'SVF
 583 sono quelle aperte, ovvero campi agricoli o parchi, in quanto nella parte urbana altamente densa di
 584 edifici si ha un effetto ombra che provoca un abbassamento della temperatura dell'aria.

585

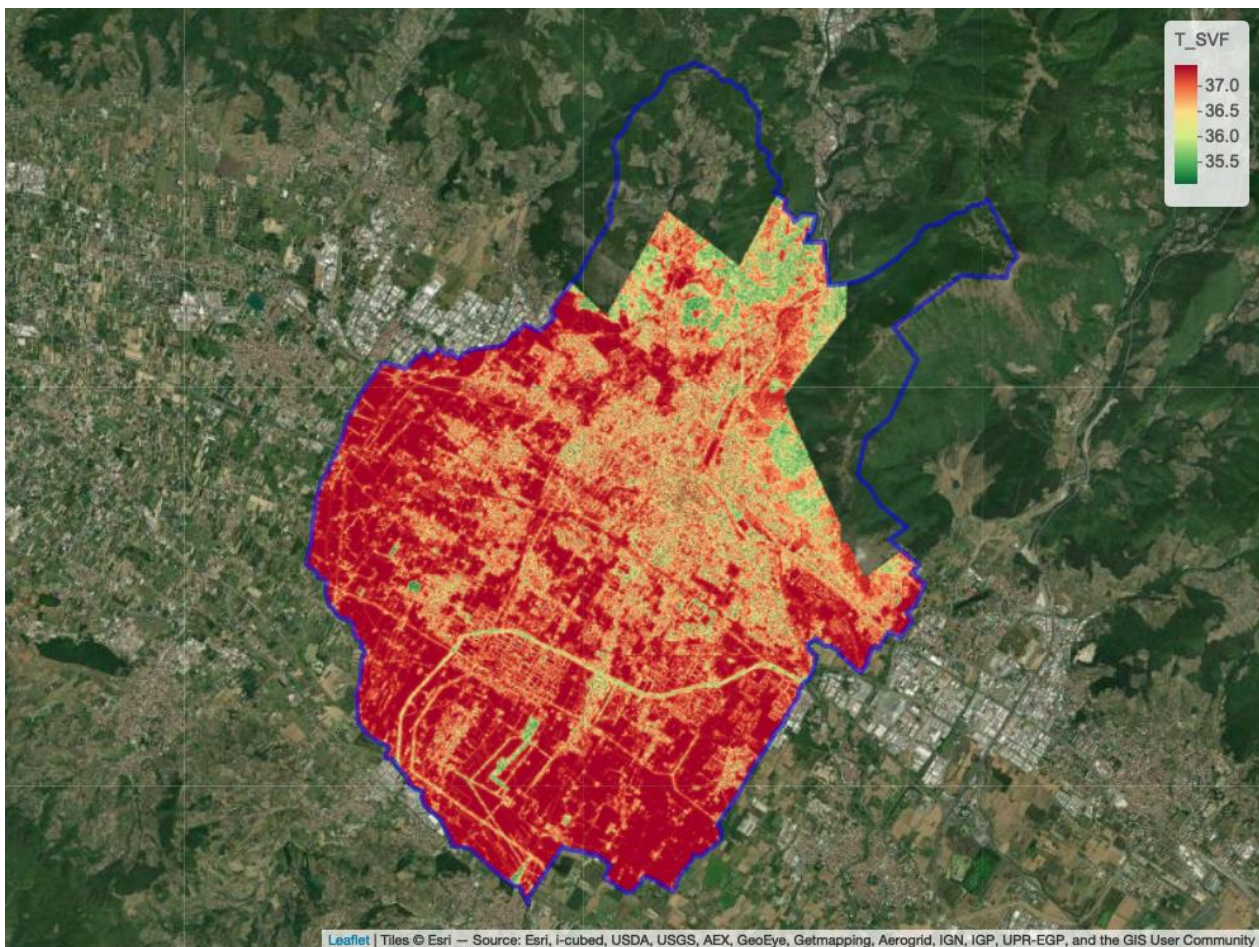


Figura 24. T_{SVF} per l'area di studio.

Indice UHTI (Urban Heatwave Thermal Index)

Il peso di ogni variabile di input, al fine di ottenere una mappa termica relativa alla temperatura dell'aria sul territorio comunale, è stato preso in considerazione sommando tramite combinazione lineare i layer precedentemente ottenuti (T_{LST} , T_{VFC} , T_{SVF}) e successiva normalizzazione a valori compresi tra 0 e 1 tramite trasformazione lineare crescente.

La mappa dell'indice UHTI è riportata in Figura 25: si può immediatamente notare che il tessuto urbano in termini di densità dell'edificato viene ben rappresentato, anche se l'influenza dei materiali evidenzia zone di maggior criticità nelle aree produttive e industriali del Comune. Il centro storico, seppur altamente esposto, risulta comunque meno "caldo" durante il giorno grazie all'effetto ombreggiamento che è stato rappresentato introducendo la parametrizzazione dello sky view factor. In figura 26 è riportata la stessa mappa UHTI discretizzata tramite classificazione "equal-interval" al fine di fornire una lettura facilitata delle aree con valore di indice termico (alto, medio alto, medio, medio basso e basso).

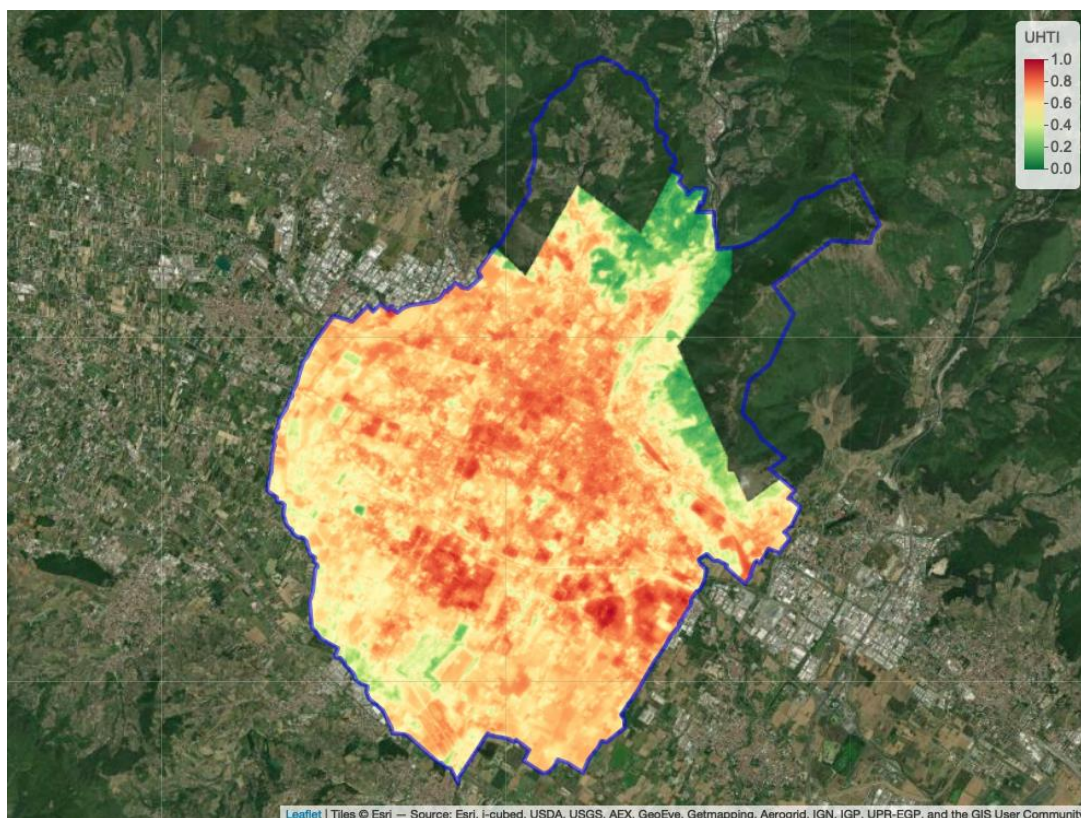


Figura 25. Mappa UHTI dell'area di studio.

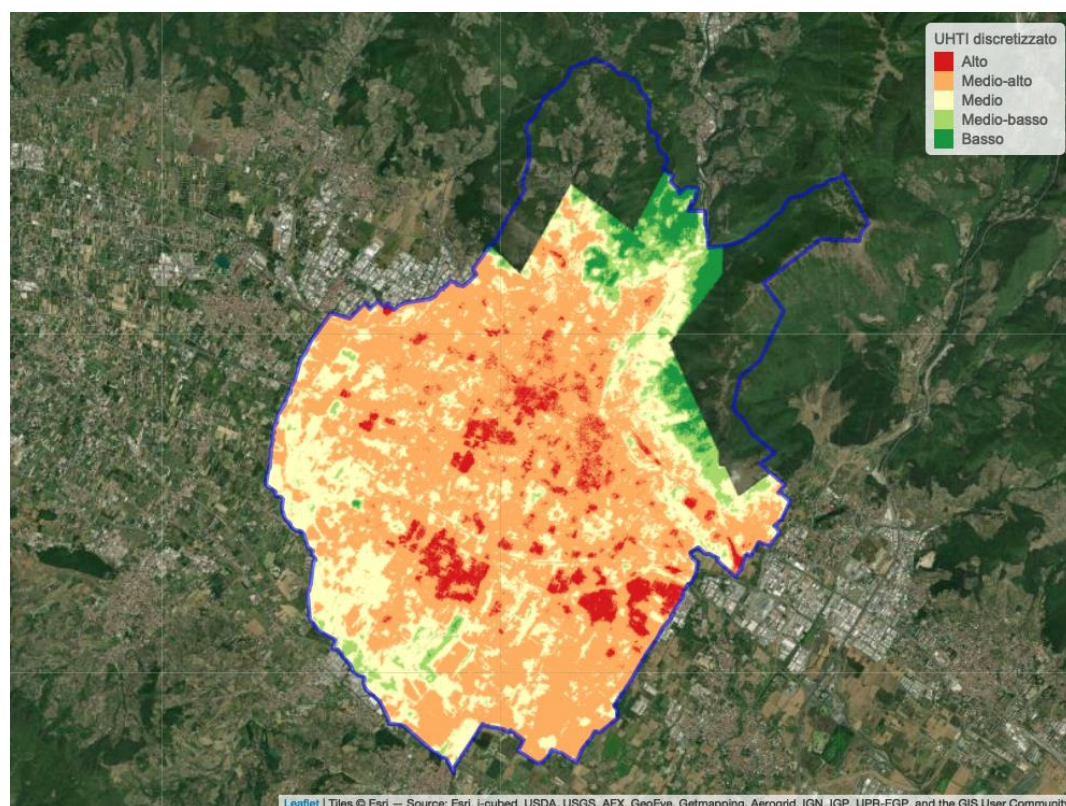
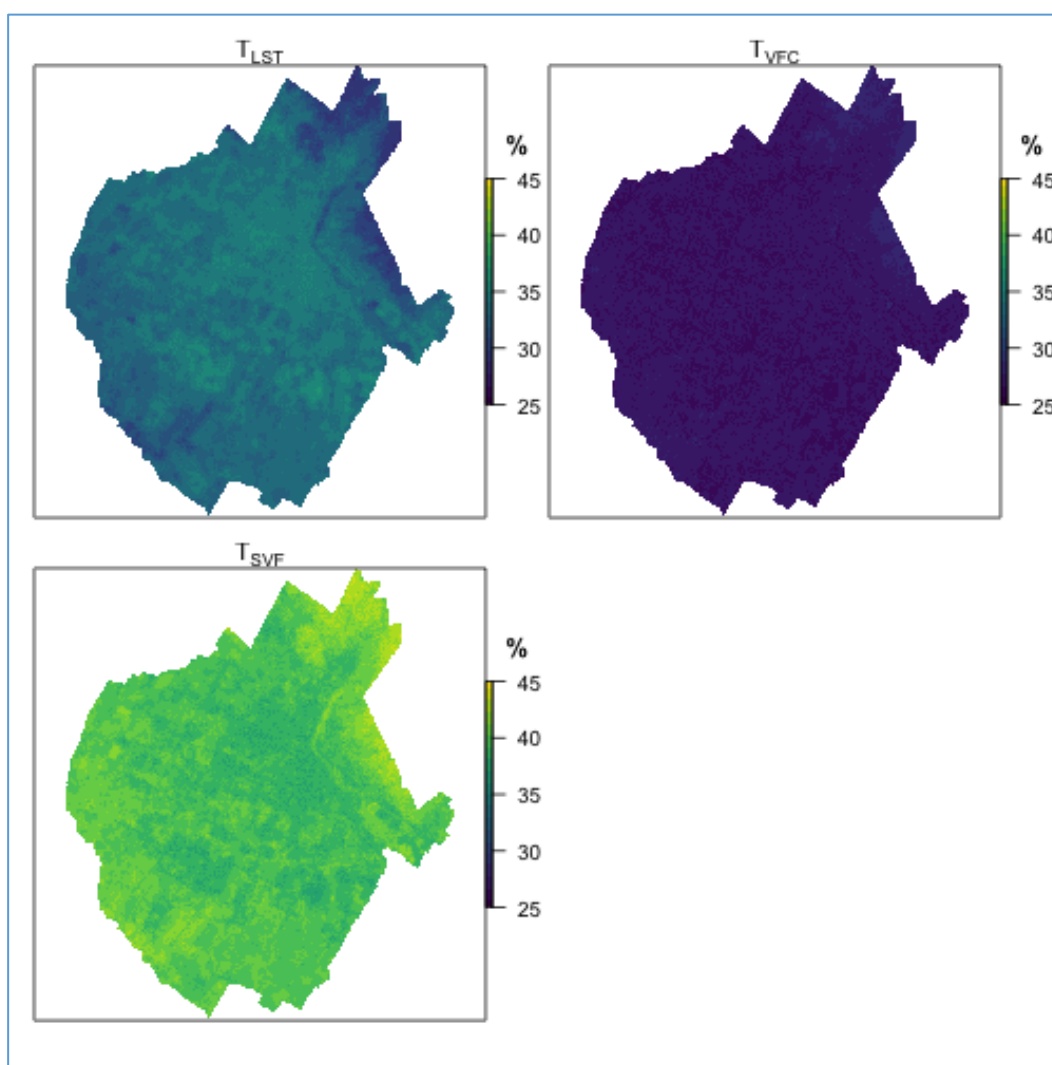


