



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

---

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE**

**ANALISI DELL'IMPATTO SUL MICROCLIMA LOCALE DELLA  
VEGETAZIONE MEDIANTE IL MODELLO ENVI-MET**

Analysis of the impact of vegetation on the local microclimate  
using the Envi-Met model

Relatore:

**Prof. Ing. Passerini Giorgio**

Tesi di laurea di:

**Tommaso Severini**

Correlatrice:

**Dott.sa Ing. Chiappini Alessandra**

**A.A. 2023 / 2024**

# ABSTRACT

La presente tesi vuole partecipare, in minima parte, al dibattito mondiale sul cambiamento climatico, ad oggi argomento ormai inflazionato nelle discussioni accademiche e mediatiche. Al fine di rispettare la vastità e la complessità della materia in questione si vuole focalizzare la ricerca su un aspetto specifico della disciplina: l'isola di calore urbana (UHI). L'obiettivo della tesi è di passare in rassegna cause, conseguenze e possibili tecniche di mitigazione del fenomeno che provoca l'innalzamento delle temperature e un peggioramento della qualità dell'aria in città. Il fenomeno risulta particolarmente adatto ad argomentazione in quanto è in rapido aumento negli ultimi anni, la sua presenza è responsabilità unica dell'uomo ed è strettamente legato alla salute psicofisica del cittadino. Dopo aver inquadrato il fenomeno dell'isola di calore urbano da un punto di vista tecnico-scientifico, si realizza uno studio approfondito operativo su una determinata zona per valutare l'intensità, in termini di temperatura potenziale dell'aria, dell'UHI e l'efficacia di quella che è stata ritenuta la tecnica di mitigazione più plausibile e più economica: il verde urbano. Un capitolo si dedica interamente all'approfondimento delle varie tipologie di vegetazione, delle sue caratteristiche e delle sue possibili tecniche di utilizzo all'interno di un contesto urbano. La zona scelta per il caso studio è ricaduta in una zona potenzialmente molto soggetta ad un innalzamento delle temperature e completamente sprovvista di vegetazione: il parcheggio del supermercato "Conad Superstore" di Castelfidardo, in via Musone. Ai fini pratici della valutazione del caso studio, ci si è forniti del software ENVI-met che ha permesso di effettuare simulazioni e ottenere scenari possibili. Infine, vengono mostrati tutti i risultati ottenuti, anche in termini pratici e numerici, delle varie simulazioni fatte, consentendo di fare riflessioni e confronti sull'efficienza del verde introdotto nel parcheggio.

# INDICE

ABSTRACT.....	1
L'ISOLA DI CALORE URBANA.....	4
<b>1.1. Definizione, descrizione e storia dell'isola di calore urbana</b> .....	4
<b>1.2. Tipologie di isole di calore</b> .....	6
<b>1.3. Cause dell'isola di calore urbana</b> .....	10
1.3.1. <i>Proprietà dei materiali da costruzione</i> .....	11
1.3.2. <i>Scarsità di vegetazione</i> .....	14
1.3.3. <i>Canyon urbani</i> .....	15
1.3.4. <i>Aumento del calore antropogenico</i> .....	18
<b>1.4. Conseguenze dell'isola di calore urbana</b> .....	19
<b>1.5. Possibili tecniche di mitigazione dell'isola di calore urbana</b> .....	21
1.5.1. <i>Cool roofs e cool pavements</i> .....	21
1.5.2. <i>Raffrescamento passivo</i> .....	23
1.5.3. <i>Vegetazione e green roofs</i> .....	24
VEGETAZIONE E ISOLA DI CALORE URBANA.....	28
<b>2.1. Il fenomeno dell'evapotraspirazione</b> .....	28
<b>2.2. Ulteriori benefici della vegetazione</b> .....	32
2.2.1. <i>Variazione direzione e velocità del vento</i> .....	32
2.2.2. <i>Funzione anti-inquinamento</i> .....	33
2.2.3. <i>Funzione ecologica</i> .....	34
2.2.4. <i>Controllo delle onde sonore e luminose</i> .....	35
2.2.5. <i>Funzione sociale e culturale</i> .....	36
<b>2.3. Urbanistica: il verde in città</b> .....	39
SOFTWARE UTILIZZATO: ENVI-MET.....	52
<b>3.1. Modelli di calcolo</b> .....	53
<b>3.2. Interfacce del software</b> .....	56
SIMULAZIONI DEL CASO STUDIO.....	65
<b>4.1. Presentazione del caso studio e dominio scelto</b> .....	65
<b>4.2. Teoria del giorno rappresentativo</b> .....	70
<b>4.3. Simulazioni estive</b> .....	73
4.3.1. <i>Stato dell'arte</i> .....	73
4.3.2. <i>Disposizione di tipo 0 Acer Campestre</i> .....	76
4.3.3. <i>Disposizione di tipo 1 Acer Campestre</i> .....	79
4.3.4. <i>Disposizione di tipo 0 Catalpa Bignonioides</i> .....	82

4.3.5. <i>Disposizione di tipo 1 Catalpa Bignonoides</i> .....	84
<b>4.4. Simulazioni invernali</b> .....	86
4.4.1. <i>Stato dell'arte</i> .....	86
4.4.2. <i>Disposizione di tipo 0 Acer Campestre</i> .....	87
4.4.3. <i>Disposizione di tipo 1 Acer Campestre</i> .....	87
4.4.4. <i>Disposizione di tipo 0 Catalpa Bignonoides</i> .....	88
4.4.5. <i>Disposizione di tipo 1 Catalpa Bignonoides</i> .....	88
CONCLUSIONI.....	89
BIBLIOGRAFIA.....	91
SITOGRAFIA.....	95
RINGRAZIAMENTI .....	98



