



**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,*

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

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

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

81 *e) Aumentare gli assorbimenti di carbonio nei suoli, nei sistemi forestali e nelle infrastrutture*  
82 *verdi, che dovrebbero almeno raddoppiare entro il 2050 rispetto ai livelli attuali, per*  
83 *compensare le emissioni incompressibili e consentire un bilancio di emissioni nette pari a*  
84 *zero. Quindi valorizzare la biodiversità nelle città puntando all'incremento dei parchi e dei*  
85 *giardini, delle dotazioni di alberature stradali, dei sistemi di orti urbani; promuovere*  
86 *l'impiego di materiali atti alla cattura, sequestro e stoccaggio della CO<sub>2</sub> attraverso "l'azione*  
87 *di rinnovati involucri architettonici, coperture edilizie, pavimentazioni".*

88 Con delibera n.79 del 24/10/2019, il Consiglio Comunale del Comune di Prato ha condiviso e  
89 approvato la proposta formulata dalla Commissione Europea del "Patto dei Sindaci per il Clima e  
90 l'Energia". Tale proposta è finalizzata al coinvolgimento delle comunità locali alla realizzazione di  
91 iniziative per ridurre nelle città le emissioni di CO<sub>2</sub> e contrastare gli effetti e le vulnerabilità del  
92 cambiamento climatico attraverso l'attuazione di un Piano d'Azione per l'Energia Sostenibile e il  
93 Clima (PAESC). In tale ottica il Comune di Prato in accordo con i ricercatori del Consiglio Nazionale  
94 delle Ricerche, Istituto per la BioEconomia (CNR-IBE), ha pertanto sottoscritto una convenzione  
95 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 CO<sub>2</sub>*

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

127 a) Dato inventariale e rilievi in campo

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

134

135 b) Remote sensing

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

140

141 c) Sistemi informativi geografici

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

149

150 d) Modellistica

151 L'approccio modellistico consta dell'utilizzo di tre modelli diversi. Il modello "C-Fix" è stato  
152 utilizzato per ottenere una stima diretta della produzione primaria lorda (GPP) con fPAR; il modello  
153 "Biome-BGC" è stato utilizzato per ottenere la capacità di immagazzinamento degli ecosistemi in  
154 termini di NEE grazie alla sua capacità di riprodurre i principali processi degli ecosistemi forestali  
155 validato in diversi ecosistemi; ed infine il modello fluidodinamico ENVI-met, un modello  
156 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 **Figura 1.** Geolocalizzazione delle due stazioni di misura Prato\_Urban e Prato\_Rural utilizzate per l'analisi delle  
187 condizioni climatiche nella città di Prato (immagine da Google Earth).

188

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

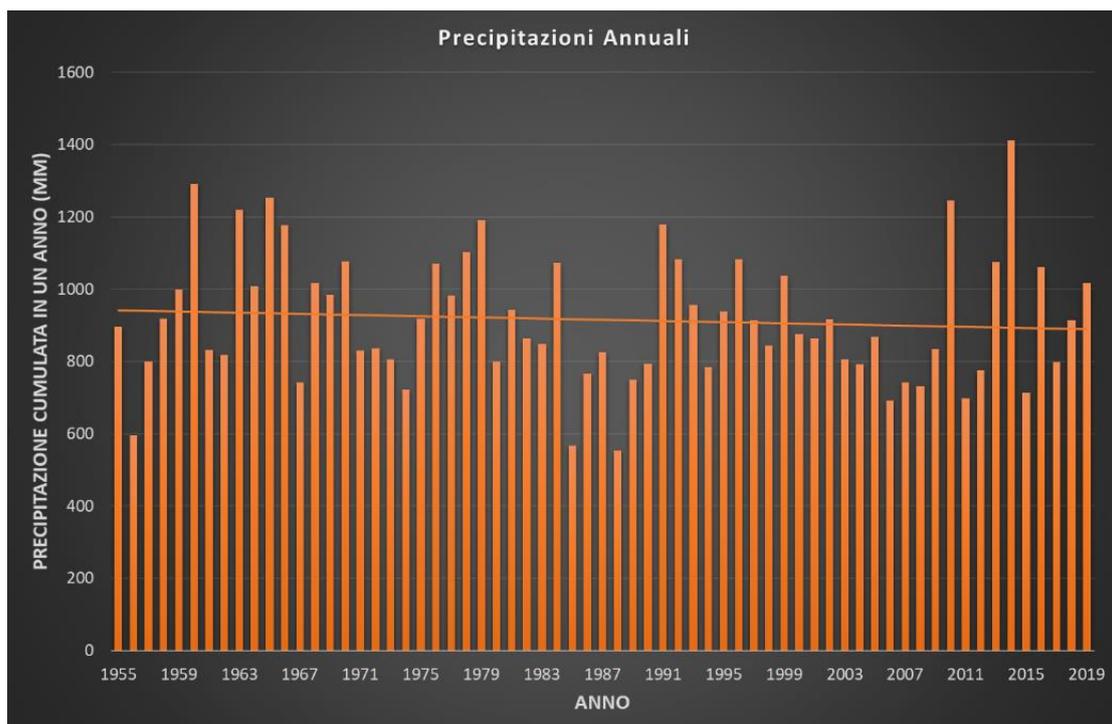


194

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.

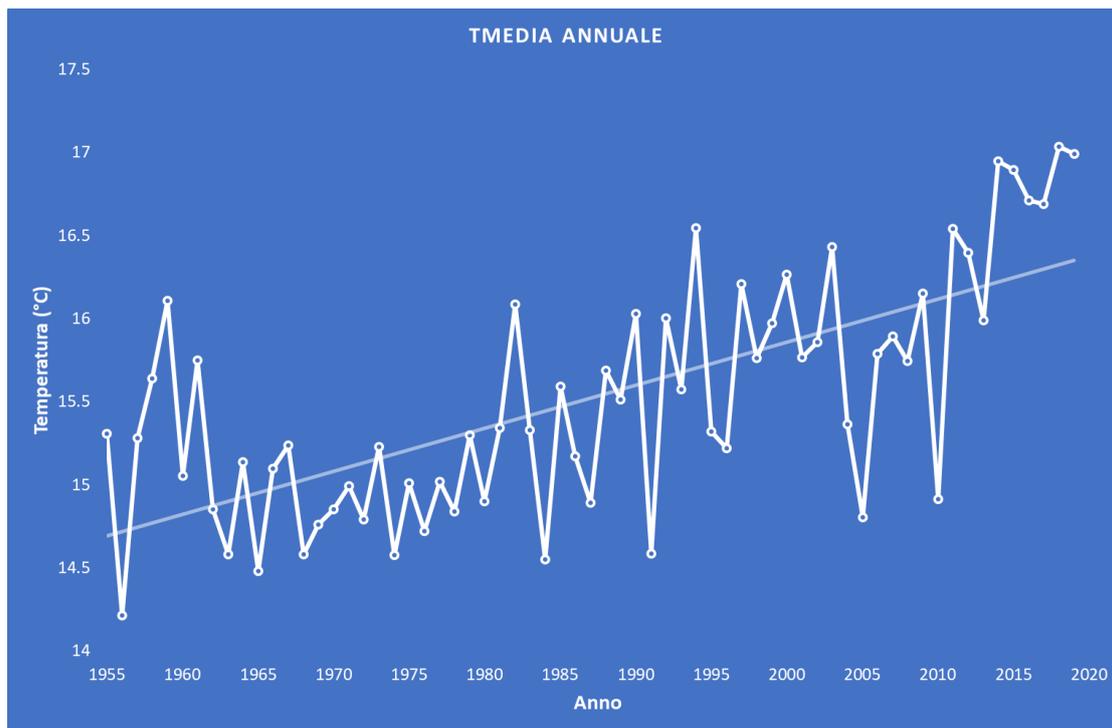


201

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.

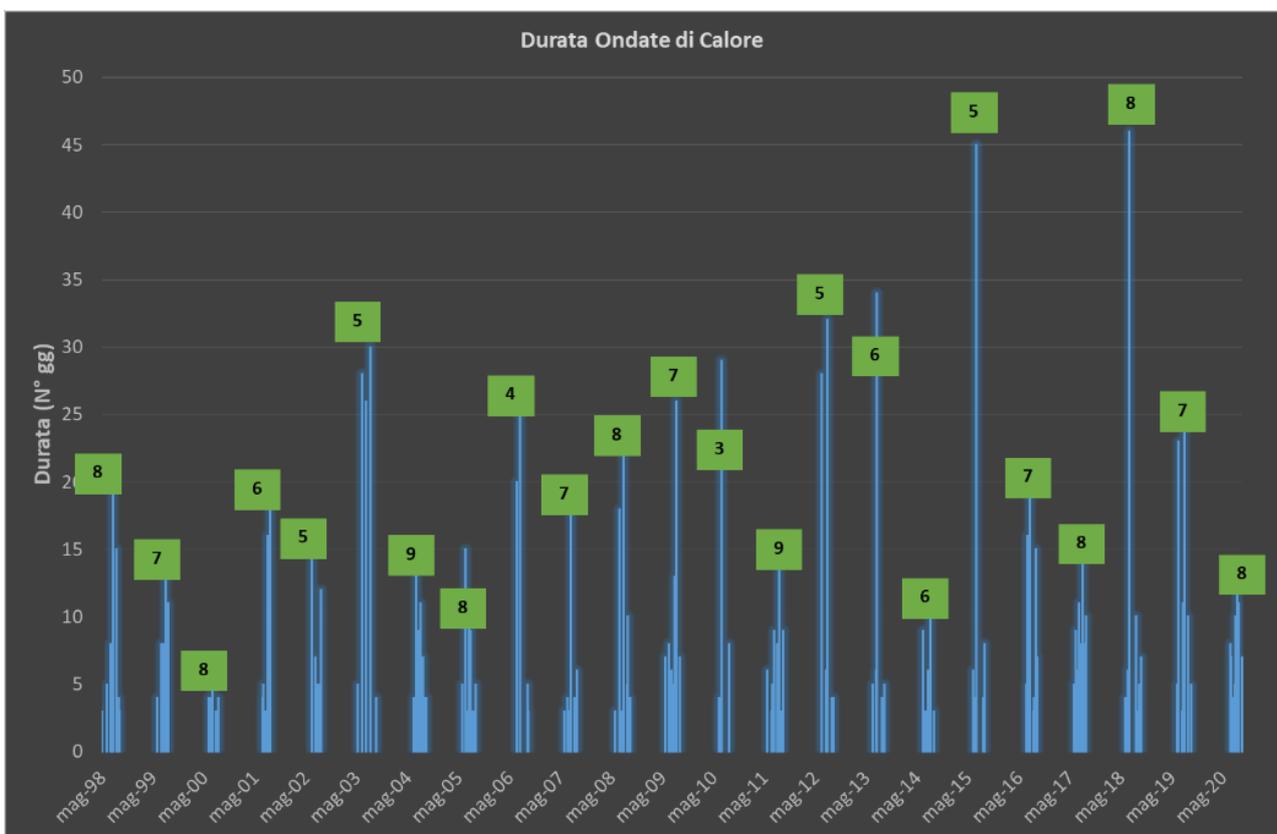
210

### 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.



234

235

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

238

239 La durata in termini di giorni di un'ondata di calore raggiunge anche valori di 45 giorni (nel 2018)  
 240 oppure si hanno tre eventi di durata di 30 giorni come è accaduto nel 2003: questo fa sì che le patologie  
 241 legate alla presenza di un'ondata di calore si siano negli anni aggravate in quanto la persistenza di  
 242 clima torrido e molto umido per un periodo di tempo prolungato porta sicuramente a effetti più gravi  
 243 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 [Giuliacchi 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) aumenta 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

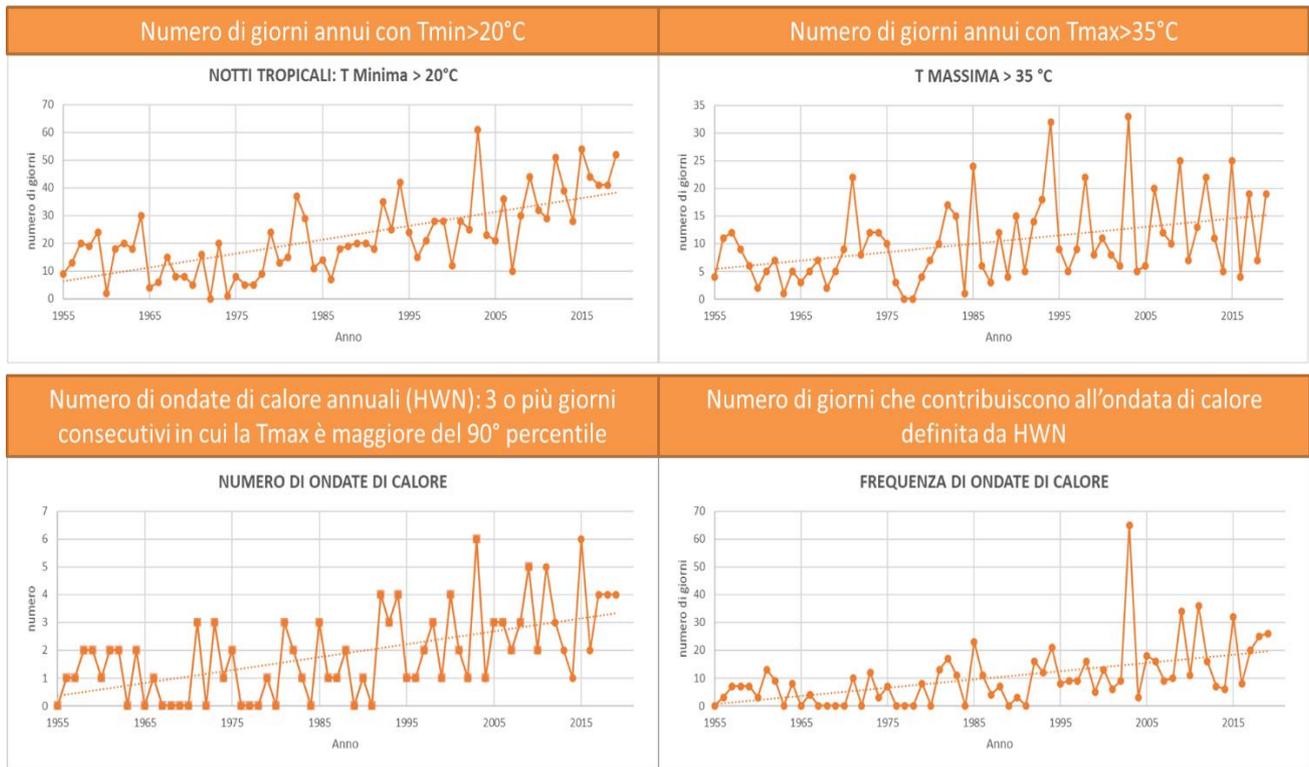
DATA	Precipitazione (mm)	Durata (ore)	tasso prec. (mm/hr)
27/08/1997	43.4	3	14.47
18/11/1999	93.6	6	15.60
09/05/2006	53.6	5	10.72
08/08/2007	64.4	5	12.88
05/10/2010	69.4	3	23.13
26/10/2011	41.2	4	10.30
19/09/2016	65	5	13.00

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](https://epic.awi.de/id/eprint/49274/1/ClimPACTv2_manual.pdf)).