Figura 26. Mappa UHTI dell'area di studio discretizzata.

608 Per comprendere meglio come ogni singola variabile pesa sul calcolo finale di questo indice, il
 609 contributo percentuale dei tre layer T_{LST} , T_{VFC} , T_{SVF} per l'indice UHTI è indicato in Figura 27.
 610 Il contributo maggiore è dato dal parametro SVF (40-45%) a dimostrazione di come sia fondamentale
 611 la morfologia dell'ambiente urbano (in termini di densità, altezza degli edifici e larghezze strade) per
 612 la determinazione del microclima locale. La copertura vegetale pesa per un 25% anche per la sua
 613 scarsa presenza in ambiente urbano, da tenerne conto se si vuole intervenire per mitigare l'effetto di
 614 un'ondata di calore. Le superfici in termini di LST pesano intorno al 30-35% e indicano altre strategie
 615 di intervento al fine di farlo pesare meno in questo caso.
 616



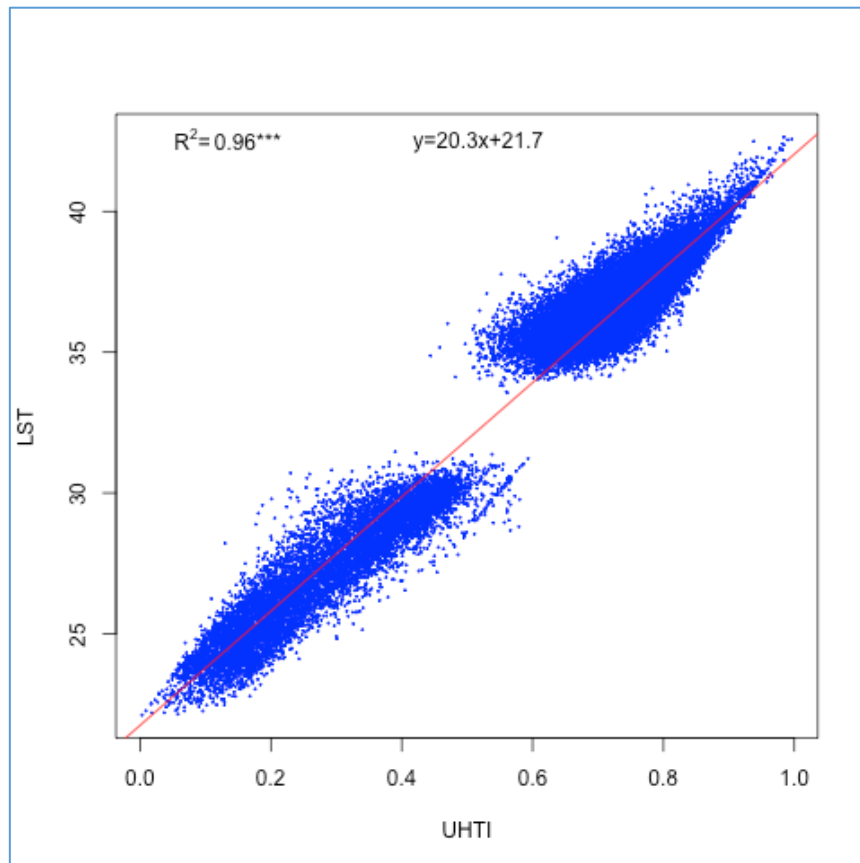
617
 618 **Figura 27.** Contributo percentuale dei layer T_{LST} e T_{VFC} e T_{SVF} al calcolo dell'indice UHTI.
 619

620 **Correlazione fra UHTI e cool/hot spot**

621 Come già evidenziato, il LST è uno dei prodotti satellitari più comunemente utilizzati per monitorare
 622 la temperatura superficiale ma l'indice UHTI fornisce, a partire da dati telerilevati, una misura più
 623 vicina, rispetto a quella dell'LST, riguardo alla percezione dell'ondata di calore.

624 Risulta quindi interessante andare a investigare quale è il grado di relazione fra UHTI e LST e dove
625 questa relazione, a livello spaziale, è più o meno marcata. La relazione fra UHTI e LST è stata studiata
626 per le aree di cool/hotspot (44648 pixel, corrispondenti al 49.6 % dell'area di studio) precedentemente
627 individuate usando la metodologia di Guerri et al. (2021). Lo scopo dell'analisi è quello di verificare
628 il grado di correlazione fra i due strati informativi e di individuare le aree dove tali correlazioni sono
629 più deboli in quanto è lì che l'indice UHTI ha un vero valore aggiunto al fine della caratterizzazione
630 della temperatura dell'aria in una ottica di benessere umano. A questo scopo sono stati usati due
631 approcci, uno tramite regressione lineare, l'altro tramite una correlazione locale utilizzando tecniche
632 a finestra mobile. Viste le differenti risoluzioni geometriche, l'indice UHTI è stato prima
633 ricampionato a 30m come lo strato informativo LST.

634 Il modello di regressione lineare (Figura 28) è caratterizzato da un coefficiente di determinazione
635 ($R^2=0.96$) molto alto ed altamente significativo; risultato analogo si è ottenuto per il coefficiente di
636 correlazione di Pearson (0.978^{***}). Va considerato che, lavorando solo sulle aree di cool/hot spot, i
637 valori intermedi di LST non sono stati considerati nella relazione. La correlazione fra i due layer è
638 abbastanza prevedibile visto che LST è uno dei tre layer di partenza da cui si ricava l'indice UHTI
639 anche se non l'unico.



641
642 **Figura 28.** Relazione lineare fra UHTI e LST.

643

644 Si è quindi cercato di individuare dove la relazione fra LST e UHTI fosse meno marcata; queste aree
645 rappresentano le zone dove vi è una differenza fra la temperatura superficiale telerilevata e quella
646 dell'aria predetta tramite l'indice UHTI. A tal fine sono stati mappati i residui del modello di
647 regressione lineare semplice; essi sono la differenza tra i dati osservati della variabile dipendente y
648 ed i valori previsti dal modello ($\bar{y}$) secondo la seguente equazione:

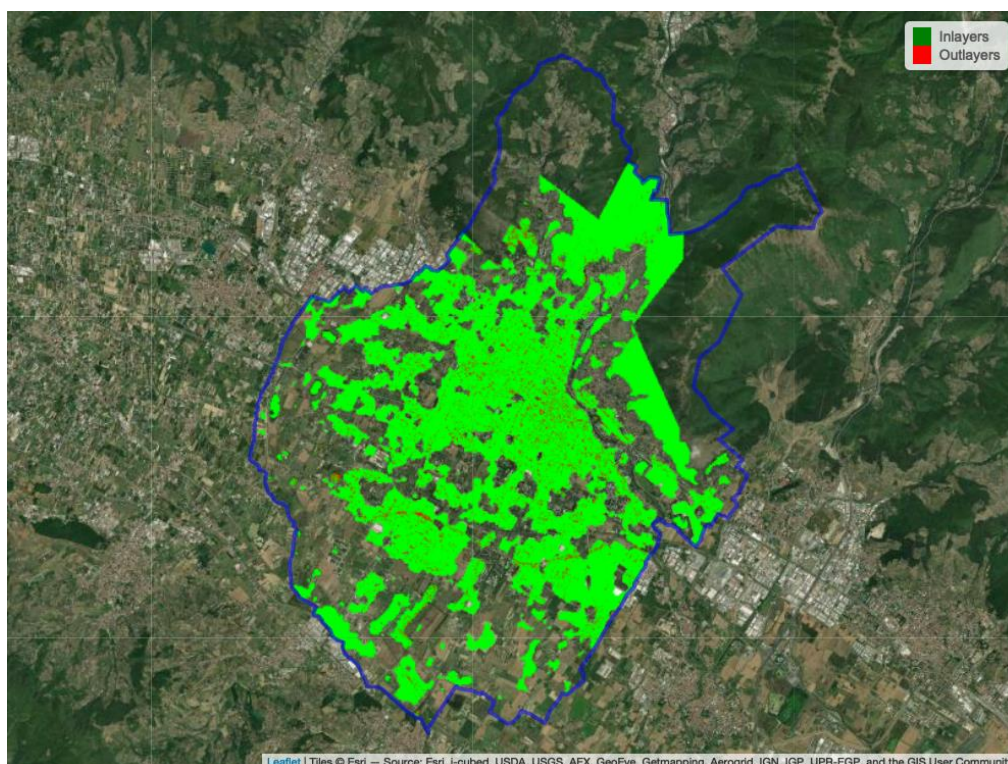
649

$$\text{Residuals} = y - \bar{y} \quad [5]$$

651

652 Successivamente sono stati identificati gli outlayer (figura 29), cioè i pixel dove i residui
653 standardizzati sono fuori dall'intervallo di confidenza al 95% e che quindi non vengono
654 adeguatamente spiegati dal modello di regressione lineare. Nella mappa di figura 28 gli outlayer sono
655 rappresentati in rosso; è interessante notare come gli outlayer si trovano prevalentemente nell'area
656 del centro, ciò è presumibilmente dovuto al fatto che LST registra i valori dei tetti (che ovviamente
657 scaldano molto) mentre invece nei canyon delle vie strette del centro in realtà la temperatura è più
658 bassa a causa dello SVF che di giorno abbassa la temperatura grazie all'effetto ombreggiamento.
659 Questo fa sì che in quelle aree la relazione fra UHTI e LST risulta essere più debole.