# CAPITOLO 1

## L'ISOLA DI CALORE URBANA

### **1.1. Definizione, descrizione e storia dell'isola di calore urbana**

L'emergenza climatica che il nostro mondo sta attraversando in questo momento rappresenta la crisi più grave e globalmente diffusa che la terra abbia mai visto da quando ospita l'uomo. Per quanto la si voglia giustificare come un evento fisiologico dovuto al normale sviluppo della terra, è ormai provato e riprovato che l'impatto delle azioni antropiche genera una crisi climatica sempre più grave. Per anni si è trascurata la discussione su tale argomento ma da quando la specie umana, quasi tutta, ha preso consapevolezza che la crisi climatica è, per gran parte, una sua colpa e strettamente correlata alla sua sopravvivenza e al suo stato di salute nella terra allora sono stati presi provvedimenti. Al giorno d'oggi le città sono i luoghi dove più tali fenomeni di cambiamento sono accentuati e visibili ed ecco perché molti studiosi dei fenomeni urbani hanno prestato attenzione al fenomeno dell'isola di calore urbana, un fenomeno "secondario" della crisi climatica del pianeta terra (Federica Gaglione, 2022).

L'"isola di calore urbana" (Urban Heat Island-UHI) è un particolare fenomeno che si manifesta nelle aree urbane in cui si genera un vero e proprio sistema microclimatico, detto appunto "isola termica", che prevede un innalzamento della temperatura rispetto alle aree rurali circostanti alla stessa altitudine, variabile circa tra 1.5°C e 5.5°C (Domenico D'Olimpio, 2022). Sebbene si possa pensare che le maggiori temperature esistenti in città possano essere favorevoli durante il periodo invernale, poiché riducono il carico di riscaldamento, le conseguenze negative dell'UHI superano i benefici dato che nei settori civili è lievitato il consumo e la domanda di picco di climatizzazione nella stagione estiva, i dati sono ogni anno in aumento e sembrano andare di pari passo con l'aggravarsi del fenomeno dell'isola di calore (Enea, 2011). È di facile intuizione, poi, che l'innalzamento delle temperature danneggia la salute umana, contribuisce a generare stati di malessere nei soggetti più deboli, come bambini e anziani, e rappresenta un inquinamento termico per tutto l'ecosistema animale e vegetale.

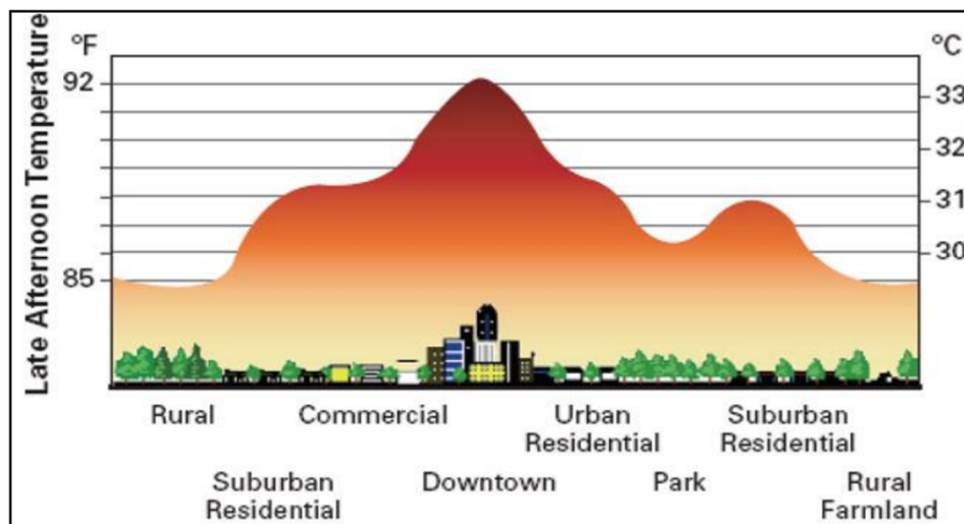


Figura 1. Rappresentazione dell'isola di calore (Enea, 2020).

L'acronimo "isola di calore" nasce nel 1818 quando Luke Howard, studiando le varie temperature nei pressi delle zone di Londra e graficandole per mezzo di curve isoterme, osserva come quest'ultima, sopra all'area urbana, ricordi un'isola nel mare, identificato con le curve isoterme delle zone rurali circostanti aventi una temperatura più bassa. Luke Howard, nel 1833 nel suo studio "the climate of London" si occupò proprio di misurare la pressione, temperatura, umidità e precipitazioni atmosferiche nella città di Londra. Lo studioso non solo identificò l'UHI come la differenza di temperatura tra la città e le aree rurali e che tale differenza aumentava dai confini della città al centro urbano. In più, dimostrò che tale fenomeno si manifestava maggiormente nelle ore notturne e nei mesi invernali. Sebbene è probabile sia stato coniato prima, il termine 'isola di calore' compare per la prima volta in letteratura nel 1958 in un articolo di Gordon Manley nel Quarterly Journal of the Royal Meteorology Society (Erell et al., 2011).

