



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE  
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

---

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile e Ambientale

**Metodi di riduzione dell'effetto isola di calore:  
valutazione dei materiali per infrastrutture mediante il  
software ENVI-met**

Methodologies for analysing and reducing the urban heat island effect:  
evaluation of infrastructure materials through ENVI-met software

Relatore:

Prof. Ing. Giorgio Passerini

Tesi di Laurea di:

Francesco Alessandrelli

Correlatore:

Dott.sa Ing. Alessandra Chiappini

A.A. 2022/2023

## Sommario

INDICE DELLE FIGURE .....	4
ABSTRACT .....	6
L'ISOLA DI CALORE URBANA .....	7
<b>1.1 Definizione ed introduzione al problema dell'isola di calore urbana</b> .....	7
<b>1.2 Tipologie</b> .....	8
<b>1.3 Cause</b> .....	9
<i>1.3.1 Proprietà specifiche dei materiali</i> .....	9
<i>1.3.2 Inquinamento atmosferico</i> .....	11
<i>1.3.3 Canyon urbani</i> .....	11
<i>1.3.4 Rilascio di calore antropogenico</i> .....	13
<i>1.3.5 Disparità tra zone verdi e aree impermeabilizzate</i> .....	13
<i>1.3.6 Vento e copertura nuvolosa</i> .....	14
<b>1.4 Isole di calore urbane nelle zone costiere</b> .....	15
<b>1.5 Tecniche di mitigazione</b> .....	16
<i>1.5.1 Utilizzo di materiali riflettenti</i> .....	16
<i>1.5.2 Copertura vegetale e green roofs</i> .....	18
<i>1.5.3 Raffrescamento passivo</i> .....	19
RUOLO DEGLI ALBERI NELL'INQUINAMENTO ATMOSFERICO .....	22
<b>2.1 Fenomeni chimico-fisici</b> .....	22
<i>2.1.1 Il fenomeno dell'evapotraspirazione</i> .....	23
<b>2.2 Le diverse tipologie di alberi</b> .....	23
FUNZIONAMENTO DEL SOFTWARE ENVI-met.....	26
<b>3.1 Cos'è ENVI-met?</b> .....	26
<b>3.2 Il modello</b> .....	26
<b>3.3 La struttura del software</b> .....	28
<b>3.4 Le interfacce</b> .....	29
IL GIORNO RAPPRESENTATIVO.....	36
<b>4.1 Definizione del giorno rappresentativo</b> .....	36
<b>4.2 Tecniche per l'individuazione del giorno rappresentativo</b> .....	36
LE SIMULAZIONI SU ENVI-MET .....	38
<b>5.1 Preparazione del modello</b> .....	38
<b>5.2 I materiali utilizzati</b> .....	41

<b>5.3 Le diverse simulazioni effettuate .....</b>	<b>44</b>
<i>5.3.1 Analisi e confronto degli outputs nel giorno rappresentativo estivo .....</i>	<i>45</i>
<i>5.3.2 Analisi e confronto degli outputs nel giorno rappresentativo invernale .....</i>	<i>55</i>
CONCLUSIONI.....	62
BIBLIOGRAFIA .....	63
RINGRAZIAMENTI .....	66

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1, fenomeno dell'isola di calore urbana,2020. Fonte: infobuildenergia.it .....	8
Figura 2, effetto Albedo. Fonte: Researchgate .....	9
Figura 3, Valori tipici coefficiente di albedo.Fonte: A.Castagnozzi,2011 .....	10
Figura 4, dimensioni caratteristiche di un canyon stradale. Fonte: Erell et al., 2011.....	11
Figura 5, diagrammi rappresentanti la relazione tra evapotraspirazione (ascisse) e temperatura superficiale (ordinate) nei mesi di maggio, ottobre e dicembre. Fonte: Wang et all., 2010.....	14
Figura 6, esempio di cool roof. Fonte: roofmaster.ca.....	17
Figura 7, Struttura di un green roof. Fonte: insulationcorp.com.....	18
Figura 8, effetto Venturi. Fonte: Meteolive.it.....	20
Figura 9, torri del vento in Iran. Fonte: Flickr .....	21
Figura 10, classifica Coldiretti piante anti inquinamento, 2018, www.coldiretti.it .....	25
Figura 11, schema semplificato del modello .....	27
Figura 12, diagramma rappresentante la struttura di Envi-met. Fonte: Battistella, 2014.....	28
Figura 13, prima interfaccia ENVI-met .....	29
Figura 14, sezione Spaces di ENVI-met .....	30
Figura 15, sezione ENVI-guide di ENVI-met .....	31
Figura 16, sezione ENVI-core di ENVI-met .....	32
Figura 17, sezione Leonardo di ENVI-met .....	33
Figura 18, Data and Settings di ENVI-met .....	33
Figura 19, esempio di materiale all'interno di DB Manager .....	34
Figura 20, esempio di pianta contenuta nella sezione Albero di ENVI-met.....	35
Figura 21, Matrice Aij .....	37
Figura 22, matrice per lo studio del caso in esame.....	37
Figura 23, Tratto esaminato del Viale Anita Garibaldi di Senigallia .....	38
Figura 24, Rappresentazione in Spaces dello stato dell'arte del tratto del Viale Anita Garibaldi scelto .....	39
Figura 25, T(°C) del 25/08/2022 .....	40
Figura 26, T(°C) del 13/11/2022 .....	40
Figura 27, Umidità (%) del 25/08/2022.....	40
Figura 28, Umidità (%) del 13/11/2022.....	41
Figura 29, Caratteristiche prestazionali Asphalt road .....	41
Figura 30, Caratteristiche prestazionali Basalt Brick Road .....	42
Figura 31, Esempio di strada con mattoni in basalto .....	42
Figura 32, Caratteristiche prestazionali Granit shining .....	42
Figura 33, Caratteristiche prestazionali Granit pavement.....	42
Figura 34, Esempio di marciapiede in granito. Fonte: Wulstan Landscapes .....	43
Figura 35, Caratteristiche prestazionali Concrete pavement light .....	43
Figura 36, rappresentazione nel database Albero del Pinus Pinea .....	43
Figura 37, Caratteristiche prestazionali del Pinus Pinea .....	44
Figura 38, Rappresentazione nel database Albero del Fagus Sylvatica .....	44
Figura 39, Caratteristiche prestazionali del Fagus Sylvatica .....	44
Figura 40, Rappresentazione grafica output simulazione Stato dell'Arte nel giorno rappresentativo estivo.....	46

Figura 41, Rappresentazione grafica output simulazione Massimizzata nel giorno rappresentativo estivo.....	47
Figura 42, Rappresentazione grafica output simulazione Verosimile nel giorno rappresentativo estivo.....	48
Figura 43, Rappresentazione grafica output simulazione Senza Alberi nel giorno rappresentativo estivo.....	49
Figura 44, Dettaglio output simulazione Verosimile del giorno rappresentativo estivo .....	50
Figura 45, Dettaglio output simulazione Stato dell'Arte del giorno rappresentativo estivo ..	50
Figura 46, Porzione di territorio interessata da una differenza nella distribuzione delle temperature .....	51
Figura 47, Dettaglio output simulazione Massimizzata del giorno rappresentativo estivo ...	51
Figura 48, Porzione di territorio numero 2 interessata da una differenza nella distribuzione delle temperature .....	52
Figura 49, Dettaglio numero 2 output simulazione Stato dell'Arte nel giorno rappresentativo estivo .....	52
Figura 50, Dettaglio numero 2 output simulazione Verosimile nel giorno rappresentativo estivo .....	53
Figura 51, Dettaglio output simulazione Massimizzata nel giorno rappresentativo estivo ...	53
Figura 52, Porzione di territorio numero 3 interessata da una differenza nella distribuzione delle temperature .....	54
Figura 53, Dettaglio numero 3 output simulazione Stato dell'Arte nel giorno rappresentativo estivo .....	54
Figura 54, Dettaglio output simulazione Senza Alberi nel giorno rappresentativo estivo .....	55
Figura 55, Rappresentazione grafica output simulazione Stato dell'Arte nel giorno rappresentativo invernale .....	56
Figura 56, Rappresentazione grafica output simulazione Verosimile nel giorno rappresentativo invernale .....	57
Figura 57, Rappresentazione grafica output simulazione Massimizzata nel giorno rappresentativo invernale .....	58
Figura 58, Rappresentazione grafica output simulazione Senza Alberi nel giorno rappresentativo invernale .....	59
Figura 59, Porzione di territorio numero 4 interessata da una differenza nella distribuzione delle temperature .....	60
Figura 60, Dettaglio output simulazione Verosimile del giorno rappresentativo invernale...	60
Figura 61, Dettaglio output simulazione Stato dell'Arte del giorno rappresentativo invernale .....	61

## ABSTRACT

La presente tesi si pone l'obiettivo di analizzare tramite il software ENVI-met gli incrementi di temperatura e umidità dovuti al fenomeno dell'isola di calore urbana (UHI) relativi a un tratto del viale Anita Garibaldi di Senigallia. L'isola di calore urbana è quel fenomeno che rende le aree urbane più calde delle aree rurali circostanti. Vengono analizzati scenari diversi scegliendo ogni volta differenti combinazioni di materiali per pavimentazioni e costruzioni e differenti tipologie di vegetazione. Dopo aver presentato il fenomeno dell'isola di calore urbana, elencandone le tipologie, le cause e approfonditi i risvolti che questo fenomeno ha nelle zone costiere, vengono esaminate le possibili tecniche di mitigazione che spaziano da un miglioramento delle caratteristiche dei materiali da costruzione a un incremento delle zone verdi presenti nelle città. Proprio a questo riguardo è presente un capitolo dedicato al ruolo delle piante nell'ecosistema urbano, evidenziandone i meccanismi chimico-fisici e le principali differenze una con l'altra nel mitigare il fenomeno dell'isola di calore. Viene poi presentato il software Envi-Met utilizzato per le simulazioni dei diversi scenari elencandone le caratteristiche principali, le componenti e le modalità di utilizzo. Infine, vengono mostrati e discussi gli output di queste simulazioni così da poter confrontare i diversi scenari e quindi i diversi materiali e le diverse tipologie di vegetazione utilizzati.

# CAPITOLO1

## L'ISOLA DI CALORE URBANA

### **1.1 Definizione ed introduzione al problema dell'isola di calore urbana**

L'isola di calore urbana è quel fenomeno che determina un microclima caratterizzato da temperature più alte nelle aree urbane rispetto alle aree di campagna o alle zone rurali circostanti (D'Elia, et al., 2023). La differenza di temperatura tra città e zone periferiche può raggiungere anche i diversi gradi centigradi. Alla base di questo fenomeno si possono annoverare svariate cause, dalle condizioni meteorologiche alla sproporzione tra aree verdi e aree edificate, impermeabili (Geopop, 2023). Diversi studi hanno evidenziato la presenza di questo fenomeno. Un'analisi svolta tra il 2014 e il 2017 sulla temperatura superficiale del Comune di Modena ha registrato una differenza di 5.9°C tra il centro e la campagna (Barbieri, 2019). Un altro studio del 2013 (D.Constantinescu, 2013) prende in analisi la capitale rumena Bucarest notando nei mesi di Luglio e Agosto una differenza tra aree edificate e rurali di, rispettivamente, 6.8°C e 8.2°C. Questo fenomeno interessa sia le piccole che le grandi città così come intere regioni. Lo dimostra uno studio del 2005 nell'intera area geografica del New Jersey. I dati hanno evidenziato una differenza media annuale tra zone urbane e non di circa 5.9°C (Rosenzweig, et al., 2005).

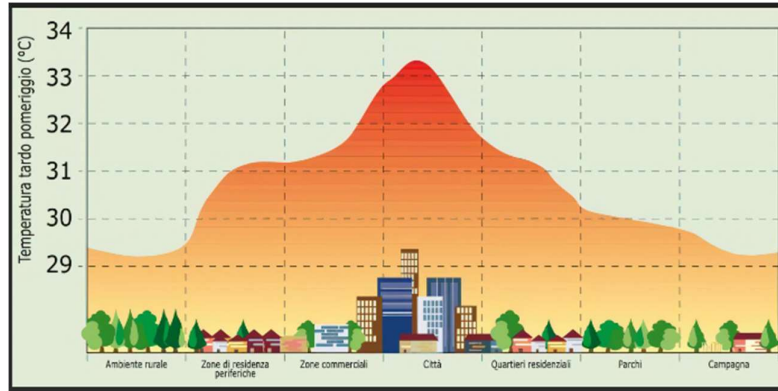


Figura 1, fenomeno dell'isola di calore urbana, 2020. Fonte: infobuildenergia.it

## 1.2 Tipologie

L'isola di calore urbana o Urban Heat Island (UHI) può essere studiata analizzandone diverse tipologie:

- Isola di calore atmosferica (atmospheric UHI - AUHI), ulteriormente distinta in:
  - Boundary Layer Urban Heat Island (BLUHI), che interessa lo strato limite urbano che si trova al di sopra dell'altezza media degli edifici;
  - Canopy Layer Urban Heat Island (CLUHI), che riguarda lo strato della copertura urbana situato sotto l'altezza media degli edifici.
- Isola di calore di superficie (surface UHI – SUHI)
- Isola di calore del sottosuolo (subsurface UHI).

Le tre diverse tipologie, seppur all'interno dello stesso fenomeno, si differenziano enormemente per cause, intensità e anche modalità di studio delle stesse. Analizzandole separatamente si è notato che le isole di calore di superficie presentano il picco di intensità durante il giorno, a differenza di quelle atmosferiche che si manifestano in prevalenza di notte. Nell'isola di calore atmosferica si studia principalmente la temperatura dell'aria. In particolare, per misurare la CLUHI, ci si posiziona tra 1.5 e 3 m dal suolo, cioè circa tra la altezza di una persona e il primo piano di una abitazione: se questa temperatura è più alta di quella misurata, alla stessa altezza, nelle zone rurali circostanti, allora si può affermare l'esistenza di questo tipo di UHI. Poiché è quella che interessa la vita delle persone, molto spesso, parlando di isola di calore urbana, non si fa riferimento alle diverse tipologie, dando per scontato che l'interesse sia rivolto al solo strato limite urbano (Battistella, 2014).



### 1.3 Cause

Le cause di questo fenomeno sono varie ed eterogenee. Spaziano dalle caratteristiche meteorologiche del territorio alle proprietà intrinseche dei materiali utilizzati nell'edificarlo.

#### 1.3.1 Proprietà specifiche dei materiali

Le principali proprietà di un materiale che influenzano la formazione delle isole di calore urbane possono essere suddivise in termiche e radiative. All'interno delle proprietà radiative rientrano l'albedo e l'emissività. L'albedo è un fattore cruciale e rappresenta la frazione di luce riflessa da un oggetto o da una superficie rispetto a quella che vi incide (Focus, 2013).

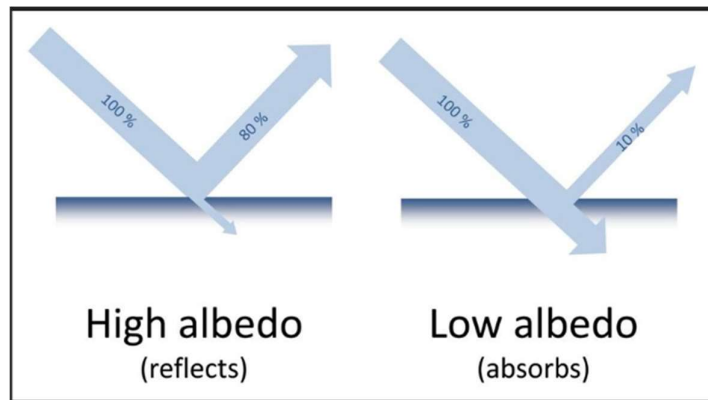


Figura 2, effetto Albedo. Fonte: Researchgate

È l'unico parametro che durante le ore del giorno può diminuire le temperature delle superfici dei materiali. Un'albedo alto, tipico di materiali caratterizzati da una colorazione chiara, mantiene infatti contenuta durante le ore di sole la temperatura superficiale dello specifico materiale.

Superficie	Indice
Neve (caduta di fresco o con un film di ghiaccio)	0,75
Superfici acquose	0,07
Suolo (creta, marne)	0,14
Strade sterrate	0,04
Bosco di conifere d'inverno	0,07
Bosco in autunno / campi con raccolti maturi e piante	0,26
Asfalto invecchiato	0,10
Calcestruzzo Invecchiato	0,22
Foglie morte	0,30
Erba secca	0,20
Erba verde	0,26
Tetti e terrazze in bitume	0,13
Pietrisco	0,20
Superfici scure di edifici (mattoni scuri, vernice scure)	0,27
Superfici chiare di edifici (mattoni chiari, vernici chiare)	0,60

Figura 3, Valori tipici coefficiente di albedo. Fonte: A.Castagnozzi, 2011

A riguardo, nel corso del mese di settembre 2012, l'Unità Tecnica per l'Efficienza Energetica – Servizio Residenziale e Terziario di ENEA ha effettuato una serie di prove su campioni di vari materiali, tra i quali una specifica pavimentazione, denominata i.IDRO DRAIN, dotata di un'albedo tale da diminuire la temperatura superficiale della strada di anche 30°C rispetto ad una normale pavimentazione in asfalto ( Heidelbergmaterials, 2019). Di notte il parametro che più influenza la formazione e l'intensità dell'isola di calore è l'emissività. Questa è la frazione di energia che un materiale irradia rispetto a quella irraggiata da un corpo nero. Diminuendo l'emissività di un materiale diminuisce anche la temperatura dell'aria circostante. Le proprietà termiche includono invece la conducibilità termica da cui dipendono l'inerzia termica e la diffusività termica. Le ultime due esprimono le relazioni esistenti tra la conducibilità, la densità e il calore specifico di un materiale. La diffusività è definita come il rapporto tra conducibilità e il prodotto tra densità e calore specifico ed è una misura di quanto velocemente la temperatura di un materiale si adatta rispetto alla temperatura dell'ambiente circostante. L'effusività, definita invece come la radice quadrata del prodotto tra conducibilità, densità e calore specifico, misura la capacità di un materiale di scambiare energia termica con l'ambiente circostante. Cambiando quindi la conducibilità termica di un materiale avremo conseguenze per quanto riguarda la temperatura superficiale e dell'aria dell'ambiente circostante. In particolare, un incremento di conducibilità termica di una pavimentazione diminuisce la temperatura superficiale a causa di una maggiore dissipazione di calore.

Riducendola, invece, diminuisce la velocità di trasferimento del calore dalla superficie al suolo. La superficie, quindi, assorbe a sua volta calore dal suolo aumentando la sua temperatura (Binarti, et al., 2020)

### 1.3.2 Inquinamento atmosferico

Le molecole di CO<sub>2</sub> non sono in grado di assorbire le radiazioni solari visibili in arrivo sulla terra; questa, riscaldata da tali radiazioni emette a sua volta radiazioni termiche infrarosse che vengono invece assorbite dalla CO<sub>2</sub> presente in atmosfera; la terra irraggia quindi calore che viene intrappolato così da provocare un aumento di temperatura (effetto serra).