660



661

662 **Figura 29.** Mappa delle aree che presentano residui standardizzati entro il livello di confidenza (verdi) e fuori (rossi).

663

Il secondo approccio utilizzato è consistito nell'implementazione di un'analisi di correlazione di Pearson localizzata tramite uso di una finestra mobile di dimensione 9*9 pixel. In figura 30 viene mostrata la mappa ricavata da tale analisi. Ciò che è più interessante notare sono i pixel blu, che rappresentano i pixel per i quali non vi è una correlazione statisticamente significativa ($pvalue > 0.05$) fra i layer LST e UHTI; si può apprezzare come essi siano particolarmente presenti nelle aree del centro e in altre aree del centro abitato caratterizzate da un fitto tessuto urbano, confermando quindi quanto emerso con il primo approccio utilizzato.

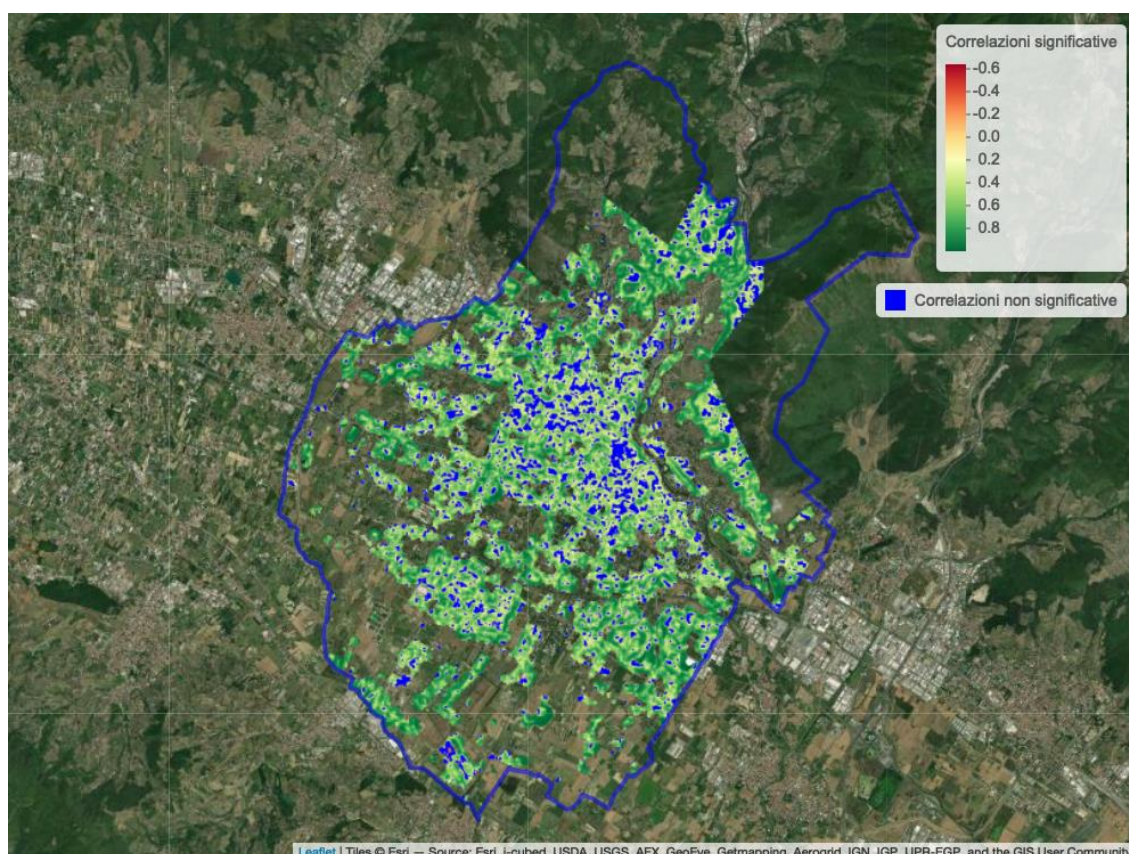


Figura 30. Mappa delle correlazioni localizzate tramite uso di finestra mobile di 9*9 pixel.

I risultati ottenuti mostrano, che in prima analisi, per ottenere le aree di hot e cool spot di un'area urbana, può essere sufficiente considerare la temperatura superficiale (LST) al fine di fornire informazioni alle pubbliche amministrazioni di quali sono le aree che maggiormente si scaldano durante un'ondata di calore; l'indice UHTI, d'altra parte, offre un contributo più completo in quanto considera tutti i parametri che condizionano la temperatura dell'aria durante un'ondata di calore e in assenza di movimento di masse d'aria. Inoltre, grazie a questo indice, verrà realizzata una mappa di fragilità microclimatica dando informazioni sull'indice di comfort nell'intero territorio comunale al fine di individuare le aree dove è maggiormente necessario intervenire per il benessere delle fasce deboli della popolazione maggiormente esposte alle ondate di calore.

3.1.5. Individuazione di un set di strategie percorribili per l'adattamento e la mitigazione agli eventi estremi e ai cambiamenti climatici / Selezione delle strategie operative per la definizione di un percorso di adattamento

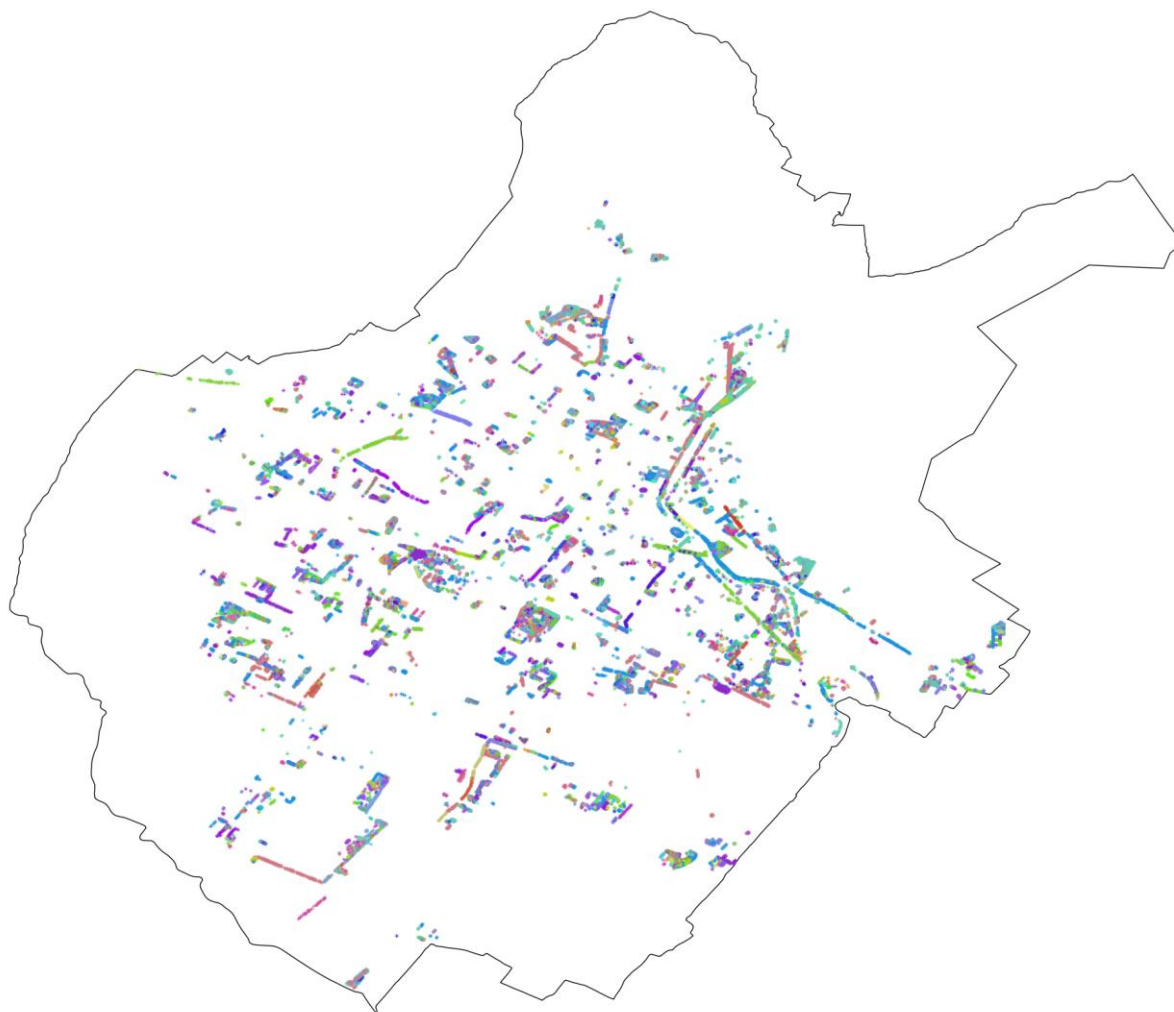
Le strategie percorribili per l'adattamento e la mitigazione agli eventi estremi ed ai cambiamenti climatici, nonché la selezione delle strategie operative per la definizione di un percorso di adattamento verranno identificate durante il secondo anno di lavoro. Tale analisi sarà infatti basata sui dati provenienti dalle analisi di fragilità condotte seguendo sia l'approccio statistico sopra riportato, che quello deterministico ancora in corso di svolgimento. Sulla base delle differenze tra i due metodi e sull'affidabilità e robustezza del dato ottenuto saranno difatti identificate le strategie più idonee.

3.2. Assorbimento di carbonio

Per la valutazione della capacità di assorbimento del carbonio, l'analisi ha tenuto di un approccio integrato tra i dati inventariali (3.2.1), analisi da sistemi informativi geografici (GIS) (3.2.2) e modellistica (3.2.3). L'obiettivo finale era infatti quello di applicare una metodologia integrata (modelli di simulazione, telerilevamento e dati ausiliari) in grado di fornire stime di NEE (Net Ecosystem Exchange) nell'ambito del territorio comunale.

3.2.1. Dati inventariali ed analisi GIS

Per poter stimare il carbonio immagazzinato dal verde urbano di Prato si è scelta una metodologia inventariale già validata in un altro lavoro sul Parco delle Cascine (Brilli et al., 2019). L'implementazione del modello ha richiesto specifiche informazioni relative a ciascun albero che insiste sul territorio urbano: specie, circonferenza o diametro, altezza (se presente), coordinate geografiche. Tali informazioni sono state estrapolate dalla banca dati geografica delle "alberature pubbliche dell'area urbana", messa a disposizione da CONSIAG (Fig. 31) la quale tuttavia esclude le aree rurali e forestali extra-urbane.



710

711 **Figura 31.** Visualizzazione delle alberature pubbliche urbane del Comune di Prato (Fonte del dato: CONSIAG).

712

713 Dei quasi 29.500 alberi presenti nel database ne sono stati selezionati 26.356 (pari a l'92,7% del
 714 totale), relativi a 28 generi diversi con specie per cui è nota o è stato possibile ottenere la curva
 715 ipsometrica (Tab. 7). Tale possibilità è inoltre garantita dall'anno di rilevazione il quale, essendo lo
 716 stesso per tutte le piante prese in analisi, ha permesso di ottenere dei valori dendrometrici (nello
 717 specifico la circonferenza) temporalmente confrontabili. Inoltre, grazie alla conoscenza delle
 718 coordinate geografiche di ogni singola pianta, le stime di carbonio stoccato calcolate per classi
 719 diametriche sono state estese a ciascuna pianta e poi rapportate all'unità di superficie per un calcolo
 720 spaziale più dettagliato.