Sebbene Howard sia stato il primo a coniare il termine, il più grande studioso e divulgatore di tale fenomeno è sicuramente il meteorologo T. R. OKE. che con i suoi libri e le sue pubblicazioni ha introdotto varie definizioni e vari studi ancora oggi presi in considerazione. Le sue pubblicazioni del 1974 e del 1979 riportavano gli effetti e le caratteristiche dell'isola di calore documentata in molti villaggi, paesi e città. Secondo quanto stabilito da T.R. Oke all'interno di "Applied Climatology: Principles & Practices" (1997) l'incremento di temperatura può superare i 12°C durante le notti serene e non ventilate. Tali studi sono aumentati in tempi moderni, effettuando misure, osservazioni e descrizioni di moltissime metropoli o centri urbani di medie dimensioni in tutto il mondo.

L'alterazione termica varia a seconda della città ma varia anche all'interno della città stessa, non tutte le sue parti presentano lo stesso comportamento termico. Attraverso l'Urban Heat Island Intensity ( $UHII = T_{\text{urban}} - T_{\text{rural}}$ ), utilizzato come indicatore, possiamo quantificare lo scostamento

prodotto e l'intensità del fenomeno. I quartieri e le zone cittadine, quindi ad alta densità edilizia, sono caratterizzate da una maggiore intensità mentre quelle che comprendono attraversamenti pluviali, come laghi e fiumi, o coperte dalla vegetazione, come i parchi o i viali alberati, sono al contrario caratterizzate da intensità inferiori.

In conclusione, possiamo citare la definizione esaustiva e ben esplicativa di UHI che Oke diede nel 1995: *"Un'isola di calore urbana è semplicemente il calore caratteristico di un paese o città. L'isola di calore urbana è presente nelle città di tutte le regioni climatiche, ciò è dovuto alle modifiche antropiche della superficie e delle caratteristiche atmosferiche. Tali modifiche sono la conseguenza dello sviluppo urbano e sono un esempio di modificazione del clima non intenzionale"*. L'ambiente urbano ha caratteristiche meccaniche e termiche diverse da quelle delle aree rurali circostanti, ciò è dovuto alla presenza degli edifici e delle varie infrastrutture che alterano la rugosità e le caratteristiche termiche del suolo. Queste modificazioni antropiche alterano il bilancio termico naturale portando ad un accumulo di energia maggiore durante il giorno. Durante la notte la restituzione dell'energia accumulata porta un aumento delle temperature dell'aria, con variazione di alcuni gradi rispetto alle aree rurali, dando luogo alla formazione dell'isola di calore urbana.

## 1.2. Tipologie di isole di calore

La distinzione tra le diverse isole di calore è stata data in primis proprio dal meteorologo T.R. Oke nel suo saggio "The Heat Island of the Urban Boundary Layer: Characteristics, Causes and Effects" (1995) e sono visibili in figura 2.

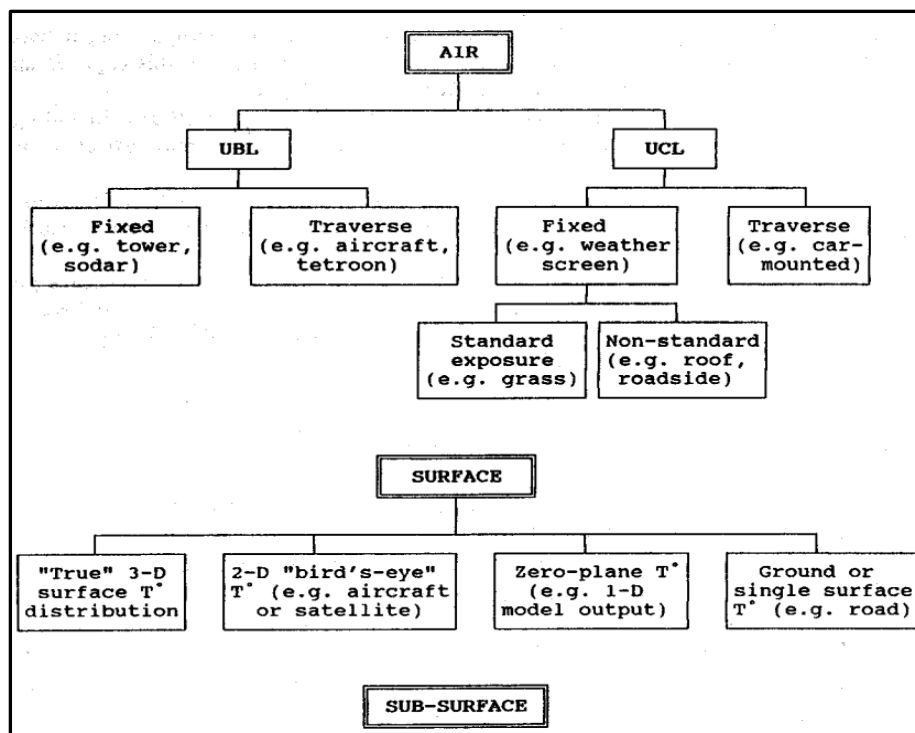


Figura 1. Tipologie di isole di calore fatta da Oke.