### 1.3.3 Canyon urbani

Un canyon urbano (o stradale) è un luogo in cui la strada è contornata da edifici su ambo i lati delineando un ambiente simile a un canyon. I canyon urbani influenzano varie condizioni, tra cui temperatura, vento, luce, qualità dell'aria oltreché ricezione radio e segnali di navigazione. Il dettaglio geometrico più determinante di un canyon stradale è il rapporto tra l'altezza del canyon (H) e la larghezza del canyon (W),  $H / W$ , che è definito come il rapporto di aspetto.

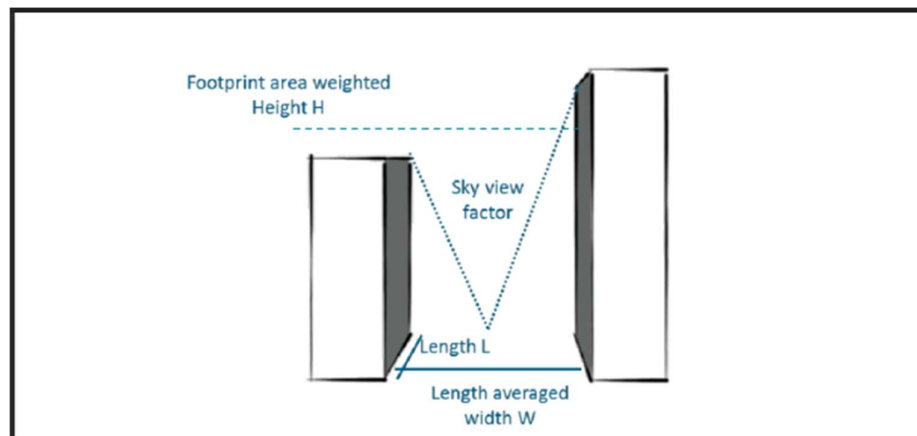


Figura 4, dimensioni caratteristiche di un canyon stradale. Fonte: Erell et al., 2011

A seconda di questo valore possiamo individuare diverse tipologie di canyon urbano:

- Canyon regolare - proporzioni  $\approx 1$  e nessuna apertura importante sulle pareti del canyon;
- Avenue canyon - proporzioni  $< 0.5$ ;

- Canyon profondo - proporzioni  $\approx 2$ .

Possiamo classificarli anche in base alla simmetria:

- Canyon simmetrico: gli edifici che compongono il canyon hanno all'incirca la stessa altezza;
- Canyon asimmetrico: gli edifici che compongono il canyon hanno differenze di altezza significative.
- Step-up canyon: un canyon stradale in cui l'altezza dell'edificio sopravento è inferiore all'altezza dell'edificio sottovento.

Analizzando i canyon urbani vengono anche presi in considerazione parametri come il volume d'aria, l'orientamento del canyon (nord-sud, est-ovest ecc.) e il fattore di vista del cielo. Il primo rappresenta l'aria contenuta internamente agli edifici su entrambi i lati che fungono da muri. La delimitazione inferiore di questo volume è la strada mentre quella superiore è immaginaria e a livello del tetto chiamata "coperchio" del canyon. Il fattore di vista del cielo (SVF) rappresenta invece il rapporto tra la radiazione ricevuta da una superficie planare e quella dall'intero ambiente emisferico irradiante ed è calcolato come la frazione di cielo visibile dal suolo. SVF è un valore adimensionale con un range variabile da 0 a 1. Un SVF unitario significa che il cielo è completamente visibile. Quando il terreno viene poi edificato o vengono piantati alberi, la SVF diminuirà proporzionalmente. La temperatura all'interno del canyon può essere superiore anche di 2-4 ° C rispetto all'ambiente circostante. Gli studi sulla temperatura dei canyon urbani considerano l'irradiazione, l'angolo di incidenza, l'albedo superficiale, l'emissività, la temperatura e la SVF. Per un SVF elevato, i canyon urbani si raffreddano rapidamente, perché più cielo è disponibile per assorbire il calore trattenuto dagli edifici. Con un SVF basso, il canyon può trattenere più calore durante il giorno, creando un maggiore rilascio di calore durante la notte (Barbieri, 2019).

#### *1.3.4 Rilascio di calore antropogenico*

Tutti quei fenomeni che sprigionano calore nell'ambiente come il traffico, come il riscaldamento e/o il raffreddamento degli edifici o degli ambienti in generale, sono assolutamente protagonisti nella formazione delle isole di calore urbane. Il loro impatto è dovuto alla non corretta e non totale dissipazione del calore da loro prodotto che quindi si accumula e contribuisce all'innalzamento delle temperature in determinate zone (Infobuildenergia, 2022)

#### *1.3.5 Disparità tra zone verdi e aree impermeabilizzate*

La diminuzione dell'evaporazione di acqua dalle aree urbane a causa delle superfici impermeabilizzate, come strade e marciapiedi, e alla carenza di vegetazione rispetto alle aree rurali causa un aumento dell'energia immessa in calore sensibile e una diminuzione di quella immessa in calore latente. Il vapore acqueo che si trova in atmosfera si forma grazie all'evaporazione dell'acqua presente negli oceani e nei mari oltreché a quella dei fiumi e dei laghi e dei corsi d'acqua in generale. Un apporto importante è fornito anche dalle terre emerse sfruttando l'evaporazione dell'acqua presente nel suolo e nel sottosuolo attraverso la traspirazione delle superfici vegetali. L'insieme dell'evaporazione del sottosuolo attraverso i pori del terreno, della traspirazione delle piante e dell'evaporazione che avviene direttamente dalla superficie terrestre prende il nome di evapotraspirazione. Il Cnr-Ibe, in collaborazione con Ispra, ha condotto uno studio dove analizza per la prima volta l'influenza della copertura arborea e del consumo di suolo nel favorire l'isola di calore urbana superficiale nelle 10 città metropolitane dell'Italia peninsulare durante il periodo diurno estivo. I ricercatori per fare questo hanno sviluppato un nuovo strumento informativo chiamato "Urban Surface Landscape layer". Altro non è se non un indicatore di copertura superficiale del paesaggio urbano capace di rappresentare le zone delle città caratterizzate da differenti combinazioni di densità di consumo di suolo e copertura arborea, e in grado di individuare aree critiche urbane caratterizzate da elevate temperature superficiali. Lo studio dimostra che il fenomeno dell'isola di calore urbana superficiale si intensifica in maniera direttamente proporzionale all'estensione delle aree con bassa copertura arborea o alta copertura artificiale. In generale

quanto più grandi e compatte sono le città, tanto maggiore è l'intensità del fenomeno isola di calore (Cnr, 2020). Uno studio sull'area metropolitana di Xuzhou, Cina ha anche evidenziato come il fenomeno dell'evapotraspirazione sia molto più efficace nel diminuire le temperature durante i mesi più caldi (maggio-ottobre), rispetto a quelli più freddi (novembre-marzo).

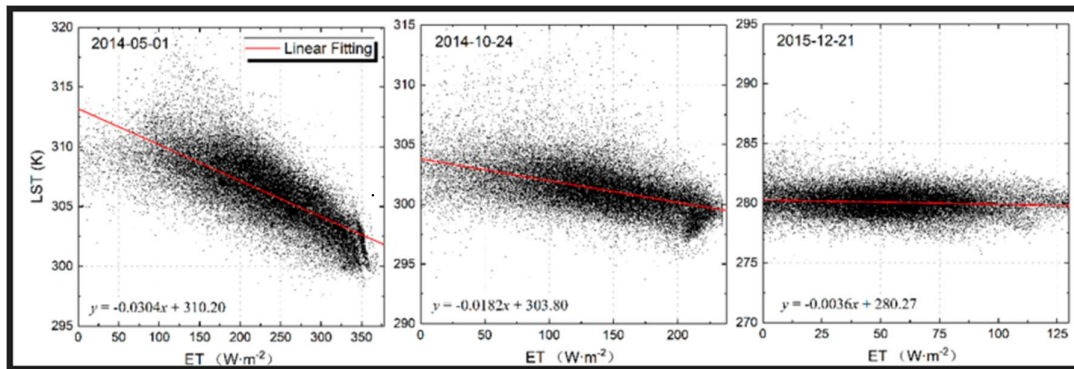


Figura 5, diagrammi rappresentanti la relazione tra evapotraspirazione (ascisse) e temperatura superficiale (ordinate) nei mesi di maggio, ottobre e dicembre. Fonte: Wang et al., 2010

Dalla fig.5 si vede infatti come a maggio, all'aumentare dell'evapotraspirazione (ET) corrisponda un decremento importante di temperatura che da circa 313K passa a circa 302K con un delta di circa 11K. La tendenza è diversa invece per i mesi di ottobre e dicembre dove ad un incremento di ET corrispondono delta di temperatura di rispettivamente circa 3K e 0.5K (Wang, et al., 2020).

### 1.3.6. Vento e copertura nuvolosa

In genere, i forti venti che penetrano all'interno delle aree urbane tendono a dissipare il calore accumulato in queste, indebolendo così l'intensità dell'isola di calore. Allo stesso modo, le nuvole possono assorbire e riflettere la radiazione solare a onde lunghe e corte, riducendo l'insolazione solare e di conseguenza l'intensità dell'isola di calore. In passato è stato studiato come la combinazione di questi due fattori (velocità del vento e quantità di nuvole) incida sulla formazione delle isole di calore. In generale, l'intensità è maggiore in condizioni climatiche di venti deboli e cielo sereno e viceversa. Studi hanno ulteriormente dimostrato che le città costiere riportano livelli significativamente più bassi di intensità rispetto alle città dell'entroterra, principalmente a causa della presenza di una brezza marina a bassa temperatura che fornisce un raffreddamento convettivo nelle città costiere (Yun et al., 2020). Inoltre, uno studio nella città di Seoul, controllando gli effetti della copertura nuvolosa (cioè, ipotizzando

condizioni di cielo sereno), ha riscontrato una chiara relazione inversa tra la velocità del vento e l'intensità dell'isola di calore; si è stimata una diminuzione media di 0.2 °C per ogni aumento di 0.5 m/s della velocità del vento. La soglia critica di velocità del vento alla quale l'intensità dell'isola di calore era quasi pari a zero era di 11.01 m/s. Analogamente, controllando gli effetti della velocità del vento (cioè, in condizioni di bassa velocità del vento), si è osservata una chiara relazione inversa tra la copertura nuvolosa e l'intensità dell'isola di calore; si è stimata una diminuzione di 0.24 °C per ogni aumento di 1 Octa, unità di misura che si basa sulla divisione della cupola celeste in 8 parti (più questa aumenta più il cielo sarà coperto) della copertura nuvolosa (Ngarambe, et al., 2021). Oltre la velocità, anche la direzione del vento influenza la formazione e l'intensità delle isole di calore urbano. In particolare, quando i venti provengono da ambienti secchi, favoriscono elevate intensità dell'isola di calore, a tutte le velocità del vento, mentre i venti provenienti dal lato dell'oceano tendono a raffreddare le regioni urbane, riducendo le intensità dell'isola di calore o addirittura promuovendo la formazione dell'isola di raffreddamento urbana (Al-Obaidi, et al., 2021).

#### **1.4 Isole di calore urbane nelle zone costiere**

L'intensità del fenomeno dell'isola di calore nelle zone costiere è alleviata dalla presenza del mare. Alcuni studi (Cheval & Costantin, 2019) hanno dimostrato come la temperatura diurna media estiva (da giugno ad agosto) aumenta con la distanza dal mare con un gradiente di 0.7 °C/km nei primi 5 km e che, se il territorio è particolarmente pianeggiante, la distanza può raggiungere anche i 15 km. Un aspetto importante che può contribuire a spiegare l'effetto mitigatore di un grande specchio d'acqua sulla variazione di temperatura, ma che purtroppo è stato raramente considerato nelle ricerche esistenti, è l'impatto dell'umidità del suolo sul SUHI, considerato come una potenziale causa di variazione delle temperature (Deng & Wu, 2013). In uno studio condotto in tre megalopoli situate in regioni a rapida urbanizzazione nella Cina orientale (Hu, et al., 2019), gli autori hanno confermato che il fenomeno del SUHI è influenzato anche dai climi umidi e secchi: le megalopoli con climi caldi e umidi tendono ad avere un'intensità del SUHI inferiore rispetto alle città con climi freschi e secchi (Morabito, et al., 2021). Sempre dallo studio di Cheval e Costantin del 2019 si è osservato come, generalmente, le aree costiere sono più calde rispetto all'entroterra in tutte le stagioni e più fredde durante il giorno in primavera, estate e autunno. In inverno, il mare rimane più caldo anche di giorno, generando un'influenza complessivamente più forte sui valori di temperatura

costieri. Di giorno, l'acqua rimane più fredda della terraferma, per cui la temperatura aumenta abbastanza rapidamente con la distanza dal mare, soprattutto durante l'estate e la primavera, mentre l'aumento è più lieve durante l'autunno, quando le temperature delle aree marine e terrestri sono più vicine. Le ore notturne sono caratterizzate da una terra più fredda e da un'acqua marina più calda, che innescano un leggero calo graduale della temperatura entro i primi 5-10 km dalla linea di costa in tutte le stagioni.

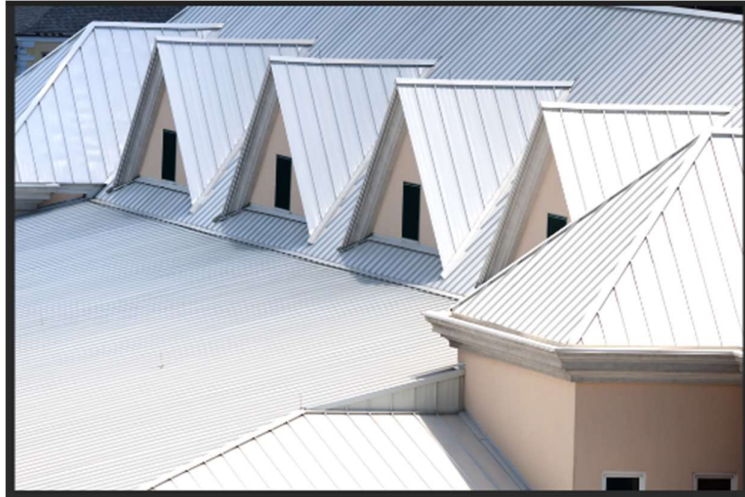
## **1.5 Tecniche di mitigazione**

La sempre più aggressiva edificazione delle zone rurali con la conseguente impermeabilizzazione del suolo sta rendendo il fenomeno dell'isola di calore urbana ogni giorno più diffuso e intenso. Per questo motivo diventa fondamentale sviluppare tecniche e metodi per mitigare questo fenomeno che vadano dal miglioramento delle caratteristiche proprie dei materiali da costruzione fino ad un'organizzazione delle città sempre più efficiente e sostenibile.

### *1.5.1 Utilizzo di materiali riflettenti*

Si parla di materiali naturali, come il marmo bianco, caratterizzati da un'elevata riflettanza alla radiazione solare ma anche di materiali artificiali, di colorazione chiara anche questi, con un coefficiente di riflettanza elevato. Vengono studiati anche rivestimenti colorati con elevata riflettanza nello spettro infrarosso o rivestimenti intelligenti composti da additivi nanotecnologici come vernici termocromatiche e Phase Change Materials (PCM) che migliorano le proprietà ottiche e termiche. In generale, comunque, l'applicazione di superfici riflettenti migliora sensibilmente le condizioni di vita in città in termini di abbassamento di temperatura (Seghetti, 2015). All'interno di queste tecnologie rientra quella del Cool Roof. È un sistema tecnologico che si basa sull'utilizzo di materiali caratterizzati da elevati livelli di proprietà radiative, ovvero materiali altamente riflettenti ed emissivi, applicati sulle superfici delle coperture al fine di ridurre l'assorbimento dell'energia solare durante il giorno e successivamente di emettere l'energia assorbita durante il periodo serale.





*Figura 6, esempio di cool roof. Fonte: roofmaster.ca*

Questi materiali presentano una colorazione bianca e possono essere vernici o elementi prefabbricati. Queste tecnologie alleviano notevolmente l'intensità dell'isola di calore urbana e il loro rendimento è direttamente correlato ai valori di albedo, dove i valori più alti corrispondono ai materiali con tonalità più chiare. Uno studio del 2022 effettuato nella città australiana di Blacktown City ha dimostrato che la sostituzione di una strada in asfalto con una in calcestruzzo chiaro ha ridotto la temperatura superficiale di addirittura 20°C (Karimipour, et al., 2022). I Cool Roof forniscono un apporto positivo anche in termini di bilancio energetico grazie ai bassi flussi di calore sensibile dovuti all'elevata riflettività della tecnologia. I benefici all'interno degli edifici invece, riguardano l'isolamento termico data la capacità di mantenere basse le temperature, di conseguenza, l'utilizzo dei climatizzatori è ridotto permettendo un risparmio energetico ed economico (Escalona, 2020). Il risparmio energetico ottenuto negli edifici che utilizzano il cool roof varia dal 15.0% al 35.7%. Il massimo risparmio energetico è stato riscontrato per i cool roof nella zona climatica tropicale. La riduzione media della temperatura superficiale del tetto è di 4.7 °C, 2.4 °C, 2.3 e 1.4 °C rispettivamente per le zone climatiche temperate, tropicali, caldo-asciutte e composite. La massima riduzione della temperatura superficiale del tetto è stata riscontrata nella zona climatica temperata rispetto alle altre zone climatiche (Rawat & Singh, 2022).

### 1.5.2 Copertura vegetale e green roofs

Le aree aperte alberate possono essere più fresche fino a 5°C rispetto a quelle prive di vegetazione, i muri situati all'ombra possono avere una temperatura inferiore di 10-25°C rispetto ai muri esposti alla radiazione solare. La decisione su quale specie vegetale impiantare, naturalmente, sarà presa in base alle caratteristiche del clima locale e in base a quanto riesca a sopportare l'ecosistema urbano; vengono quindi preferite, ad esempio, specie a crescita veloce e resistenti alla siccità, o alberi che richiedono poche potature. Nei climi temperati verranno privilegiate le piante decidue, le quali in inverno permettono il passaggio di gran parte della radiazione solare schermandola invece nei mesi caldi. Le specie più grandi dovrebbero essere posizionate di preferenza sul lato occidentale e orientale dell'abitazione (per schermare i muri dai raggi obliqui del sole) mentre il lato settentrionale dovrebbe eventualmente essere riservato a piante sempreverdi in grado di attenuare i venti freddi. Se non ci fosse la possibilità o lo spazio per piantare grandi alberi resterebbero almeno due scelte: si potrà puntare su specie rampicanti oppure ricorrere a un tetto verde. Un tetto verde è composto da un buon rivestimento impermeabilizzante e coibentante ricoperto da un substrato dove crescono le radici della vegetazione, solitamente composta da erbacee perenni o al massimo piccoli arbusti (Danieli, 2020).