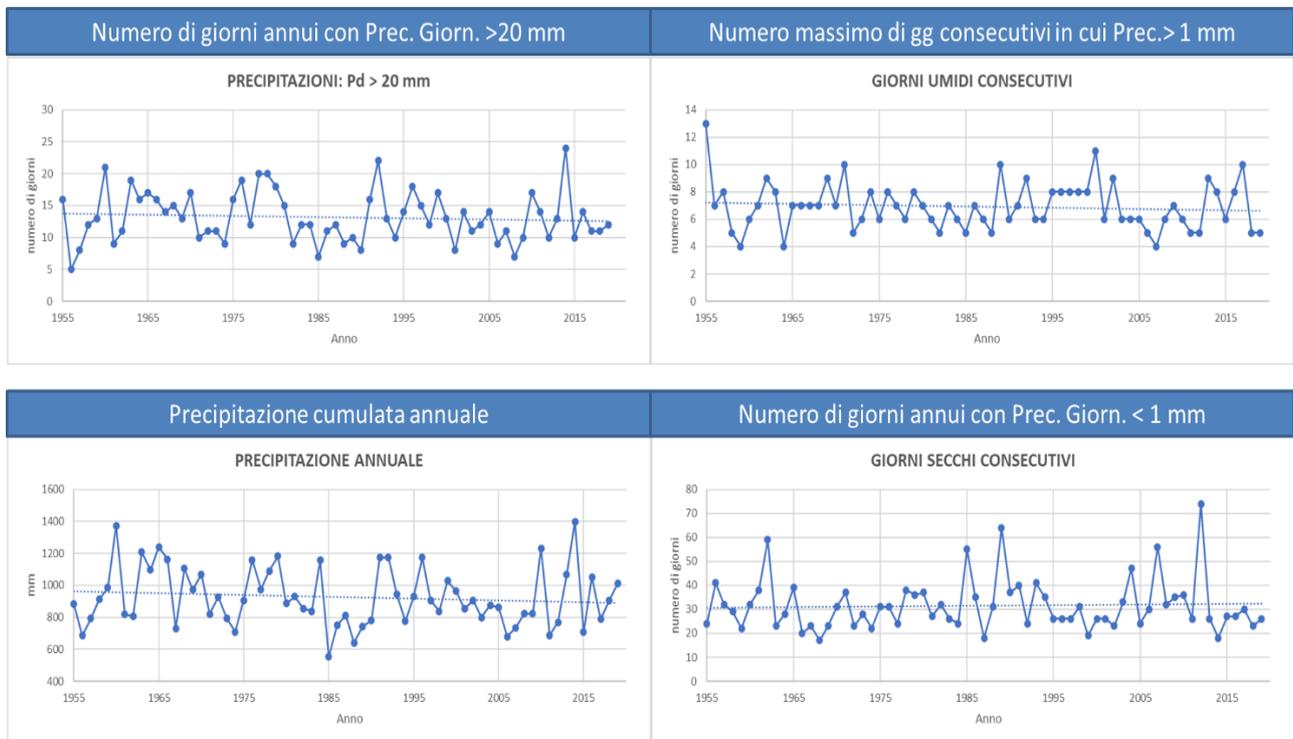
285 In Figura 7 sono riportati gli indici relativi all'aumento di giorni caldi e alle ondate di calore: possiamo  
286 notare come la tendenza di tutti gli indici è un aumento sia delle notti tropicali ( $T_{\text{minima}} > 20^{\circ}\text{C}$ )  
287 che dei giorni estremamente caldi ( $T_{\text{massima}} > 35^{\circ}\text{C}$ ). 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

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

314

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

316

317 **a. Temperatura superficiale diurna estiva**

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

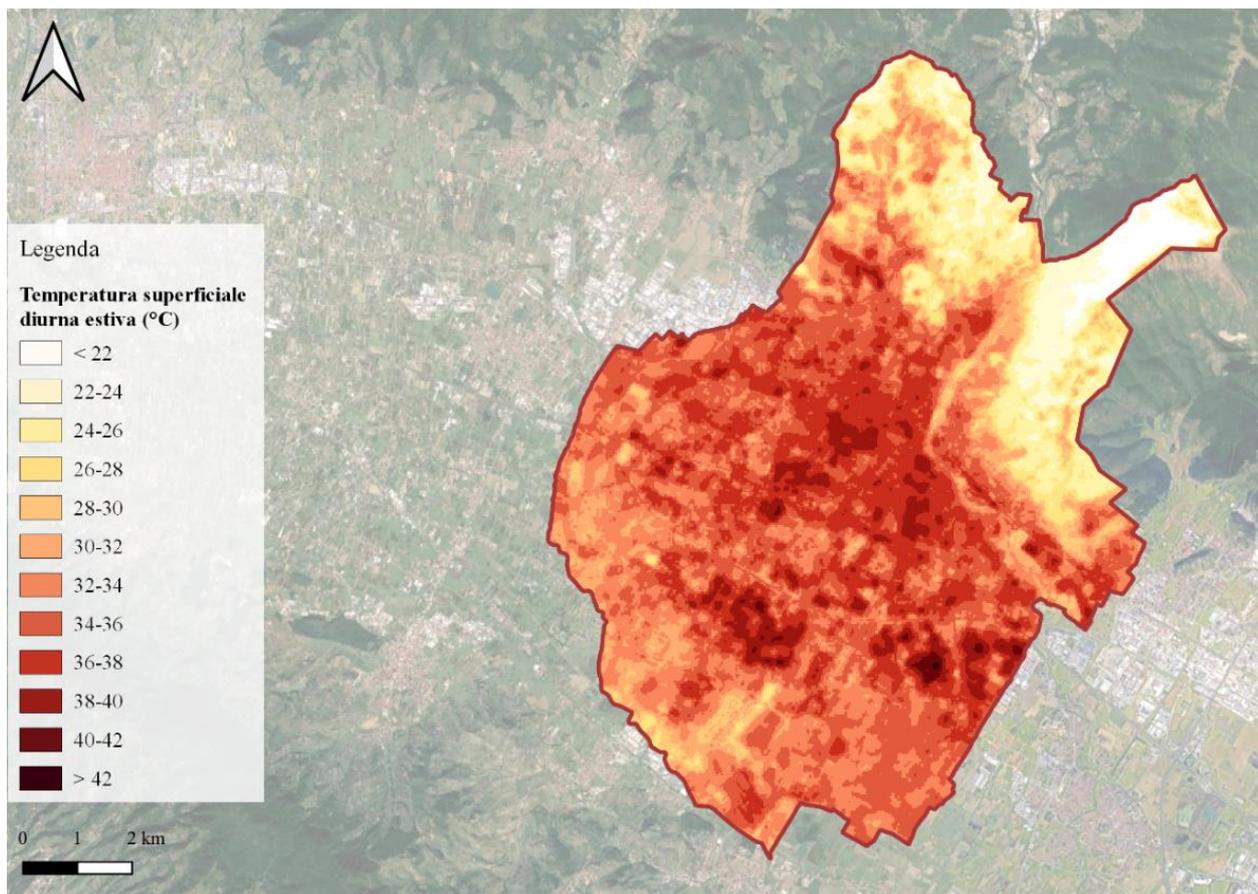
326

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

327

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

329 Il calcolo della LST ha adottato la metodologia ufficiale sviluppata dall'Agenzia U.S. Geological Survey  
 330 (2020) e impiegata in numerose ricerche in ambito internazionale (Sobrino, Rassouni, Li, 2001; Sobrino,  
 331 Jiménez-Muñoz, Paolini, 2004; Mallick et al., 2012; Guha et al., 2018).



332

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

334

335 **b. Intensità dell'isola di calore urbana superficiale**

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

340 
$$UTFVI = (LST - LST_{media}) / LST_{media}$$

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

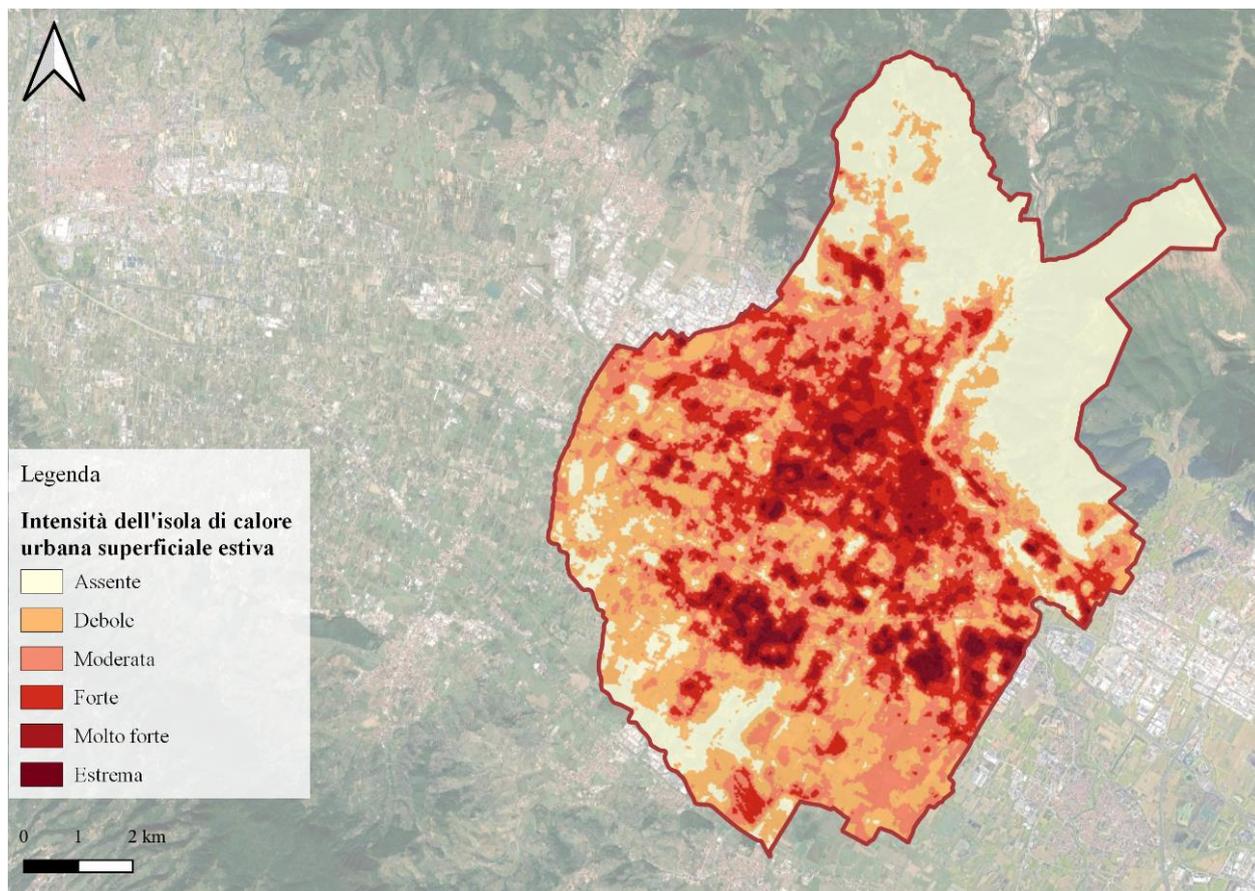
Classi UTFVI	Valutazione ecologica	Intensità SUHI
< 0	Eccellente	Nessuna
0-0.005	Buona	Debole
0.005-0.010	Normale	Moderata
0.010-0.015	Negativa	Forte

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

345

346 **Tabella 4.** Classi di UTFVI.

347



348

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

350

### 351 **c. Anomalie termiche superficiali estive**

352 Le anomalie termiche superficiali sono state definite tramite l'applicazione di un metodo statistico di  
 353 autocorrelazione spaziale di tipo locale (Getis-Ord  $G_i^*$ ) al dataset di LST del periodo 2015-2021. Attraverso  
 354 questo metodo, sono stati individuati spazialmente i *clusters* di punti caldi (*hot-spots*) e freddi (*cool-spots*)  
 355 statisticamente significativi, intesi come punti caratterizzati da valori elevati (o bassi) e circondati da punti con  
 356 valori simili, entro un raggio di ricerca definito dalla risoluzione spaziale del dato di input (Mavrakou et al.,  
 357 2018). L'applicazione dell'algoritmo Getis-Ord  $G_i^*$  ha previsto una categorizzazione in 6 classi di *hot-* e *cool-*  
 358 *spot* su 6 livelli in funzione di livelli di confidenza del 99%, 95% e 90%, in cui si registrano differenti soglie  
 359 di LST media diurna estiva (tab. 3).

360

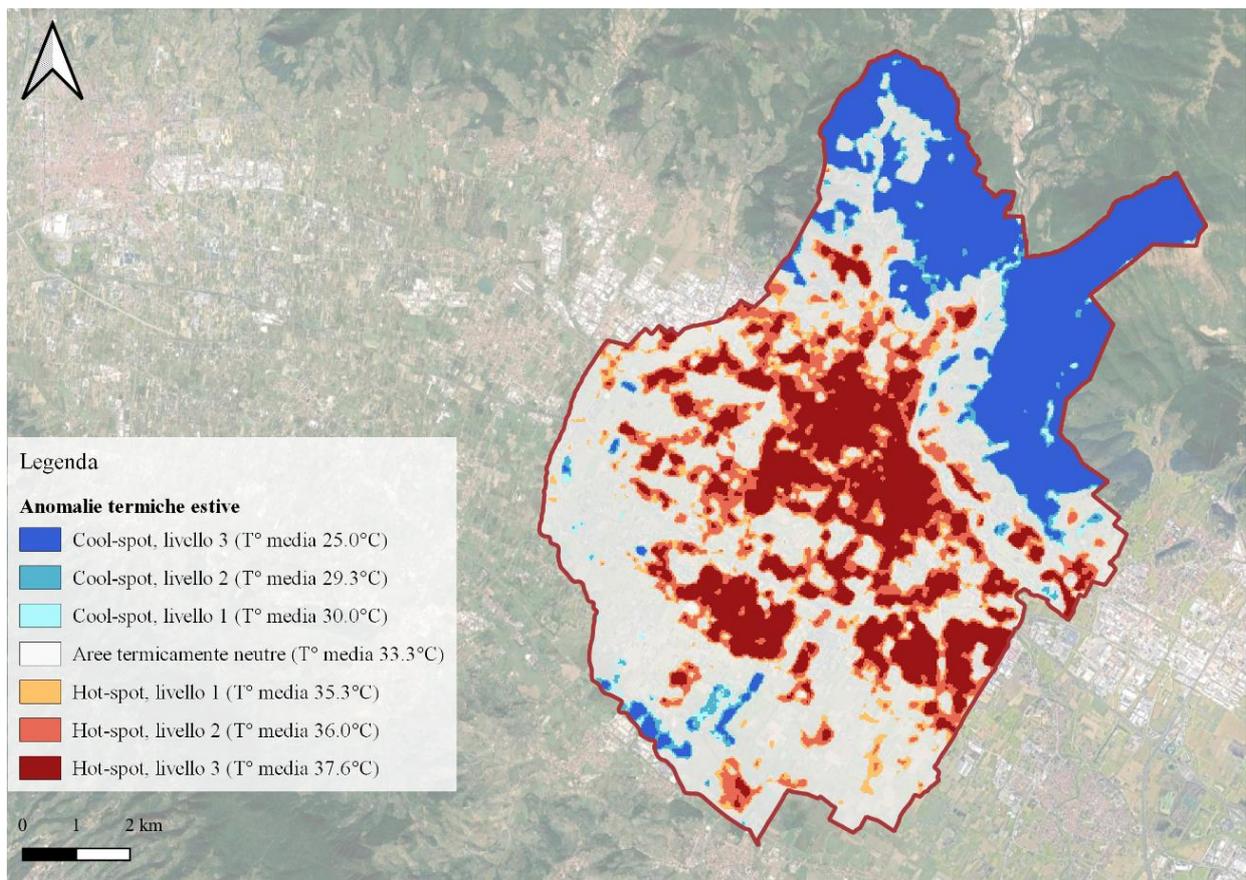
Classi	Livello di confidenza	LST media diurna (°C)	Area (ha) [%]*
Cool-spot, livello 3	99%	28.0	1872.3 [19.2]
Cool-spot, livello 2	95%	29.3	223.6 [2.3]
Cool-spot, livello 1	90%	30.0	134.6 [1.4]
Aree termicamente neutre	-	33.4	4346.3 [44.5]
Hot-spot, livello 1	90%	35.4	583.8 [6.0]
Hot-spot, livello 2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

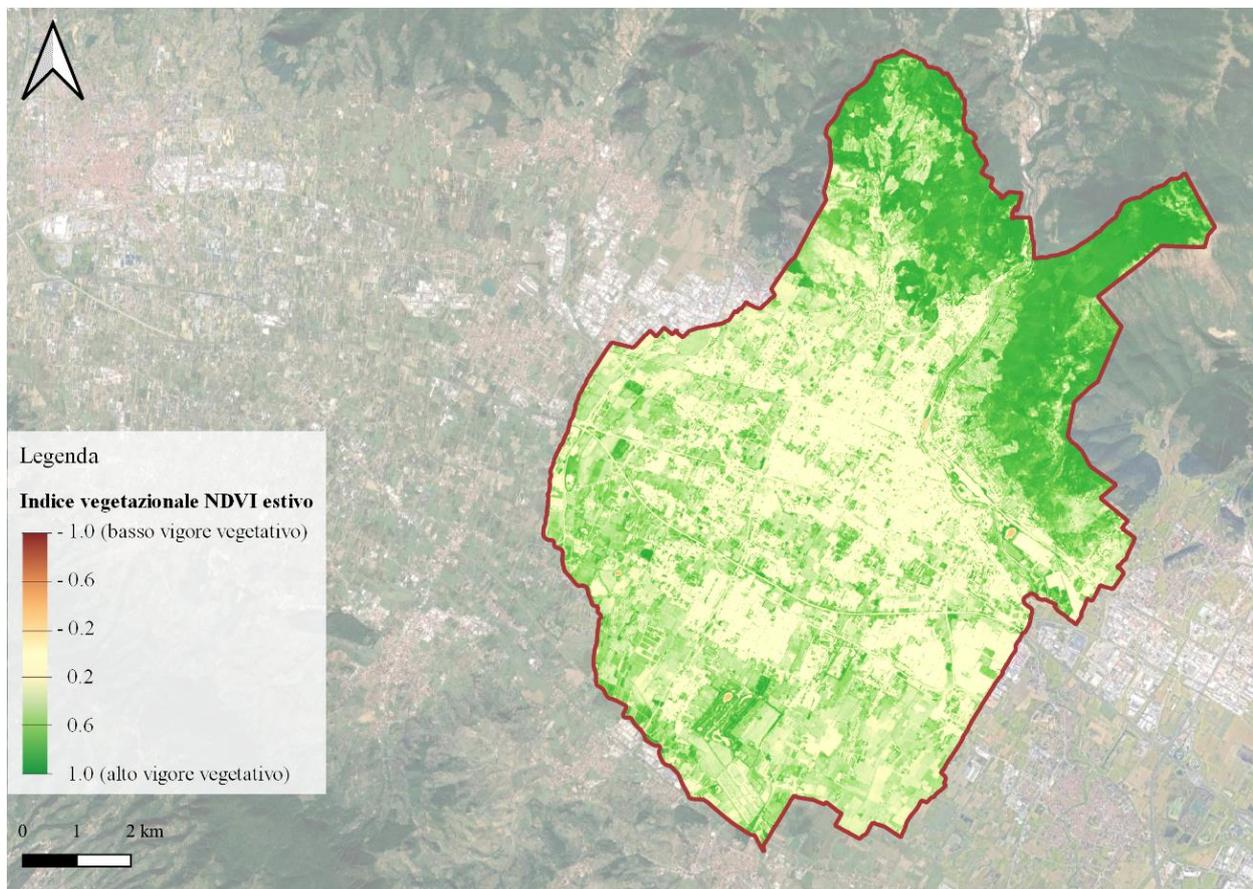
370

371 **d. Indice vegetazionale NDVI estivo**

372 L'indice vegetazionale NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) rappresenta un importante indicatore  
373 negli studi volti a indagare gli effetti della vegetazione sul microclima urbano e il fenomeno SUHI (Ma et al.,  
374 2016; Guha et al., 2018). NDVI è un indice adimensionale che descrive la differenza tra la riflettanza visibile  
375 (RED) e vicina infrarossa (NIR) della copertura vegetale: i calcoli per ciascun pixel restituiscono valori  
376 compresi tra -1 e 1, in cui 0 significa assenza di vegetazione e vicino a +1 indica la massima densità possibile  
377 di foglie verdi.