Le possibili tipologie di isole di calore sono quindi:

- **Isola di calore atmosferica (atmospheric urban heat island - AUHI)**, che a sua volta si divide in:
  - **Boundary Layer Urban Heat Island (BLUHI)**, che interessa lo strato limite urbano (UBL) e situato al di sopra dell'altezza media degli edifici. Questo strato arriva al massimo ad un'altezza di 1,5 km dalla superficie terrestre e può essere visto come un fenomeno a mesoscala, le differenze di temperature sono meno rilevanti;
  - **Canopy Layer Urban Heat Island (CLUHI)**, che riguarda lo strato della copertura urbana (UCL), ubicato sotto l'altezza media degli edifici. Questo strato si aggira tra 1-3 metri dalla superficie terrestre ed è un fenomeno a scala locale, riguarda quella zona d'aria che influenza la vita della popolazione;

L'isola di calore atmosferica studia per lo più i flussi d'aria e ha il fine di capire come gli insediamenti antropici riscaldano le masse d'aria a varie distanze dalla sua superficie. Fu proprio Oke a distinguere varie scale con cui un'isola di calore poteva essere studiata, a seconda che sia visualizzata a microscala o a mesoscala si passa rispettivamente a considerare più elementi che scambiano calore (spazi verdi, presenza di alberi, altezza e morfologia degli edifici urbani...) ad una situazione più generale e semplificata. Poiché la CLUHI è quella che interessa la vita delle persone, spesso con il termine "isola di calore" ci si riferisce al solo strato della copertura urbana (Battistella, 2014).

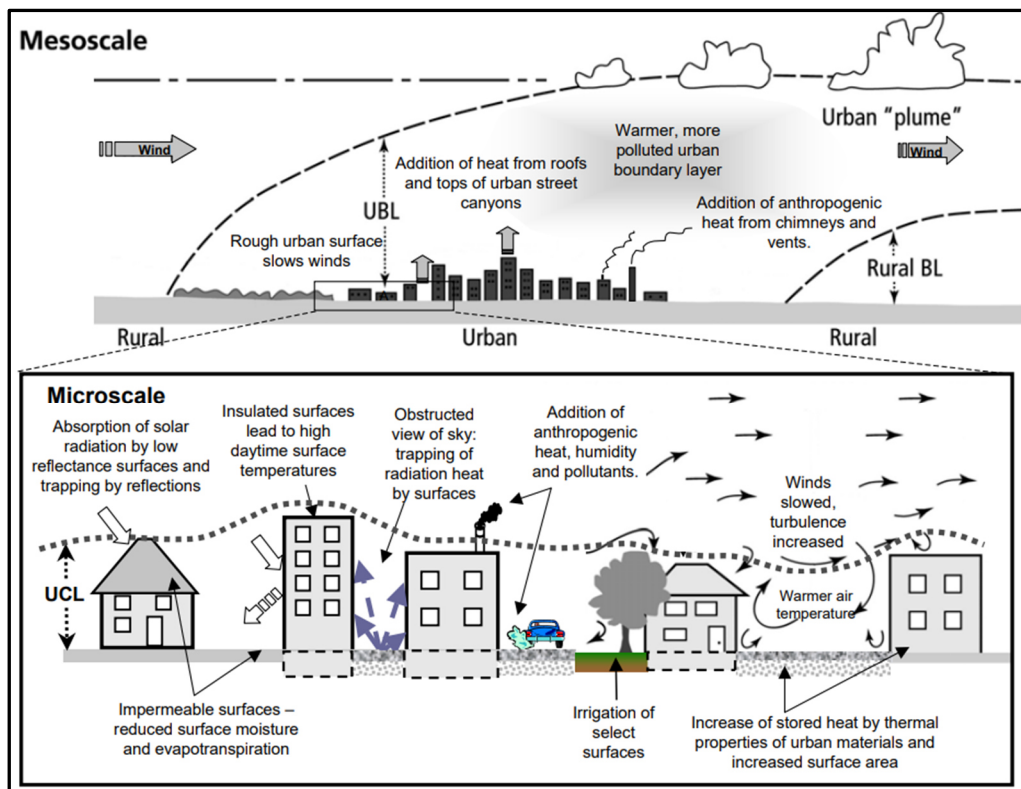


Figura 3. Rappresentazione della Boundary Layer Urban Heat Island e della Canopy Layer Urban Heat Island.

(Fonte: Voogt, 2006)

- **Isola di calore superficiale (surface UHI)**, è il fenomeno per cui le superfici delle città si riscaldano a causa della radiazione solare. È strettamente correlato alle proprietà radiative e termiche dei materiali da costruzioni (basti pensare che l'asfalto sotto il sole può arrivare fino ad 80 °C) ma dipende anche dalle condizioni meteorologiche, dalla stagionalità e dalla potenza della radiazione solare, ecco perché il fenomeno non è costante nei giorni e non è costante nelle varie zone della città. Le superfici urbane aumentano di temperatura, rispetto alle superfici rurali, tra 10-15 °C durante il giorno e 5-10 °C durante la notte. Il fenomeno è massimo in estate. (J.A. Voogt e T.R. Oke, 2003).
- **Isola di calore del sottosuolo (sub-surface UHI)**, è il fenomeno per cui il sottosuolo si riscalda a causa del calore trasmesso per conduzione dalla superficie. Tra le tipologie di isole di calore questa è sicuramente la più trascurata, in termini di studio, ma negli ultimi anni sono state effettuate analisi più approfondite sulle problematiche che tale fenomeno può indurre. Tutte le attività antropiche del mondo tecnologicamente sviluppato, soprattutto nelle grandi città e metropoli, generano dispersioni termiche che gravano largamente sul riscaldamento del sottosuolo. È il caso delle tubazioni sotterranee, che siano impianti di teleriscaldamento, fognature o cavi ad alta tensione, ma anche dei sistemi di trasporto privato e pubblico, addirittura le metropolitane agiscono come fonte di calore già sotterranea. Le "isole di calore sotterranee" possono indurre un aumento della temperatura del suolo fino a decine di metri, secondo studi in varie città del mondo fino a 100 metri, con un aumento compreso tra 0,1 e 2,5 °C per decennio (Ohga, 2023). Per quanto questo problema possa essere irrilevante e trascurabile ad occhi non esperti, minime alterazioni della temperatura del sottosuolo portano a significative conseguenze: la temperatura induce a deformazione di terreni geologicamente più suscettibili, le fondazioni degli edifici possono perdere parte della loro capacità portante, le reti di acqua, gas ed elettricità possono mal funzionare o non funzionare e, infine, gli effetti della temperatura possono danneggiare l'ecosistema sotterraneo e lo stato geochimico delle acque di falda, fino a modificarne il grado di disponibilità.