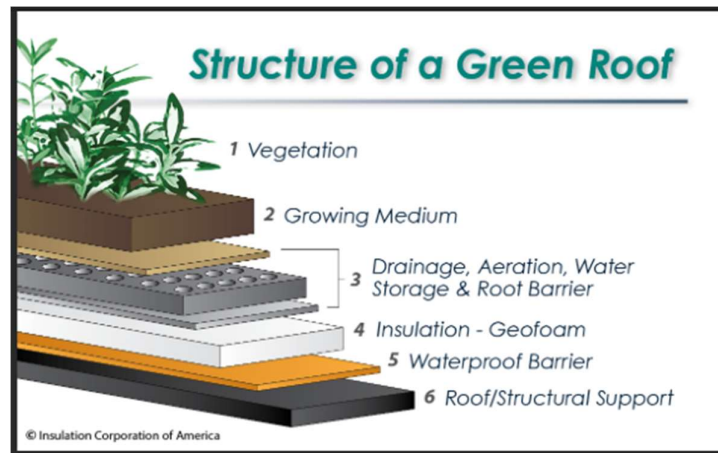


Figura 7, Struttura di un green roof. Fonte: insulationcorp.com

Il Green Roof è una soluzione tecnologica di copertura ad elevati livelli prestazionali e contribuisce in maniera positiva al bilancio energetico, all'ambiente, all'isolamento e al

risparmio energetico dell'edificio. Le tipologie di coperture vegetali sono di due tipi: intensiva, caratterizzata dalla presenza di arbusti che necessitano di uno strato di coltura tra i 20 e 150cm; estensiva, caratterizzata da specie vegetali di ridotta altezza e basso livello di manutenzione (1-2 volte l'anno). Queste hanno bisogno di uno strato di coltura di 15cm. I green roofs, infatti, forniscono un apporto positivo al contributo energetico grazie al flusso di calore latente, valore che si ottiene mediante l'utilizzo di una parte della radiazione incidente nel processo di evapotraspirazione, al flusso di calore sensibile, che viene contenuto riducendo l'incremento della temperatura dell'aria; alla capacità termica del sistema, che assorbe l'80% dell'energia utilizzandone circa il 70% nei processi di evapotraspirazione. Per quanto riguarda il bilancio ambientale, invece, si tiene conto di fattori come la decarbonizzazione, capacità caratteristica di un sistema vegetale, che permette la riduzione degli inquinanti in atmosfera, la cattura della CO<sub>2</sub> ed altri gas a effetto serra. Questa tecnologia riesce anche a consentire il controllo del deflusso delle acque meteoriche con la conseguente riduzione della quantità d'acqua in discarica. Si notano anche benefici all'interno degli edifici. Questi riguardano l'isolamento acustico e l'isolamento termico. Quest'ultimo si deve all'impedimento dell'incidenza diretta dei raggi solari sulla superficie della copertura, evitando di conseguenza l'innalzamento delle temperature superficiali (Escalona, 2020).

### *1.5.3 Raffrescamento passivo*

Anche la conformazione delle città e degli edifici ha un effetto sul fenomeno dell'isola di calore. A questo riguardo lo sfruttamento della ventilazione naturale rappresenta una soluzione intelligente per garantire il raffrescamento passivo degli edifici, specialmente nei climi caldi e nelle stagioni estive. Questo fenomeno si basa sul movimento e il rinnovamento dell'aria, che sono tanto maggiori quanto più evidenti sono le differenze di temperatura e pressione tra l'interno e l'esterno e che sottraggono calore alle strutture edilizie per convezione termica. I sistemi di raffrescamento passivo sono basati sui seguenti principi fisici: effetto camino ottenuto per differenza di temperatura dell'aria; raffrescamento ventilativo, basato sull'effetto Venturi e ottenuto per differenza di pressione dell'aria; convogliamento del vento tramite canalizzazioni appositamente create; raffrescamento convettivo che sfrutta i benefici della ventilazione notturna; raffrescamento evaporativo ottenuto per evaporazione dell'acqua in presenza di vento. L'effetto camino sfrutta la variazione naturale del livello di pressione e di densità dell'aria provocata dal gradiente termico tra l'interno e l'esterno che, a sua volta, genera un movimento dell'aria che procede dalla zona ad alta verso quella a bassa densità. Il

raffrescamento ventilativo sfrutta invece l'effetto esercitato dalla pressione del vento sull'edificio. Il lato orientato perpendicolarmente alla direzione prevalente dei venti, infatti, è esposto a una pressione maggiore (sovra-pressione) rispetto a quello contrapposto (depressione). L'aria entra dalle aperture poste sulle pareti ad alta pressione, muovendosi attraverso l'edificio fino a raggiungere il lato a bassa pressione, dove viene espulsa. Questo fenomeno è basato sull'Effetto Venturi secondo cui quando un fluido si muove in modo stazionario, al variare della sezione di passaggio variano la velocità e la pressione del moto.

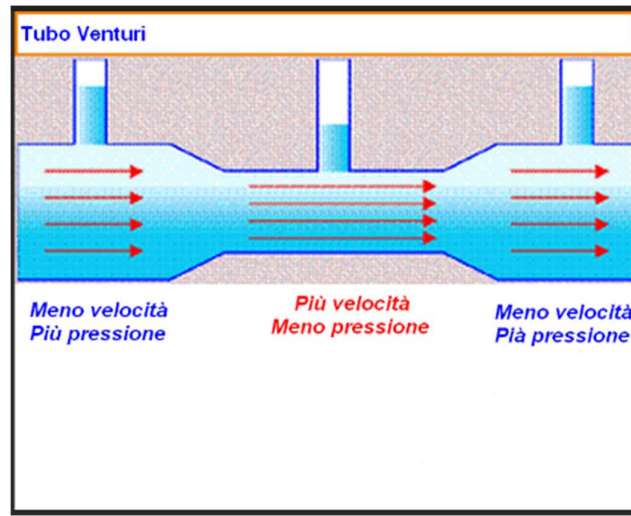


Figura 8, effetto Venturi. Fonte: Meteolive.it

In questo caso, quindi, più diminuisce la sezione, più si ha un aumento della velocità del flusso e dell'energia cinetica e una diminuzione della pressione. Il raffrescamento per convogliamento sfrutta invece la torre del vento. Questo è un sistema diffuso soprattutto nei climi caldi ed aridi mediorientali e nordafricani.



*Figura 9, torri del vento in Iran. Fonte: Flickr*

Grazie alla sua conformazione, la torre riesce a incanalare il vento trasportandolo verso il basso in direzione dei locali da raffrescare nei quali sono inserite delle aperture per creare una corretta differenza di pressione. Il raffrescamento convettivo è basato sulla refrigerazione causata dalla ventilazione notturna. Questa viene convogliata negli ambienti interni rimuovendo così il calore accumulato dalle strutture di giorno. Questa soluzione è particolarmente efficiente per i climi caratterizzati da una notevole escursione termica giornaliera, quando la temperatura notturna scende sotto la zona di comfort. Il raffrescamento evaporativo sfrutta invece il potenziale raffreddamento associato all'evaporazione dell'acqua che, quando cambia stato passando da liquido a vapore, sottrae calore all'ambiente. Questo perché durante la trasformazione di fase, le molecole d'acqua immagazzinano una quantità di energia pari al calore latente di vaporizzazione (Infobuildenergia, 2013).

## CAPITOLO 2

# RUOLO DEGLI ALBERI NELL'INQUINAMENTO ATMOSFERICO

### 2.1 Fenomeni chimico-fisici

Gli alberi sono fondamentali per alleviare il fenomeno dell'isola di calore in quanto riducono la presenza in atmosfera di particolato e di tutte quelle sostanze che contribuiscono all'effetto serra. Gli alberi, infatti, sono dei filtri per l'aria grazie al processo della fotosintesi clorofilliana che assorbe anidride carbonica e produce ossigeno. È imprescindibile la loro presenza per combattere l'inquinamento poiché trattengono, tramite le foglie, il tronco e le ramificazioni, una grande quantità di particolato atmosferico e gas inquinanti. Questo processo è permesso dagli stomi che sono situati sulla pagina inferiore della foglia e la loro funzione è consentire lo scambio gassoso fra l'interno e l'esterno della pianta. L'efficienza di questo fenomeno dipende dalla grandezza, dal numero degli stomi e dalla presenza di peli (cere e tricomi) che risiedono nella pagina inferiore della foglia. Le superfici fogliari che sono particolarmente rugose e ricche di peli catturano il particolato. Questo, una volta trattenuto, viene poi dilavato dalle piogge. I gas inquinanti, responsabili dell'effetto serra, vengono invece trattenuti grazie agli stomi. Più sono in quantità abbondante, maggiore è la capacità di purificare l'aria. Il processo di neutralizzazione degli inquinanti avviene poi attraverso una serie di processi chimici interni alla pianta. È stato studiato come un albero di circa 20 metri di altezza con una chioma di 10 metri per 10 metri nel complesso può assorbire in un anno circa 1 kg di particolato atmosferico (Conalpa, 2018)

### 2.1.1 Il fenomeno dell'evapotraspirazione

L'evaporazione è il processo tramite il cui l'acqua passa dallo stato liquido allo stato di vapore. L'energia che serve per far avvenire questa trasformazione è data per la maggior parte dalla radiazione solare. In assenza di questa, l'evaporazione può comunque avvenire utilizzando calore sottratto al suolo o alla massa d'acqua. La traspirazione, allo stesso modo, consiste nel passaggio allo stato di vapore dell'acqua liquida presente però nei tessuti delle piante e nel successivo trasferimento del vapore all'atmosfera che avviene attraverso la superficie delle foglie. L'entità (o tasso) di evaporazione dipende proporzionalmente dal flusso netto di calore latente. Questo si definisce come la quantità di calore necessaria per la rottura dei legami a idrogeno durante il processo di evaporazione di un'unità di massa d'acqua. La stessa quantità di calore è rilasciata nel momento in cui tali legami si riformano per condensazione. L'evaporazione dipende anche dal calore sensibile. Questo rappresenta invece quanto calore viene scambiato tra due corpi con conseguente diminuzione del delta di temperatura. È quindi il calore che produce una variazione di temperatura in un oggetto. Il frazionamento tra calore sensibile e latente è importante quindi per studiare il flusso evaporativo. Il rapporto tra i due viene definito come rapporto di Bowen e si esprime come:

$$\mathcal{K} = \frac{H}{\lambda E} = \gamma \frac{T_0 - T_a}{e_s - e_a}$$

Dove  $\lambda$  rappresenta la costante psicometrica, funzione di pressione e calore specifico dell'aria a pressione costante. Il termine  $E$  rappresenta il flusso evaporativo,  $\gamma$  il calore latente di vaporizzazione,  $H$  il flusso di calore sensibile ceduto alla corrente d'aria. I termini  $e_a$  ed  $e_s$  sono definiti rispettivamente come pressione di vapore effettiva ad una quota di riferimento e pressione di vapore saturo (Claps & Allamano, 2011).

## 2.2 Le diverse tipologie di alberi

Le performance degli alberi antismog sono impressionanti. Questi sono in grado di assorbire quasi 4000 chili di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) nell'arco di vent'anni di vita, riducono inoltre la dispersione in atmosfera delle polveri sottili PM10 e abbassano la temperatura dell'ambiente circostante. È una classifica ufficiale di Coldiretti, stilata nel 2018, a mettere a fuoco quali specie sono più adatte a combattere l'inquinamento atmosferico.

1. Acero Riccio (*Acer platanoides*)

Primo in questa speciale classifica di piante antismog è l'Acero riccio. Le peculiarità di questa pianta sono le foglie fra i 10 e i 15 cm a punta ricurva (da cui deriva l'appellativo di "riccio"). L'acero assorbe fino a 3800 chili di CO<sub>2</sub> in vent'anni, mitiga l'inquinamento e abbatte le isole di calore in ambienti urbani.

2. Betulla verrucosa (*Betula pendula*)

La Betulla verrucosa è in grado di crescere sui terreni più impervi. Era considerata albero sacro presso i Celti e le tribù germaniche. Anch'essa in grado di aspirare 3100 chili di CO<sub>2</sub> dall'aria.

3. Cerro (*Quercus cerris*)

Terzo posto a parimerito per il Cerro che, con i suoi 35 metri di altezza, assorbe in un ventennio fino a 3.1 tonnellate di anidride carbonica.

4. Ginkgo (*Ginkgo Biloba*)

Il Ginkgo Biloba assorbe 2800 chili di CO<sub>2</sub>. Fornisce un'importantissima protezione contro gas, polveri e afa, adattandosi a tutti i tipi di terreno (compresi quelli urbani). Si tratta di un albero antichissimo, risalente addirittura a 250 milioni di anni fa.

5. Tiglio nostrano (*Tilia Plathyphyllos*)

Un gigante dalla crescita rapidissima, presentissimo nelle strade e nei parchi di città. Altissime capacità antinquinanti.

6. Bagolaro (*Celtis australis*)

Particolarmente adatto all'assorbimento del diossido di carbonio (3.660 kg in 20 anni), il Bagolaro può crescere fino ad un'altezza di 20-25 metri.

7. Tiglio selvatico (*Tilia cordata*)

Riconosciuta come una specie eccellente nel catturare la Co<sub>2</sub> e nel ridurre considerevolmente lo smog urbano, questo parente alto del tiglio è tipicamente piantato nei giardini di città.

8. Olmo comune (*Ulmus minor*)

L'olmo comune, con la sua capacità di trasformare migliaia di kg di CO<sub>2</sub> in biomassa, si sviluppa sia in altezza (fino a 30 metri) che in larghezza.

9. Frassino comune (*Fraxinus excelsior*)

Dalla crescita velocissima, questo gigante verde può arrivare a 40 metri di altezza ed aspirare oltre 3000 kg di Co<sub>2</sub> in 30 anni, oltre ad essere un perfetto mangia-inquinanti dell'aria

10. Ontano nero (*Alnus glutinosa*)



L'Ontano nero, con un'altezza media di 10 metri, è il piccolino del gruppo. Una caratteristica che non gli impedisce di bloccare fino a 2600 chili di CO2 e di garantire un forte assorbimento di inquinanti gassosi (Tirelli, 2019)

SPECIE	CO2 CATTURATA (tonnellate in 20 anni)	CAPACITA' ANTI INQUINANTI GASSOSI	CAPACITA' ANTI POLVERI	CAPACITA' TOTALE DI MITIGAZIONE
<b>Acerò riccio</b> (Acer platanoides)	3,8	ALTA	MEDIA	OTTIMA
<b>Betulla verrucosa</b> (Betula pendula)	3,1	ALTA	MEDIA	OTTIMA
<b>Cerro</b> (Quercus cerris)	3,1	ALTA	MEDIA	OTTIMA
<b>Ginkgo</b> (Ginkgo Biloba)	2,8	ALTA	ALTA	OTTIMA
<b>Tiglio nostrano</b> (Tilia Platyphyllos)	2,8t	ALTA	ALTA	OTTIMA
<b>Bagolaro</b> (Celtis australis)	2,8t	ALTA	ALTA	OTTIMA
<b>Tiglio selvatico</b> (Tilia cordata)	2,8t	ALTA	ALTA	OTTIMA
<b>Olmo comune</b> (Ulmus minor)	2,8t	ALTA	MEDIA	OTTIMA
<b>Frassino comune</b> (Fraxinus excelsior)	2,8t	ALTA	MEDIA	OTTIMA
<b>Ontano nero</b> (Alnus glutinosa)	2,6t	ALTA	MEDIA	OTTIMA

Figura 10, classifica Coldiretti piante anti inquinamento, 2018, [www.coldiretti.it](http://www.coldiretti.it)

## CAPITOLO 3

### FUNZIONAMENTO DEL SOFTWARE ENVI-met

#### 3.1 Cos'è ENVI-met?

Dal sito ufficiale dello stesso software: *“ENVI-met è un software di simulazione tridimensionale del microclima che consente di creare condizioni di vita più sostenibili in un ambiente in continua evoluzione. Le applicazioni interattive di ENVI-met possono analizzare scientificamente gli effetti di diversi scenari di urbani progettati da architetti o urbanisti. I moduli di calcolo di ENVI-met coprono un ampio spettro di discipline scientifiche, dalla fluidodinamica e termodinamica alla fisiologia vegetale e alla scienza del suolo. Il principio guida di ENVI-met è quello di integrare tutti questi diversi approcci in un unico modello, in modo che tutti gli elementi possano interagire tra loro e riprodurre le sinergie reali. Ciò rende ENVI-met diverso dalle altre piattaforme di modellazione per la simulazione ambientale. Ci sono molti software che calcolano il flusso d'aria tra gli edifici o la radiazione solare sulle facciate, ma pochi considerano l'ambiente urbano complesso come un unico sistema e/o considerano la moltitudine di processi che avvengono tra gli elementi.”*

#### 3.2 Il modello

Il modello di ENVI-met consiste in tre diversi sotto modelli che interagiscono tra di loro:

- Un modello 1-D chiamato “boundary model”;
- Un modello 3-D chiamato “atmospheric model”;
- Un modello 3-D chiamato “soil model”.

Il modello unidimensionale viene utilizzato principalmente per l'inizializzazione del modello tridimensionale e per definire le condizioni al contorno. Si estende dal livello del suolo ( $z=0$ ) fino a un'altezza di  $H = 2500$  m dal suolo.

Edifici, vegetazione e modello digitale di elevazione si limitano ad una griglia rettangolare. Questa fa riferimento ad un modello tridimensionale la cui area è suddivisa in griglie a celle rettangolari  $I \times J \times K$  con dimensioni  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ . Le distanze orizzontali  $\Delta x$  e  $\Delta y$  sono costanti per tutte le celle della griglia. La distanza orizzontale  $\Delta z$  può essere impostata su costante o telescopica. Se viene impostata costante allora tutte le celle della griglia avranno la stessa altezza  $\Delta z$ . Si può decidere che la cella più bassa, la più vicina al suolo, venga suddivisa in cinque sottocelle in modo che l'estensione verticale di queste celle del reticolo sia di  $0.2\Delta z$ . Il vantaggio di questa impostazione è che i processi di scambio tra l'atmosfera e il terreno, che hanno un'influenza sostanziale sul microclima a livello del suolo, possono essere simulati in modo più preciso. Per il calcolo dei flussi di temperatura e umidità internamente al terreno si fa riferimento ad un modello del suolo costituito da  $I \times J \times N$  celle.  $N$  è attualmente impostato su 14 e la spaziatura verticale di queste celle è telescopica e va dal livello del suolo a 1.75 m sotto il livello del suolo. Per effettuare questo calcolo bisogna però definire un modello monodimensionale poiché si fa riferimento soltanto all'asse  $z$  (Huttner, 2012).

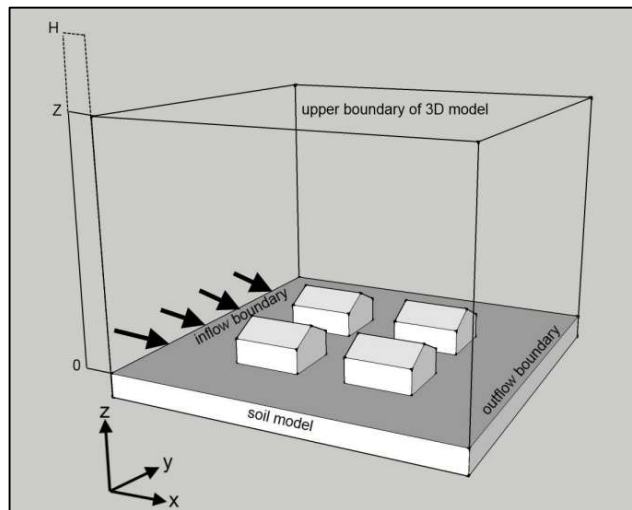


Figura 11, schema semplificato del modello

### 3.3 La struttura del software

Per una simulazione ottimale dei vari processi, ENVI-met richiede necessariamente la soddisfazione di alcuni parametri fondamentali:

- La risoluzione delle griglie con cui si realizza il modello dell'area di studio deve avere una dimensione tale che permetta l'inserimento di edifici e alberi. Questa deve essere quindi inferiore a 10m altrimenti il software non sarà in grado di svolgere la simulazione;
- Il programma deve essere in grado di effettuare il bilancio energetico su superfici di diverso tipo;
- La simulazione deve includere i fenomeni fisico-chimici tipici delle piante;
- Il sistema di calcolo dei processi atmosferici deve poter fare delle previsioni abbastanza accurate.