378 La mappa di NDVI è stata ottenuta dalle immagini acquisite dal satellite Sentinel-2A del programma europeo  
379 Copernicus (*level-2A*) nel periodo estivo 2015-2021, dotate di una copertura nuvolosa inferiore al 10% e una  
380 risoluzione spaziale di 10 m. La formula applicata a ciascun dataset di immagini satellitari è la seguente:  $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$   
381

382



383

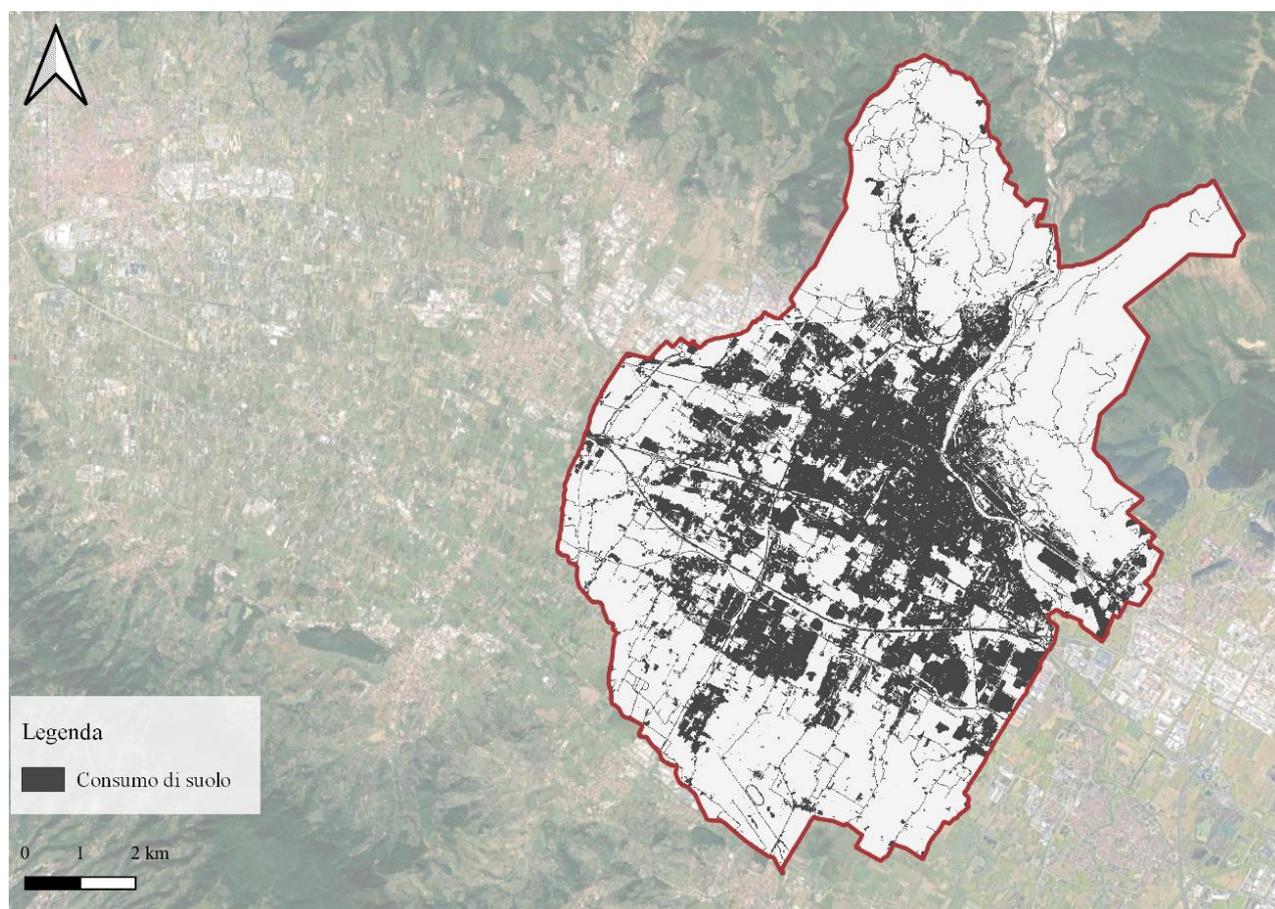
384 **Figura 12.** Mappa del comune di Prato in riferimento all'indice vegetazionale NDVI estivo

385

386 **e. Consumo di suolo**

387 L'indice di consumo di suolo ha evidenziato la concentrazione dell'area urbana, e nello specifico la presenza  
388 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, [ww.isprambiente.gov.it](http://ww.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

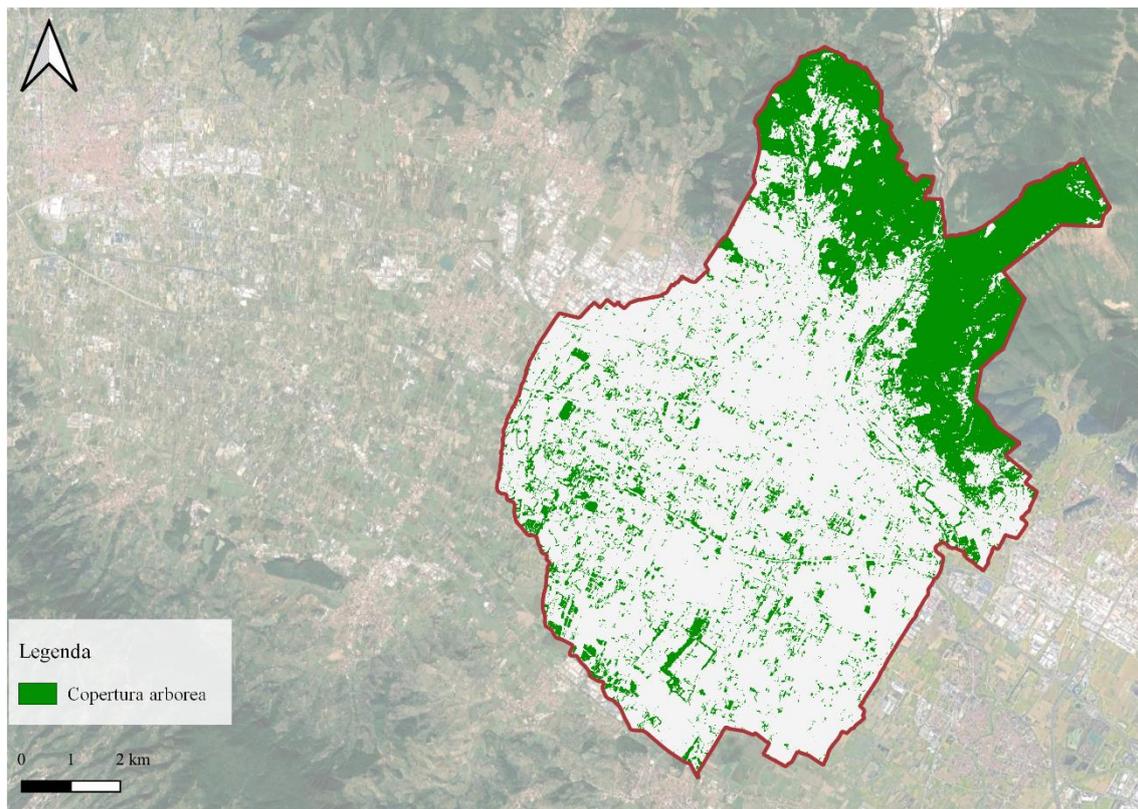
399 **Figura 13.** *Mappa del comune di Prato in riferimento al consumo di suolo*

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

406 all'interno della piattaforma Google Earth Engine (Morabito et al., 2021). Il layer finale è un file  
407 raster binario in cui i valori 0 e 1 indicano rispettivamente le aree non coperte e coperte da alberature  
408 con una risoluzione spaziale di 10 m. Ulteriori specifiche informazioni sulla modalità di elaborazione  
409 del dato sono disponibili sulla piattaforma Zenodo  
410 (<https://zenodo.org/record/3898707#.Xux1vGgzZPY>, doi:10.5281/zenodo.3898707).  
411



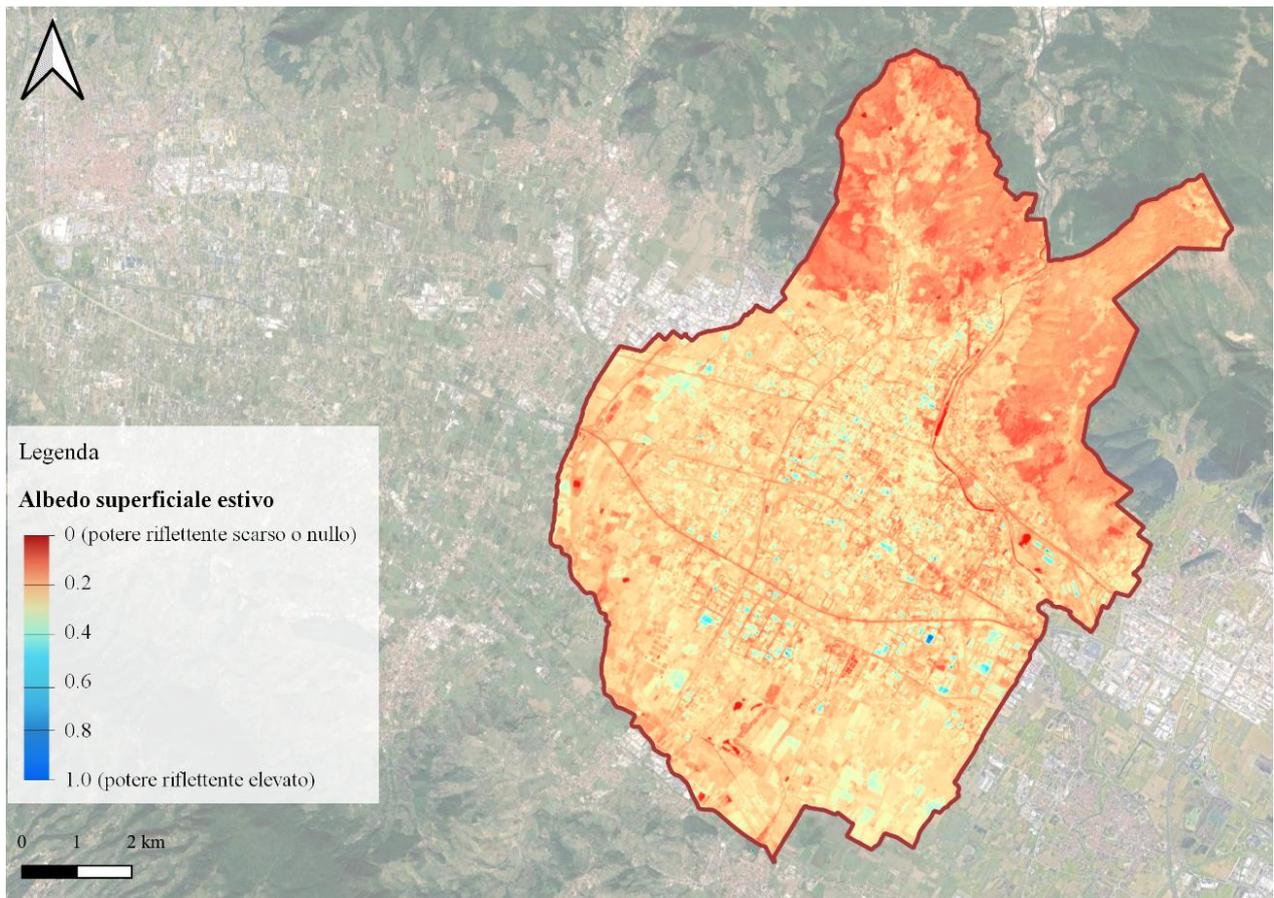
412  
413 **Figura 14.** *Mapa del comune di Prato in riferimento alla copertura arborea*

414

#### 415 **g. Albedo superficiale estivo**

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

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



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

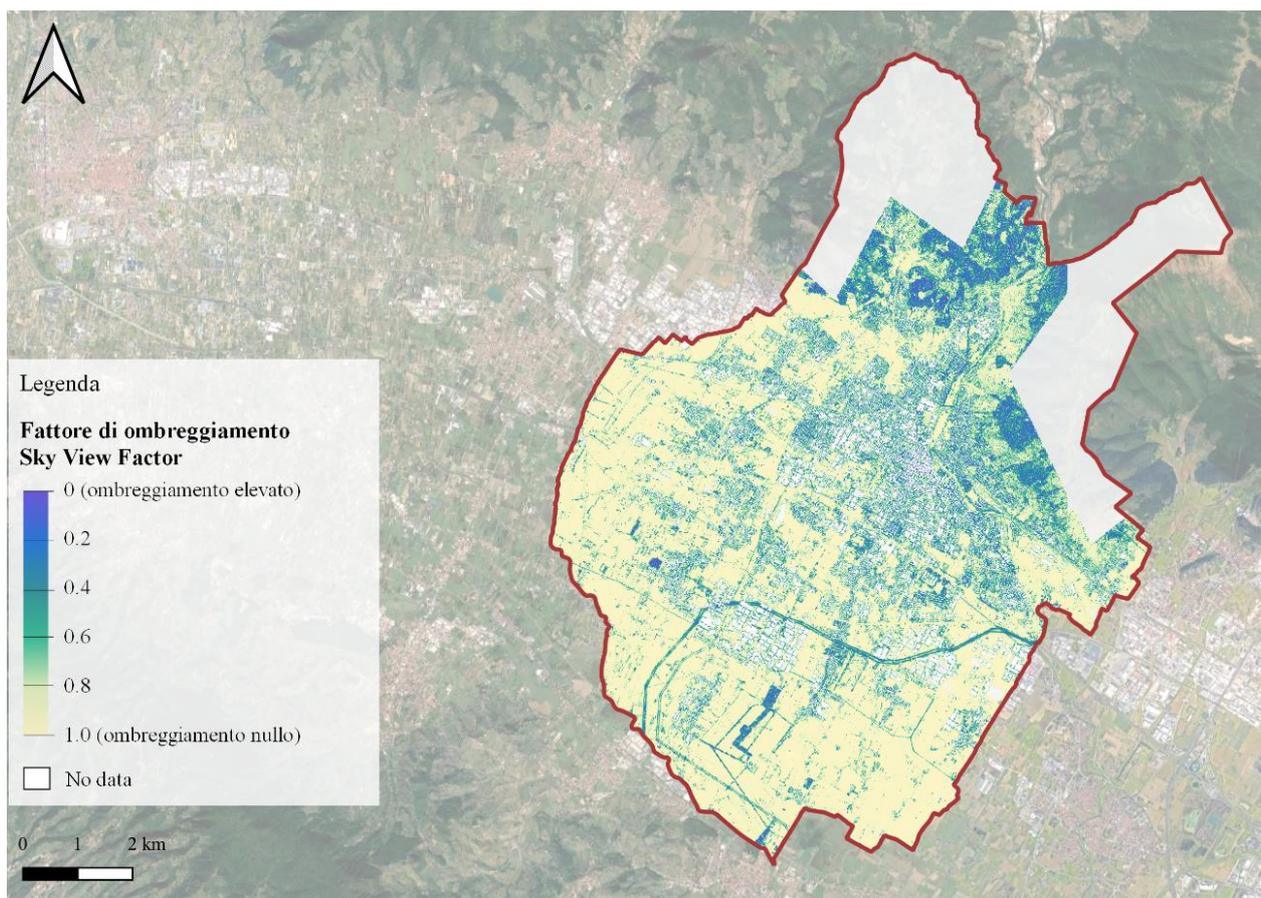
427

#### 428 **h. Fattore di ombreggiamento Sky View Factor**

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

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

438



439

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

441

442 **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

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

445

446 Il livello estremo di hot-spot (livello 3) è caratterizzato dalle distribuzioni più elevate di consumo di suolo  
 447 (87.4%) e più basse di copertura arborea (0.9%), bassi valori di indice vegetazionale NDVI (0.16) e albedo  
 448 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.