Negli ultimi anni la Northwestern University ha effettuato uno studio per monitorare il cambiamento climatico sotterraneo nella città di Chicago. I ricercatori hanno installato una rete di sensori lungo il Chicago Loop, l'area finanziaria piena di edifici, scantinati, tunnel e parcheggi sotterranei, e nel sottosuolo del Grant Park, l'area verde vicino al lago Michigan. I risultati hanno portato ad una differenza di 10 °C tra le due zone fino ad un massimo di 25 °C laddove ci sono tunnel sotterranei. Lo studio è proseguito tramite software che hanno permesso di effettuare simulazioni fino all'anno 2051 capaci di fornire dati riguardo al probabile cambiamento di temperatura sotterranea negli anni e il conseguente abbassamento o rigonfiamento degli edifici. Il software ha evidenziato che il terreno può

gonfiarsi, espandendosi fino a 12 millimetri a causa del surriscaldamento, oppure contrarsi, sprofondando sotto il peso degli edifici fino a 8 millimetri. Il problema maggiore è che nessuna opera civile è stata progettata in passato tenendo conto di questo fenomeno (Rinnovabili, maggio 2024).

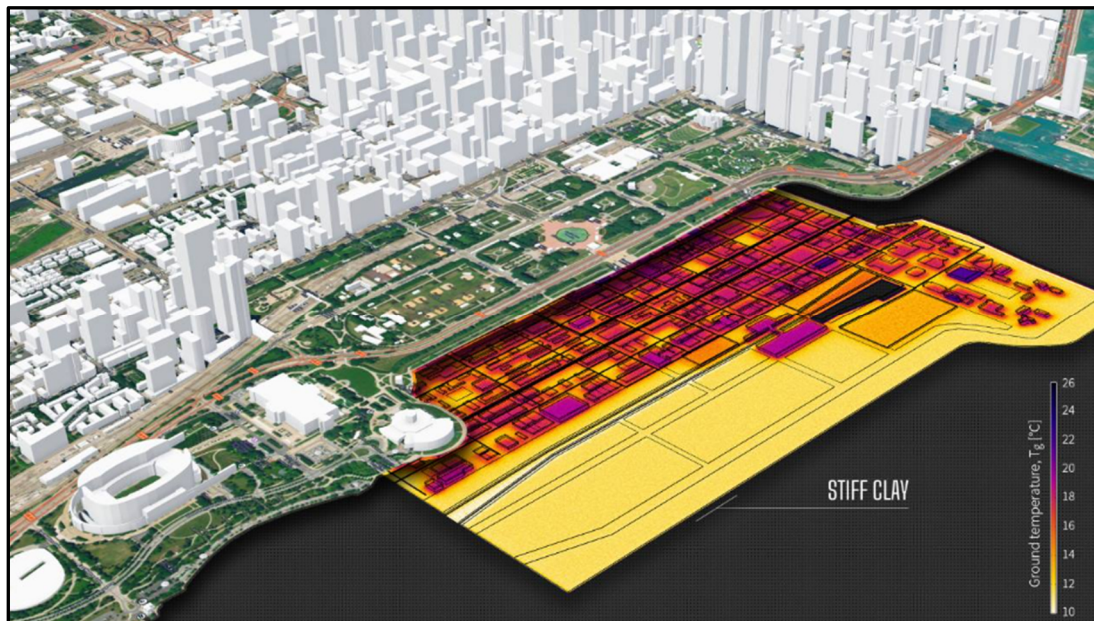


Figura 4. Studio dell'isola di calore sotterranea effettuato dalla Northwestern University sulla città di Chicago (Rinnovabili, maggio 2024).

Le diverse tipologie di isole di calore sono correlate sicuramente fra loro, ognuna è causa e conseguenza dell'altra, ma la loro analisi va effettuata singolarmente poiché differiscono per origine, tecniche di misurazione e dinamiche temporali. Ad esempio, le isole di calore di superficie raggiungono la massima intensità durante il giorno mentre quelle atmosferiche di notte e possono essere addirittura negative di giorno. Un altro esempio può essere il fatto che per l'isola di calore atmosferica si usano termometri tradizionali, fissi o mobili, o lo studio della trasmissione di onde nei primi metri del suolo, mentre per quella superficiale si usa il telerilevamento che rileva la radiazione infrarossa di una "superficie semplificata". È necessaria l'uso di una superficie semplificata perché non esiste una definizione univoca di superficie urbana, a seconda di dove siano posizionate le sonde per il telerilevamento si ottengono tre possibili schematizzazioni della sua geometria come riportato in figura 5.