ENVI-met è in grado di soddisfare tutti i requisiti precedentemente elencati. Per effettuare i calcoli usufruisce di equazioni di tipo termo-fluidodinamico che lo rendono in grado di studiare i comportamenti di modelli climatici tridimensionali. ENVI-met ha diverse interfacce, ognuna delle quali fa parte del processo di simulazione o legge i dati di output. L'interfaccia è il risultato di tre componenti principali di input che compongono la struttura del software. Questa svolge la vera e propria simulazione applicando i modelli di calcolo. I risultati dei calcoli effettuati vengono raggruppati in file di output leggibili e analizzati su altre due interfacce di lettura. (Battistella, 2014).

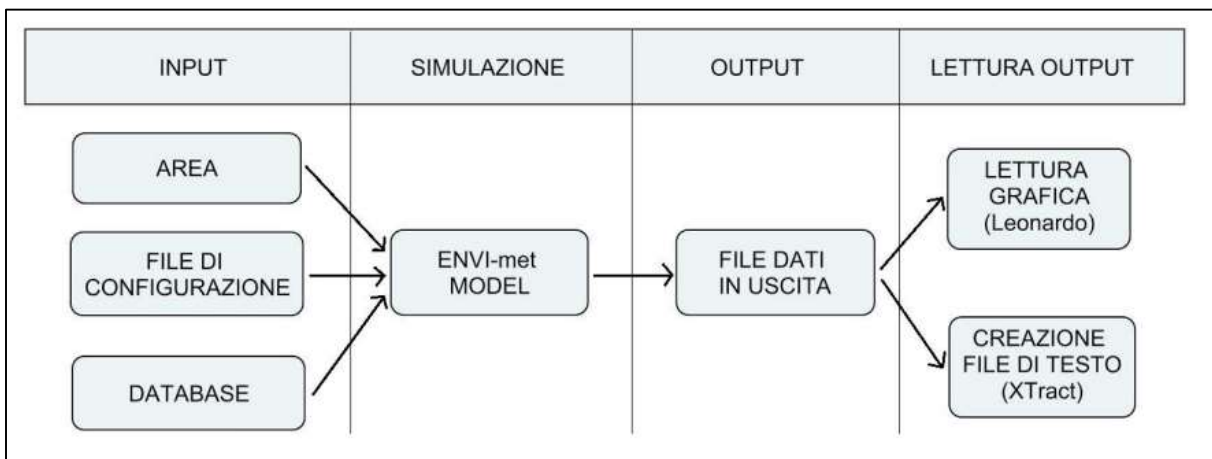


Figura 12, diagramma rappresentante la struttura di Envi-met. Fonte: Battistella, 2014

### 3.4 Le interfacce

Appena lo si avvia ENVI-met si presenta con la prima interfaccia consistente nelle varie sezioni del software:

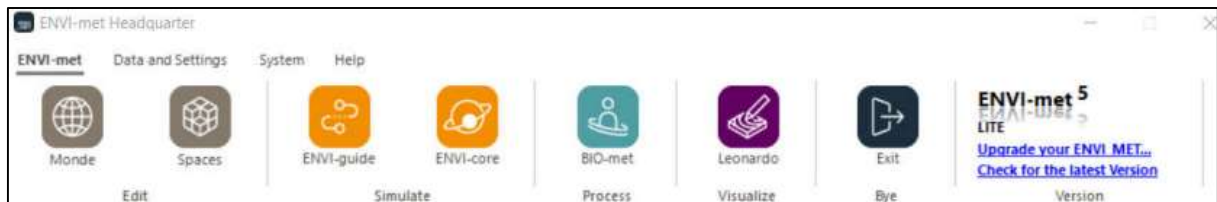


Figura 13, prima interfaccia ENVI-met

Cliccando su ENVI-met ci appaiono 7 diverse icone rappresentanti ognuna una sezione del programma.

- Monde è l'editor che ci permette di digitalizzare il nostro spazio di lavoro, per esempio partendo da un'immagine presa da Google Earth, prima di convertirlo in un file .INX, cioè la nostra griglia ortogonale costituita da un insieme di celle;
- Spaces ci permette di lavorare nel file .INX configurandolo in modo da eseguire la simulazione che vogliamo. Ci permette di aggiungere alberi ed edifici, di intercambiare i materiali da costruzione e le tipologie di suolo e pavimentazioni. Possiamo inserire green roofs e modificare l'altezza degli edifici.

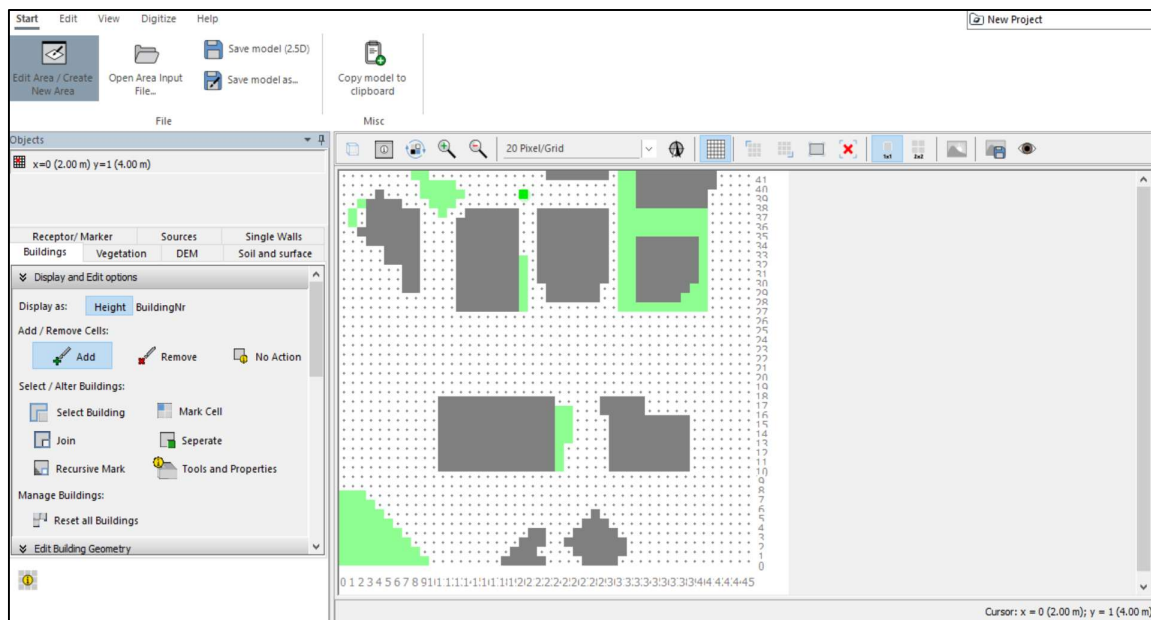


Figura 14, sezione Spaces di ENVI-met

- ENVI-guide è la sezione che consente di inserire i dati meteorologici del giorno del quale vogliamo fare la simulazione, da temperatura e umidità nei modelli più semplici, a direzione e intensità del vento in quelli più complicati. Permette inoltre di definire il range orario nel quale svolgere la simulazione. Una volta inseriti tutti i dati verrà creato un file .SIMX.

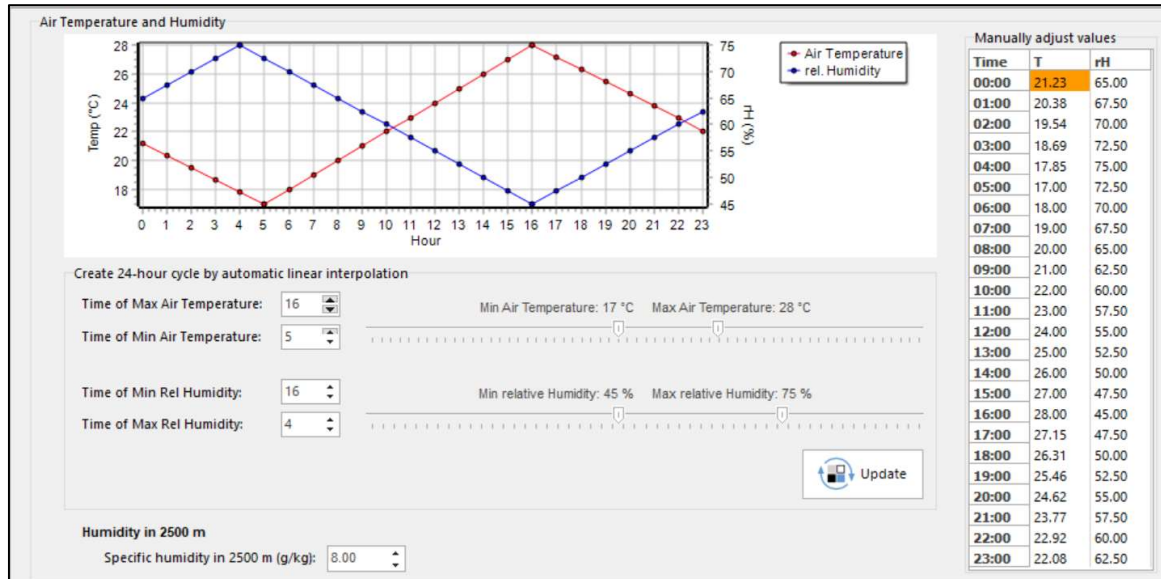


Figura 15, sezione ENVI-guide di ENVI-met

- Una volta inseriti anche i dati meteo si avvia ENVI-core. Questo, inserendo il file.SIMX, ci permette di eseguire la vera e propria simulazione. Vengono elencate minuto dopo minuto tutte le operazioni che il programma sta svolgendo e viene indicata anche l'ora corrente della simulazione così da poterla eventualmente stoppare nell'ora che ci interessa.

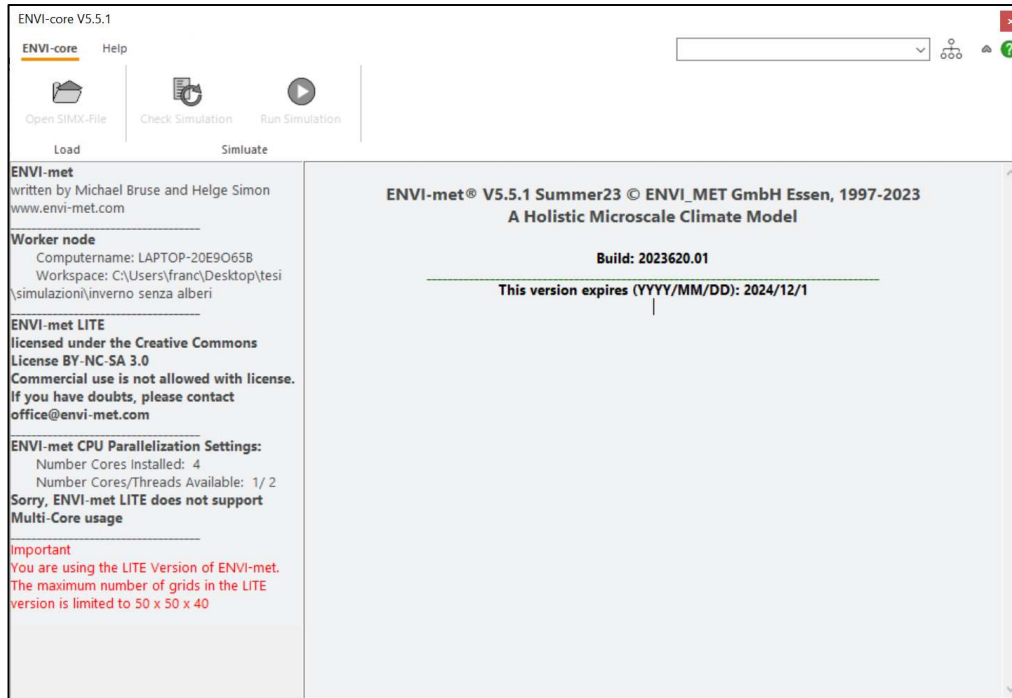


Figura 16, sezione ENVI-core di ENVI-met

- Biomet è uno strumento di processazione che permette di calcolare l'indice di comfort termico partendo dai dati di output di una simulazione.
- Leonardo è la sezione che permette di visualizzare i dati di output raffigurandoli come mappe bi o tridimensionali. Ci consente di scegliere l'ora della simulazione da rappresentare, il parametro (come per esempio la temperatura), l'altezza dal suolo a cui si vuole misurarlo, solitamente 1.40m. Ci permette anche di cambiare la legenda, le scala dei colori e tutte le impostazioni grafiche.



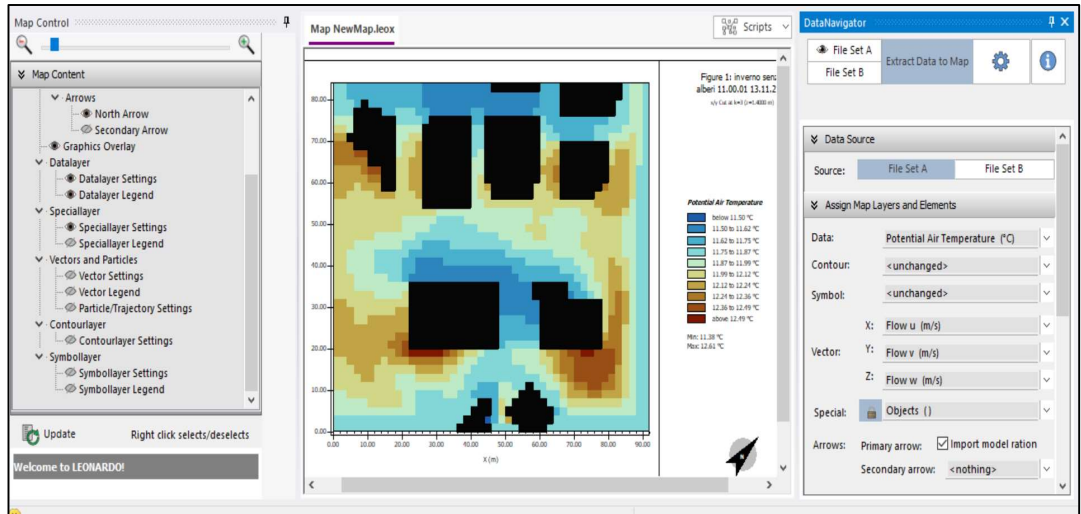


Figura 17, sezione Leonardo di ENVI-met

Dall'interfaccia principale, cliccando invece su Data and Settings ci appariranno le seguenti sezioni:

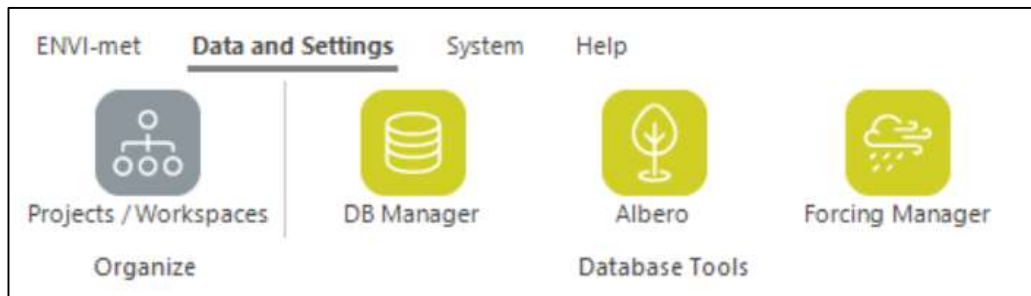


Figura 18, Data and Settings di ENVI-met

- Projects/Workspaces ci permette di selezionare il progetto a cui vogliamo lavorare;
- DB Manager è il database di ENVI-met dove sono presentati tutti i materiali da cui si può attingere per le simulazioni con una loro descrizione e tutte le caratteristiche strutturali e prestazionali che possiedono, dall'albedo fino anche al colore.

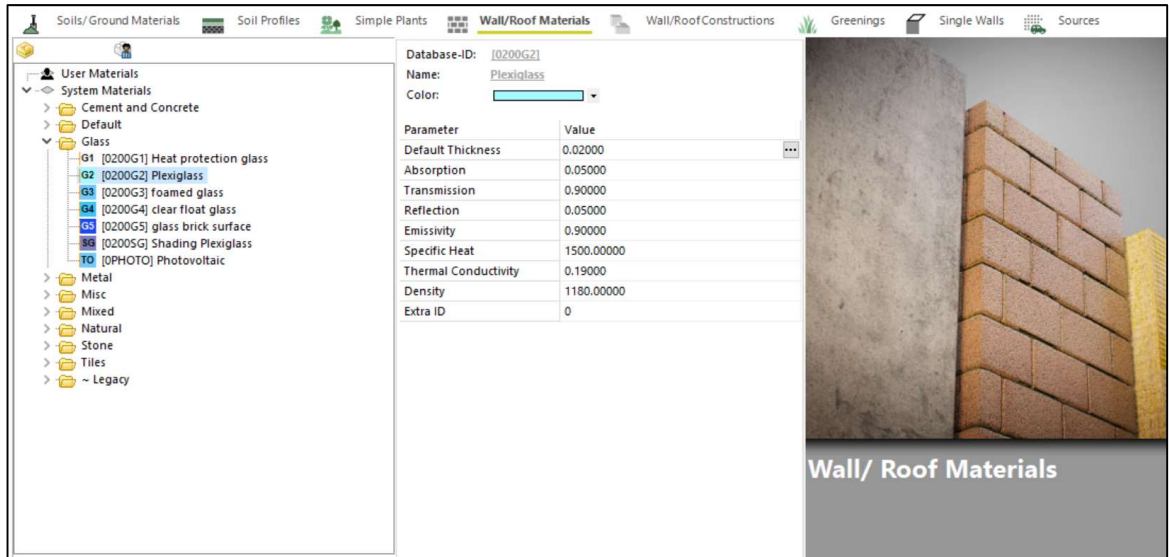


Figura 19, esempio di materiale all'interno di DB Manager

- Albero è invece il database contenente le piante. Le presenta tramite una raffigurazione tridimensionale e ne annota le dimensioni e le caratteristiche come, per esempio, il diametro della chioma.