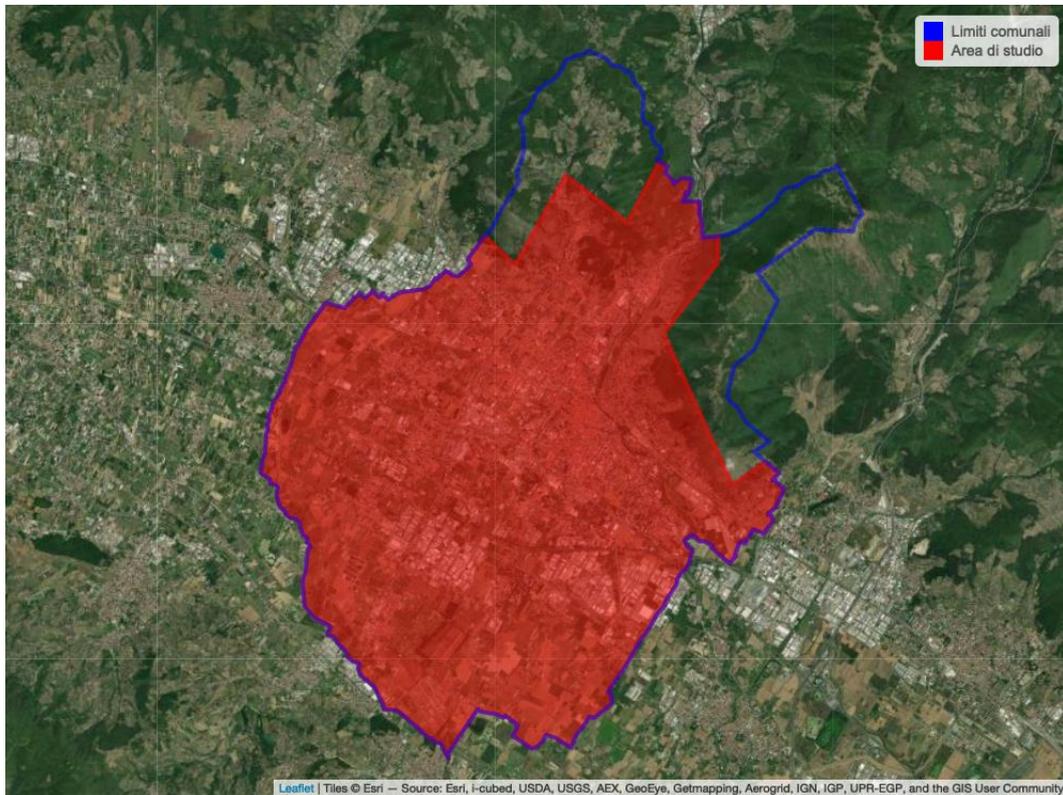
468 Il LST è uno dei prodotti satellitari oggi giorno più comunemente utilizzati per monitorare la  
469 temperatura superficiale e ricavare indicatori di benessere per la popolazione. L'indice LST registra  
470 la temperatura superficiale del terreno e può differire in maniera più o meno sostanziale 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).  
487



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

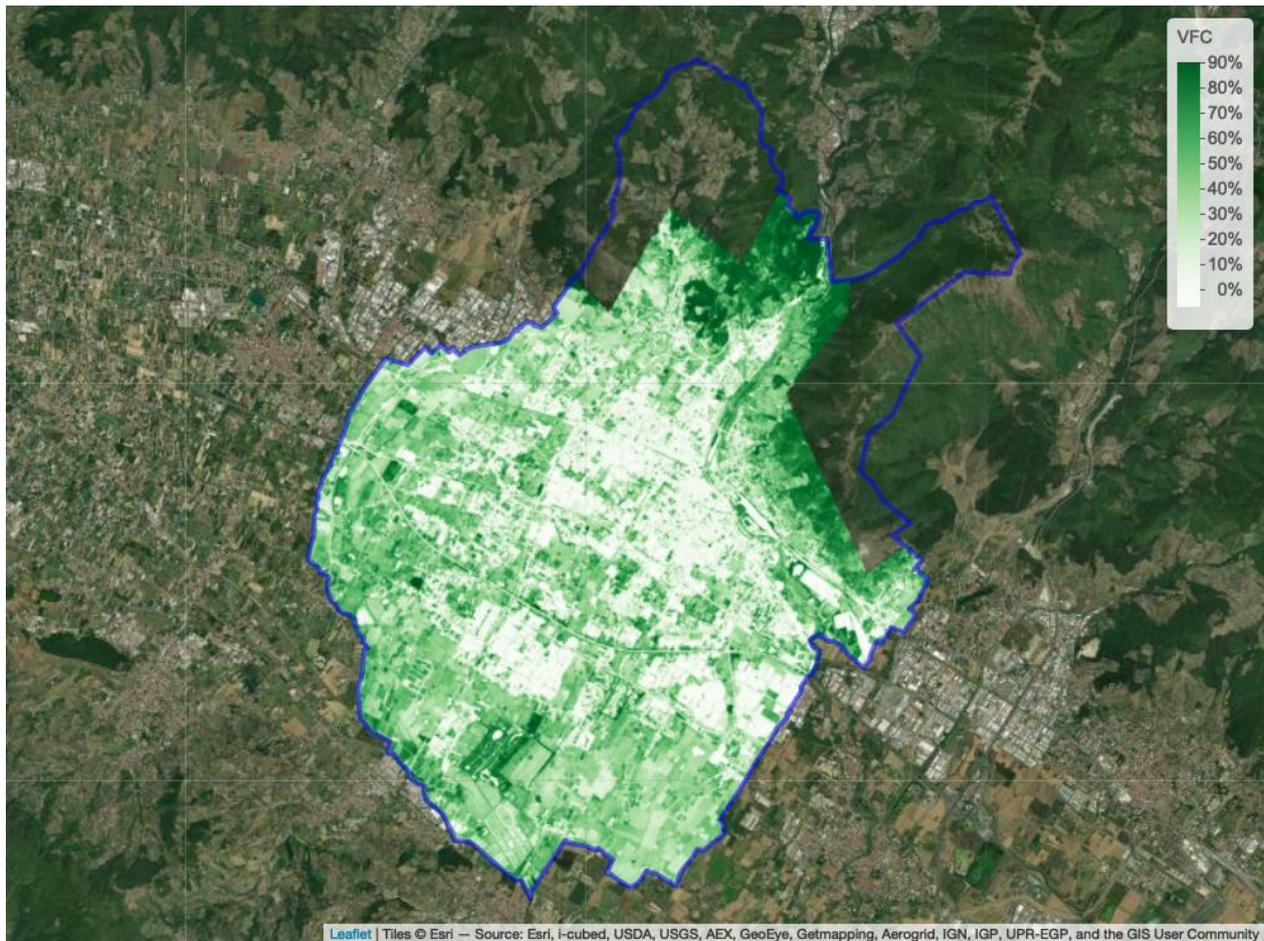
490  
491 L'indice NDVI è stato utilizzato per ricavare la mappa di copertura vegetale del territorio (Figura 17).  
492 La copertura vegetale, espressa in percentuale, è stata calcolata a partire dall'NDVI medio del 2017  
493 ricavato da immagini Sentinel 2 utilizzando l'indice Vegetation Fraction 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:

497

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

498

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).  
502



503

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

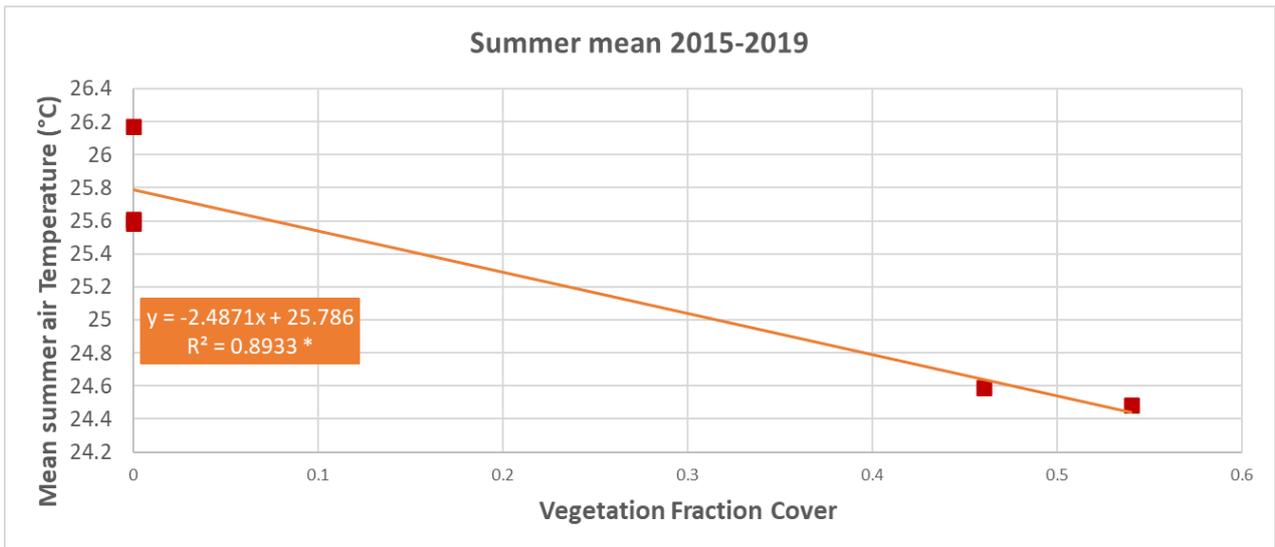
505

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

511

$$512 \quad T_{VFC} = -2.49VFC + 25.79 \quad [2]$$

513



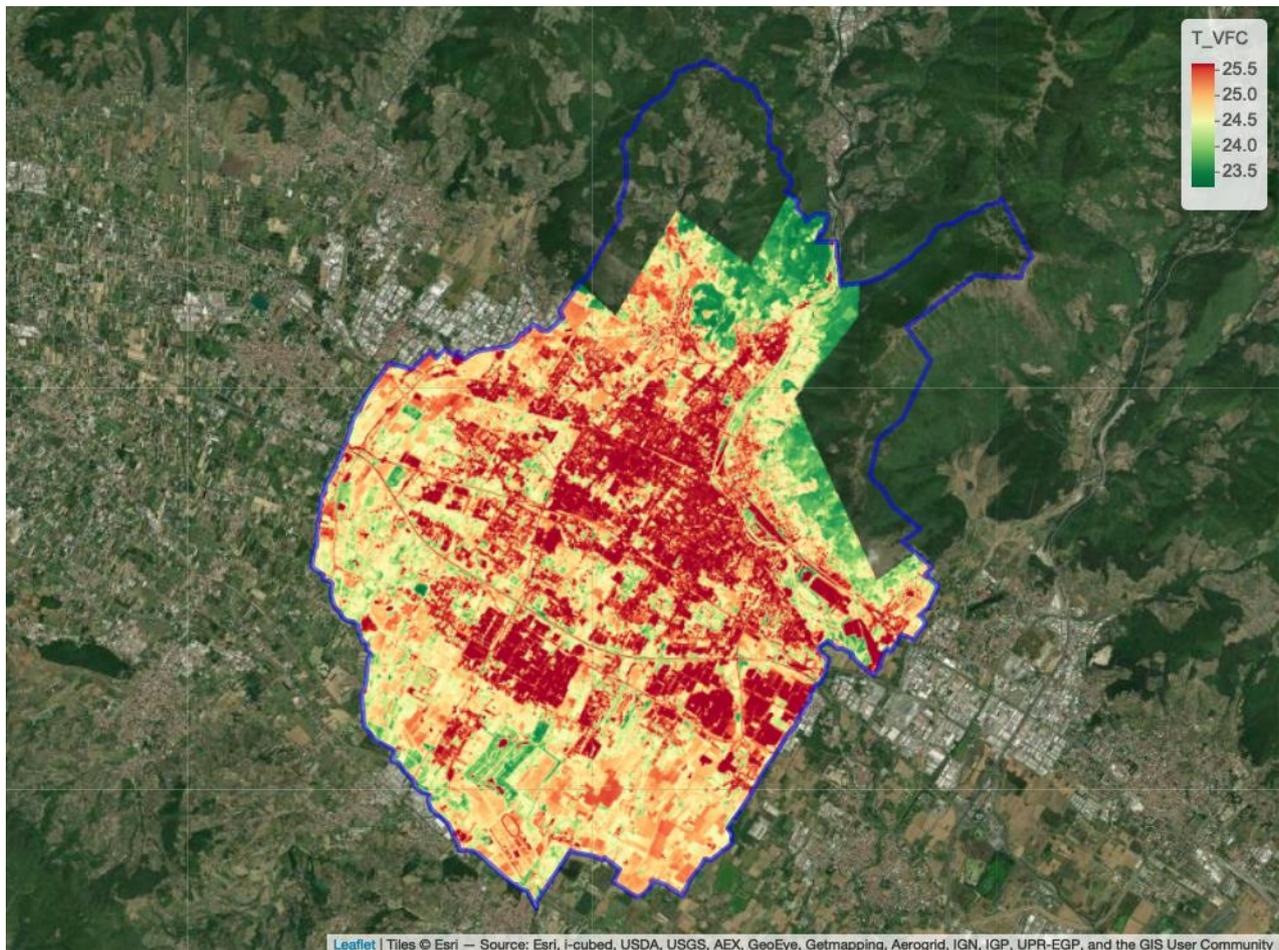
514

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

517

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

520



521

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

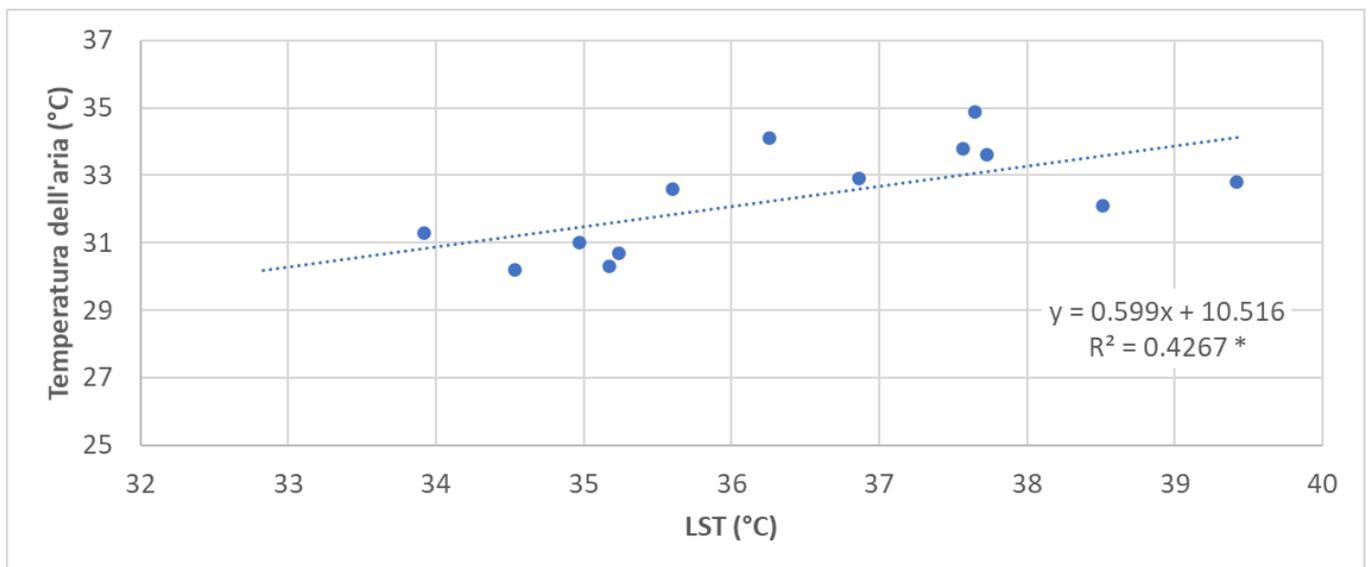
523

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:

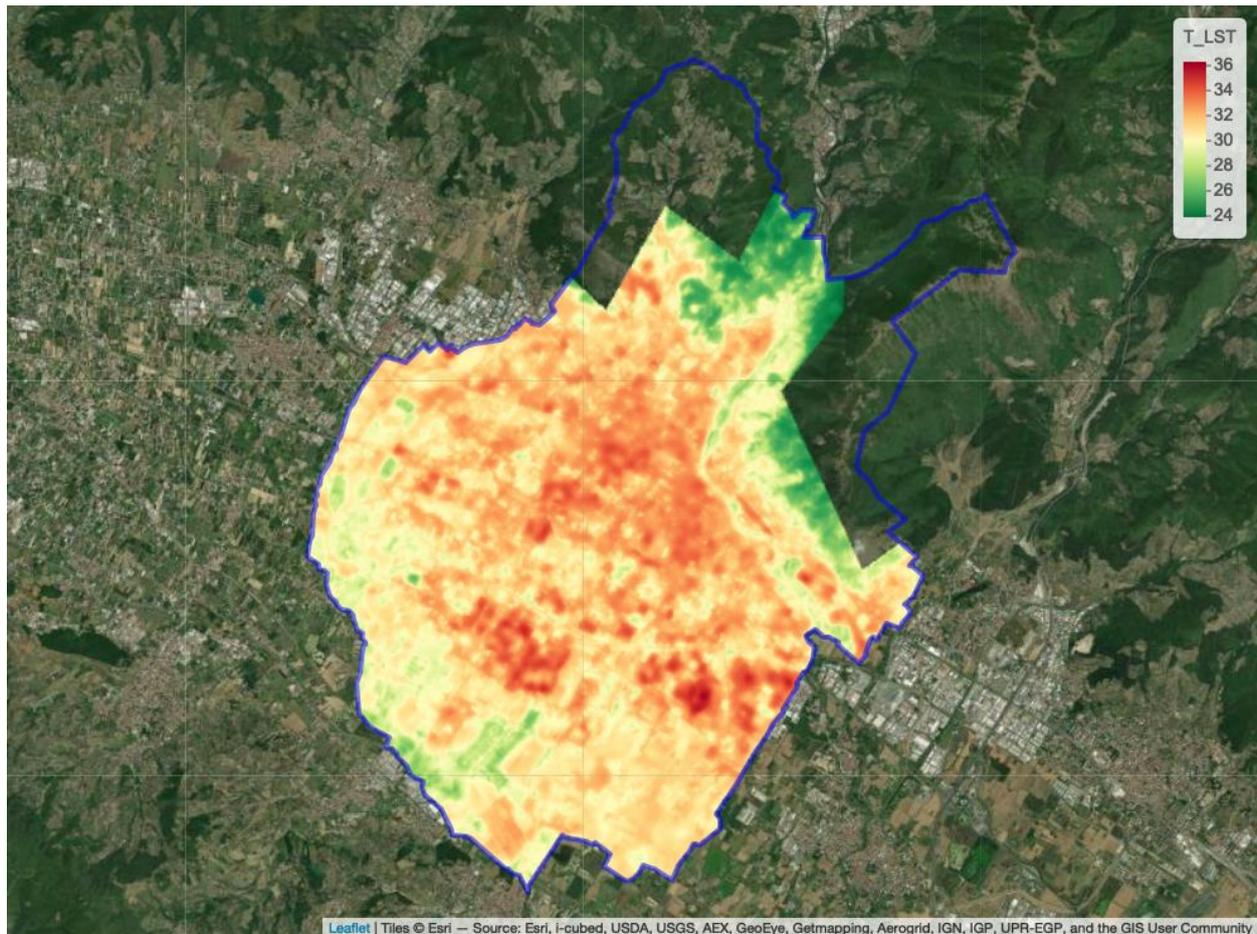
549

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

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

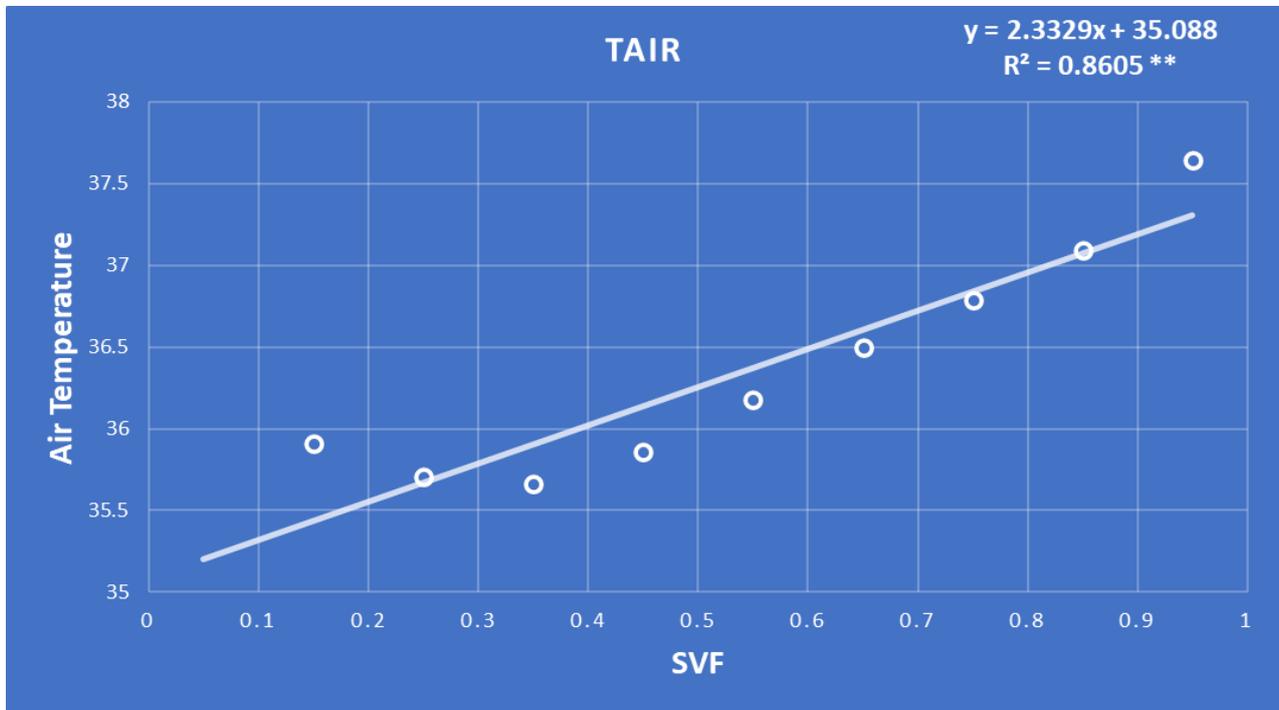
566 (SVF basso) causa una diminuzione della temperatura dell'aria. Attraverso le simulazioni  
567 fluidodinamiche effettuate con il modello ENVI-met (Par. 3.3) sulle tre aree della città di Prato è stato  
568 estratto il valore di SVF calcolato dal modello e messo in relazione con la temperatura dell'aria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

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

576



577

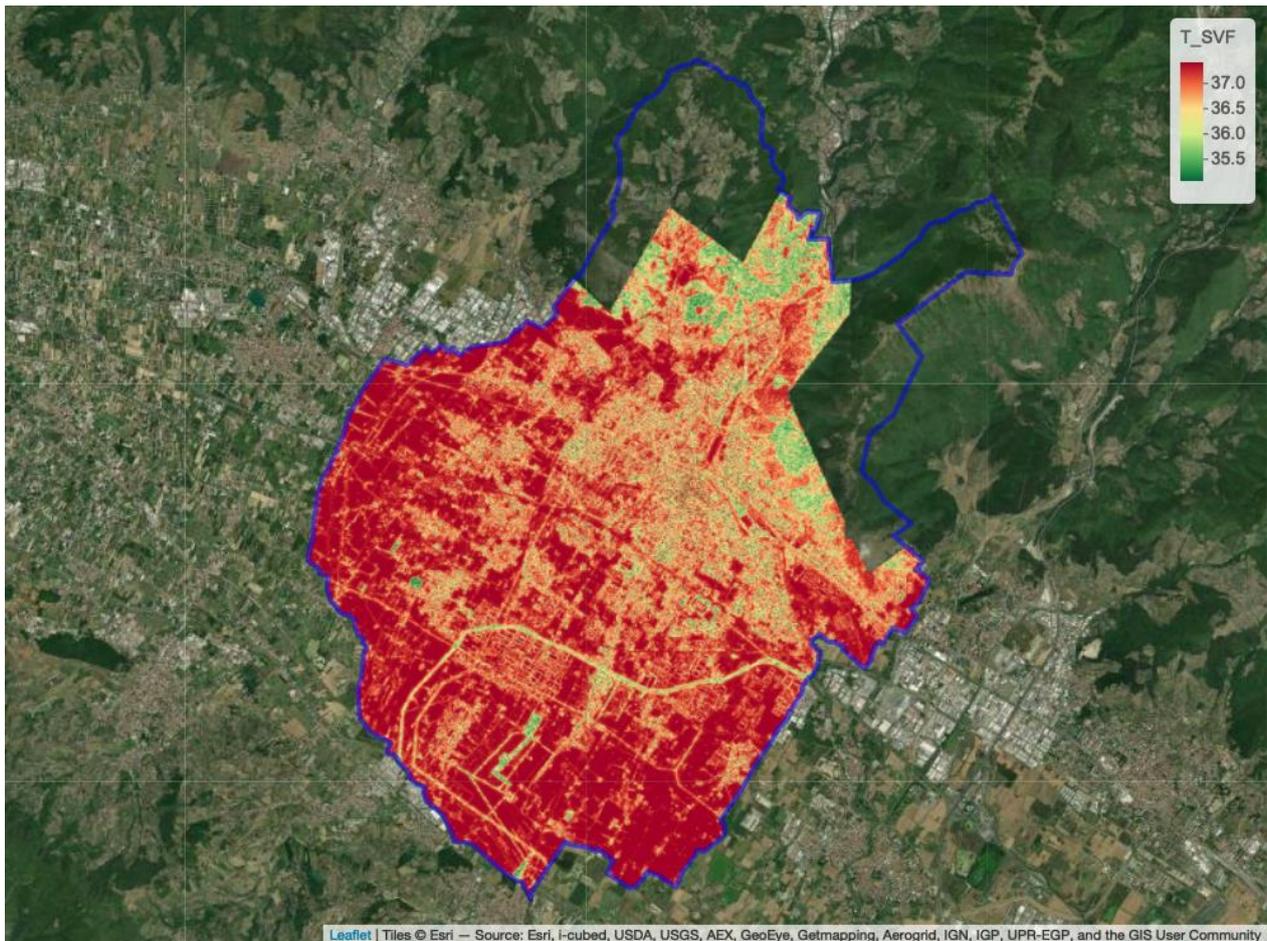
578 **Figura 23.** Relazione tra la media della temperatura dell'aria a 1.8 m alle ore 12:00 ottenuta dal modello ENVI-met per  
579 intervalli di 0.1 dello SVF (\*\*pvalue<0.01)

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



586

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

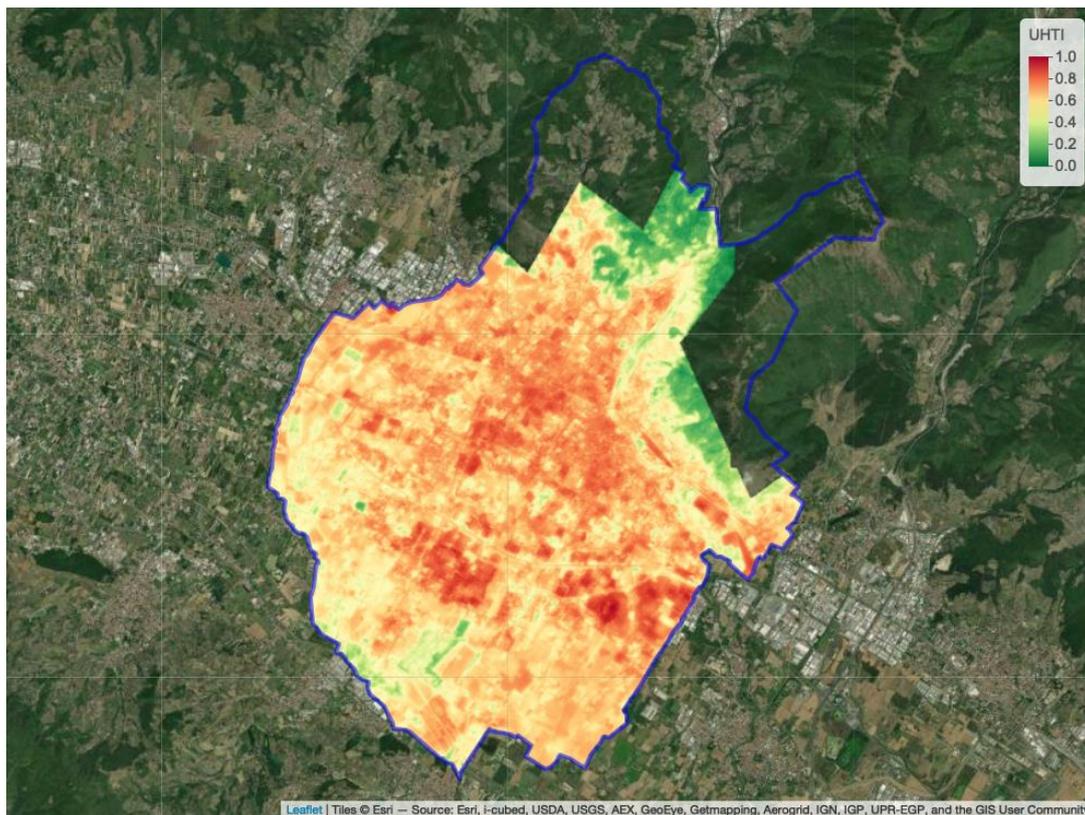
588

589 **Indice UHTI (Urban Heatwave Thermal Index)**

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

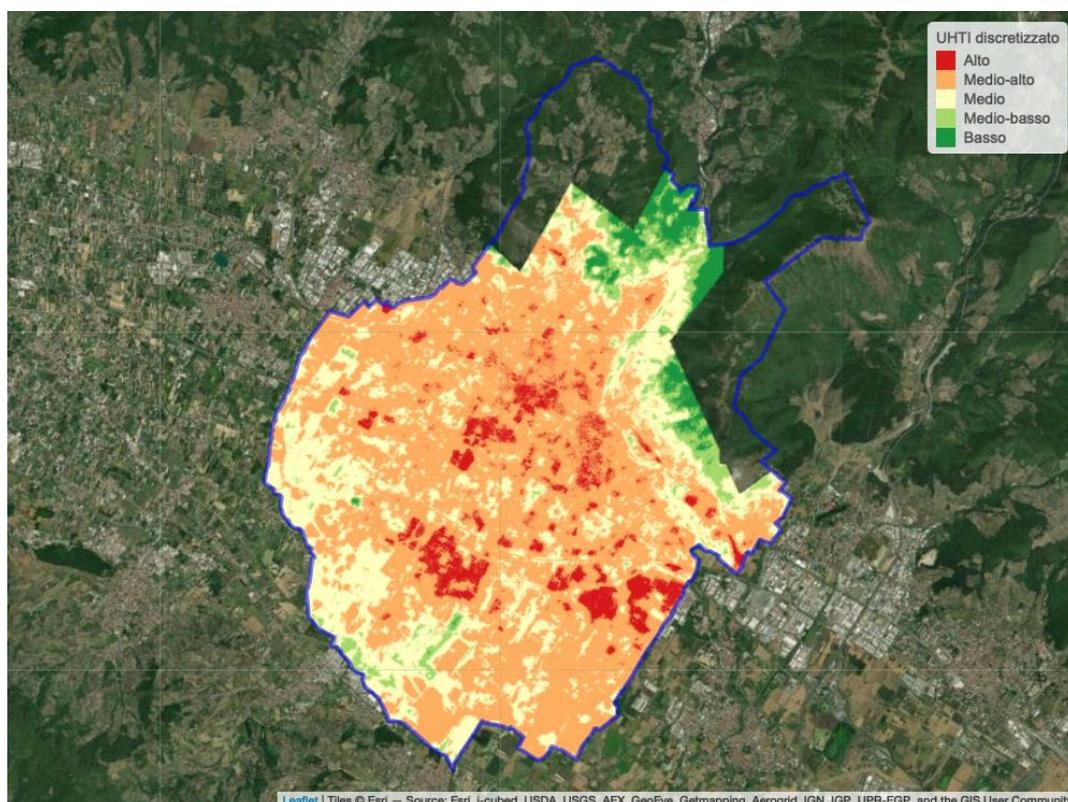
594 La mappa dell'indice UHTI è riportata in Figura 25: si può immediatamente notare che il tessuto  
 595 urbano in termini di densità dell'edificato viene ben rappresentato, anche se l'influenza dei materiali  
 596 evidenzia zone di maggior criticità nelle aree produttive e industriali del Comune. Il centro storico,  
 597 seppur altamente esposto, risulta comunque meno "caldo" durante il giorno grazie all'effetto  
 598 ombreggiamento che è stato rappresentato introducendo la parametrizzazione dello sky view factor.

599 In figura 26 è riportata la stessa mappa UHTI discretizzata tramite classificazione "equal-interval" al  
 600 fine di fornire una lettura facilitata delle aree con valore di indice termico (alto, medio alto, medio,  
 601 medio basso e basso).



602  
603  
604

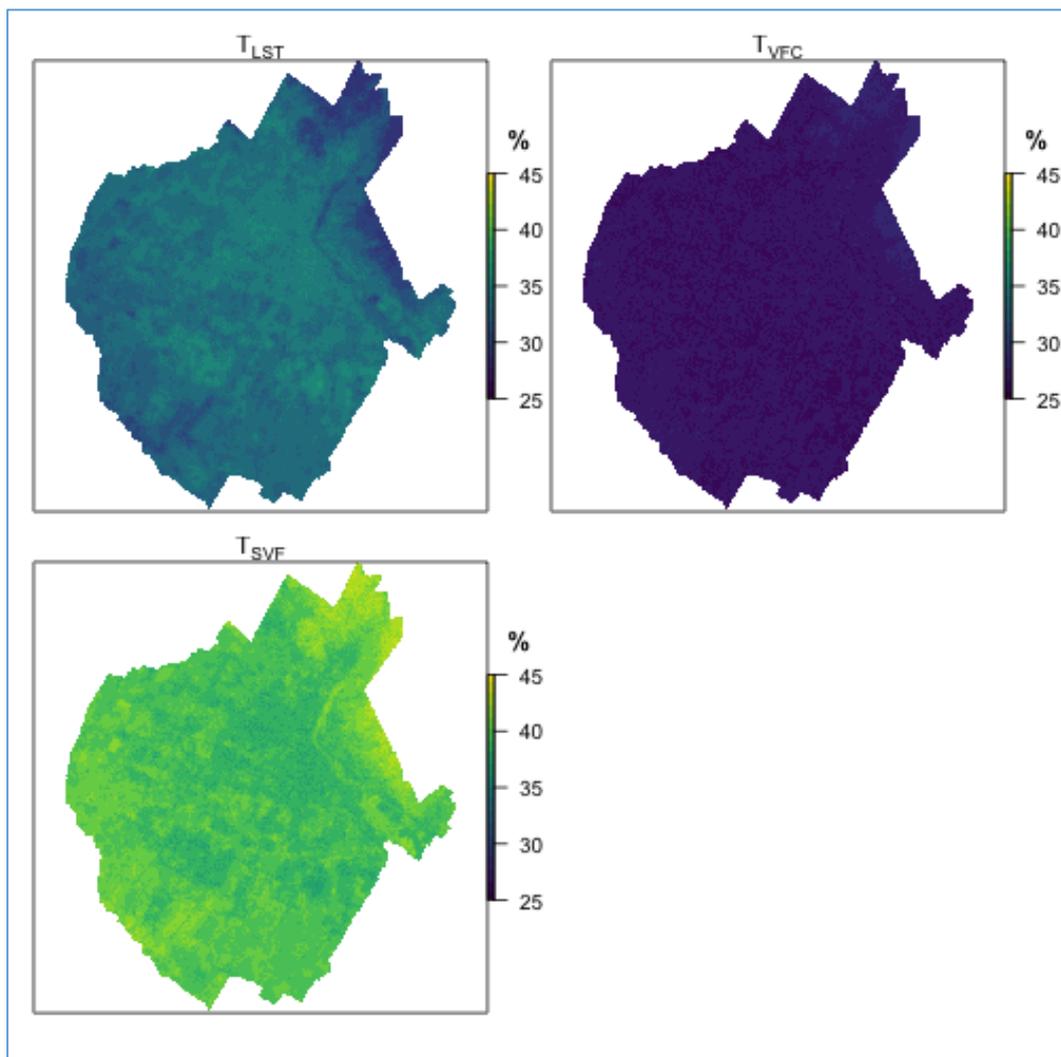
*Figura 25. Mappa UHTI dell'area di studio.*



605  
606  
607

*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.