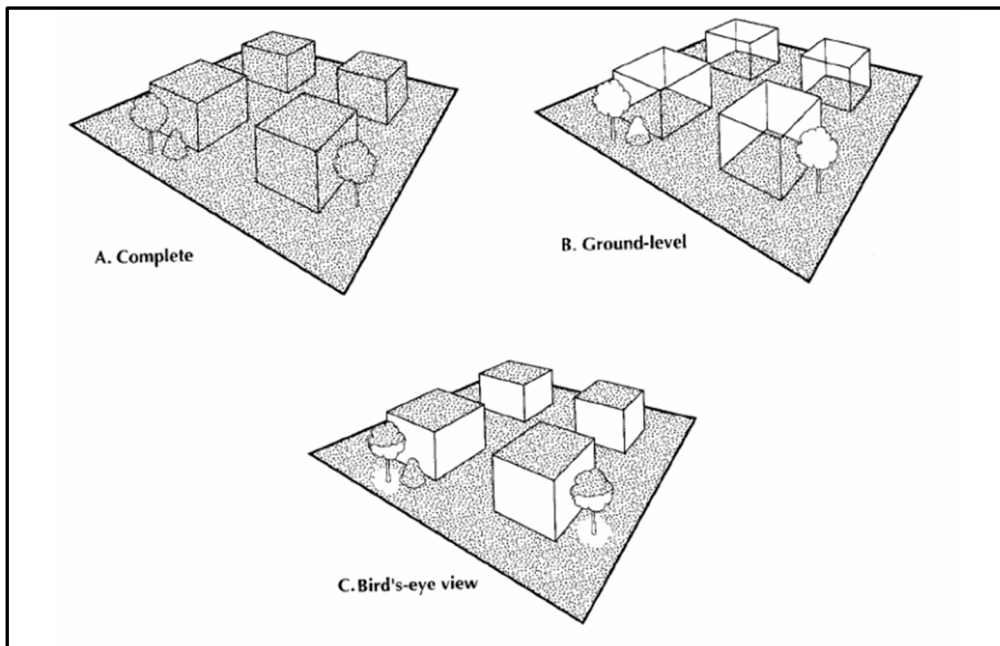


Figura 5. Differenti definizioni di superficie urbana (Voogt e Oke 1987).

### 1.3. Cause dell'isola di calore urbana

L'isola di calore urbana è un'anomalia termica influenzata da molteplici fattori che si viene a creare in un contesto di fondo complesso: la città. I fattori condizionati sono sicuramente fra loro correlati ma cambiano in modalità ed intensità a seconda delle specificità di ogni città, pertanto il contributo di essi alla UHI non è definibile a priori in maniera del tutto generale. L'isola di calore urbana varia di intensità da giorno a giorno a causa di fenomeni non direttamente correlabili alle azioni dell'uomo come la posizione geografica, le condizioni meteorologiche e il momento temporale.

Per facilitarne lo studio si è pensato di schematizzare le varie cause, dividendole innanzitutto in variabili controllabili ed incontrollabili, ed inserire all'interno di ognuna di essa le osservazioni fatte dai vari studiosi negli anni precedenti.

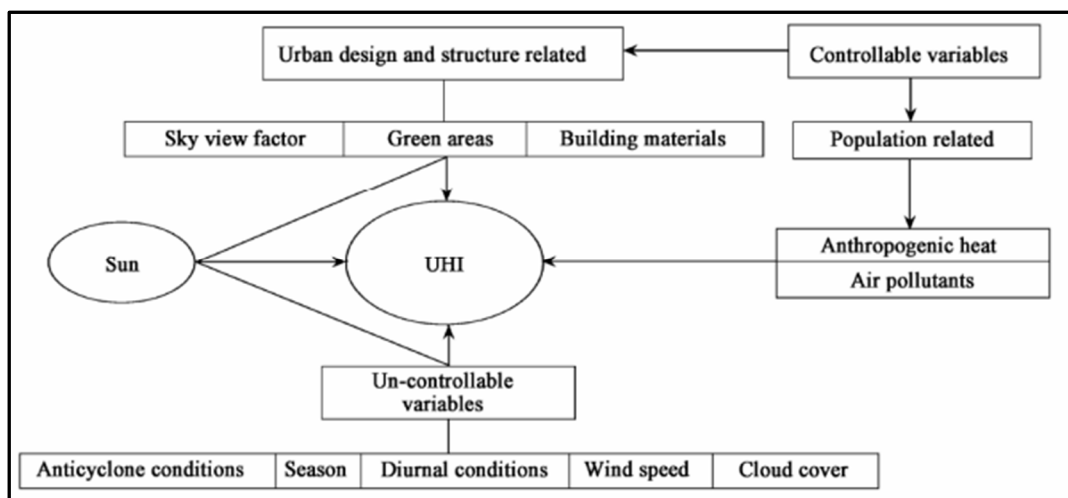


Figura 6. Classificazione delle cause dell'UHI (Rizwan, 2008)

Tra le variabili incontrollabili, oltre alle altre già citate in precedenza, vi si trovano anche la velocità del vento e la copertura nuvolosa. Una bassa velocità del vento tende a formare una zona di alta pressione e un'atmosfera stabile e l'assenza di una copertura nuvolosa fa sì che tutta la radiazione solare arrivi alla superficie della terra, questa è la condizione più gravosa per la formazione dell'isola di calore. Al contrario, la presenza di venti forti permette di allontanare masse d'aria calda intrappolate nella geometria urbana, la creazione di brezze assicura un rimescolamento di masse d'aria tra le zone rurali e quelle urbane e la presenza di nuvole, durante le ore diurne, permette la schermatura parziale dei raggi solari.