721

ID number	ID color	Genere	Specie	N° alberi	Circ. media	Diam. Medio
1		Acero	Campestre, Ginnala, Negundo, Freemani, Platanoide (riccio), Pseudoplatano (montano), Saccarino	2134	67.0	21.3
2		Aesculus	Ippocastano, Indica, Carnea	218	133.0	42.4
3		Alnus	Cordata, glutinosa, Incana	15	40.0	40.0

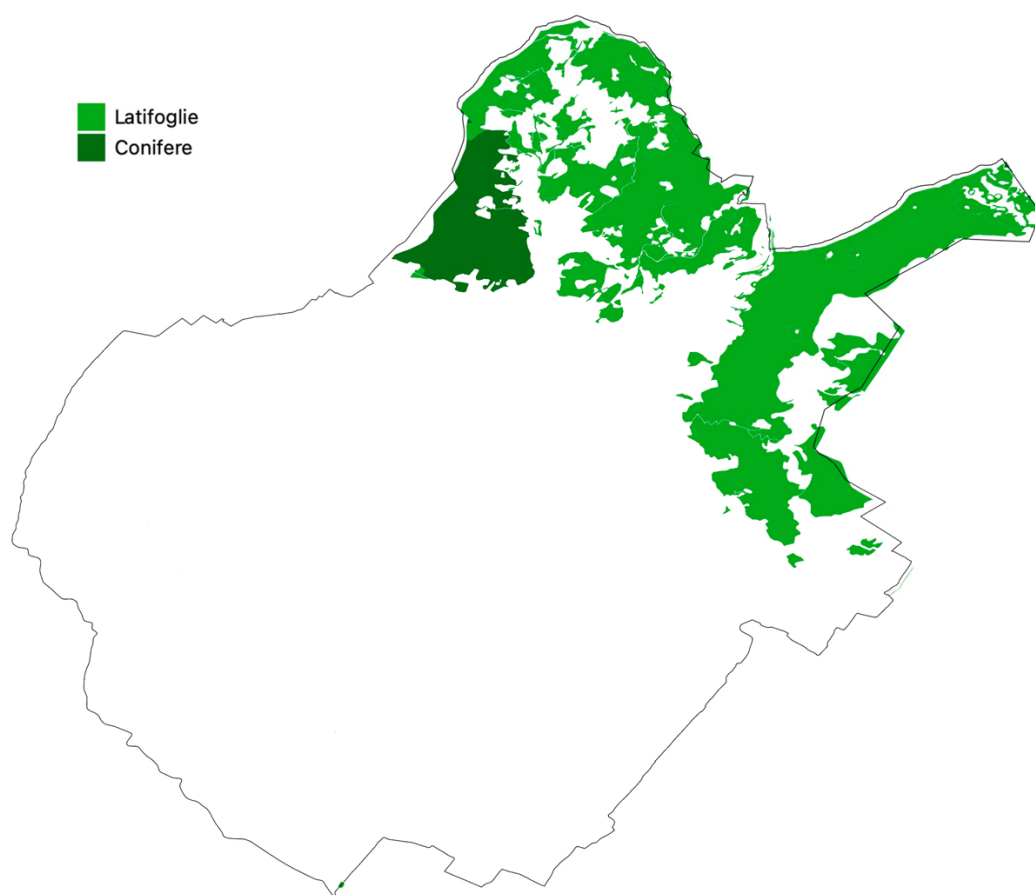
4		Betula	Pendula	20	52.0	40.0
5		Carpino	Betulus (bianco), Carpinifolia (nero)	783	53.0	16.9
6		Catalpa	Bignonoides	55	95.0	30.3
7		Cedrus	Atlantica, deodara, libano, calocedro	782	162.0	51.6
8		Celtis	Australis, Levigata	1345	68.0	21.7
9		Conifere	Picea, Abies	51	75.0	23.9
10		Corylus	Avellana, Colurna	114	19.0	6.1
11		Cupressus	Sempervirens, Leylandi, Arizonica, Glabra	1447	83.0	26.4
12		Farnia	Quercus Robur	534	76.0	24.2
13		Frassino	Americana, Angustifolia, Excelsior, Ornus, Oxicarpa	1618	54.0	17.2
14		Gleditsia	Spino di Giuda	113	86.0	27.4
15		Juglans	Regia, Nigra	98	78.0	24.8
16		Leccio	Quercus ilex	1467	96.0	30.6
16		Liquidambar	Liquidambar S.	88	57.0	18.2
17		Magnolia	Grandiflora, Lilflora, Solanganea	260	64.0	20.4
18		Olea	Olea Eu.	1622	75.0	23.9
19		Olmo	Pumila, Laevis, Minore	272	93.0	29.6
20		Pinus	Pinea, Nero, Pinaster, Silvestre, Strobo, Wallichiana, Halepensis	3491	166.0	52.9
21		Pioppo	Italica, Nigra, Alba, Canescens, Tremulo	598	123.0	39.2
22		Platano	Orientalis, Acerifolia	1578	145.0	46.2
23		Prunus	Avium, Cerasifera, Domestica, Dolce, Laurocesaro, Persica, Serrulata, Armeniaca, Lusitanica, Amygdalus	433	57.0	18.2
24		Pyrus	Callieriana, Communis	679	43.0	13.7
25		Quercus	Pubescens, Cerris, Petrae, Palustris, Rubra, Robur, Suber	904	88.0	28.0
26		Robinia	Robinia pseudoacacia	446	91.0	29.0
27		Sophora	S. Japonica	44	99.0	31.5
28		Tiglio	Americana, Europea, Tomentosa, Ibrida argentea, Cordata, Platifolia,	5147	102.0	32.5
TOT calcolate				26356	84.1	28.5
TOT Dataset				28431		
% copertura				92.7		

722

723 **Tabella 7.** Tabella delle “alberature pubbliche dell’area urbana” raggruppata per genere, includendo specie X genere,
724 numero di piante/alberi, valore medio della circonferenza e del diametro per specie presente.

725

726 Per poter valutare il contributo in termini di accumulo di carbonio della vegetazione extra-urbana è
727 stato necessario individuare le aree forestali che ricadono nel territorio comunale e la diversa
728 tipologia. Tali aree sono state estrapolate utilizzando informazioni ottenute dalla banca dati
729 geografica di uso suolo della Regione Toscana del 2016. I modelli utilizzati per le stime sono stati
730 implementati sulle due tipologie forestali che ricadono nella porzione nord-orientale del Comune: il
731 querceto misto, che copre una superficie di circa 5000 ha, e le conifere, che invece occupano una
732 superficie di circa 340 ha (Fig. 32).



734

735 **Figura 32.** Aree forestali (querceto misto e conifere) extra-urbane del Comune di Prato (Fonte del dato: Uso Suolo
 736 2016, Regione Toscana).

737

738

3.2.2. Approccio modellistico

739

740

741

742

743

744

745

746

747

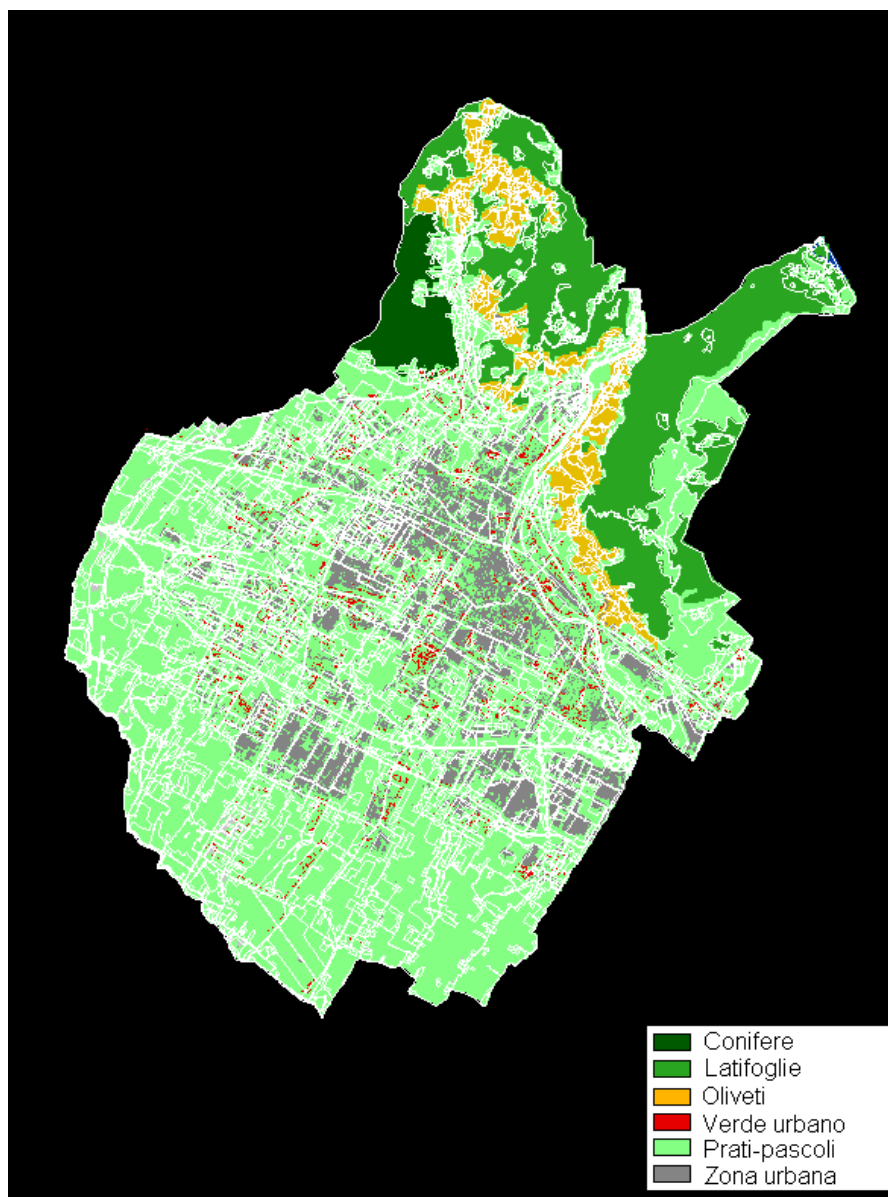
748

749

750

L'approccio modellistico è stato effettuato mediante l'integrazione tra modelli e dati osservati. Innanzitutto, è stata effettuata una spazializzazione a scala territoriale, con 250 m di risoluzione spaziale, dei dati meteorologici giornalieri mediante il modello DAYMET e stima della radiazione solare mediante MT-Clim. Poi è stata calcolata la produttività (GPP) a partire da immagini da satellite ad alta risoluzione (Sentinel 2; 10 m di risoluzione spaziale) utilizzando il modello C-Fix attraverso dati di FAPAR (Fraction of Photosynthetically Active Radiation Absorbed) derivati da telerilevamento integrati con dati di radiazione. Poi è stata calcolata la capacità di immagazzinamento degli ecosistemi in termini di NEE mediante il modello BIOME-BGC; un modello capace di riprodurre i principali processi degli ecosistemi forestali validato in diversi ecosistemi. Le stime ottenute sono state poi corrette sulla base del volume reale ottenuto da una mappa ad alta risoluzione spaziale (pixel di 23 m). Queste mappe tenevano conto di volume legnoso (per le respirazioni autotrofe) e di SOC (per respirazione eterotrofa, i.e. decomposizione). Inoltre, la mappa di contenuto di carbonio organico nel