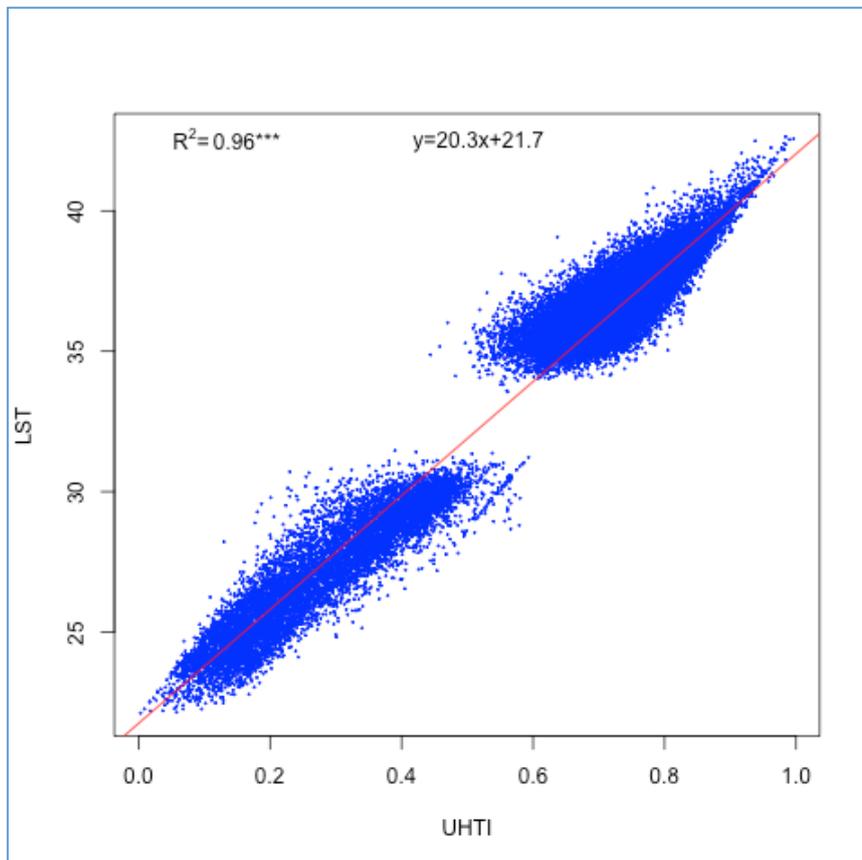
619  
620 **Correlazione fra UHTI e cool/hot spot**

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.

640



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:

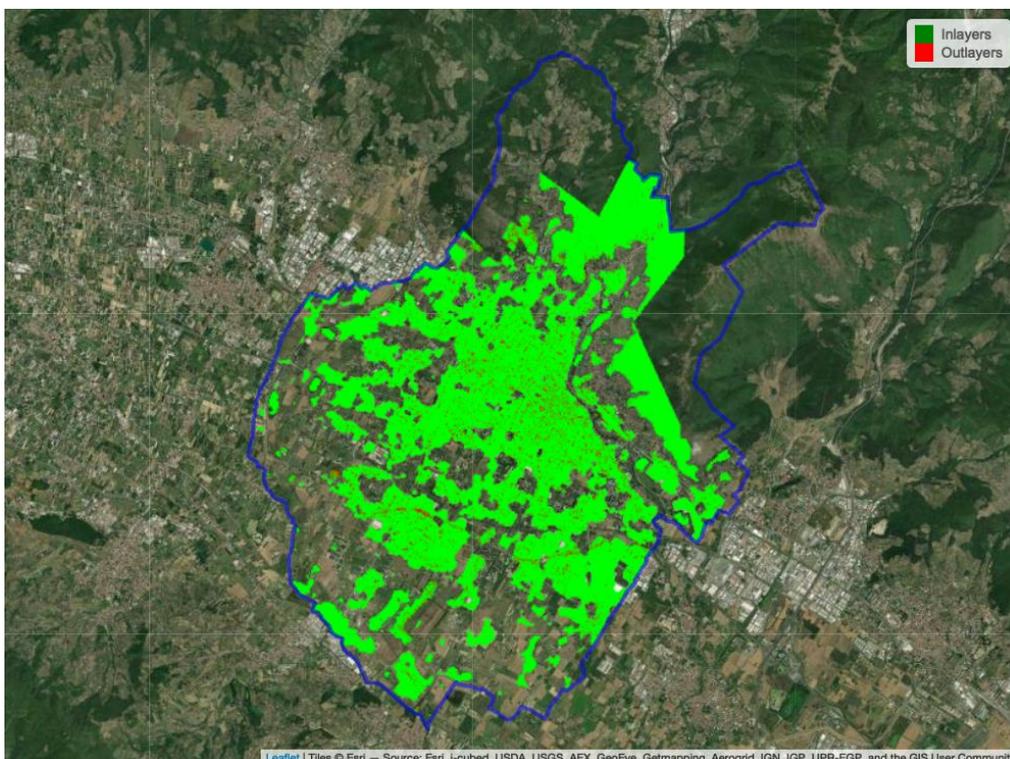
649

$$650 \quad \text{Residuals} = y - \bar{y} \quad [5]$$

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

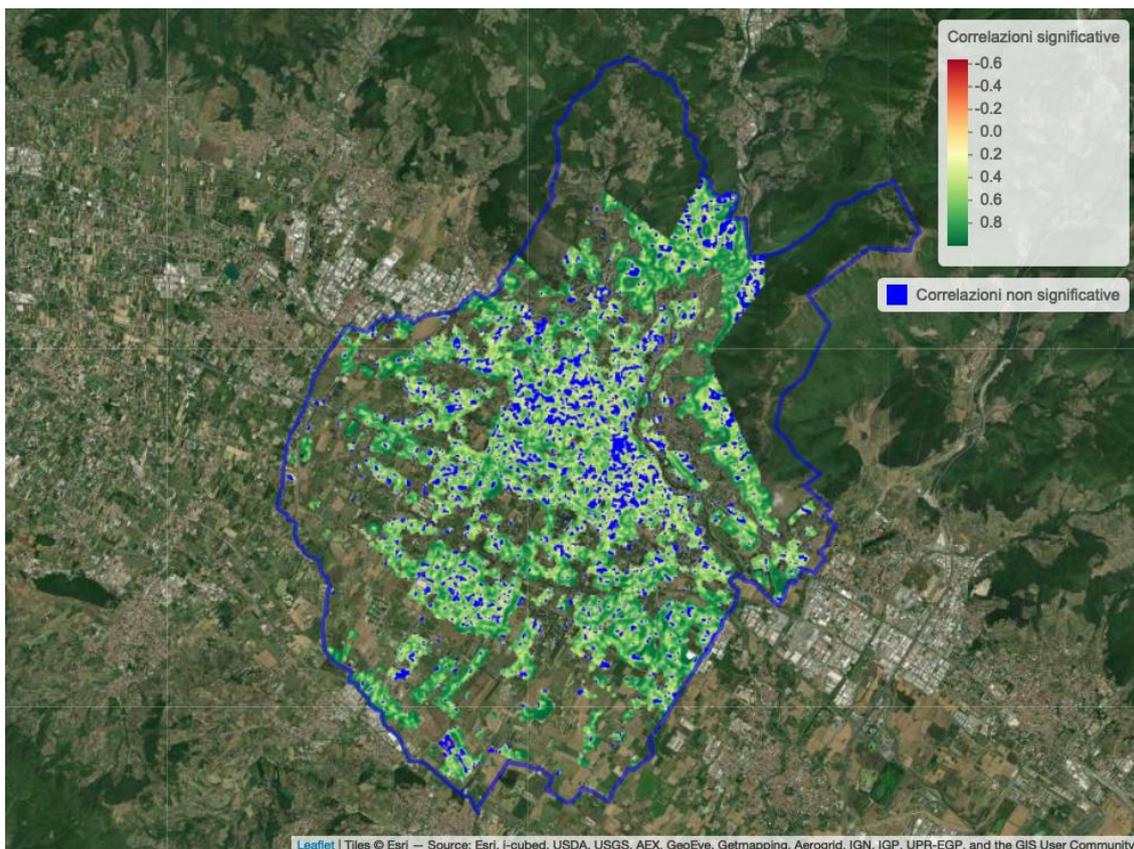


661

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

663

664 Il secondo approccio utilizzato è consistito nell'implementazione di un'analisi di correlazione di  
665 Pearson localizzata tramite uso di una finestra mobile di dimensione 9\*9 pixel. In figura 30 viene  
666 mostrata la mappa ricavata da tale analisi. Ciò che è più interessante notare sono i pixel blu, che  
667 rappresentano i pixel per i quali non vi è una correlazione statisticamente significativa ( $pvalue > 0.05$ )  
668 fra i layer LST e UHTI; si può apprezzare come essi siano particolarmente presenti nelle aree del  
669 centro e in altre aree del centro abitato caratterizzate da un fitto tessuto urbano, confermando quindi  
670 quanto emerso con il primo approccio utilizzato.  
671



672  
673 **Figura 30.** Mappa delle correlazioni localizzate tramite uso di finestra mobile di 9\*9 pixel.

674  
675 I risultati ottenuti mostrano, che in prima analisi, per ottenere le aree di hot e cool spot di un'area  
676 urbana, può essere sufficiente considerare la temperatura superficiale (LST) al fine di fornire  
677 informazioni alle pubbliche amministrazioni di quali sono le aree che maggiormente si scaldano  
678 durante un'ondata di calore; l'indice UHTI, d'altra parte, offre un contributo più completo in quanto  
679 considera tutti i parametri che condizionano la temperatura dell'aria durante un'ondata di calore e in  
680 assenza di movimento di masse d'aria. Inoltre, grazie a questo indice, verrà realizzata una mappa di  
681 fragilità microclimatica dando informazioni sull'indice di comfort nell'intero territorio comunale al  
682 fine di individuare le aree dove è maggiormente necessario intervenire per il benessere delle fasce  
683 deboli della popolazione maggiormente esposte alle ondate di calore.

684                   **3.1.5. Individuazione di un set di strategie percorribili per l’adattamento e la**  
685                   **mitigazione agli eventi estremi e ai cambiamenti climatici / Selezione delle**  
686                   **strategie operative per la definizione di un percorso di adattamento**

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

693

694                   **3.2. Assorbimento di carbonio**

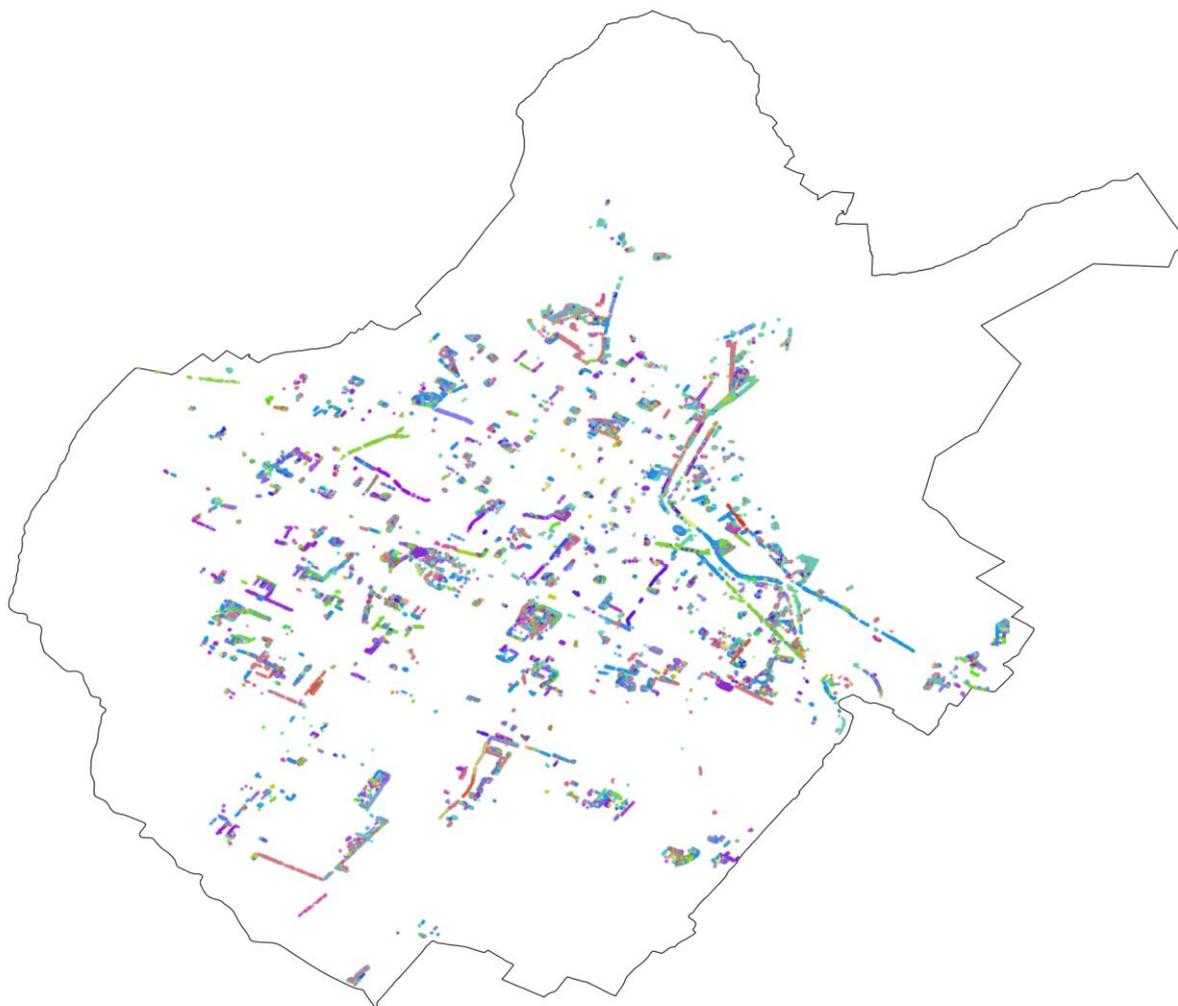
695 Per la valutazione della capacità di assorbimento del carbonio, l’analisi ha tenuto di un approccio integrato  
696 tra i dati inventariali (3.2.1), analisi da sistemi informativi geografici (GIS) (3.2.2) e modellistica (3.2.3).  
697 L’obiettivo finale era infatti quello di applicare una metodologia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

700

701                   **3.2.1. Dati inventariali ed analisi GIS**

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

709



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

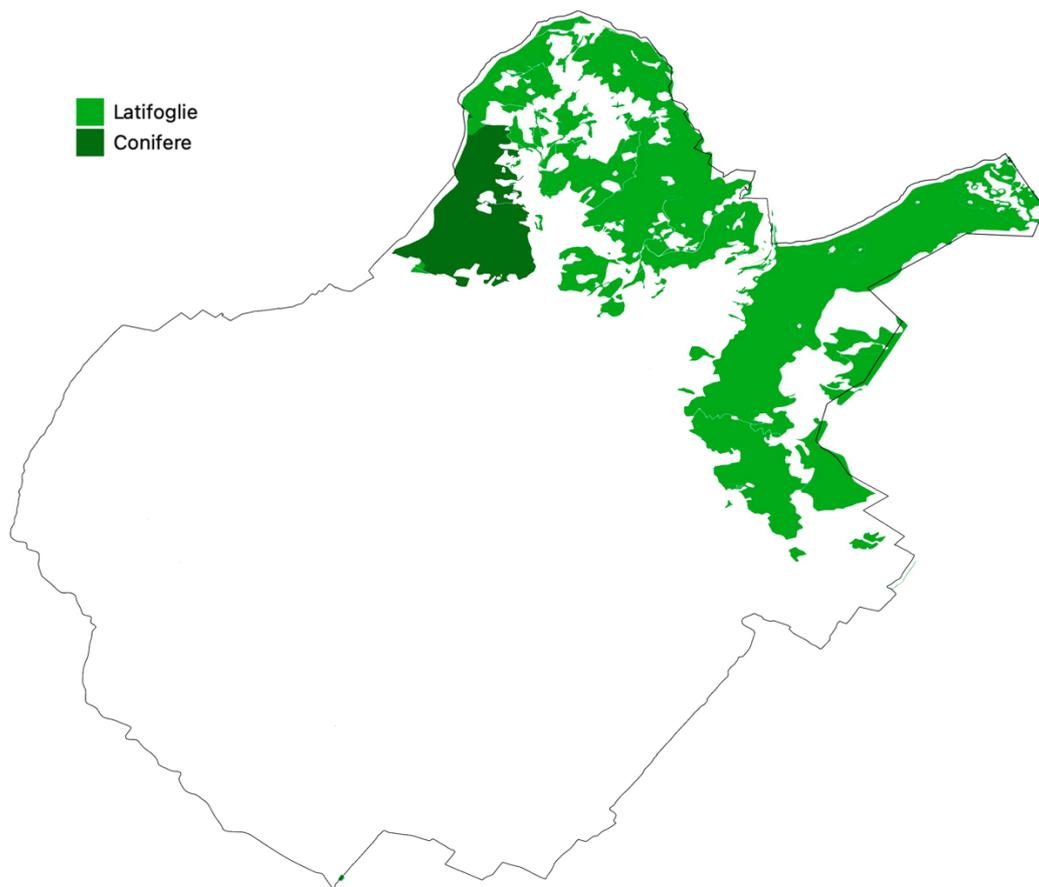
4		Betula	Pendula	20	52.0	40.0
5		Carpino	Betulus (bianco), Carpinifolia (nero)	783	53.0	16.9
6		Catalpa	Bignonoides	55	95.0	30.3
7		Cedrus	Atlantica, deodara, libano, calocedro	782	162.0	51.6
8		Celtis	Australis, Levigata	1345	68.0	21.7
9		Conifere	Picea, Abies	51	75.0	23.9
10		Corylus	Avellana, Colurna	114	19.0	6.1
11		Cupressus	Sempervirens, Leylandi, Arizonaica, 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	Calleriana, 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
<b>TOT calcolate</b>				26356	84.1	28.5
<b>TOT Dataset</b>				28431		
<b>% copertura</b>				<b>92.7</b>		