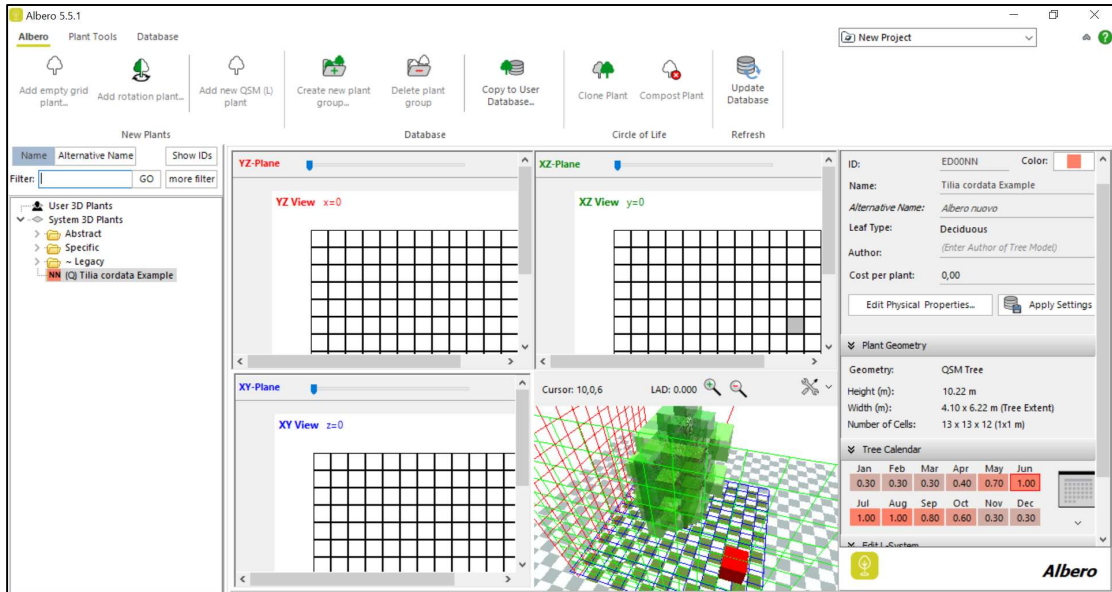


Figura 20, esempio di pianta contenuta nella sezione Albero di ENVI-met

- Forcing Manager permette di inserire condizioni al contorno molto dettagliate come temperatura dell'aria, umidità, dati relativi al vento e alla copertura nuvolosa, intensità della radiazione solare e precipitazione.

## CAPITOLO 4

### IL GIORNO RAPPRESENTATIVO

#### 4.1 Definizione del giorno rappresentativo

Nello svolgimento di una simulazione ambientale è necessario tenere in considerazione una grandissima quantità di dati. ENVI-met, però, fornisce dati di output relativi ad una specifica giornata. Non è quindi facile individuare il giorno preciso su cui lavorare. Per questo motivo si introduce la tecnica del giorno rappresentativo consistente nel determinare il giorno in cui le condizioni climatiche di temperatura e umidità siano le più possibili rappresentanti del periodo in questione, per esempio l'estate o l'inverno. L'individuazione di questo giorno ci permette quindi di compiere simulazioni più coerenti ed efficaci possibile. Nella pratica il giorno rappresentativo è il giorno per il quale la somma degli errori quadratici medi tra i parametri monitorati ogni ora (cioè, mediati all'interno di ciascuna ora) e degli stessi parametri per tutti gli altri giorni alle stesse ore è minima (Tirabassi, et al., 2005).

#### 4.2 Tecniche per l'individuazione del giorno rappresentativo

Si ha quindi la necessità di individuare un set di dati di una serie giornaliera, mensile o stagionale che meglio rappresenti il periodo in esame. Si utilizza la tecnica del giorno rappresentativo.

Si introduce la matrice A:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^{24} (c_{ki} - c_{kj})^2, \quad i, j = 1, 2, \dots, N$$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
1	0	107.7	61.51	92.32	519.3	281	118.92	18.7	384.88	130.29	68.21	146.81	217.62	73.68	227.14	391.76	349.53	110.47	154.14	916.83	1150.5	846.55	518.26
2	107.7	0	41.05	33.34	198.88	171.48	55.02	115.94	821.48	296.29	78.17	42.33	33.52	23.62	44.54	173.22	111.07	23.13	15.88	428.17	682.54	450.83	228.78
3	61.51	41.05	0	31.21	331.31	149.63	34.45	43.65	569.43	192.76	84.52	99.38	102.05	7.31	97.81	208.07	156.78	30.28	74.03	627.12	769.45	531.56	276.25
4	92.32	33.34	31.21	0	220.68	105.32	82.58	100.32	678.86	184.03	129.13	112.17	99.9	31.36	90.26	124.7	99.57	42.11	69.74	506.47	620.38	413.75	208.68
5	519.3	198.88	331.31	220.68	0	310.32	374.24	539.1	1571.4	754.93	475.63	304.51	169.56	295.86	122.84	152.58	129.09	277.07	173.84	101.57	352.9	220.41	115
6	281	171.48	149.63	105.32	310.32	0	193.18	292.96	849.26	261.01	372.01	331.01	286.84	168.14	253.6	61.06	77.17	172.23	250.4	539.93	391.28	254.19	139.42
7	118.92	55.02	34.45	82.58	374.24	193.18	0	95.3	716.78	268.47	73.95	68.51	90.78	25.04	113.8	263.26	167.79	24.43	84.08	603.81	796.68	556.07	328.08
8	18.7	115.94	43.65	100.32	539.1	292.96	95.3	0	366.9	155.37	68.81	152.53	207.32	60	214.4	401.2	349.71	104.85	158.62	926.83	1143.84	849.97	509.1
9	384.88	821.48	569.43	678.86	1571.4	849.26	716.78	366.9	0	284.49	658.01	907.61	1066.82	660.7	1052.2	1163.96	1172.75	758.31	954.18	2286.35	2231.74	1862.81	1373.86
10	130.29	296.29	192.76	184.03	754.93	261.01	268.47	155.37	284.49	0	276.66	374.28	474.51	232.29	497.99	439.33	432.66	255.24	408.29	1234.14	1163.87	902.72	646.99
11	68.21	78.17	84.52	129.13	475.63	372.01	73.95	68.81	658.01	276.66	0	37.62	111.13	63.95	171.21	446.35	330.54	67.82	89.49	782.3	1160.95	860.1	553.25
12	146.81	42.33	99.38	112.17	304.51	331.01	68.51	152.53	907.61	374.28	37.62	0	35.53	62.73	88.23	342.63	220.62	38.92	37.29	535.42	918.45	656.74	412.39
13	217.62	33.52	102.05	99.9	169.56	286.84	90.78	207.32	1066.82	474.51	111.13	35.53	0	65.86	24.8	241.08	134.83	48.55	11.46	341.07	687.76	466.91	254.82
14	73.68	23.62	7.31	31.36	295.86	168.14	25.04	60	660.7	232.29	63.95	62.73	65.86	0	70.56	206.64	143.47	13.05	44.94	565.85	753.12	516.47	274.16
15	227.14	44.54	97.81	90.26	122.84	253.6	113.8	214.4	1052.2	497.99	171.21	88.23	24.8	70.56	0	186.64	120.71	69.77	23.64	299.73	596.22	390.23	177.32
16	391.76	173.22	208.07	124.7	152.58	61.06	263.26	401.2	1163.96	439.33	446.35	342.63	241.08	206.64	186.64	0	36.57	204.47	222.2	309.65	219	113.57	48.1
17	349.53	111.07	156.78	99.57	129.09	77.17	167.79	349.71	1172.75	432.66	330.54	220.62	134.83	143.47	120.71	36.57	0	119.72	138.99	260.62	263.43	138.54	60.53
18	110.47	23.13	30.28	42.11	277.07	172.23	24.43	104.85	758.31	255.24	67.82	38.92	48.55	13.05	69.77	204.47	119.72	0	41.45	523.74	709.55	485.74	274.33
19	154.14	15.88	74.03	69.74	173.84	250.4	84.08	158.62	954.18	408.29	89.49	37.29	11.46	44.94	23.64	222.2	138.99	41.45	0	377.25	718.06	480.57	248.88
20	916.83	428.17	627.12	506.47	101.57	539.93	603.81	926.83	2286.35	1234.14	782.3	535.42	341.07	565.85	299.73	309.65	260.62	523.74	377.25	0	310.77	224.48	215.31
21	1150.5	682.54	769.45	620.38	352.9	391.28	796.68	1143.84	2231.74	1163.87	1160.95	918.45	687.76	753.12	586.22	219	263.43	709.55	718.06	310.77	0	48.03	179.18
22	846.55	450.83	531.56	413.75	220.41	254.19	556.07	849.97	1862.81	902.72	860.1	656.74	466.91	516.47	390.23	113.57	138.54	485.74	480.57	224.48	48.03	0	76.07
23	518.26	228.78	276.25	208.68	115	139.42	328.08	509.1	1373.86	646.99	553.25	412.39	254.82	274.16	177.32	48.1	60.53	274.33	248.88	215.31	179.18	76.07	0

Figura 21, Matrice  $A_{ij}$

“N” indica il numero di giorni all’interno del periodo per il quale calcoliamo il giorno rappresentativo,  $c_{ki}$  rappresenta il valore del parametro in esame, ad esempio la temperatura, nel giorno  $i$  all’ora  $k$ . Utilizziamo poi  $A_i$ :

$$A_i = \sum_{j=1}^N A_{ij}$$

Questa rappresenta la somma dei residui quadrati della  $i$ -esima riga (o  $j$ -esima colonna dato che la matrice  $A_{ij}$  è simmetrica e con tutti zero nella diagonale). Il giorno rappresentativo è l’ $i$ -esimo giorno per il quale la quantità  $A_i$  è la minore ottenuta (Tirabassi & Buske, 2021).

giorni/ore	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
1	7	95	29	65	24	67	11	15	95	22	31	15	56	26	26	41	39	72	77	87	1	51	93	2
2	76	26	23	49	71	33	67	6	97	4	70	64	95	7	96	89	65	78	47	64	34	69	25	56
3	89	45	67	38	42	65	74	69	33	88	78	8	46	36	69	31	3	80	20	52	24	54	98	67
4	61	91	24	6	20	98	61	12	81	90	4	39	99	11	66	22	62	19	3	97	72	59	62	32
5	97	53	23	67	34	34	17	55	8	36	61	52	22	82	95	93	66	57	74	33	57	91	30	49
6	19	90	19	18	58	28	12	3	9	70	80	53	42	13	70	97	33	3	49	28	21	72	76	32
7	5	70	91	42	65	84	33	53	33	25	38	83	31	48	24	9	23	18	84	10	76	25	32	32
8	66	57	79	9	75	57	84	85	30	49	13	45	55	73	25	89	88	88	36	17	91	85	59	46
9	35	90	32	96	100	65	48	20	99	27	15	64	11	17	14	14	10	55	60	42	71	45	24	30
10	95	27	6	87	13	4	32	42	11	85	94	27	97	86	13	45	72	13	4	6	62	49	49	70
11	48	59	12	50	12	73	74	53	77	45	2	32	89	21	84	46	99	22	12	64	82	24	14	44
12	86	72	97	35	99	54	28	41	15	51	66	24	10	2	17	54	44	65	6	79	32	44	13	85
13	24	90	34	79	50	58	72	34	47	48	52	100	56	10	10	40	1	98	61	17	18	76	15	74
14	16	33	70	3	5	7	5	45	75	47	15	73	43	32	96	87	13	70	90	41	41	76	41	6
15	65	67	81	49	43	36	31	28	1	5	38	66	86	84	63	70	13	80	99	29	68	49	20	61
16	80	3	64	10	49	7	58	58	25	91	25	66	14	49	22	80	11	47	56	98	52	76	20	3
17	95	70	48	80	96	38	11	100	75	57	57	25	69	50	39	41	100	19	40	1	40	5	66	57
18	81	33	94	19	10	66	83	40	13	38	36	51	44	53	84	28	4	20	3	94	6	45	74	2
19	13	53	49	71	90	35	88	80	7	77	14	38	56	69	36	63	90	32	91	29	79	49	30	83
20	67	87	56	19	81	51	26	58	65	62	7	49	11	77	26	37	88	55	44	88	70	39	9	17
21	6	26	62	63	38	74	99	60	40	13	1	39	68	90	36	47	99	70	53	79	15	20	15	36
22	92	72	8	72	60	81	62	42	28	78	97	25	9	27	99	97	52	51	79	46	33	18	27	80
23	61	41	31	97	28	33	28	75	5	19	13	74	98	77	79	48	59	83	30	42	64	56	29	46
24	45	58	77	33	30	24	94	76	93	31	95	56	53	99	14	100	45	19	46	10	64	100	15	96
25	37	41	99	33	79	96	94	95	100	20	42	73	75	82	41	92	63	31	29	83	63	7	77	17
26	53	13	40	81	31	1	87	54	1	35	25	74	74	63	40	68	12	86	1	16	57	66	76	31
27	27	78	32	93	79	73	95	36	91	17	68	32	88	38	69	41	51	18	90	40	85	6	18	69
28	18	16	67	83	89	67	26	27	82	46	16	57	40	32	57	82	21	67	85	30	99	60	33	40
29	73	1	94	30	46	1	65	37	8	37	91	77	61	93	64	1	19	46	93	18	46	84	39	91
30	6	12	18	46	50	37	36	94	92	13	41	27	15	97	90	43	5	20	75	66	26	48	5	97
31	15	90	80	77	97	31	30	63	66	91	17	57	20	36	29	71	16	23	28	11	87	11	78	32

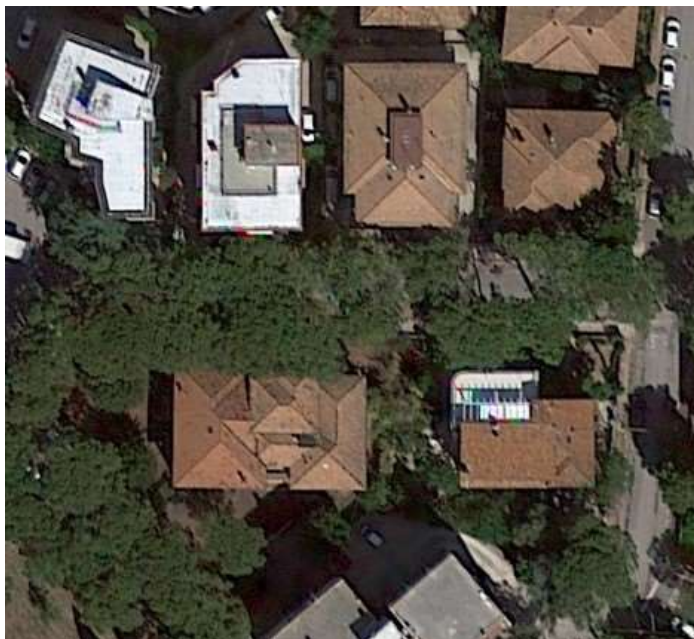
Figura 22, matrice per lo studio del caso in esame

## CAPITOLO 5

### LE SIMULAZIONI SU ENVI-MET

#### 5.1 Preparazione del modello

Questa tesi discute i risultati ottenuti da diverse simulazioni riferite ad una porzione del Viale Anita Garibaldi di Senigallia compresa tra l'incrocio tra Via Marche e Via l'Aquila e l'incrocio con Via Luciano La Marca, per una lunghezza di circa 90m.



*Figura 23, Tratto esaminato del Viale Anita Garibaldi di Senigallia*



Per ottenere il file .INX da utilizzare in Spaces si è partiti dalla visualizzazione di questo tratto di viale fornita da Google Earth ([www.googleearth.com](http://www.googleearth.com)). Grazie all'immagine satellitare vengono quindi inseriti all'interno della griglia propria di Spaces tutti gli elementi di suolo, vegetazione ed edifici ottenendo così la rappresentazione su file .INX dello stato dell'arte del tratto del viale scelto.

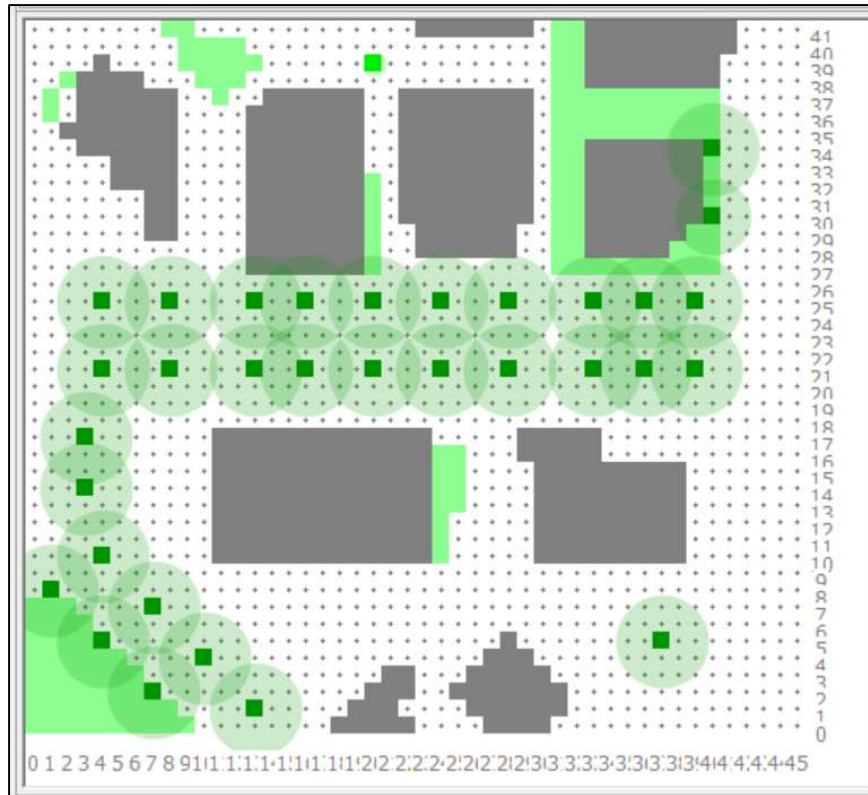


Figura 24, Rappresentazione in Spaces dello stato dell'arte del tratto del Viale Anita Garibaldi scelto

Da questo file è poi possibile partire per effettuare altre simulazioni, cambiando vegetazione, suolo e materiali da costruzione.

Tramite la tecnica del giorno rappresentativo (vedi Cap.4) vengono individuate due giornate, una estiva e una invernale, rispettivamente del 25 agosto 2022 e del 13 novembre 2022, nelle quali svolgere le simulazioni. Dal sito del SIRMIP (servizio informativo regionale Meteo-Idro-Pluviometrico) della regione Marche vengono scaricati i dati di temperatura e umidità delle centraline più vicine inseriti poi in ENVI-guide. Per la porzione di territorio in esame si sono utilizzati i dati della centralina di Senigallia (sensore 2737), la più vicina alla zona di interesse.