### *1.3.1. Proprietà dei materiali da costruzione*

Essendo l'isola di calore urbana un fenomeno che si manifesta in aree urbane la prima causa di essa va ricercata proprio nella modalità in cui l'uomo ha modificato l'ambiente naturale e come ha realizzato le suddette. Le città sono spazi creati utilizzando materiali che differiscono per proprietà da quelli presenti nelle zone rurali o in zone completamente naturali. La diffusa urbanizzazione porta sempre di più a sostituire aree verdi con marciapiedi, strade, muri, tetti, ecc. realizzati con materiali che hanno proprietà termiche e radiative diverse da quelle di un terreno naturale. In generale tutti i materiali da costruzione hanno un'inerzia termica maggiore rispetto ad un terreno naturale, ciò vuol dire che assorbono gran parte del calore incidente durante il giorno per poi liberarlo sottoforma di raggi infrarossi durante la notte (Colucci, 2019). Tra le proprietà radiative dei materiali da costruzione la più importante è sicuramente l'albedo o riflettanza. L'albedo è definito come il rapporto tra la radiazione riflessa e la radiazione incidente di una superficie, il suo valore oscilla tra 0 (superficie perfettamente nera) e 1 (superficie perfettamente bianca). Superfici con valore alto di albedo sono capaci di riflettere gran parte della radiazione, di conseguenza di immagazzinarne poca e di alzare poco la propria temperatura. È per questo motivo che in estate risulta più gradevole indossare indumenti bianchi piuttosto che neri o che nei paesi del sud Mediterraneo si è scelto di realizzare case completamente bianche. Tale proprietà dipende dalle caratteristiche del materiale e dalla lunghezza d'onda della radiazione, nel nostro caso quella del sole (Radiazione e suolo: Albedo, CNR). In figura 7 sono riportati alcuni valori di albedo di alcune superfici, per i materiali da costruzione poi c'è da tenere conto che il loro invecchiamento comporta ad un abbassamento di tale indice dovuto al cambiamento della superficie in rugosità, lucentezza e colore.



Tipo di superficie	albedo
Strade sterrate	0,04
Superfici acquose	0,07
Bosco di conifere d'inverno	0,07
Asfalto invecchiato	0,10
Tetti o terrazzi in bitume	0,13
Suolo (creta, marne)	0,14
Erba secca	0,20
Pietrisco	0,20
Calcestruzzo invecchiato	0,22
Bosco in autunno/campi	0,26
Erba verde	0,26
Superfici scure di edifici	0,27
Foglie morte	0,30
Superfici chiare di edifici	0,60
Neve	0,75

Figura 7. Valori tipici di albedo di elementi naturali e non.

Una volta che i materiali hanno assorbito parte della radiazione solare, a secondo del proprio valore di albedo, tenderanno a rilasciarla sottoforma di calore seguendo la legge dell'emissività, la proprietà che più influenza l'isola di calore durante le ore notturne. L'emissività di una superficie è una proprietà radiativa e si definisce come il rapporto tra la radiazione emessa dalla superficie e la radiazione emessa da un corpo ideale, il corpo nero, alla stessa temperatura. L'emissività si indica con la lettera  $\epsilon$  e può assumere valori che oscillano tra 0 e 1. Quando  $\epsilon=1$  si è in presenza di un corpo nero, un corpo ideale capace di riflettere e assorbire la massima radiazione per ogni lunghezza d'onda e temperatura. Pertanto, l'emissività è una misura di quanto il potere emissivo di una superficie reale si discosta da quello di un corpo nero. Il potere emissivo è una vera e propria grandezza, misurata in  $W/m^2$ , che misura è la quantità di energia radiante emessa per unità di superficie di un materiale per unità di tempo. Il potere emissivo totale di un corpo nero segue la legge di Stefan-Boltzmann:  $E_n = \sigma \cdot T^4$  dove  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$  è la costante di Stefan-Boltzmann e  $T$  è la temperatura assoluta della superficie espressa in kelvin. Per conoscere il potere emissivo di un corpo reale basta moltiplicare l'emissività per il potere emissivo di un corpo nero:  $E = \epsilon \sigma T^4$ . L'emissività di una superficie reale non è costante ma varia a seconda della temperatura, della lunghezza d'onda e dell'angolo di incidenza della radiazione; pertanto, esistono varie formule dell'emissività a seconda dei parametri considerati, la più utilizzata è l'emissività emisferica totale che è funzione solo della temperatura (Yunus A. Çengel, 2013). Altre proprietà radiative dei materiali sono i coefficienti di riflessione, assorbimento e trasmissione. Quando una radiazione incidente

colpisce una superficie questa è in parte riflessa, in parte assorbita e in parte trasmessa (per superfici opache la radiazione trasmessa è pari a zero). La somma dei coefficienti deve essere sempre pari a 1 mentre la somma dei tre contributi della radiazione deve essere pari alla radiazione incidente, per il primo principio della termodinamica.