751 suol (Soil Organic Carbon, SOC) con risoluzione di 250 m è stata utilizzata per correggere le stime
752 di respirazione eterotrofa (decomposizione) fornite da BIOME-BGC.
753 Il territorio comunale è stato suddiviso considerando sia le diverse classi di uso suolo individuate
754 mediante interpretazione di ortofoto, che le alberature urbane inventariate dal Comune di Prato. La
755 mappa risultante riporta i boschi di conifere, i boschi di latifoglie, gli oliveti, le alberature urbane, le
756 zone caratterizzate da specie erbacee (i.e. prati, pascoli e seminativi) e le zone urbane e residenziali
757 dove la copertura vegetale è inferiore al 10% (Figura 33, Tabella 8). Per ciascuna delle diverse
758 categorie sono state ottenute mappe di GPP e NEE che vengono mostrate in Figure 34-35. In Tabella
759 8 si riportano, oltre all'estensione delle diverse classi di uso suolo, i valori medi annui in termini sia
760 di GPP che di NEE.
761



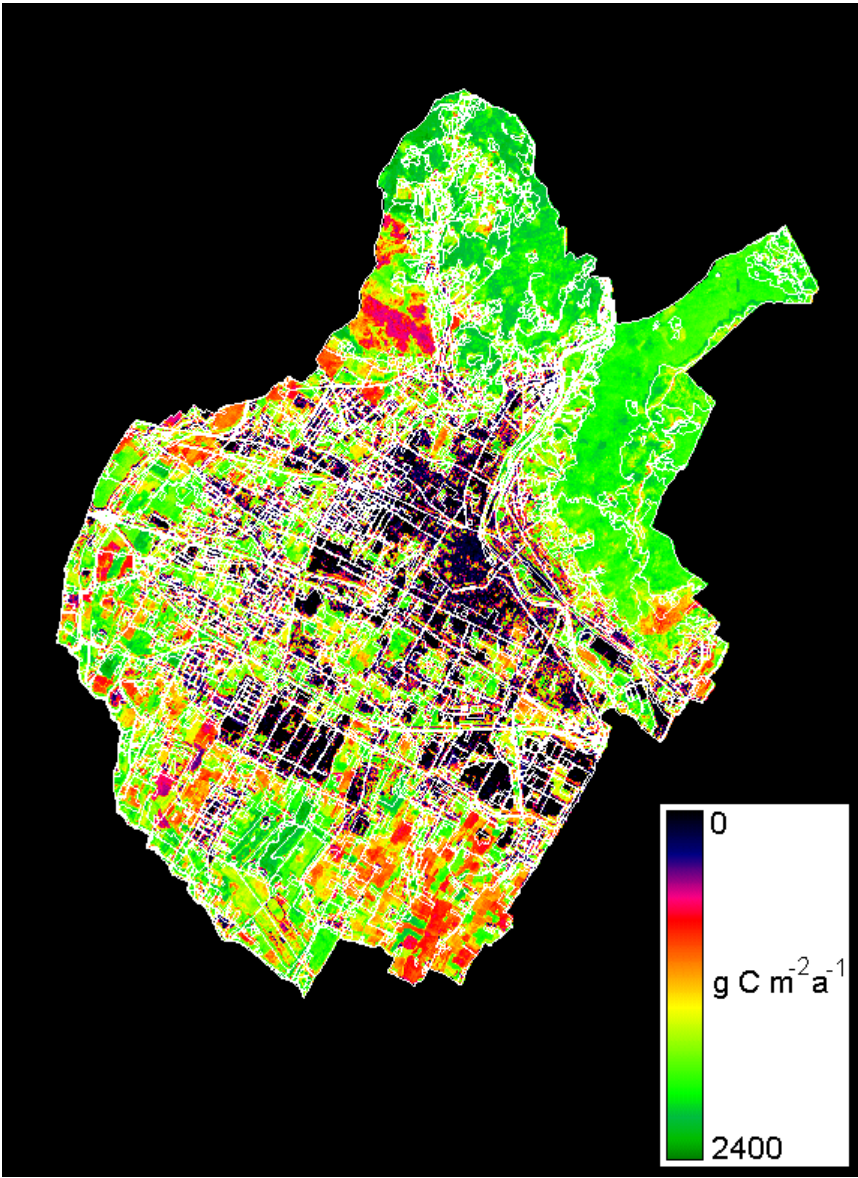
763 **Figura 33.** Distribuzione delle diverse categorie di uso suolo presenti all'interno del territorio comunale.

764

Tipo di vegetazione	Superficie (ha)	GPP (g C m ⁻² a ⁻¹)	NEE (g C m ⁻² a ⁻¹)
Conifere	210	1228	403
Latifoglie	1300	1931	640
Oliveto	500	1658	350
Alberature urbane	190	1305	161
Prati-pascoli-seminativi	6310	1328	50
Zona urbana (FVC < 0.1)	1260	69	5

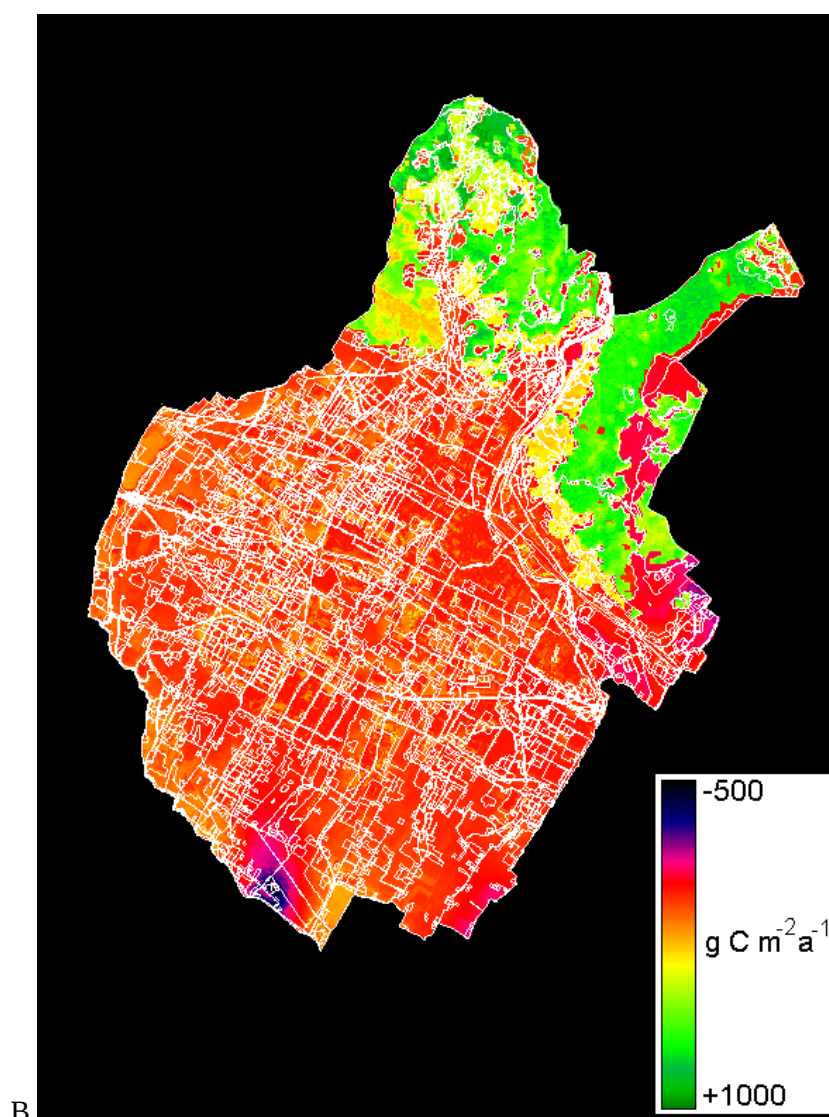
765

766 **Tabella 8.** Valori di GPP e NEE media annua per le diverse classi di vegetazione presenti all'interno del territorio
767 comunale.



768

769 **Figura 34.** Mappa di GPP del Comune di Prato.



B

Figura 35. Mappa di NEE del Comune di Prato.

Completivamente il territorio comunale ha una GPP media pari a $1260 \text{ g C m}^{-2} \text{anno}^{-1}$ ed una NEE di circa $147 \text{ g C m}^{-2} \text{anno}^{-1}$. La distribuzione della GPP è uniformemente elevata laddove la copertura vegetale (sia essa erbacea che arborea) è elevata mentre i valori più ridotti corrispondono a zone in cui Per quanto riguarda infine la distribuzione della NEE, le foreste (ed in particolare quelle a latifoglie che hanno una copertura vegetale più alta) sono la categoria capace di sottrarre dall'atmosfera la maggior quantità di carbonio. Seguono poi gli oliveti, caratterizzati dalla presenza alternata di specie erbacee ed arboree che hanno una NEE pari a $350 \text{ g C m}^{-2} \text{anno}^{-1}$, le alberature urbane che coprono una ridotta porzione del territorio e contribuiscono a sottrarre carbonio, e le specie erbacee che hanno un bilancio annuo prossimo a zero. La zona in cui si ha maggiore emissione di carbonio corrisponde ad una porzione

783 di territorio in cui risulta esserci un forte accumulo di carbonio organico nel suolo e quindi molta
784 decomposizione (cfr. zona in blu in Figura 2 B).

785

786 3.3. *Modello Digital-Twin*

787 Il comportamento bio-fisico del tessuto urbano, a partire dalla interazione ambientale superfici-
788 edifici-vegetazione-irraggiamento-sorgenti emissive-atmosfera è di difficile comprensione ma di
789 fondamentale importanza per l'implementazione di scenari e politiche di governance. Lo sviluppo di
790 uno strumento di simulazione in logica digital-twin, cioè un insieme di modelli in grado di simulare
791 tutti i processi, si rende necessario per la comprensione e l'analisi di tutti gli effetti bio-fisici e
792 morfologici di un ambiente urbano. A tal fine si è scelto di operare con la modellistica ENVI-met a
793 scala urbanistica facendo un'analisi di aree rappresentative di tre diversi tessuti urbani (centro storico,
794 residenziale e industriale) e dimensioni di circa 1 Km² (con una griglia di 5 m di risoluzione), ed i cui
795 risultati possano essere trasposti a zone morfologicamente simili. La simulazione dell'intera città
796 richiede risorse di calcolo al momento non disponibili. Il modello a questa scala permette di simulare
797 l'interazione tra edificato, vegetazione urbana, reticolo stradale ed atmosfera, andando quindi a
798 costituire uno strumento di pianificazione e governance. Le aree di studio su cui è stata effettuata la
799 simulazione con il software ENVI-met sono state selezionate in coordinamento con l'Ufficio Tecnico
800 del Comune di Prato, assumendole come indicative dei tessuti urbani esistenti, al fine di ottenere la
801 rappresentazione "tipo" del comportamento microclimatico di ciascun tessuto rispetto alla struttura e
802 morfologia delle rispettive componenti urbane espresse tramite: la densità dell'edificato, larghezza
803 delle strade, i materiali che costituiscono tali componenti, la vegetazione presente. Le aree identificate
804 sono riportate in Figura 36.