Dati di temperatura del 25/08/2022			
Ora	°C	Ora	°C
0	20,2	12	26,7
1	19,5	13	26,9
2	19,4	14	27
3	19	15	27,2
4	18,9	16	27,5
5	18,8	17	27,5
6	18,9	18	27,2
7	21,4	19	25,9
8	24,6	20	24,5
9	25,8	21	23,2
10	26,5	22	22
11	26,7	23	21,1

Figura 25, T(°C) del 25/08/2022

Dati di temperatura del 13/11/2022			
Ora	°C	Ora	°C
0	9,9	12	15,3
1	8,9	13	16,3
2	8,2	14	16
3	7,9	15	14,8
4	8,1	16	13,5
5	8,3	17	12,8
6	7,9	18	12
7	7,8	19	11,5
8	7,7	20	10,9
9	8,2	21	10,5
10	10,1	22	9,9
11	11,6	23	9,2

Figura 26, T(°C) del 13/11/2022

Dati di umidità del 25/08/2022			
Ora	%	Ora	%
0	68.00	12	59.00
1	71.00	13	58.00
2	72.00	14	58.00
3	73.00	15	55.00
4	74.00	16	53.00
5	75.00	17	49.00
6	76.00	18	49.00
7	66.00	19	56.00
8	53.00	20	62.00
9	54.00	21	65.00
10	55.00	22	69.00
11	58.00	23	70.00

Figura 27, Umidità (%) del 25/08/2022



Dati di umidità del 13/11/2022			
Ora	%	Ora	%
0	86.00	12	74.00
1	89.00	13	52.00
2	90.00	14	51.00
3	91.00	15	64.00
4	91.00	16	72.00
5	91.00	17	73.00
6	91.00	18	82.00
7	92.00	19	88.00
8	92.00	20	90.00
9	92.00	21	92.00
10	90.00	22	92.00
11	87.00	23	92.00

Figura 28, Umidità (%) del 13/11/2022

## 5.2 I materiali utilizzati

Dal database di ENVI-met DB Manager si sono selezionati alcuni materiali da utilizzare nelle diverse simulazioni per le pavimentazioni di strade e marciapiedi. Questi hanno caratteristiche prestazionali differenti adatte a simulare un ampio spettro di scenari.

In particolare, si sono individuati per le strade:

- Asphalt road [0200ST]<sup>1</sup>:

PARAMETRO	VALORE
Albedo	0.12
Emissività	0.9
Colore	

Figura 29, Caratteristiche prestazionali Asphalt road

<sup>1</sup> Codice relativo al materiale sul database DB Manager di ENVI-met

- Basalt Brick Road [0200BA]:

PARAMETRO	VALORE
Albedo	0.2
Emissività	0.9
Colore	

Figura 30, Caratteristiche prestazionali Basalt Brick Road



Figura 31, Esempio di strada con mattoni in basalto

- Granit shining [0200G2]:

PARAMETRO	VALORE
Albedo	0.6
Emissività	0.9
Colore	

Figura 32, Caratteristiche prestazionali Granit shining

Per i marciapiedi si sono utilizzati:

- Granit pavement [000GS]:

PARAMETRO	VALORE
Albedo	0.35
Emissività	0.9
Colore	

Figura 33, Caratteristiche prestazionali Granit pavement



Figura 34, Esempio di marciapiede in granito. Fonte: Wulstan Landscapes

- Concrete Pavement Light [0200PL]:

PARAMETRO	VALORE
Albedo	0.5
Emissività	0.9
Colore	

Figura 35, Caratteristiche prestazionali Concrete pavement light

Da Albero, il database di ENVI-met per la vegetazione si sono selezionate le seguenti piante:

- Pinus Pinea [0000PP]:

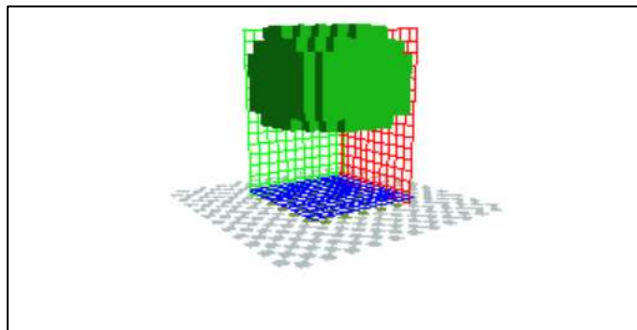


Figura 36, rappresentazione nel database Albero del Pinus Pinea

PARAMETRO	VALORE
Albedo	0.6
Emissività	0.96
Trasmittanza	0.3

Figura 37, Caratteristiche prestazionali del Pinus Pinea

- Fagus Sylvatica [0000B2]:

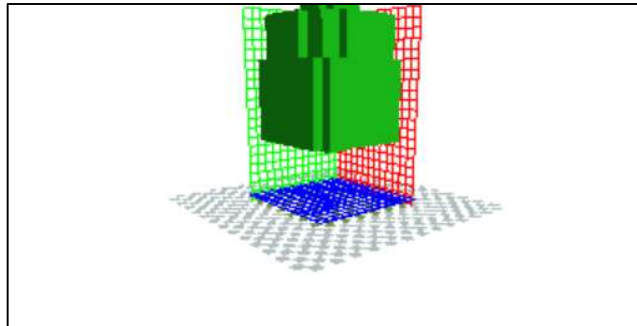


Figura 38, Rappresentazione nel database Albero del Fagus Sylvatica

PARAMETRO	VALORE
Albedo	0.18
Emissività	0.96
Trasmittanza	0.3

Figura 39, Caratteristiche prestazionali del Fagus Sylvatica

### 5.3 Le diverse simulazioni effettuate

Per un'analisi il più possibile esaustiva e dettagliata del tratto di territorio in esame vengono effettuate quattro diverse simulazioni utilizzando per ognuna materiali e vegetazione differenti. Per ogni scenario vengono prodotti due outputs, uno nel giorno rappresentativo estivo, cioè il 25 agosto 2022 e uno nel giorno rappresentativo invernale quindi il 13 novembre 2022.

La simulazione Stato dell'Arte è stata impostata mantenendo la configurazione reale del tratto del viale in esame in termini di materiali utilizzati e vegetazione. Vengono quindi impiegati:

- Asphalt Road per le strade;
- Granit Pavement per i marciapiedi;
- Pinus Pinea per la vegetazione.

La simulazione Verosimile viene impostata utilizzando materiali e vegetazione che nella pratica possono comunemente essere impiegati per la costruzione di strade e marciapiedi e per la costituzione delle zone verdi, ma diversi da quelli presenti nella simulazione allo stato dell'arte. In particolare:

- Basalt Brick Road per le strade;
- Concrete Pavement Light per i marciapiedi;
- Fagus Sylvatica per la vegetazione.

La simulazione Massimizzata è configurata selezionando materiali e vegetazione a più alte prestazioni così da avere dati di output migliori possibili in termini di distribuzione di temperatura. Sono quindi stati scelti:

- Granit Shining per le strade;
- Concrete Pavement Light per i marciapiedi;
- Fagus Sylvatica per la vegetazione.

La simulazione Senza Alberi, come suggerisce il nome viene impostata senza la presenza di vegetazione così da mostrare la distribuzione di temperatura nel caso più critico possibile. Si utilizzano comunque:

- Asphalt Road per le strade;
- Granit Pavement per i marciapiedi.

### *5.3.1 Analisi e confronto degli outputs nel giorno rappresentativo estivo*

Una volta configurati i diversi scenari vengono quindi prodotte tramite Leonardo due rappresentazioni dei dati di output, una per il giorno rappresentativo estivo e una per quello invernale. Per poter confrontare gli outputs dello stesso giorno rappresentativo ma di diverse

simulazioni vengono impostati nelle rappresentazioni grafiche uguali intervalli di temperatura, dieci in totale, ai quali vengono attribuiti gli stessi colori in modo da avere rappresentazioni uniformi e quindi più facilmente confrontabili.

In particolare, per il giorno rappresentativo estivo quindi il 25 agosto 2022 sono prodotte queste rappresentazioni grafiche dei dati di output relativi alla distribuzione di temperatura.

Per la simulazione Stato dell'arte si ha:

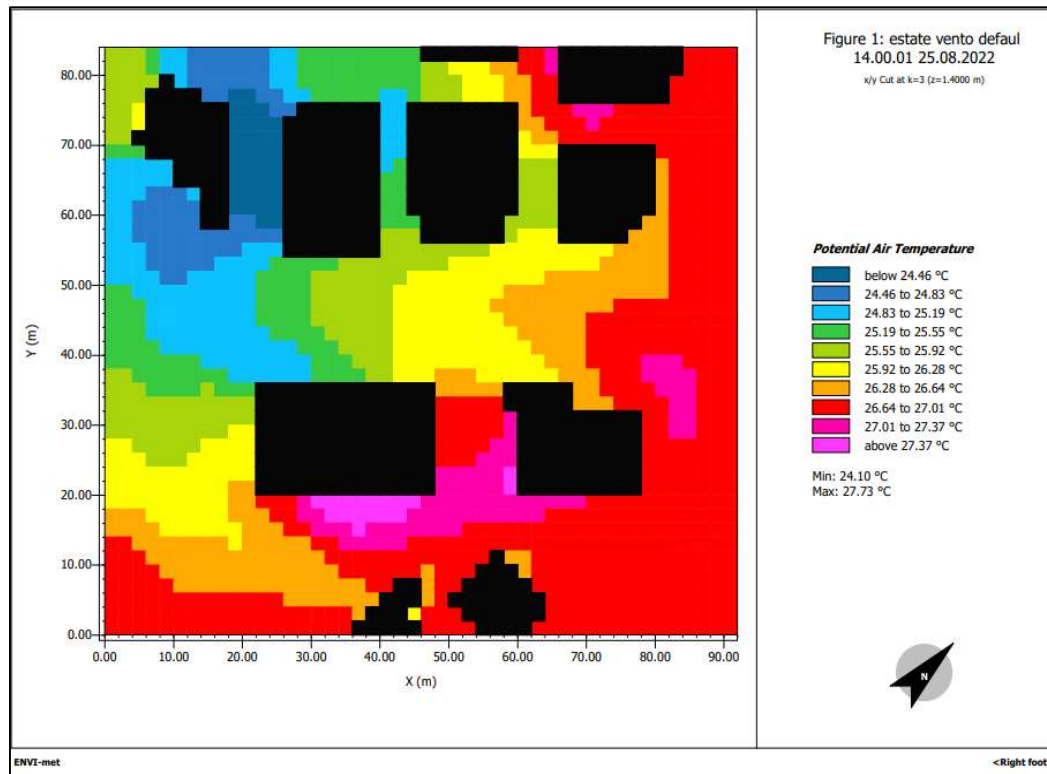


Figura 40, Rappresentazione grafica output simulazione Stato dell'Arte nel giorno rappresentativo estivo

Per la simulazione Massimizzata la rappresentazione grafica dei dati di output si presenta in questo modo:

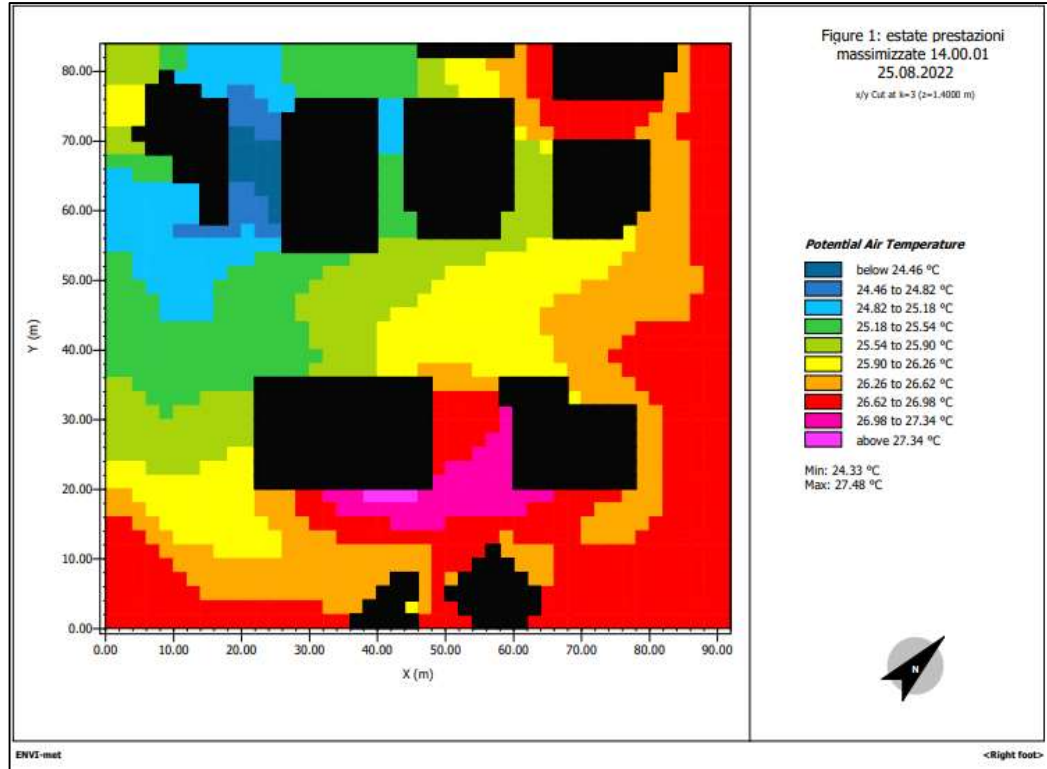


Figura 41, Rappresentazione grafica output simulazione Massimizzata nel giorno rappresentativo estivo

La simulazione Verosimile:

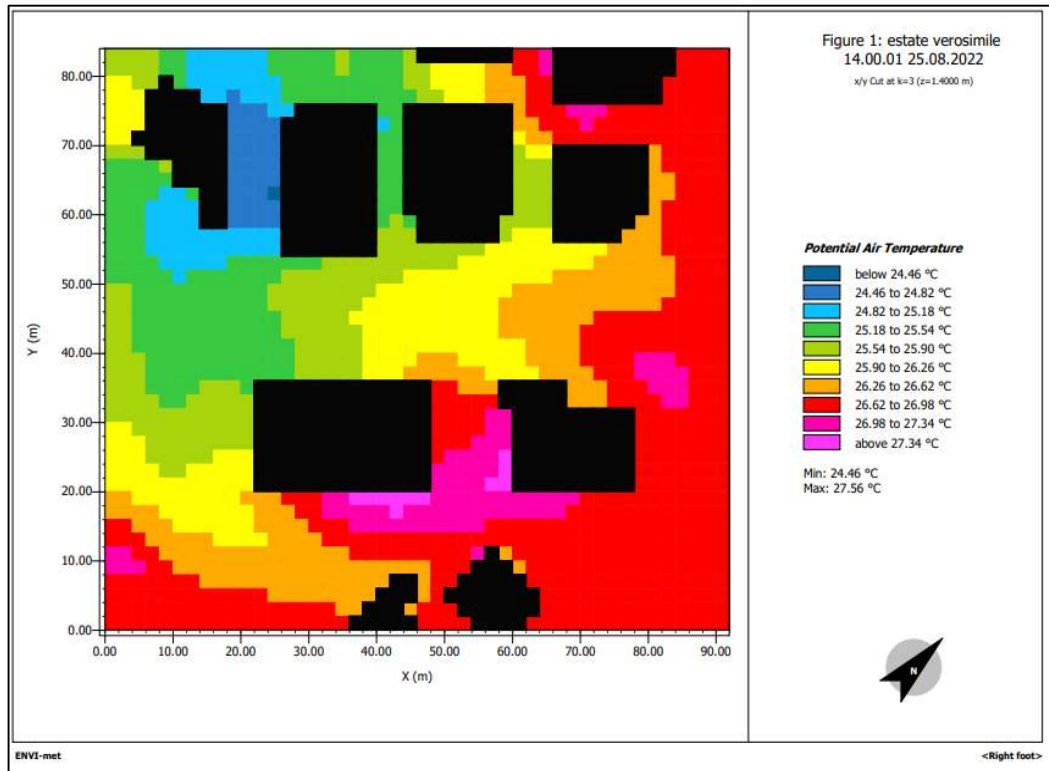


Figura 42, Rappresentazione grafica output simulazione Verosimile nel giorno rappresentativo estivo



Per la simulazione Senza Alberi si ha:

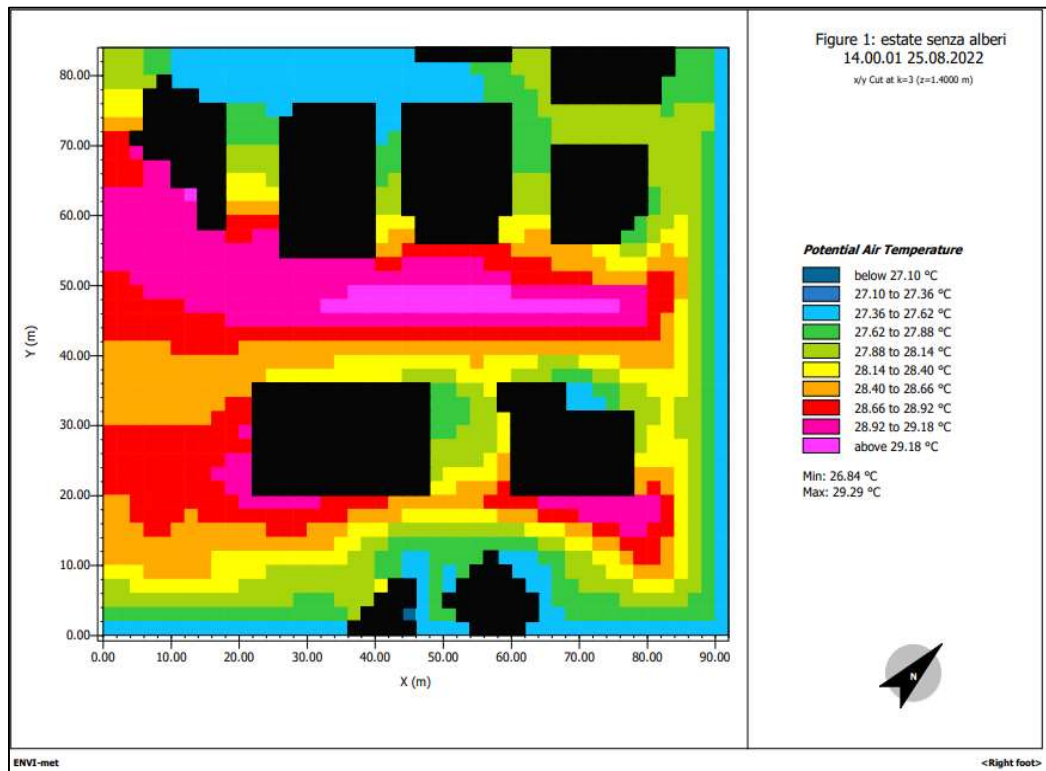
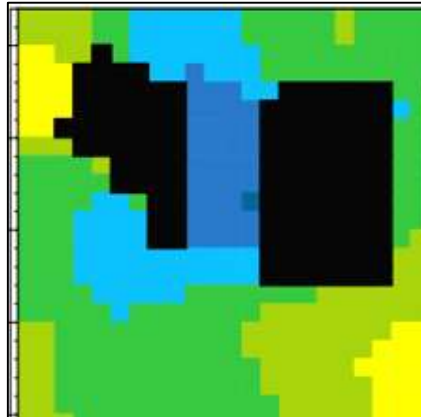


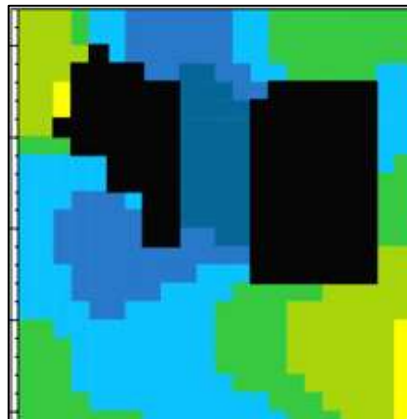
Figura 43, Rappresentazione grafica output simulazione Senza Alberi nel giorno rappresentativo estivo

Per le simulazioni Stato dell'Arte, Verosimile e Massimizzata vengono impostati dieci intervalli di temperatura uguali, associati agli stessi colori, in modo da rendere le tre diverse rappresentazioni grafiche confrontabili. In particolare si sono scelti gli intervalli da 24.46°C a 24.82°C, da 24.82°C a 25.18°C, da 25.18°C a 25.54°C, da 25.54°C a 25.90°C, da 25.90°C a 26.26°C, da 26.26°C a 26.62°C, da 26.62°C a 26.98°C, da 26.98°C a 27.34°C e le fasce con temperature inferiori a 24.46°C e quelle con temperature maggiori di 27.34°C. Per la simulazione Senza Alberi vengono scelti intervalli differenti in quanto la rappresentazione con gli stessi intervalli delle altre tre, a causa della differenza di temperature ottenuta, non sarebbe risultata efficace. Vengono quindi selezionati i seguenti intervalli: da 27.10°C a 27.36°C, da 27.36°C a 27.62°C, da 27.62°C a 27.88°C, da 27.88°C a 28.14°C, da 28.14°C a 28.40°C, da 28.40°C a 28.66°C, da 28.66°C a 28.92°C, da 28.92°C a 29.18°C e le fasce con temperature inferiori a 27.10°C e quelle con temperature maggiori di 29.18°C.