722

723 *Tabella 7. Tabella delle "alberature pubbliche dell'area urbana" raggrupata 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

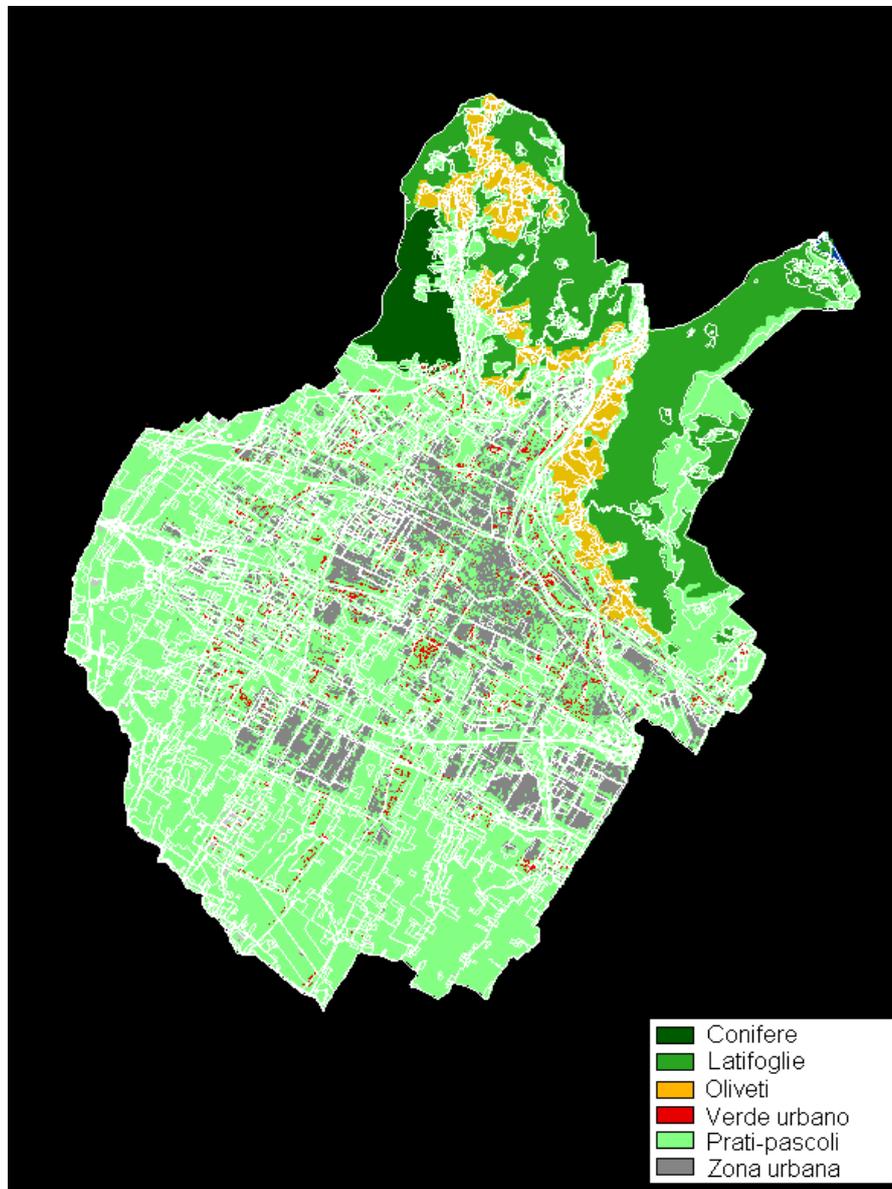
750

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



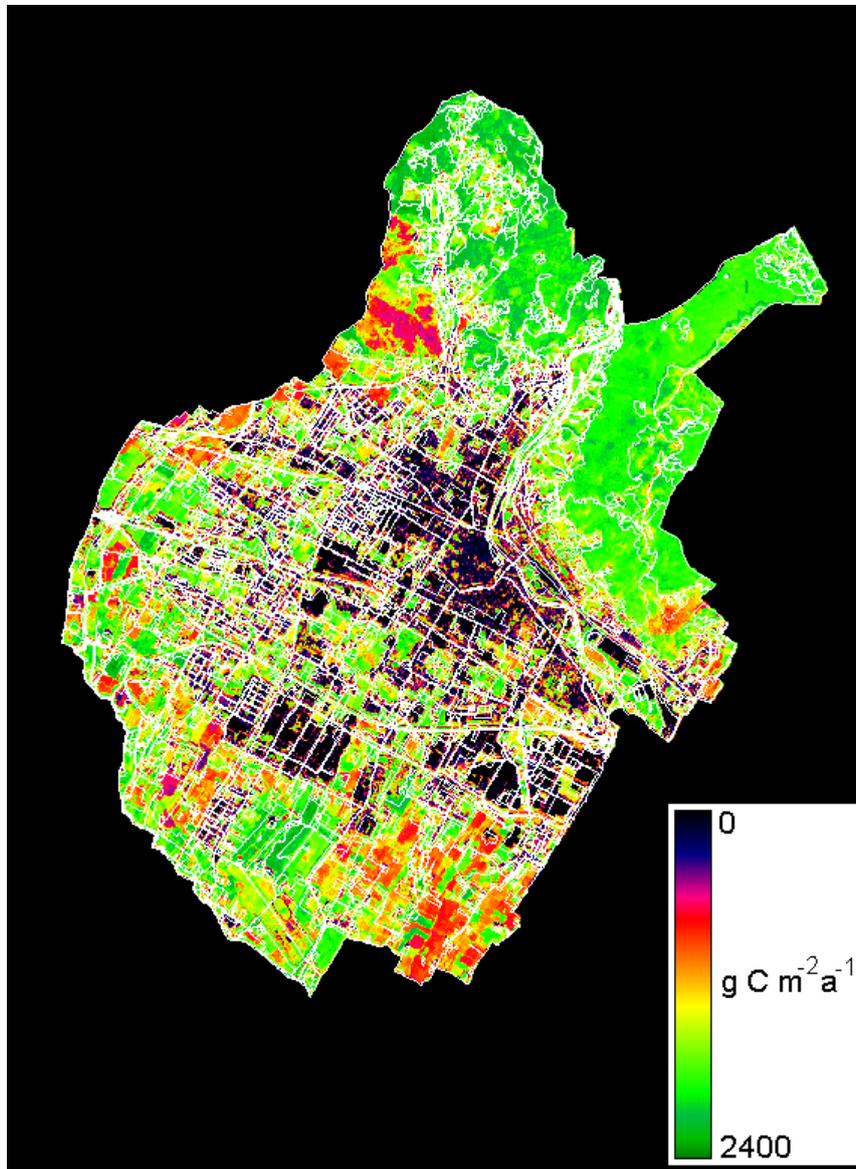
762

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

Tipo di vegetazione	Superficie (ha)	GPP (g C m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> )	NEE (g C m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> )
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

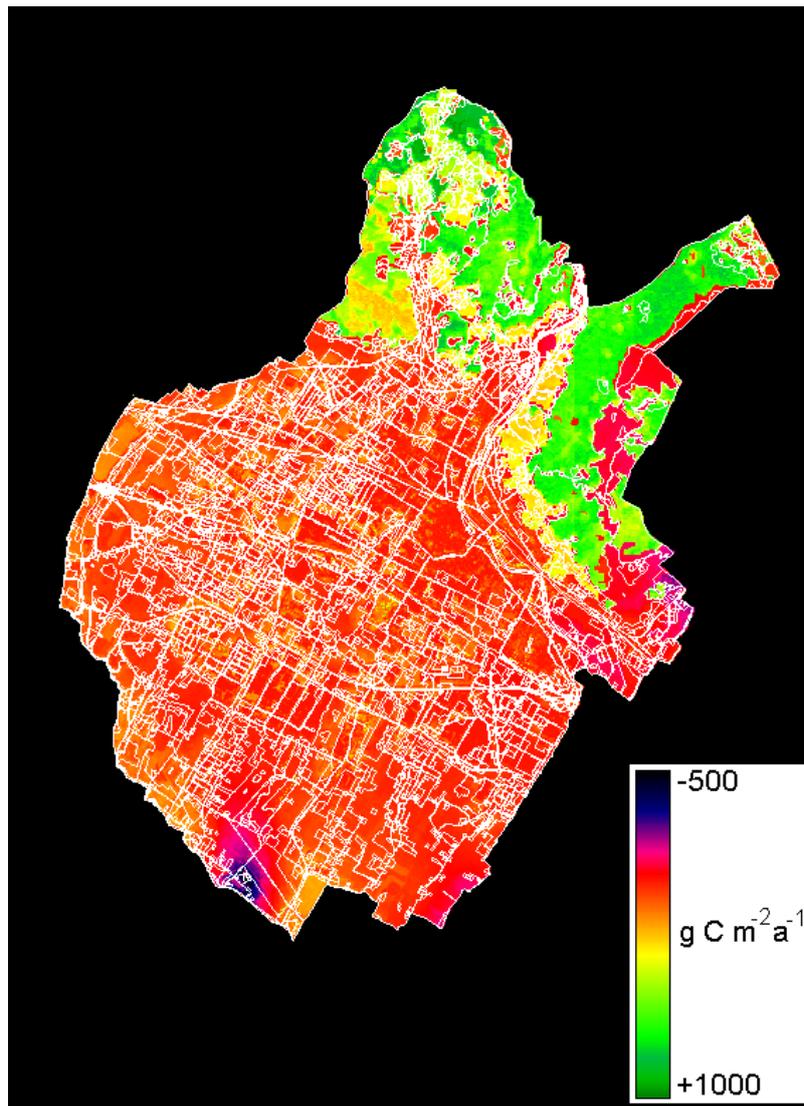
765

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.*



771

B

772 **Figura 35.** *Mappa di NEE del Comune di Prato.*

773

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

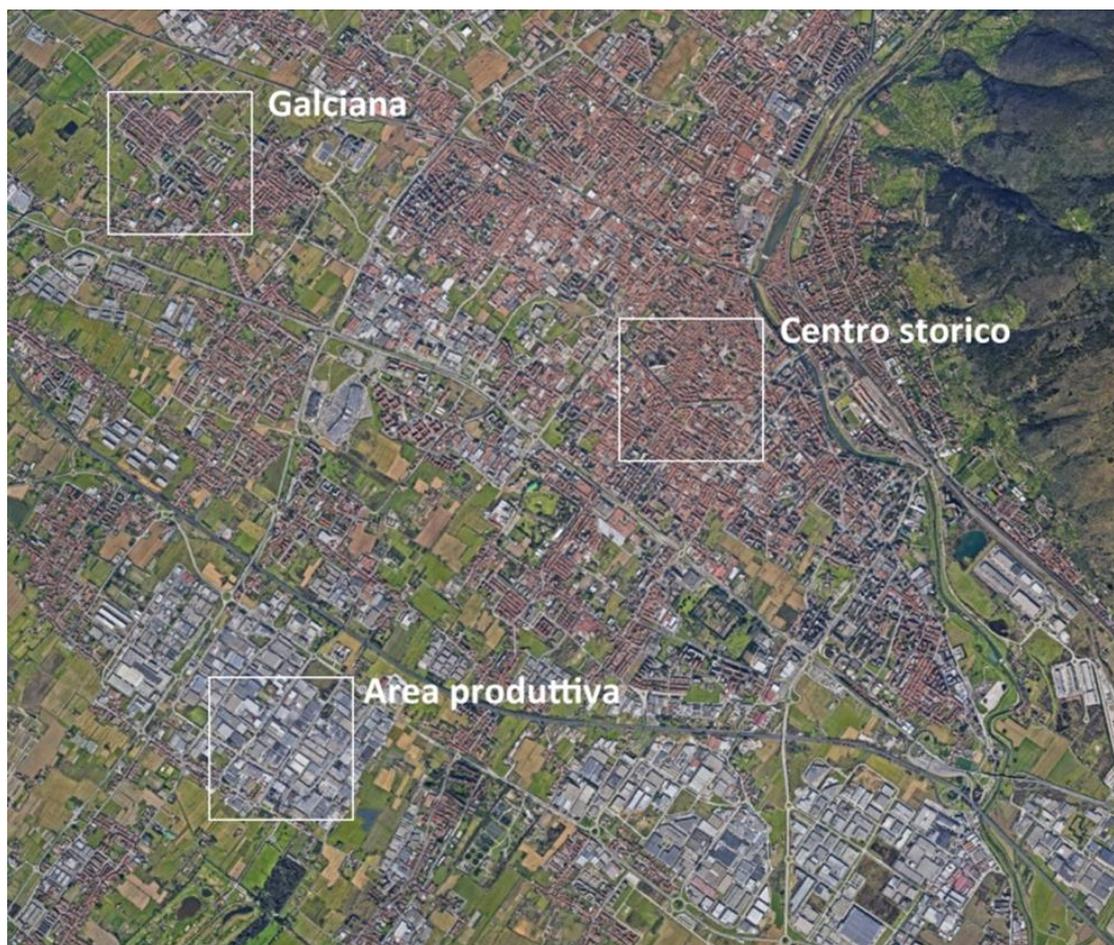
783 di territorio in cui risulta esserci un forte accumulo di carbonio organico nel suolo e quindi molta  
784 decomposizione (cfr. zona in blu in Figura 2 B).

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 Km<sup>2</sup> (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

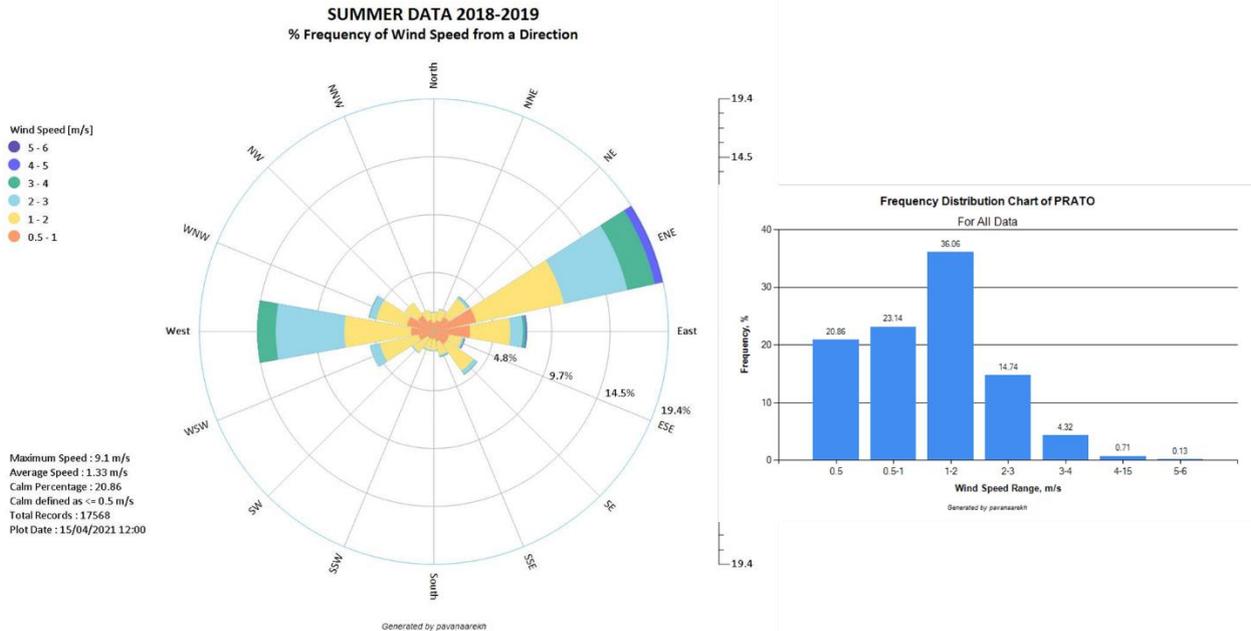
807 **Figura 36.** Geolocalizzazione delle tre aree di studio del comune di Prato simulate con il modello ENVI-met.