805



806

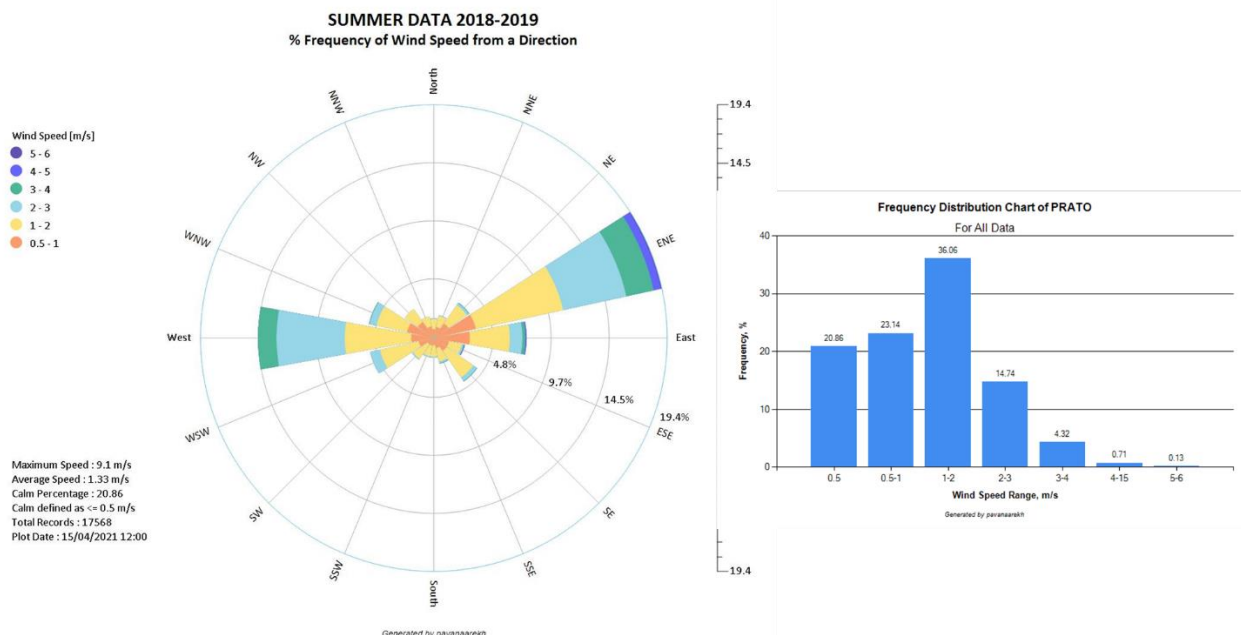
807 **Figura 36.** Geolocalizzazione delle tre aree di studio del comune di Prato simulate con il modello ENVI-met.

808

809 L'area centro storico nell'ambito della Tavola ES4 - Sistemi e Subsistemi territoriali del Piano
 810 Strutturale online ricade nel "Sistema 3 – Il centro storico", ed è caratterizzata nella sua estensione
 811 da due tipi di tessuti: il primo tessuto denso e compatto, costituito da slarghi e piazze principali,
 812 prevalentemente mineralizzato, che rappresenta la parte più storica; il secondo tipo di tessuto, verso
 813 sud, che comprende un tessuto più misto con una morfologia meno densa rispetto al centro. L'area
 814 produttiva selezionata ricade nel "Sistema 7 – I Macrolotti" della Tavola ES4 - Sistemi e Subsistemi
 815 territoriali e, confrontando il suo tessuto produttivo con gli altri presenti sul territorio, si può ritenere
 816 descrittiva sia a livello di morfologia, di tessitura e di rapporto fra le componenti urbane. Per
 817 rappresentare un borgo tipico è stata selezionata l'area Galciana, che ricade nel "Sistema 5 – I borghi"
 818 per l'appunto. Tale area infatti contiene al suo interno diversi tessuti tipologici fra quelli descritti e
 819 analizzati nel dettaglio nella relazione del Piano relativa alla "Metodologia di individuazione puntuale
 820 dei morfotipi urbani nel territorio pratese", descrittiva dei morfotipi delle urbanizzazioni
 821 contemporanee esistenti. Nello specifico tali tessuti sono: tessuto ad isolato compatto, tessuto
 822 produttivo commerciale o direzionale, tessuto storico con mix di funzioni a bassa densità, tessuto di

823 origine storica con funzione produttiva, tessuto lineare lungo strada di formazione prevalentemente
824 recente a bassa-media densità.

825 Queste tre aree sono state simulate con il modello fluidodinamico ENVI-met al fine di avere
826 un'analisi microclimatica fluidodinamica di tre differenti aree per poter ottenere la mappa a scala
827 comunale. ENVI-met (<http://www.envi-met.com/>) è un modello microclimatico tridimensionale non
828 idrostatico (Bruse and Fleer, 1998) in grado di simulare le interazioni superficie-pianta-aria in
829 ambiente urbano con una risoluzione spaziali di 0.5-10 m e una risoluzione temporale di 10 sec. È un
830 modello fluidodinamico in grado di simulare diverse variabili, tra cui il flusso intorno e tra gli edifici,
831 i processi di scambio di calore e vapore sia alla superficie del suolo che dei muri, gli scambi turbolenti,
832 alcuni parametri della vegetazione, la bioclimatologia e la dispersione di particelle. Il modello ENVI-
833 met può essere utilizzato per diversi scopi al fine di studiare e comprendere diversi aspetti dei canyon
834 urbani come gli effetti di orientamento e rapporto edifici/verde sul comfort urbano outdoor, il ruolo
835 della vegetazione per la mitigazione dell'isola di calore urbana, ecc.... I dati di input necessari per
836 far girare ENVI-met sono costituiti dalla descrizione dettagliata del suolo (asfalto, erba, terreno nudo,
837 acqua, etc.), degli edifici (localizzazione, dimensioni), vegetazione (presenza di alberi, altezza e
838 specie) e delle condizioni atmosferiche iniziali. Attraverso l'interfaccia grafica si inserisce l'orografia
839 e le condizioni meteo iniziali in termini di velocità e direzione del vento a 10 m, temperatura dell'aria
840 e umidità relativa (valori massimo e minimo). I risultati delle simulazioni possono mostrare gli effetti
841 di come le soluzioni architettoniche, le tecnologie sostenibili, l'uso del verde e dell'acqua, consentono
842 di migliorare le condizioni microclimatiche outdoor. È stato scelto di simulare le condizioni
843 microclimatiche per la giornata con la temperatura massima registrata durante l'ondata di calore
844 dell'estate 2019. A tal fine è stata effettuata un'analisi dei dati di velocità e direzione del vento
845 disponibili (2018-2019) al fine di caratterizzare la città da un punto di vista anemologico e ad andare
846 a considerare il vento tipico medio dell'area urbana (Figura 37). La direzione prevalente del vento
847 durante il periodo estivo risulta essere Est-Nord-Est con velocità del vento comprese tra 1 e 2 m/s.



848

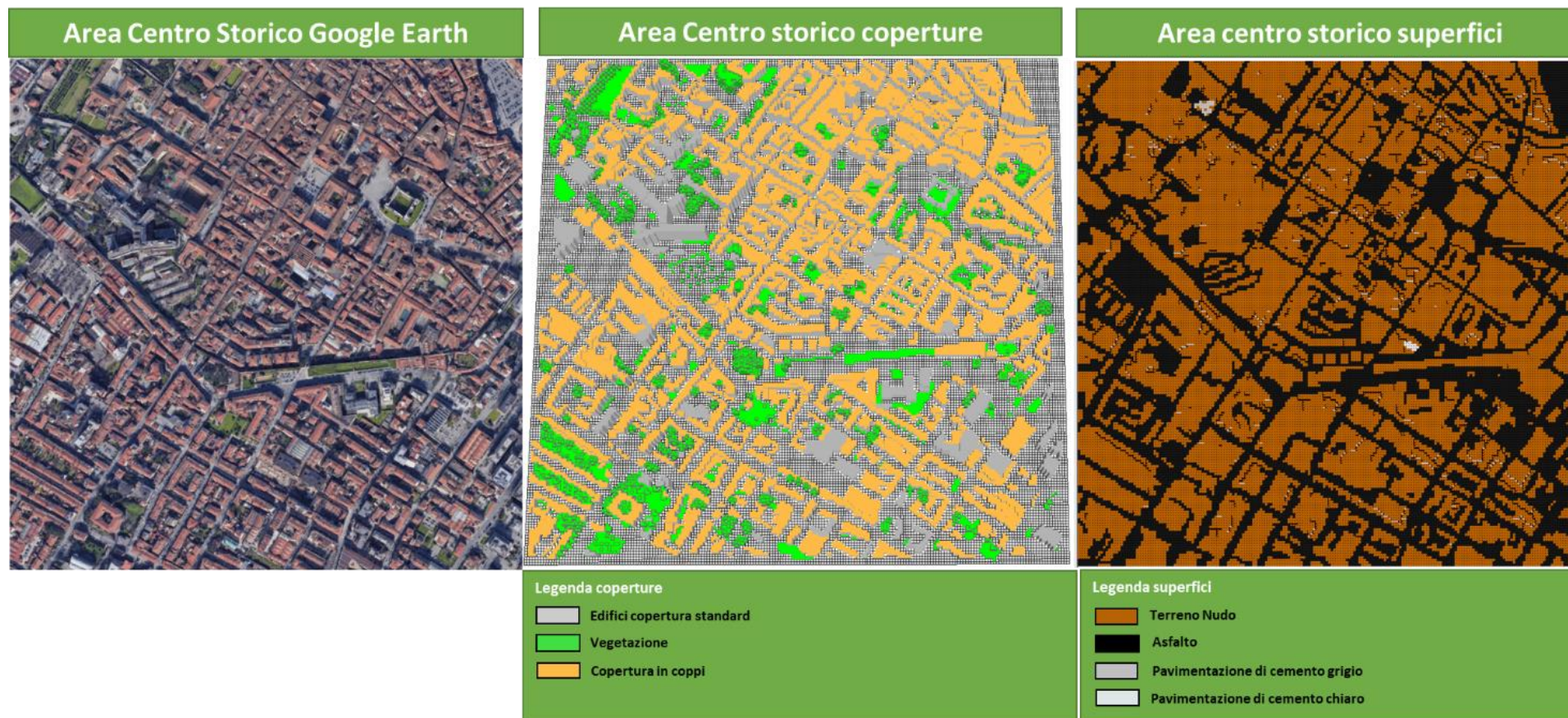
849 **Figura 37.** Rosa dei venti per la città di Prato durante il periodo estivo (2018-2019) e relativa frequenza delle velocità
 850 del vento per ogni settore.