Confrontando i vari scenari si nota come in termini di temperatura in valore assoluto, i risultati ottenuti per le simulazioni Stato dell'Arte e Verosimile siano sostanzialmente identici. Varia però in alcuni punti la distribuzione.



*Figura 44, Dettaglio output simulazione Verosimile del giorno rappresentativo estivo*



*Figura 45, Dettaglio output simulazione Stato dell'Arte del giorno rappresentativo estivo*

Dalle figure 44 e 45, rappresentanti la stessa porzione di territorio, in particolare la zona che circonda l'edificio nell'angolo in alto sinistra raffigurato in Fig.46,

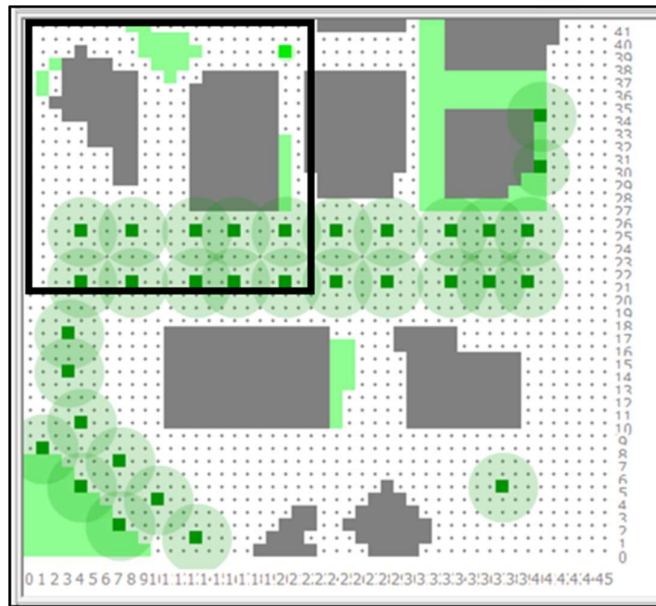


Figura 46, Porzione di territorio interessata da una differenza nella distribuzione delle temperature

rispettivamente nella simulazione Verosimile e in quella Stato dell'Arte, si nota come nella seconda ci sia una diffusione più elevata di zone a più bassa temperatura (colori blu e azzurro) rispetto alla prima. Nel dettaglio, nello scenario Verosimile si avranno più porzioni di territorio interessate da temperature maggiori di  $25.18^{\circ}\text{C}$  rispetto allo scenario Stato dell'Arte dove sono preponderanti le fasce che vanno da temperature inferiori a  $24.46^{\circ}\text{C}$  a temperature di circa  $25.18^{\circ}\text{C}$ .

Comprendendo nel confronto anche la simulazione Massimizzata (fig.41) si nota nell'angolo in alto a sinistra un dettaglio con una distribuzione di temperatura intermedia tra quelle di Fig.44 e Fig.45:

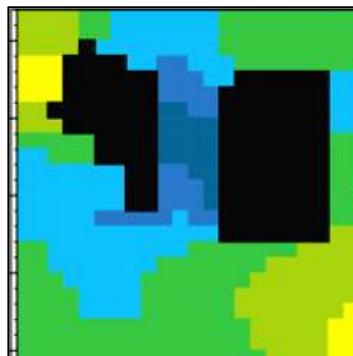


Figura 47, Dettaglio output simulazione Massimizzata del giorno rappresentativo estivo

La differenza più importante rispetto alle due simulazioni precedenti si nota invece nella porzione di territorio rappresentata in Fig.48.

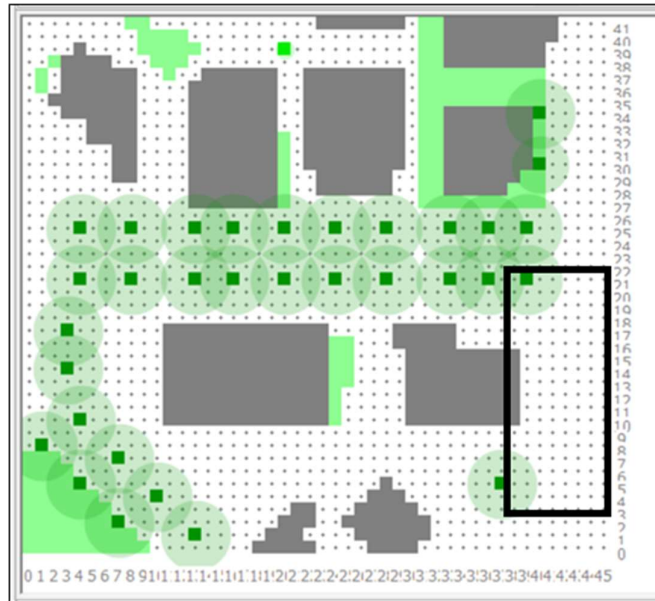


Figura 48, Porzione di territorio numero 2 interessata da una differenza nella distribuzione delle temperature

La situazione è piuttosto simile per le simulazioni Stato dell'Arte e Verosimile mentre si differenzia per la simulazione Massimizzata.



Figura 49, Dettaglio numero 2 output simulazione Stato dell'Arte nel giorno rappresentativo estivo

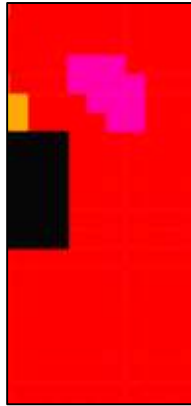


Figura 50, Dettaglio numero 2 output simulazione Verosimile nel giorno rappresentativo estivo



Figura 51, Dettaglio output simulazione Massimizzata nel giorno rappresentativo estivo

La Fig.51 mostra come nello scenario della simulazione Massimizzata, nella porzione di territorio raffigurata in Fig.47, si abbia una prevalenza di zone a temperatura compresa tra 26.26°C e 26.62°, intervallo associato al colore arancione. La fascia preponderante nelle simulazioni Verosimile e Stato dell'Arte è quella invece di colore rosso, attribuito all'intervallo di temperatura tra 26.62°C e 26.98°C, con picchi anche fino a 27.37°C rappresentati dal colore violetto.

I risultati cambiano in maniera decisa se si fa riferimento alla simulazione Senza Alberi. Come prevedibile le temperature sono più alte in tutte le sezioni, con un aumento della massima di quasi 2°C e della minima superiore ai 2°C. Il peggioramento più evidente si nota proprio in corrispondenza delle zone dove sono stati eliminati gli alberi (fig.52).

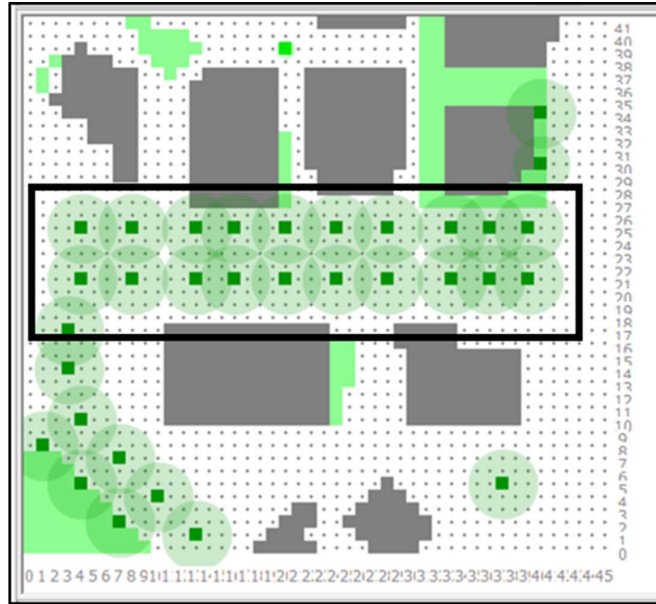


Figura 52, Porzione di territorio numero 3 interessata da una differenza nella distribuzione delle temperature

Ecco come questa zona si presenta nelle quattro diverse simulazioni. Poiché per le simulazioni Stato dell'Arte, Verosimile e Massimizzata il risultato non presenta differenze notevoli prendiamo come rappresentativo lo scenario della simulazione Stato dell'Arte e lo confrontiamo con quello Senza Alberi.

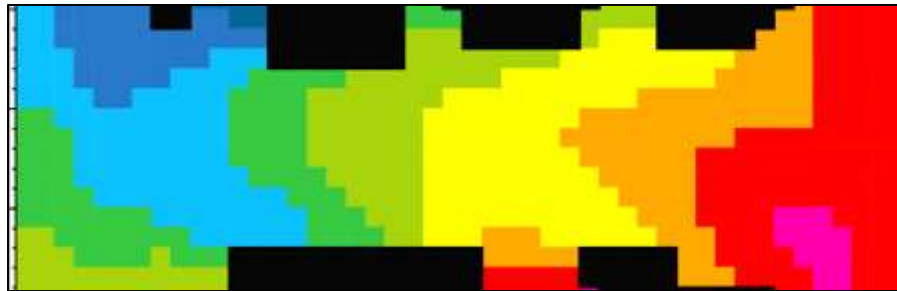


Figura 53, Dettaglio numero 3 output simulazione Stato dell'Arte nel giorno rappresentativo estivo



*Figura 54, Dettaglio output simulazione Senza Alberi nel giorno rappresentativo estivo*

Osservando la scala di colori con cui vengono rappresentati i dati di output della simulazione Senza Alberi (fig.43) si nota come ci sia una forte presenza di zone interessate da temperature che variano tra  $28.66^{\circ}\text{C}$  a temperature maggiori di  $29.18^{\circ}\text{C}$ , rappresentate dalle gradazioni del rosso e del viola. La figura 53 ci mostra invece come le temperature in quella porzione di viale nella simulazione Stato dell'Arte, rappresentativa anche delle simulazioni Verosimile e Massimizzata, varino gradualmente da sinistra verso destra partendo da intervalli di temperatura tra  $24.83^{\circ}\text{C}$  e  $25.19^{\circ}\text{C}$  (colore azzurro) arrivando a zone interessate da intervalli di temperatura tra  $26.64^{\circ}\text{C}$  e  $27.01^{\circ}\text{C}$  (colore rosso). Si ottiene una differenza, in alcune zone, anche maggiore di  $2^{\circ}\text{C}$ .

### *5.3.2 Analisi e confronto degli outputs nel giorno rappresentativo invernale*

Ogni simulazione viene effettuata anche nel giorno rappresentativo invernale, individuato in questo caso nel 13 novembre 2022. Qua di seguito sono mostrate le rappresentazioni grafiche ottenute con Leonardo dei dati di output per ogni scenario.

Per la simulazione Stato dell'Arte:

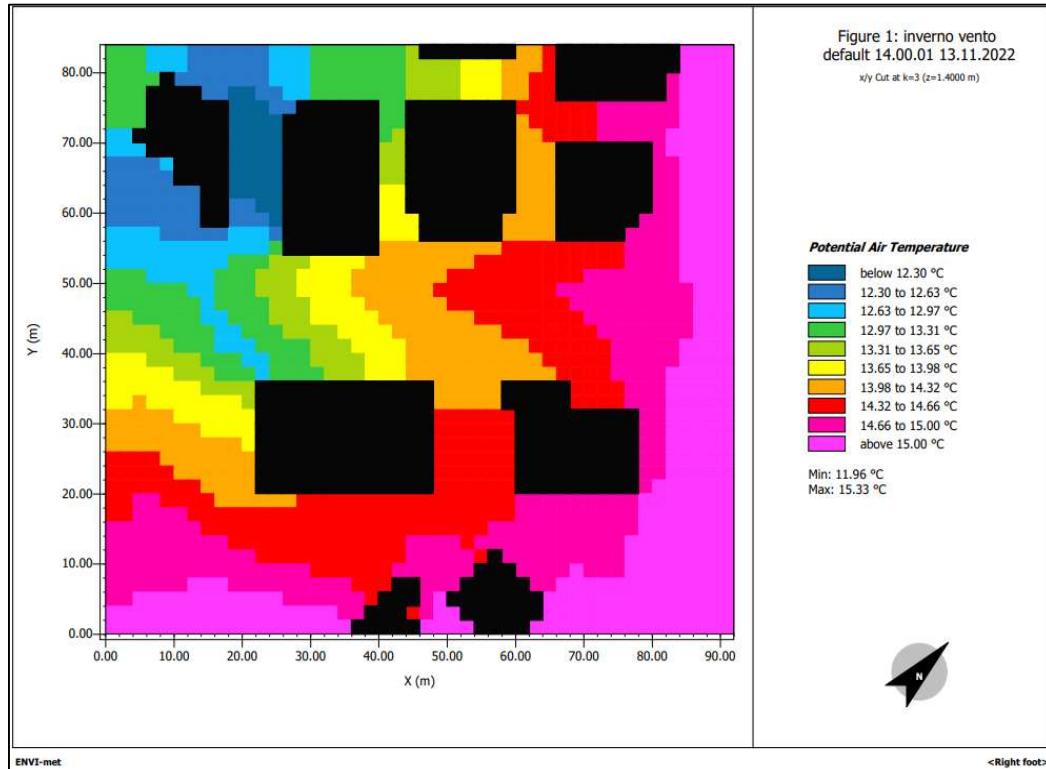


Figura 55, Rappresentazione grafica output simulazione Stato dell'Arte nel giorno rappresentativo invernale



Per la simulazione Verosimile:

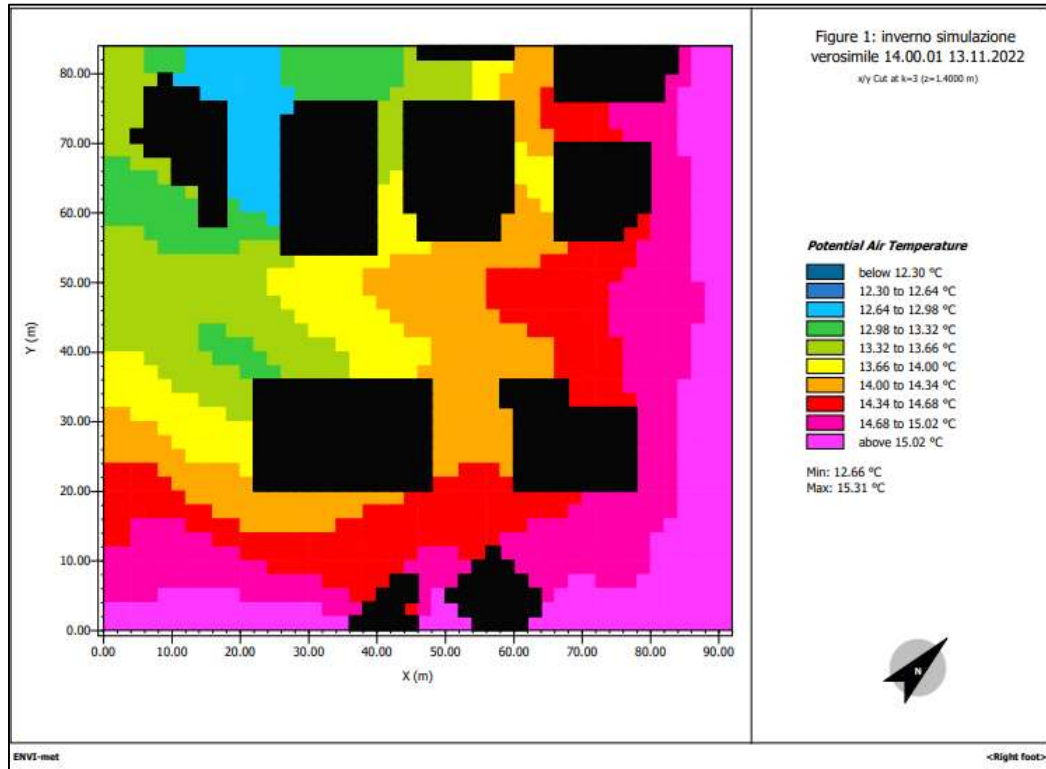


Figura 56, Rappresentazione grafica output simulazione Verosimile nel giorno rappresentativo invernale

I dati di output della simulazione Massimizzata sono rappresentati graficamente in questo modo:

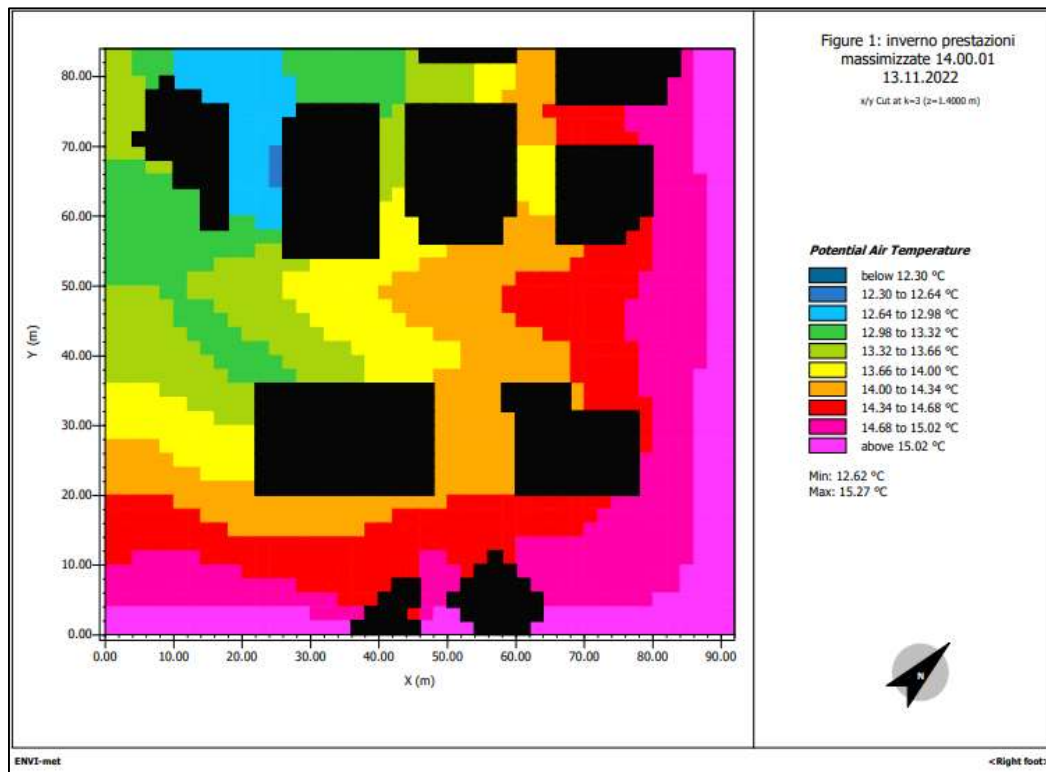


Figura 57, Rappresentazione grafica output simulazione Massimizzata nel giorno rappresentativo invernale