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

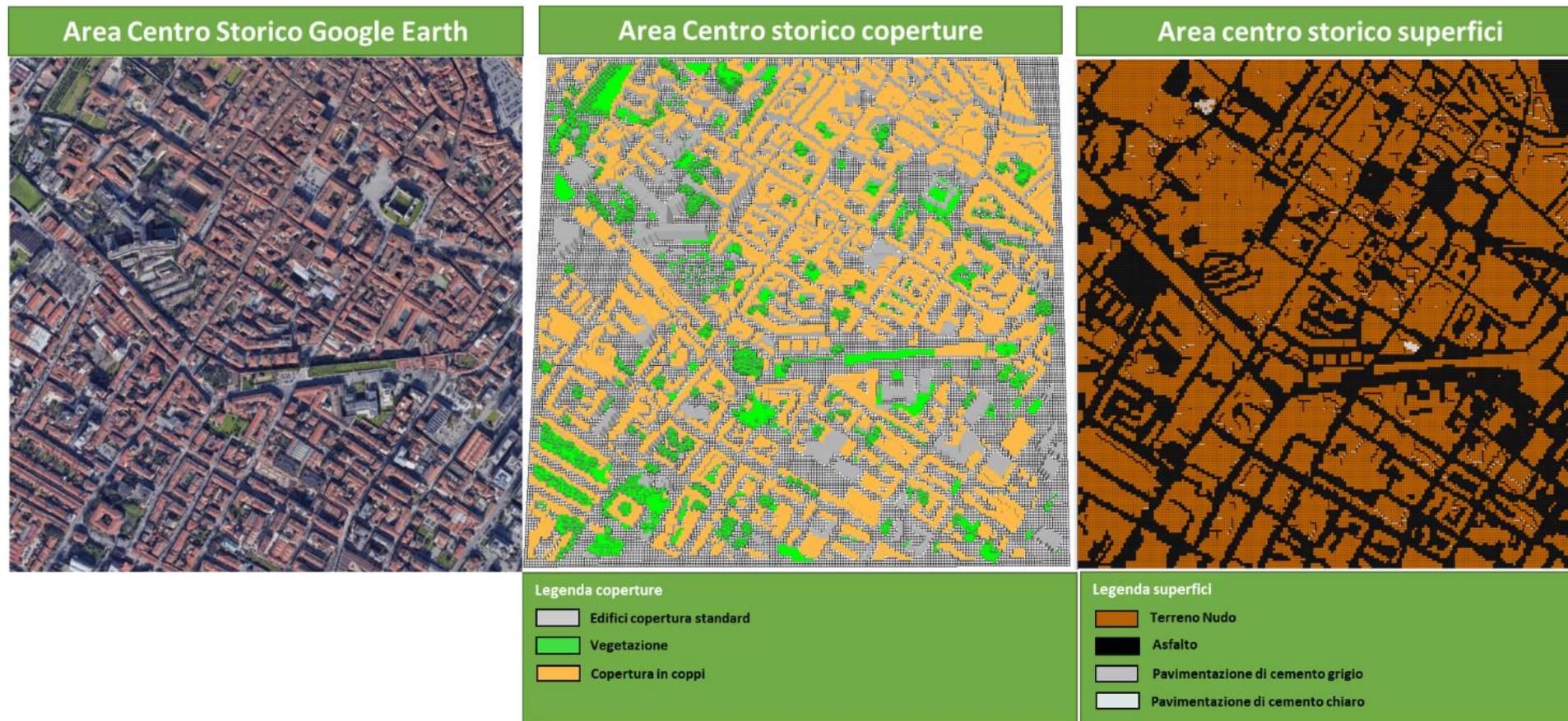
849 **Figura 37.** Rosa dei venti per la città di Prato durante il periodo estivo (2018-2019) e relativa frequenza delle velocità  
 850 del vento per ogni settore.

851

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

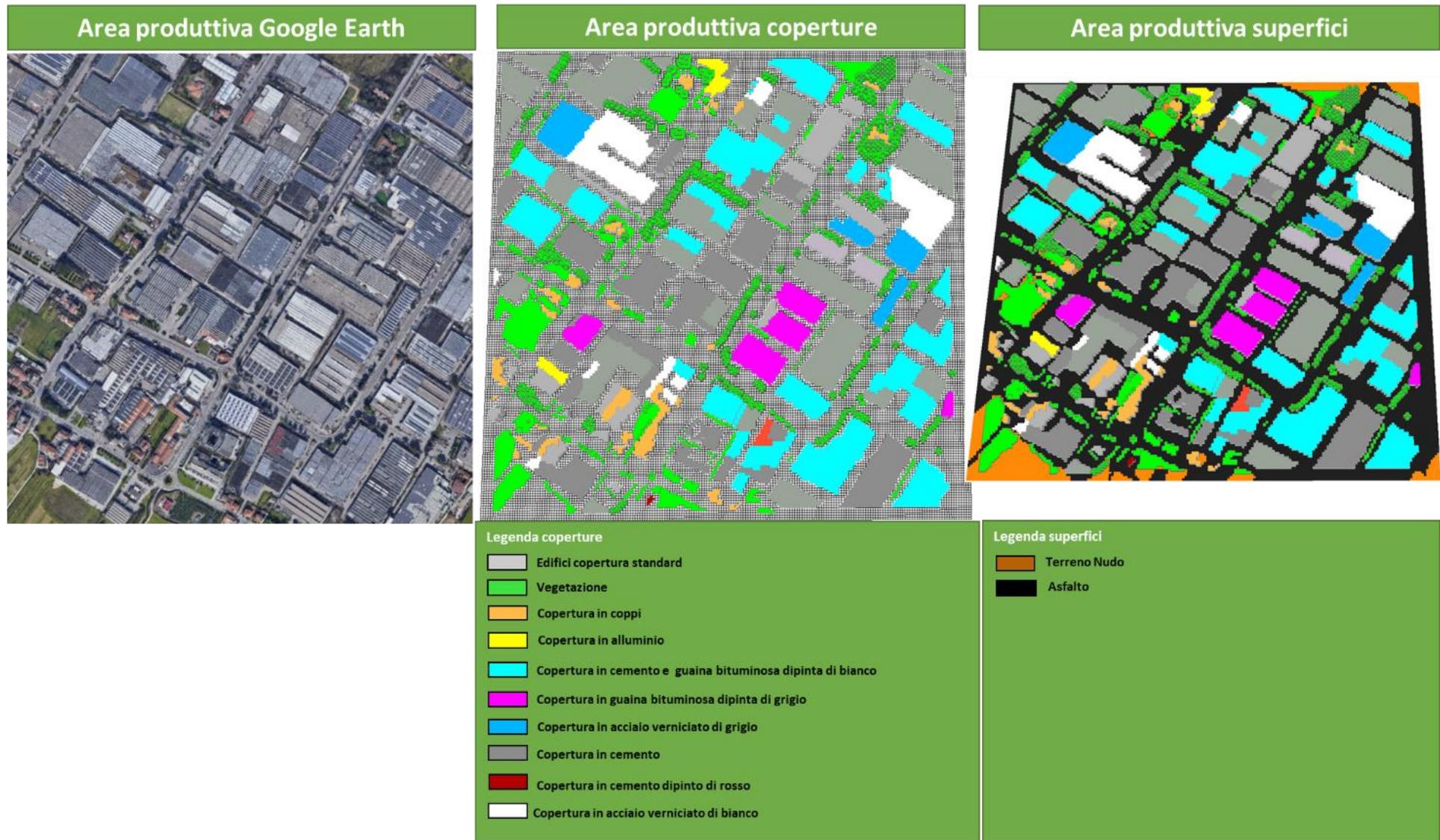
- 853 ■ velocità vento: 2.0 m/s;
- 854 ■ direzione del vento: 70 ° da Nord;
- 855 ■ Temperatura massima: 39.75 °C alle ore 14:00;
- 856 ■ Temperatura minima: 24.07 °C alle ore 4:00;
- 857 ■ Umidità relativa massima: 58% alle ore 04:00;
- 858 ■ Umidità relativa minima: 15% alle ore 14:00.

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.



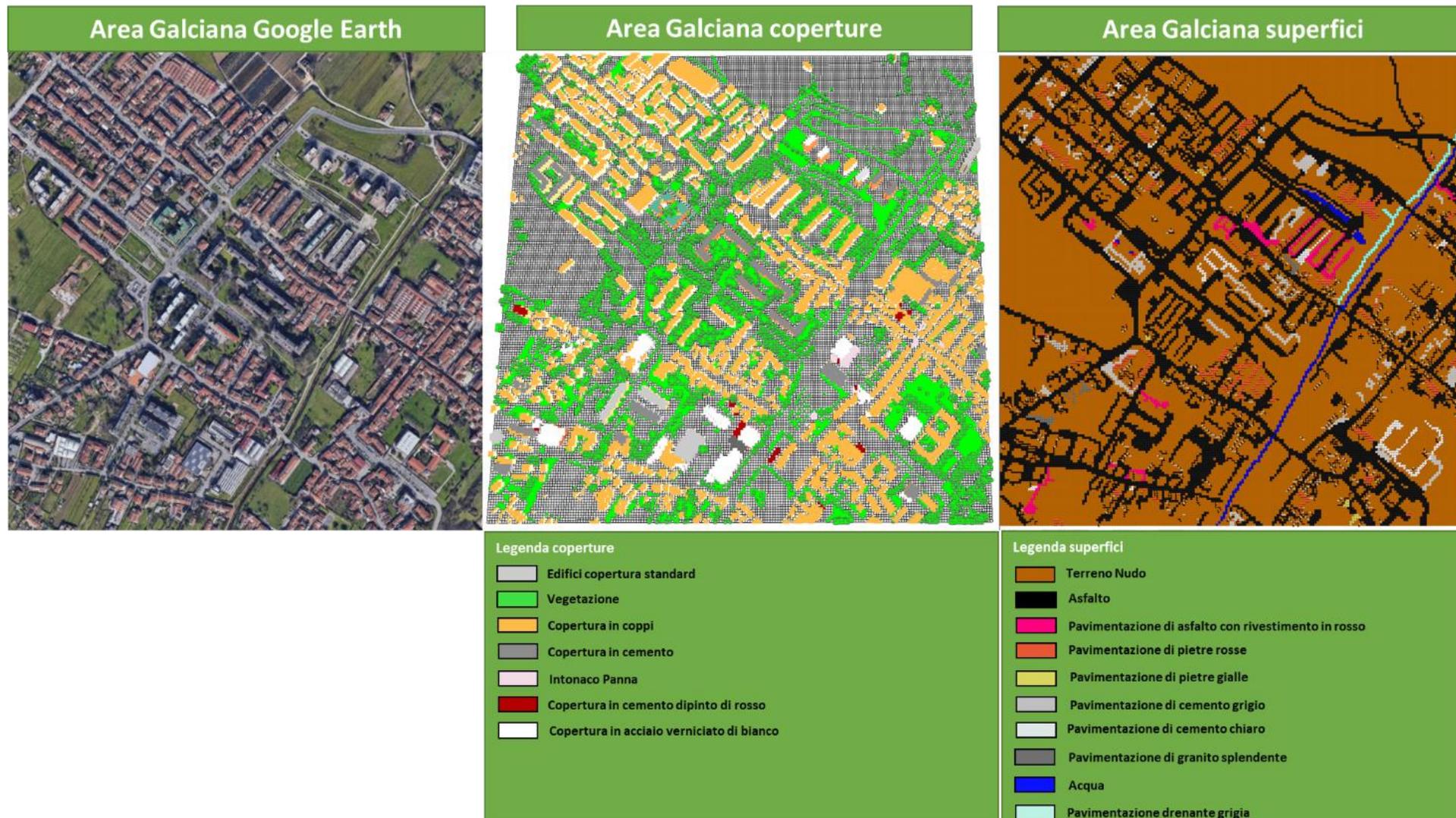
862

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.*

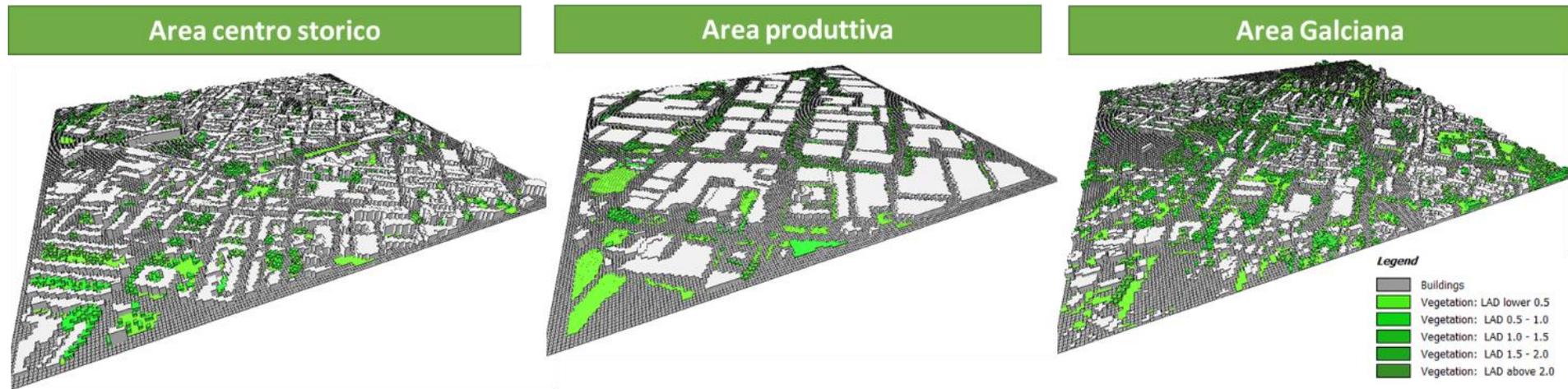


866

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 CO<sub>2</sub>.*

875 Il super-sito per la misura degli scambi di CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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

888

889

890

891

892

893

894

895

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

896

##### 1) Ipotesi di scenari mitigativi insieme a target di “Carbon neutrality”

897

898

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

899

900

901

902

903

904

905

906

907

908

909

910

911

912

913

914

##### 2) Ipotesi di scenari emissivi

916

917

Tale ipotesi potrebbe prevedere la contabilizzazione delle emissioni su base comunale, utilizzando i 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 CO<sub>2</sub> 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.

- 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.

- 978 19. Mavrakou, T.; Polydoros, A.; Cartalis, C.; Santamouris, M. Recognition of Thermal Hot and Cold Spots  
979 in Urban Areas in Support of Mitigation Plans to Counteract Overheating: Application for Athens.  
980 *Climate* **2018**, 6, 16, doi: <https://doi.org/10.3390/cli6010016>.
- 981 20. Morabito, M.; Crisci, A.; Georgiadis, T.; Orlandini, S.; Munafò, M.; Congedo, L.; Rota, P.; Zazzi, M.  
982 Urban Imperviousness Effects on Summer Surface Temperatures Nearby Residential Buildings in  
983 Different Urban Zones of Parma. *Remote Sensing* **2018**, 10, 17, doi: <https://doi.org/10.3390/rs10010026>.
- 984 21. Morabito, M.; Crisci, A.; Guerri, G.; Messeri, A.; Congedo, L.; Munafò, M. Surface Urban Heat Islands  
985 in Italian Metropolitan Cities: Tree Cover and Impervious Surface Influences. *Sci. Total Environ.* **2021**,  
986 751, 142334, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142334>.
- 987 22. Morabito, M.; Crisci, A.; Messeri, A.; Orlandini, S.; Raschi, A.; Maracchi, G.; Munafò, M. The Impact  
988 of Built-up Surfaces on Land Surface Temperatures in Italian Urban Areas. *Sci. Total Environ.* **2016**,  
989 551–552, pp. 317–326, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.029>.
- 990 23. Munafò, M. (Ed.). Land Consumption, Land Cover Changes, and Ecosystem Services. Report SNPA  
991 15/20, 2020; ISBN 978-88-448-1013-9.
- 992 24. Oke, T.R. Canyon Geometry and the Nocturnal Urban Heat Island: Comparison of Scale Model and Field  
993 Observations. *J. Climatol.* **1981**, 1, pp. 237–254, doi: <https://doi.org/10.1002/joc.3370010304>.
- 994 25. Renard, F.; Alonso, L.; Fitts, Y.; Hadjiosif, A.; Comby, J. Evaluation of the Effect of Urban  
995 Redevelopment on Surface Urban Heat Islands. *Remote Sensing* **2019**, 11, 299, doi:  
996 <https://doi.org/10.3390/rs11030299>.
- 997 26. Sobrino, J., Raissouni N., Li Z. L. A comparative study of land surface emissivity retrieval from NOAA  
998 data. *Remote Sensing of the Environment* **2001**, 75, pp. 256-266, doi: [https://doi.org/10.1016/S0034-](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00171-1)  
999 [4257\(00\)00171-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00171-1).
- 1000 27. Sobrino J., Jiménez-Muñoz J. C., Paolini L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5.  
1001 *Remote Sensing of Environment* **2004**, 90, pp. 434-440, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.003>
- 1002 28. Toscano, P. (Ed.). Remote Sensing Applications for Agriculture and Crop Modelling. MDPI  
1003 Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020; ISBN 978-3-03928-226-5.
- 1004 29. U.S. Geological Survey Landsat 8 (L8). Data Users Handbook. Version 5.0. 2019. Available online:  
1005 <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-data-users-handbook>.
- 1006 30. Strategia europea per i cambiamenti climatici, 2003: [https://eur-lex.europa.eu/legal-](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52013DC0216&from=IT)  
1007 [content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52013DC0216&from=IT](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52013DC0216&from=IT)
- 1008 31. SNAC 2012. La Strategia Nazionale di Adattamento ai cambiamenti climatici:  
1009 [https://pdc.minambiente.it/sites/default/files/allegati/strategia\\_nazionale\\_adattamenti\\_climatici.pdf](https://pdc.minambiente.it/sites/default/files/allegati/strategia_nazionale_adattamenti_climatici.pdf)
- 1010 32. Svenson, M.K. Sky View Factor Analysis—Implications for Urban Air Temperature Differences.  
1011 *Meteorol. Appl.* **2004**, 11, 201–211, doi: <https://doi.org/10.1017/S1350482704001288>.
- 1012 33. U.S. Geological Survey Landsat 8 (L8). Data Users Handbook. Version 5.0. 2019. Available online:  
1013 <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-data-users-handbook>.
- 1014 34. Variazioni e tendenze degli estremi di temperatura e precipitazione in Italia, 2013:  
1015 [https://www.isprambiente.gov.it/files/pubblicazioni/statoambiente/SA\\_37\\_2013\\_indici\\_estremi.pdf](https://www.isprambiente.gov.it/files/pubblicazioni/statoambiente/SA_37_2013_indici_estremi.pdf).