851

852 Per la giornata del 25 luglio 2019 si è quindi inizializzato il modello con i seguenti dati meteorologici:

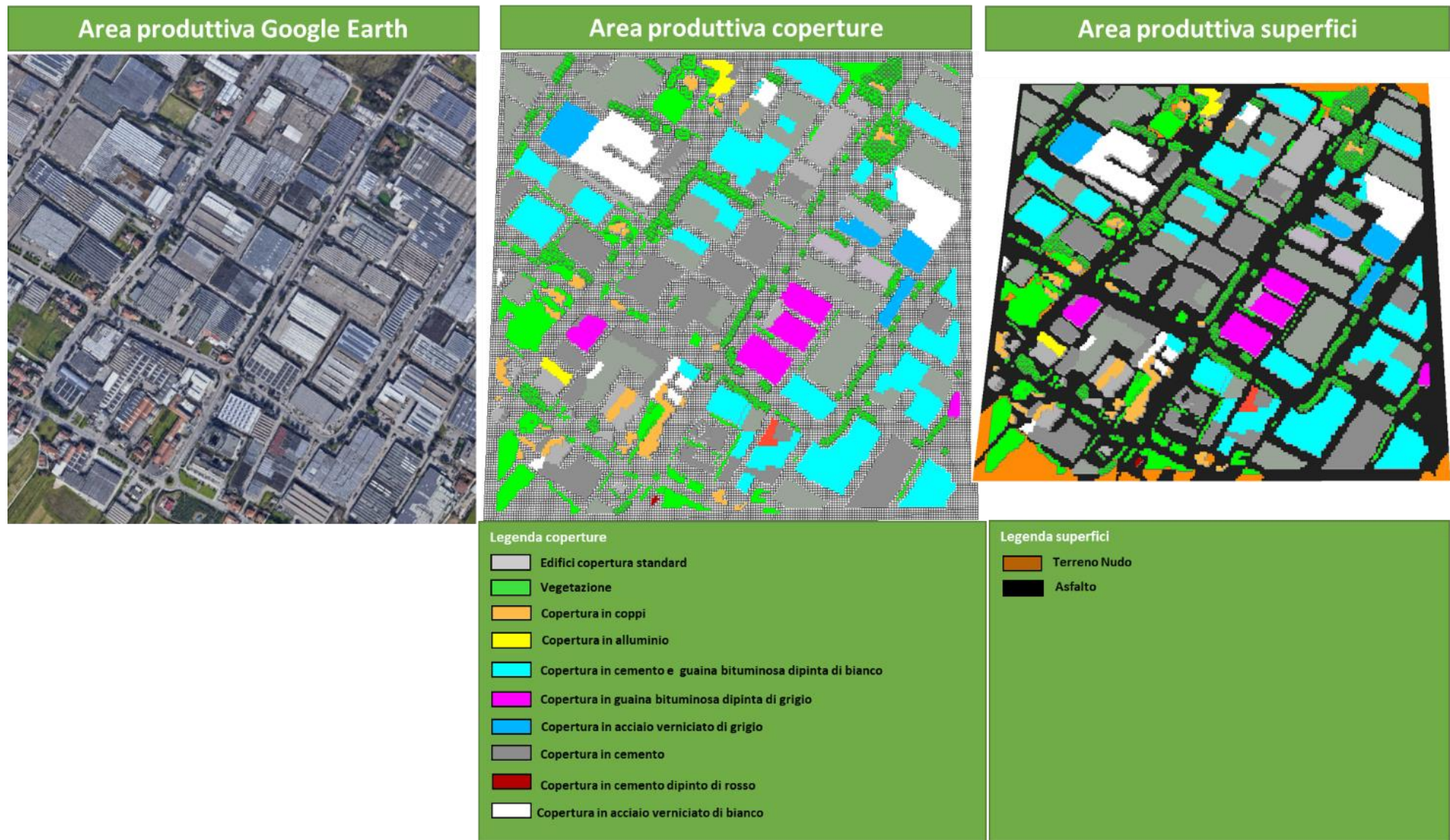
- 853 ■ velocità vento: 2.0 m/s;
- 854 ■ direzione del vento: 70 ° da Nord;
- 855 ■ Temperatura massima: 39.75 °C alle ore 14:00;
- 856 ■ Temperatura minima: 24.07 °C alle ore 4:00;
- 857 ■ Umidità relativa massima: 58% alle ore 04:00;
- 858 ■ Umidità relativa minima: 15% alle ore 14:00.

859 L'orografia delle varie aree comprendente palazzi, vegetazione e uso del suolo è stata inserita nel
 860 modello ENVI-met per tutte le tre aree considerate e nelle Figure 38, 39 e 40 sono riportate
 861 l'immagine di Google Earth, le coperture degli edifici e i materiali utilizzati per le superfici.



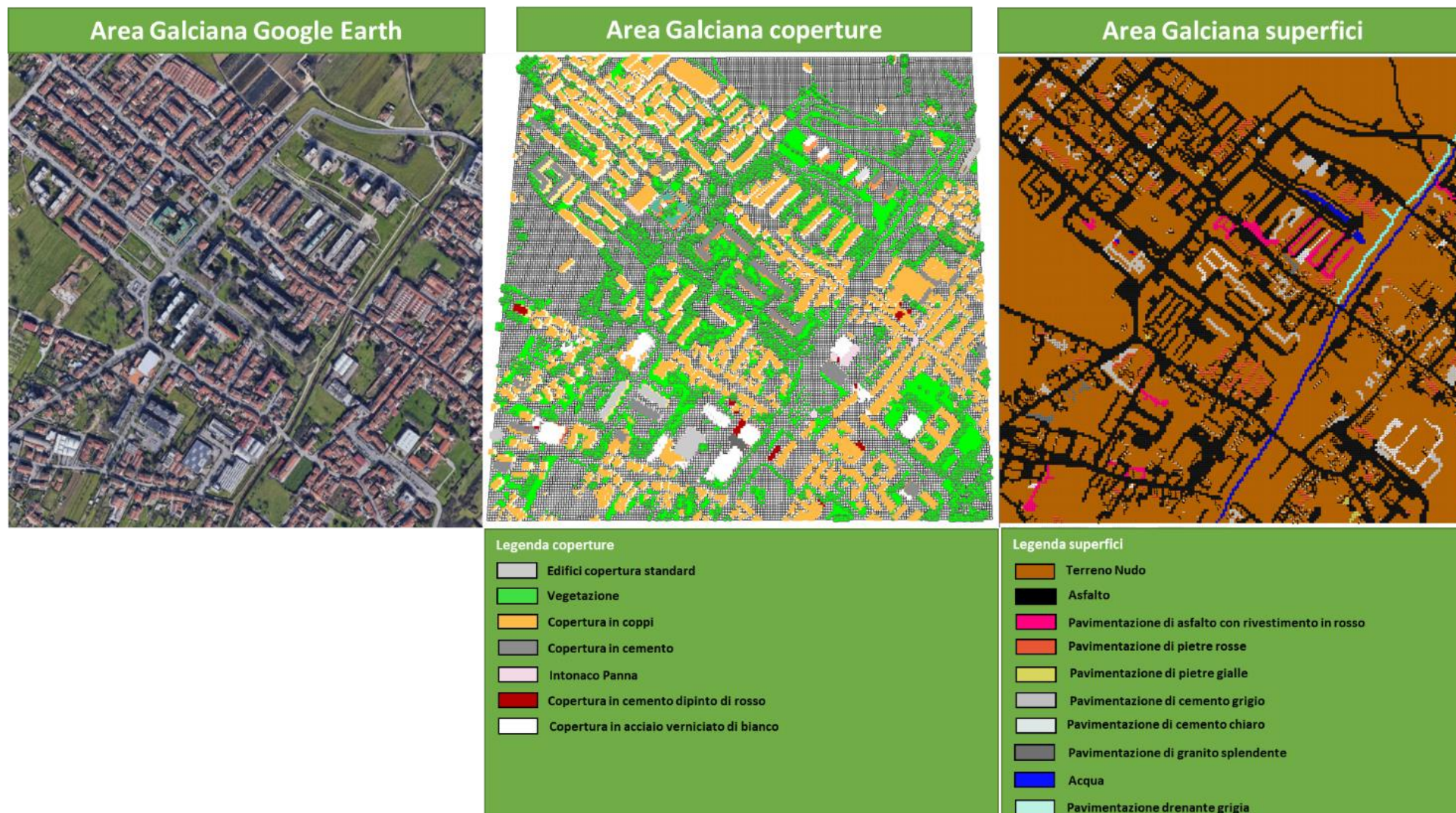
862

863 *Figura 38. Immagine Google Earth, coperture degli edifici e materiali alla superficie per l'area centro storico.*



864

865 **Figura 39.** Immagine Google Earth, coperture degli edifici e materiali alla superficie per l'area produttiva.

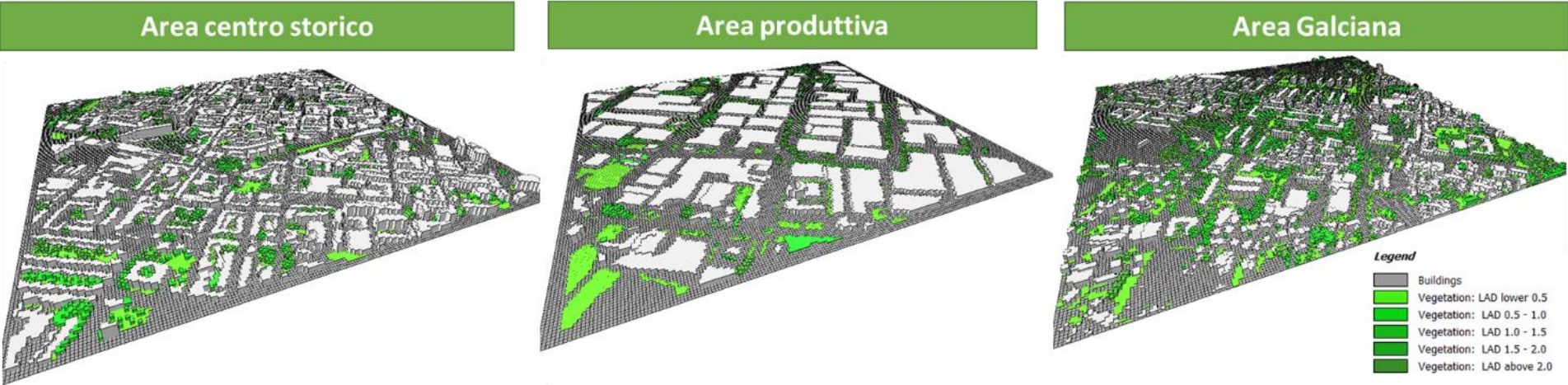


866

867 **Figura 40.** Immagine Google Earth, coperture degli edifici e materiali alla superficie per l'area centro Galciana.

868 La modellizzazione 3D di vegetazione e edifici è riportata nella Figura 41. Il modello ha girato per 36 ore al fine di avere l'evoluzione della
869 fluidodinamica per una giornata considerando le ore iniziali poco stabili dal punto di vista numerico.

870



871

872

873 **Figura 41.** Modellizzazione 3D con vegetazione ed edifici delle tre aree inserite nel modello ENVI-met.

874 3.4. *Super-sito per la misura degli scambi di CO₂.*

875 Il super-sito per la misura degli scambi di CO₂ in area urbana è stato installato nel centro di Prato, più
876 specificatamente sul tetto di palazzo Pretorio (43°52'50''N, 11°05'47'' E; fig. 41a). Il sito consta di
877 una stazione eddy covariance (Fig. 41b) necessaria per misurare sia i livelli di CO₂ che gli scambi
878 gassosi a scala stagionale all'interno del sistema urbano



879
880 **Figura 41.** *Installazione della stazione Eddy Covariance su Palazzo Pretorio (a) nel centro della città di Prato. A destra*
881 *(b) dettaglio della strumentazione utilizzata comprensiva di analizzatore di gas ad infrarosso e anemometro triassiale.*

882 La stazione, installata nel Giugno del 2021, raccoglie dati ad alta frequenza sulle misure di flussi in
883 ambiente urbano, e permetterà di valutarne le dinamiche in relazione sia alla stagionalità che ad
884 eventuali azioni mitigative implementate nel contesto comunale. Data la ridotta disponibilità di dati
885 attualmente collezionati, analisi di dettaglio verranno effettuate durante il secondo anno di lavoro.

886 4. Sviluppi futuri

887 Le attività di ricerca effettuate nel primo anno di lavoro e finalizzate allo sviluppo del Piano d'Azione
888 per l'Energia Sostenibile ed il Clima (PAESC) per il Comune di Prato sono state effettuate utilizzando
889 molteplici approcci, i quali hanno previsto sia l'impiego di misure di campo e database territoriali che
890 l'utilizzo di modelli matematici. Gli approcci utilizzati hanno fornito le basi per uno studio, tutt'ora
891 in corso, che si traduce in uno strumento fondamentale non solamente per la pianificazione degli
892 abbattimenti emissivi e della riforestazione urbana nel comune di Prato, ma anche per la creazione di
893 ipotesi di scenari alternativi. In tale contesto, possibili sviluppi futuri legati alle correnti attività di
894 ricerca potranno riguardare due aspetti fondamentali per contrastare l'impatto del cambiamento
895 climatico nel comune di Prato.