Per la simulazione Senza Alberi si ottiene:

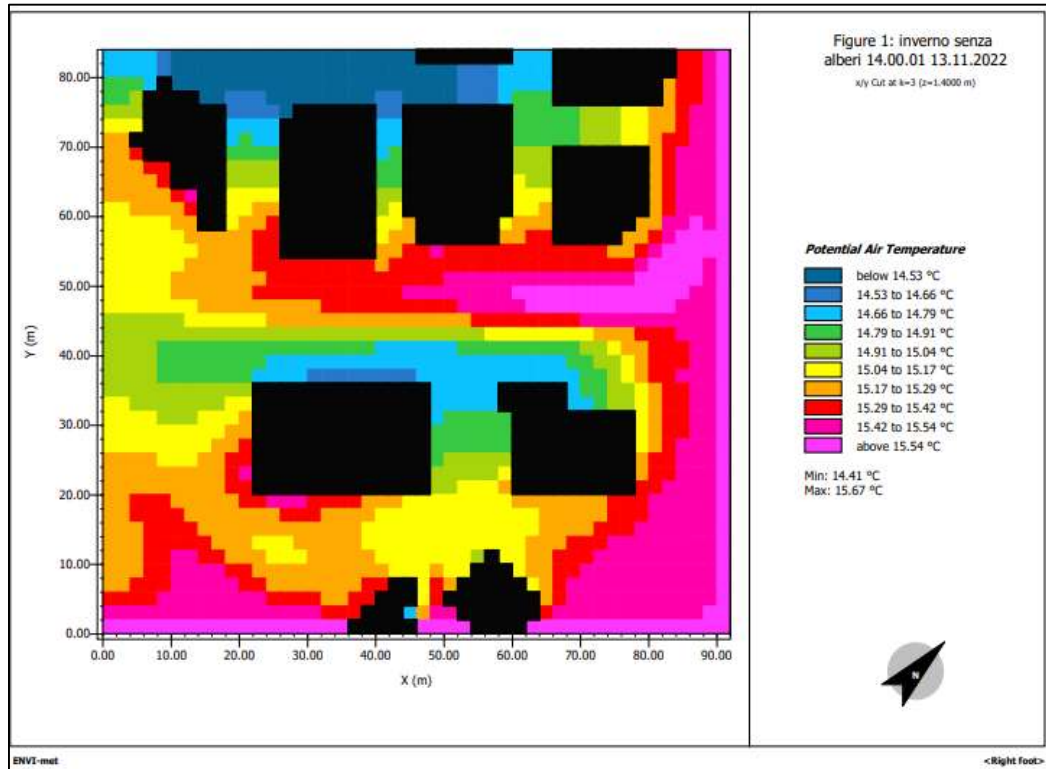


Figura 58, Rappresentazione grafica output simulazione Senza Alberi nel giorno rappresentativo invernale

Analogamente alle rappresentazioni grafiche dei dati di output delle simulazioni per il giorno rappresentativo estivo, anche per il giorno rappresentativo invernale vengono definiti dieci intervalli di temperatura, ognuno associato ad un colore, al fine di rendere analizzabili e confrontabili i risultati di tali simulazioni. Anche in questo caso gli intervalli sono i medesimi per le simulazioni Stato dell'Arte, Verosimile e Massimizzata mentre per la simulazione Senza Alberi ne vengono scelti di differenti data la non conformità dei risultati ottenuti. In particolare, per le tre simulazioni sopra citate vengono impostati i seguenti intervalli di temperatura: da 12.30°C a 12.64°C, da 12.64°C a 12.98°C, da 12.98°C a 13.32°C, da 13.32°C a 13.66°C, da 13.66°C a 14.00°C, da 14.00°C a 14.34°C, da 14.34°C a 14.68°C, da 14.68°C a 15.02°C e le fasce con temperature inferiori a 12.30°C e quelle con temperature maggiori di 15.02°C. Per la simulazione Senza Alberi, invece, gli intervalli scelti sono i seguenti: da 14.53°C a 14.66°C, da 14.66°C a 14.79°C, da 14.79°C a 14.91°C, da 14.91°C a 15.04°C, da 15.04°C a 15.17°C, da 15.17°C a 15.29°C, da 15.29°C a 15.42°C, da 15.42°C a 15.54°C e le fasce con temperature inferiori a 14.53°C e quelle con temperature maggiori di 15.54°C.

Confrontando i risultati si nota come per il giorno rappresentativo invernale le differenze tra i vari scenari siano meno marcate. Le simulazioni Verosimile e Massimizzata hanno outputs pressoché identici sia in termini di distribuzione di temperature che in termini di valore assoluto della minima e della massima (per le minime rispettivamente 12.66°C e 12.62°C mentre per le massime 15.31°C e 15.27°C). Si trova invece una differenza confrontando queste due con la simulazione Stato dell'Arte, in particolare nel tratto mostrato in Fig.59.

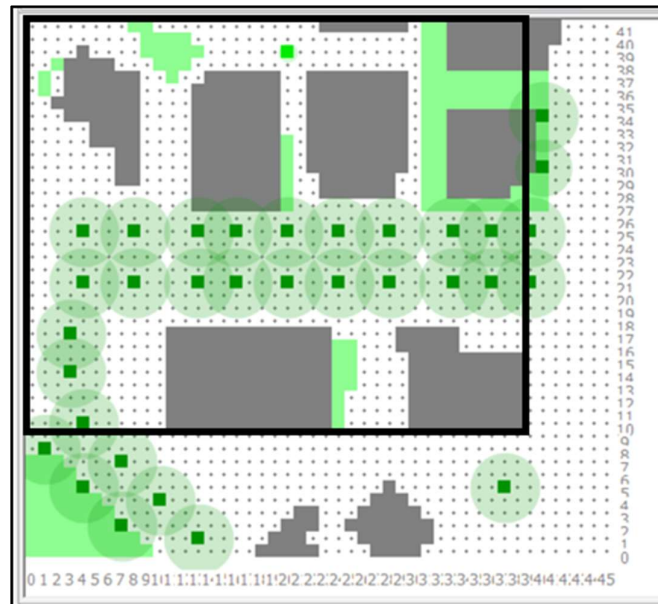


Figura 59, Porzione di territorio numero 4 interessata da una differenza nella distribuzione delle temperature

Prendendo come rappresentativa la prima tra le simulazioni Verosimile e Massimizzata e confrontandola per la porzione di territorio qui sopra con la simulazione Stato dell'Arte notiamo le seguenti distribuzioni di temperatura:

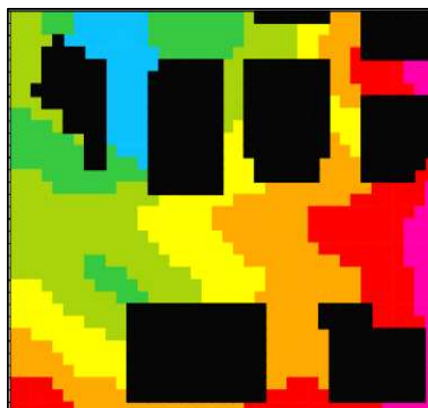
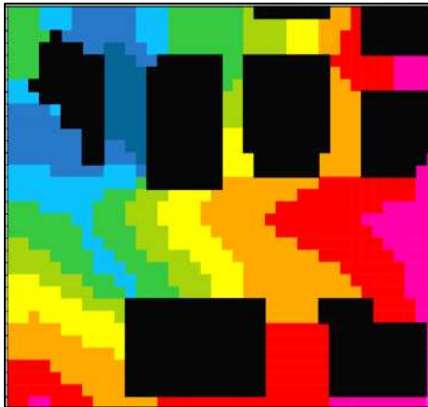


Figura 60, Dettaglio output simulazione Verosimile del giorno rappresentativo invernale



*Figura 61, Dettaglio output simulazione Stato dell'Arte del giorno rappresentativo invernale*

Dalle Fig.60 e Fig.61 si nota diminuzione diffusa delle temperature nella simulazione Stato dell'Arte con un aumento della presenza di zone a temperatura massima di 13.32°C (dalle tonalità del blu a quelle del verde) rispetto alle zone con temperature fino anche a 14.68°C (tonalità dell'arancione e del rosso). Questa differenza si nota soprattutto confrontando le temperature minime, 11.96°C per la simulazione Stato dell'Arte contro i 12.66°C della simulazione Verosimile e i 12.62°C della simulazione Massimizzata. Comprendendo nel confronto anche la simulazione Senza Alberi si nota una differenza evidente tra le temperature minime. Si ha infatti una temperatura minima di 14.41°C per la simulazione Senza Alberi rispetto a una media di 12.41°C per le altre tre simulazioni. Una differenza di 2°C. Questo fenomeno è evidente analogamente al giorno rappresentativo estivo, nella porzione di territorio rappresentata in Fig.52, cioè la zona interessata dalla rimozione degli alberi. L'aumento di temperatura minima si spiega con la non presenza delle chiome degli alberi che, negli scenari Stato dell'Arte, Verosimile e Massimizzato, schermavano il viale dai raggi del sole e quindi favorivano l'abbassamento delle temperature.

## CONCLUSIONI

Confrontando le simulazioni effettuate si nota che il fattore più incisivo nel mitigare l'effetto isola di calore urbana, nel tratto del viale studiato, è rappresentato dalla presenza o meno degli alberi o della vegetazione in genere. Questo porta infatti a modeste riduzioni della temperatura soprattutto nel periodo estivo. Per quanto riguarda la stagione invernale, invece, la rimozione degli alberi influisce in particolare nelle temperature minime, aumentandole di qualche grado. Le tipologie di materiali caratterizzate da caratteristiche prestazionali come un'albedo più alto, utilizzate per le strade e i marciapiedi, contribuiscono, seppur in maniera più lieve, a una generale diminuzione delle temperature nella stagione estiva. Lo stesso non avviene invece in inverno dove il contributo apportato dalla diversa scelta dei materiali non influenza i risultati. I risultati delle simulazioni presenti in questa tesi sono stati ottenuti utilizzando la versione Lite di ENVI-met. Questa seppur rendendo possibile lo studio di scenari complicati non permette l'utilizzo di funzionalità più avanzate, come il calcolo in parallelo, e un accesso alla totalità dei database di materiali e piante. Per il caso in esame sarebbe stato interessante infatti studiare degli scenari in presenza di green roofs, non presenti nella versione Lite, o modificare i materiali utilizzati nella costruzione degli edifici. Per l'applicazione di questi scenari si rimanda a sviluppi futuri.

## BIBLIOGRAFIA

- Heidelbergmaterials, 2019. *Heidelberg materials*. [Online]  
Available at: <https://www.heidelbergmaterials.it/it/effetto-albedo-iiidro-drain>
- Al-Obaidi, Neave & Polrolniczak, 2021. *Assessing the Impact of Wind Conditions on Urban Heat Islands in Large Australian Cities*, s.l.: s.n.
- Barbieri, 2019. *IMPLEMENTATION OF A METHODOLOGY FOR A MULTI-TEMPORAL ANALYSIS OF THE SURFACE URBAN HEAT ISLAND USING GIS AND REMOTE SENSING TECHNIQUES:THE CASE STUDY OF MODENA, ITALY*, s.l.: s.n.
- Battistella, L., 2014. *Il fenomeno dell'isola di calore urbana a Padova: analisi dei dati e scenari di mitigazione*, s.l.: s.n.
- Binarti, Pranowo & Leksono, 2020. Thermal Infrared Images to Identify the Contribution of Surface Materials to the Canopy Layer Heat Island in Hot-Humid Urban Areas. *Environmental and Climate Technologies*, Volume 24, pp. 604-623.
- Cheval & Costantin, 2019. *Black Sea impact on its west-coast land surface temperature*, s.l.: s.n.
- Claps & Allamano, 2011. *EVAPOTRASPIRAZIONE DA SPECCHIO LIQUIDO E VEGETAZIONE E BILANCIO RADIATIVO ALLA SUPERFICIE TERRESTRE*, s.l.: s.n.
- Cnr, 2020. *Comunicato stampa*. s.l.:s.n.
- Conalpa, 2018. *Conalpa*. [Online]  
Available at: <https://www.conalpa.it/alberi-e-arbusti-anti-inquinamento/>
- D.Constantinescu, 2013. *URBAN CLIMATE CERTIFICATION – CONDITION OF MITIGATION THE URBAN HEAT ISLAND ON THERMAL COMFORT IN BUILDINGS IN SUMMER*, s.l.: s.n.
- Danieli, L., 2020. *IconaClima*. [Online]  
Available at: <https://www.iconaclima.it/approfondimenti/isola-di-calore-mitigazione>
- D'Elia, Marini & Nadotti, 2023. Cosa sono le isole di calore e come cambiano la vita in città. *Repubblica*.
- Deng & Wu, 2013. *Examining the impacts of urban biophysical compositions on surface urban heat island: A spectral unmixing and thermal mixing approach*, s.l.: s.n.

- ENVI-met, n.d. *ENVI-met*. [Online]  
Available at: <https://www.envi-met.com/it/software/>
- Escalona, S. L. C., 2020. *Ingenio*. [Online]  
Available at: <https://www.ingenio-web.it/articoli/come-mitigare-l-effetto-isola-di-calore-con-nuove-tecnologie-per-le-coperture/>
- Focus, 2013. *Focus*. [Online]  
Available at: [www.focus.it](http://www.focus.it)
- Google, n.d. *Google Earth*. [Online]  
Available at: <http://www.googleearth.com>
- Hu, et al., 2019. Comparison of surface and canopy urban heat islands within megacities of eastern China. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 156, pp. 160-168.
- Huttner, S., 2012. *Further development and application of the 3D microclimate simulation ENVI-met*, s.l.: s.n.
- Infobuildenergia, 2013. *Infobuildenergia*. [Online]  
Available at: <https://www.infobuildenergia.it/approfondimenti/la-ventilazione-naturale-in-edilizia/>
- Infobuildenergia, 2022. *Infobuildenergia*. [Online]  
Available at: [nfobuildenergia.it/approfondimenti/effetto-isola-di-calore-come-ridurre-il-surriscaldamento-urbano/](https://www.infobuildenergia.it/approfondimenti/effetto-isola-di-calore-come-ridurre-il-surriscaldamento-urbano/)
- Karimipour, Tam, Burnie & Le, 2022. SIMULATING COOLING STREET STRATEGIES ON URBAN HEAT ISLANDS EFFECTS: AN EMPIRICAL STUDY FOR BLACKTOWN CITY, AUSTRALIA. *Journal of greenbuilding*, Volume 17.
- Morabito, et al., 2021. Surface urban heat islands in Italian metropolitan cities: Tree cover and impervious surface influences. *Science of The Total Environment*, Volume 751.
- Ngarambe, et al., 2021. Influences of wind speed, sky conditions, land use and land cover characteristics on the magnitude of the urban heat island in Seoul: An exploratory analysis. *Sustainable cities and society*, Volume 71.
- Rawat & Singh, 2022. A study on the comparative review of cool roof thermal performance in various regions. *Energy and Built Environment*, Volume 3, pp. 327-347.
- Rosenzweig, et al., 2005. *Characterizing the urban heat island in current and future climates in New Jersey*, s.l.: s.n.
- Seghetti, E., 2015. *Build News*. [Online]  
Available at: <https://www.buildnews.it/articolo/riscaldamento-urbano-e-isole-di-calore-le-strategie-di-mitigazione>
- SIRMIP, n.d. [Online]  
Available at: <http://app.protezionecivile.marche.it/>



Tirabassi & Buske, 2021. *A Synthesis of the Information Given by Temporal Data Series: The Representative Day*, s.l.: s.n.

Tirabassi, Grifoni & Passerini, 2005. *THE REPRESENTATIVE DAY TECHNIQUE IN THE STUDY OF PHOTOCHEMICAL SMOG POLLUTION IN FALCONARA INDUSTRIAL AREA*, s.l.: s.n.

Tirelli, G., 2019. *Ecobnb*. [Online]

Available at: <https://ecobnb.it/blog/2019/03/alberi-anti-smog/>

Wang, et al., 2020. *Simulating the Impact of Urban Surface Evapotranspiration on the Urban Heat Island Effect Using the Modified RS-PM Model: A Case Study of Xuzhou, China*, s.l.: s.n.

## RINGRAZIAMENTI

Arrivato in fondo a questo percorso desidero ringraziare chi mi ha sostenuto, appoggiato, supportato e sopportato per tutta la sua durata.

Ringrazio innanzitutto e soprattutto la mia famiglia, mia mamma Arianna, mio papà Pierpaolo e mio fratello Luca, così come i miei cugini, zii e nonni. Senza di voi probabilmente non sarei qui a scrivere queste parole. Siete stati, siete e sarete il mio punto di riferimento.

Ringrazio tutti i miei amici e amiche di BP, la mia seconda famiglia, e tutti gli altri, tanti, amici che non mi hanno mai fatto sentire solo. Ognuno immerso nel proprio percorso ma con la stessa certezza di avere sempre una casa dove tornare.

Desidero poi ringraziare Fede, “Otto” e Umut per avermi fatto vivere la più bella esperienza della mia vita, per tutte le risate e per la spensieratezza di quei giorni. Per sempre Saulètekis.

Grazie anche ai miei compagni di squadra per essere stati importanti compagni di viaggio e aver reso tutte le settimane di duro lavoro passate insieme più divertenti e leggere.

Ringrazio i miei compagni di università, Palo, Noe, Tommi, Da e Lo per avermi permesso di condividere ansie, preoccupazioni ma soprattutto gioie e tantissime risate, rendendo un po' meno buie le aule di ingegneria.

Ringrazio infine il mio Relatore Prof. Ing. Giorgio Passerini per avermi permesso di svolgere il tirocinio e di stendere la tesi con lui e la mia Correlatrice Dott. Ing. Alessandra Chiappini per la sua enorme disponibilità nell'aiutarmi lungo tutto il percorso di tirocinio e tesi rendendo il tutto più facile e interessante.