896 1) Ipotesi di scenari mitigativi insieme a target di "Carbon neutrality"

897 In questo contesto l'approccio modellistico potrà essere sviluppato per tenere conto di ipotesi
898 addizionali di mitigazione mediante scenari che potrebbero prevedere:

- 899 a. Incrementi in termini percentuali delle superfici verde. Ciò permetterebbe di valutare
900 l'incremento della capacità mitigativa apportata da un aumento delle superfici verdi
901 all'interno del comune di Prato.
- 902 b. Incrementi del volume legnoso. Ipotesi di aumenti volumetrici sulla stessa superficie o su
903 superfici diverse (incrementate o ridotte) permetteranno di valutare la capacità di stoccaggio
904 del carbonio in relazione alle piante utilizzate ed alla loro dimensione/età.
- 905 c. Tipologia di specie. L'approccio modellistico potrebbe stimare il diverso contributo
906 mitigativo sulla base delle modifiche della dimensione e della presenza delle diverse
907 macrocategorie individuate, ovvero cambiamenti nella capacità mitigativa sulla base della
908 maggiore o minore presenza di sistemi caratterizzati da latifolia sempreverde, latifolia
909 decidua, conifere, oliveto, etc.
- 910 d. Utilizzo di diversi scenari climatici. L'applicazione di scenari climatici fornirà un'idea
911 dell'impatto delle modifiche climatiche sulle ipotesi di riforestazione, oltre a fornire in termini
912 quantitativi possibili confronti tra i diversi land-use (attuale contro quello ipotizzabile in
913 futuro)

914 2) Ipotesi di scenari emissivi

916 Tale ipotesi potrebbe prevedere la contabilizzazione delle emissioni su base comunale, utilizzando i
917 dati IRSE. Attualmente, a causa del mancato aggiornamento del dato, il riferimento più prossimo è al

918 1990. Al 2030 dovrebbero essere previsti abbattimenti delle emissioni al 55%, con il raggiungimento
919 della neutralità completa al 2050. Il dataset dovrebbe considerare tutti processi emissivi, la densità
920 abitativa, l'attività industriale e le reti viarie, presentando per ognuno di questi parametri un fattore
921 di emissione che ha una stima valida della CO₂ emessa. La complessità nello sviluppo di questo
922 approccio rispetto a quello identificato nel punto 1 potrebbe ricondursi alla mancanza della
923 componente elettrica, poiché essendo spesso prodotta da un'altra parte risulterebbe di difficile
924 quantificazione.

925 Bibliografia

- 926 1. Baghaeipoor, G.; Nashrollani, N. The Effect of Sky View Factor on Air Temperature in High-Rise Urban
927 Residential Environments. *J. Daylighting* **2019**, 6, 42–51, doi: <http://dx.doi.org/10.15627/jd.2019.6>.
- 928 2. Bonafoni, S.; Sekertekin, A. Albedo Retrieval From Sentinel-2 by New Narrow-to-Broadband
929 Conversion Coefficients. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* **2020**, 17, pp. 1618–1622, 1013, doi:
930 <https://doi.org/10.1109/LGRS.2020.2967085>.
- 931 3. Bruse, M.; Fleer, H. Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three
932 dimensional numerical model. *Environ. Model. Softw.* 1998, 13, 372–384.
- 933 4. Chirici G., Giannetti F., McRoberts R.E., Travaglini D., Pecchi M., Maselli F., Chiesi M., Corona P.
934 (2020). Wall-to-wall spatial prediction of growing stock volume based on Italian National Forest
935 Inventory plots and remotely sensed data. *International Journal of Applied Earth Observation and*
936 *Geoinformation*, 84, 101959.
- 937 5. Fu, P.; Rich, P.M. A Geometric Solar Radiation Model with Applications in Agriculture and Forestry.
938 *Comput. Electron. Agric.* **2002**, 37, pp. 25–35, doi: [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(02\)00115-1](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00115-1).
- 939 6. Gao, L., Wang, X., Johnson, B. A., Tian, Q., Wang, Y., Verrelst, J., ... & Gu, X. (2020). Remote sensing
940 algorithms for estimation of fractional vegetation cover using pure vegetation index values: A review.
941 *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 159, 364–377.
- 942 7. Gardin L., Chiesi M., Fibbi L., Maselli F. (2021). Mapping soil organic carbon in Tuscany through the
943 statistical combination of ground observations with ancillary and remote sensing data. *Geoderma*, in
944 revision.
- 945 8. Giuliacci, M., A. Giuliacci, P. Corazzon. Manuale di meteorologia. Guida alla comprensione dei fenomeni
946 atmosferici e dei cambiamenti climatici. Alpha Test, 4° Edizione 2019, ISBN: 978-88-483-2185-3 ,
947 pp.688
- 948 9. Guerri, G., Crisci, A., Messeri, A., Congedo, L., Munafò, M., & Morabito, M. (2021). Thermal Summer
949 Diurnal Hot-Spot Analysis: The Role of Local Urban Features Layers. *Remote Sensing*, 13(3), 538.
- 950 10. Guha, S.; Govil, H.; Dey, A.; Gill, N. Analytical Study of Land Surface Temperature with NDVI and
951 NDBI Using Landsat 8 OLI and TIRS Data in Florence and Naples City, Italy. *European Journal Remote*
952 *Sensing* **2018**, pp. 667–678, doi: <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1474494>.
- 953 11. Hatfield J. L., Sauer T. J., Prueger J. H. *Radiation Balance*. In: Hillel, D. (ed). *Encyclopedia of Soils in*
954 *the Environment*. Elsevier, Oxford, UK. p. 355–359.
- 955 12. Jiao Z., Ren H., Mu X., Zhao J., Wang T., Dong J. Evaluation of Four Sky View Factor Algorithms Using
956 Digital Surface and Elevation Model Data. *Earth and Space Science* **2019**, 6, pp. 222–237, doi:
957 <https://doi.org/10.1029/2018EA000475>.
- 958 13. Li, F., Chen, W., Zeng, Y., Zhao, Q., & Wu, B. (2014). Improving estimates of grassland fractional
959 vegetation cover based on a pixel dichotomy model: A case study in Inner Mongolia, China. *Remote*
960 *Sensing*, 6(6), 4705–4722.
- 961 14. Ma Q., Wu J., He C..A hierarchical analysis of the relationship between urban impervious surfaces and
962 land surface temperatures: spatial scale dependence, temporal variations, and bioclimatic modulation.
963 *Landscape Ecology* **2016**, 31, pp. 1139–1153, doi: <https://doi.org/10.1007/s10980-016-0356-z>.
- 964 15. Mallick J., Singh C. K., Shashtri S., Rahman A., Mukherjee S. Land surface emissivity retrieval based on
965 moisture index from LANDSAT TM satellite data over heterogeneous surfaces of Delhi city.
966 *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* **2012**, 19, pp. 348–358, doi:
967 <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.06.002>.
- 968 16. Maselli F., Chiesi M., Moriondo M., Fibbi L., Bindi M., Running S.W. (2009). Modelling the forest
969 carbon budget of a Mediterranean region through the integration of ground and satellite data. *Ecological*
970 *Modelling*, 220 (3): 330–342.
- 971 17. Maselli, F., Papale, D., Puletti, N., Chirici, G., Corona, P., (2009). Combining remote sensing and
972 ancillary data to monitor the gross productivity of water-limited forest ecosystems. *Remote Sensing of*
973 *Environment*, 113, 657–667.
- 974 18. Maucha G., Büttner G., Kosztra B.. *European Validation of GMES FTS Soil Sealing Enhancement Data*.
975 In Proceedings of the 31st European Association of Remote Sensing Laboratories Symposium (EARSeL
976 2011): Remote Sensing and Geoinformation not Only for Scientific Cooperation, Prague, Czech Republic,
977 30 May–2 June 2011; pp. 223–238.

19. Mavrakou, T.; Polydoros, A.; Cartalis, C.; Santamouris, M. Recognition of Thermal Hot and Cold Spots in Urban Areas in Support of Mitigation Plans to Counteract Overheating: Application for Athens. *Climate* **2018**, *6*, 16, doi: <https://doi.org/10.3390/cli6010016>.
20. Morabito, M.; Crisci, A.; Georgiadis, T.; Orlandini, S.; Munafò, M.; Congedo, L.; Rota, P.; Zazzi, M. Urban Imperviousness Effects on Summer Surface Temperatures Nearby Residential Buildings in Different Urban Zones of Parma. *Remote Sensing* **2018**, *10*, 17, doi: <https://doi.org/10.3390/rs10010026>.
21. Morabito, M.; Crisci, A.; Guerri, G.; Messeri, A.; Congedo, L.; Munafò, M. Surface Urban Heat Islands in Italian Metropolitan Cities: Tree Cover and Impervious Surface Influences. *Sci. Total Environ.* **2021**, *751*, 142334, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142334>.
22. Morabito, M.; Crisci, A.; Messeri, A.; Orlandini, S.; Raschi, A.; Maracchi, G.; Munafò, M. The Impact of Built-up Surfaces on Land Surface Temperatures in Italian Urban Areas. *Sci. Total Environ.* **2016**, *551–552*, pp. 317–326, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.029>.
23. Munafò, M. (Ed.). Land Consumption, Land Cover Changes, and Ecosystem Services. Report SNPA 15/20, 2020; ISBN 978-88-448-1013-9.
24. Oke, T.R. Canyon Geometry and the Nocturnal Urban Heat Island: Comparison of Scale Model and Field Observations. *J. Climatol.* **1981**, *1*, pp. 237–254, doi: <https://doi.org/10.1002/joc.3370010304>.
25. Renard, F.; Alonso, L.; Fitts, Y.; Hadjiosif, A.; Comby, J. Evaluation of the Effect of Urban Redevelopment on Surface Urban Heat Islands. *Remote Sensing* **2019**, *11*, 299, doi: <https://doi.org/10.3390/rs11030299>.
26. Sobrino, J.; Raissouni, N.; Li, Z. L. A comparative study of land surface emissivity retrieval from NOAA data. *Remote Sensing of the Environment* **2001**, *75*, pp. 256–266, doi: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00171-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00171-1).
27. Sobrino, J.; Jiménez-Muñoz, J. C.; Paolini, L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment* **2004**, *90*, pp. 434–440, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.003>.
28. Toscano, P. (Ed.). Remote Sensing Applications for Agriculture and Crop Modelling. MDPI Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020; ISBN 978-3-03928-226-5.
29. U.S. Geological Survey Landsat 8 (L8). Data Users Handbook. Version 5.0. 2019. Available online: <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-data-users-handbook>.
30. Strategia europea per i cambiamenti climatici, 2003: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52013DC0216&from=IT>
31. SNAC 2012. La Strategia Nazionale di Adattamento ai cambiamenti climatici: https://pdc.minambiente.it/sites/default/files/allegati/strategia_nazionale_adattamenti_climatici.pdf
32. Svenson, M.K. Sky View Factor Analysis—Implications for Urban Air Temperature Differences. *Meteorol. Appl.* **2004**, *11*, 201–211, doi: <https://doi.org/10.1017/S1350482704001288>.
33. U.S. Geological Survey Landsat 8 (L8). Data Users Handbook. Version 5.0. 2019. Available online: <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-data-users-handbook>.
34. Variazioni e tendenze degli estremi di temperatura e precipitazione in Italia, 2013: https://www.isprambiente.gov.it/files/pubblicazioni/statoambiente/SA_37_2013_indici_estremi.pdf.