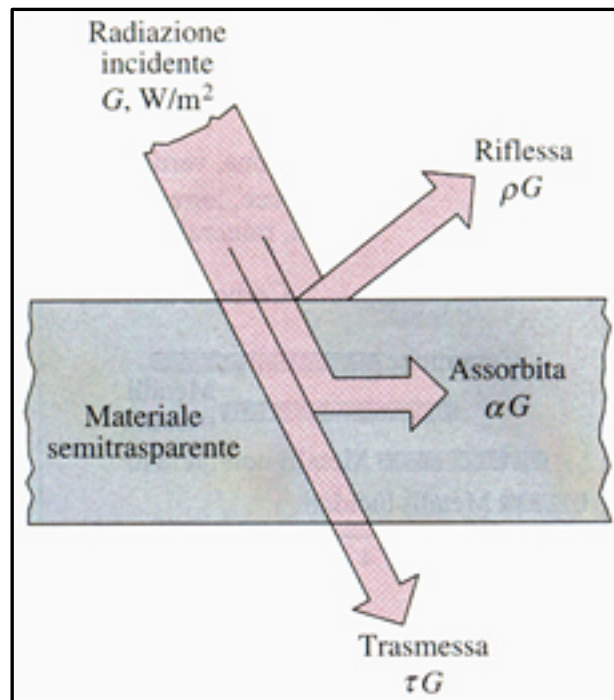


Figura 8. Suddivisione della radiazione incidente una superficie (Yunus A. Çengel, 2013).

Tutte le proprietà radiative sono correlate alla formazione e all'intensità dell'isola di calore, in particolare un'emissività ridotta fa sì che la superficie irradia meno energia all'aria circostante e attenua la gravità dell'isola di calore.

Le proprietà termiche di un materiale, invece, sono le proprietà che entrano in gioco quando il materiale stesso scambia energia termica (calore). Tra queste:

- calore specifico: definito come la quantità di calore richiesta per innalzare la temperatura dell'unità di massa del materiale di  $1^\circ\text{C}$ ;
- capacità termica: definito il prodotto del calore specifico per la massa;
- conducibilità termica  $\lambda$ : definita come "la potenza termica che si trasmette attraverso uno spessore unitario del materiale per unità di superficie e per differenza di temperatura unitaria" (Yunus A. Çengel, 2013).
- diffusività termica: descrive quanto rapidamente un materiale reagisce a una variazione di temperatura ed è definita come il rapporto tra la conducibilità e il calore specifico moltiplicato per la densità del materiale;
- inerzia termica: è la misura della risposta termica di una superficie ad un flusso di calore, è direttamente proporzionale alla conducibilità e alla capacità termica (Valedo, giugno 2024).

### 1.3.2. Scarsità di vegetazione

La crescita continua della popolazione urbana e lo sviluppo tecnologico-edilizio delle attività antropiche hanno portato l'uomo a realizzare sempre più superfici impermeabili come strade, edifici, marciapiedi e piazzali. Il fenomeno di impermeabilizzazione è portato all'ennesima potenza nelle metropoli, le quali, nei loro anni passati di alto sviluppo demografico, sono state progettate senza la minima accortezza di lasciare spazi verdi permeabili come parchi e giardini. L'attenzione alla coesistenza di vegetazione e aeree impermeabili è un fenomeno relativo a tempi recenti grazie anche allo sviluppo dell'"architettura verde". Con il termine impermeabilizzazione si intende la copertura del suolo naturale mediante materiali di tipo artificiale che non permettono all'acqua il suo normale deflusso e invaso che senza di essi seguirebbe. Secondo la commissione europea l'impermeabilizzazione è la principale causa di degrado del suolo in Europa dato che ne compromette le sue funzionalità e ne altera i sistemi ecologici (L'impatto dell'impermeabilizzazione, 2016). La scarsità o la totale assenza di vegetazione (prati, giardini, parchi o piccoli boschi) nei centri urbani è ritenuta una causa dell'isola di calore urbana dato che non solo i materiali artificiali hanno un'inerzia termica maggiore rispetto ai terreni naturali ma viene anche meno il processo di evapotraspirazione. Con evapotraspirazione si intende il duplice e contemporaneo processo di evaporazione e traspirazione, entrambi sono passaggi di stato da acqua liquida a vapore che avvengono grazie alla disponibilità di calore, nella maggior parte dei casi provenienti dalla radiazione solare, ma si differenziano in quanto il primo sottrae acqua ai pori del terreno e alla superficie terrestre mentre il secondo alla superficie fogliare.

Per comprendere il perché la scarsità di vegetazione influenza l'isola di calore vanno introdotti dalla letteratura i concetti di calore latente e calore sensibile. Il calore sensibile è l'energia termica scambiata che produce una variazione di temperatura di un corpo mentre il calore latente è l'energia scambiata necessaria per far avvenire un passaggio di stato, senza produzione di variazione di temperatura a bulbo secco. Il rapporto di Bowen  $\beta$  è definito come il rapporto tra il calore sensibile e il calore latente e Stull nel 1988 fornì una serie di valori tipici di  $\beta$  in funzione del tipo di terreno seppur il valore è variabile a seconda delle precipitazioni (Valedo, giugno 2024). Il rapporto di Bowen risulta in valore più alto nelle zone urbanizzate rispetto alle aree naturali e ciò sottolinea come in città sia maggiore il calore sensibile rispetto a quello latente. Infatti, la radiazione solare in arrivo sulla terra aumenta la temperatura della superficie urbana dato che, essendo principalmente impermeabilizzata, non ha acqua disponibile per l'evaporazione. Nelle aree verdi o rurali, invece, la radiazione solare viene usata in gran parte per far avvenire il passaggio di stato dell'acqua meteorica, trattenuta dalla vegetazione, a vapore acqueo senza innalzamento di temperatura delle superfici, senza accumulo di calore all'interno di esse e quindi senza rilascio durante le ore notturne. Oltre a tali motivi, la vegetazione, soprattutto gli alberi di una certa altezza e con la chioma, svolge un ruolo importante nella formazione di zone ombreggiate, cioè zone dove

i materiali da costruzione sono schermati dalla radiazione solare e rimangono più freschi durante il giorno.

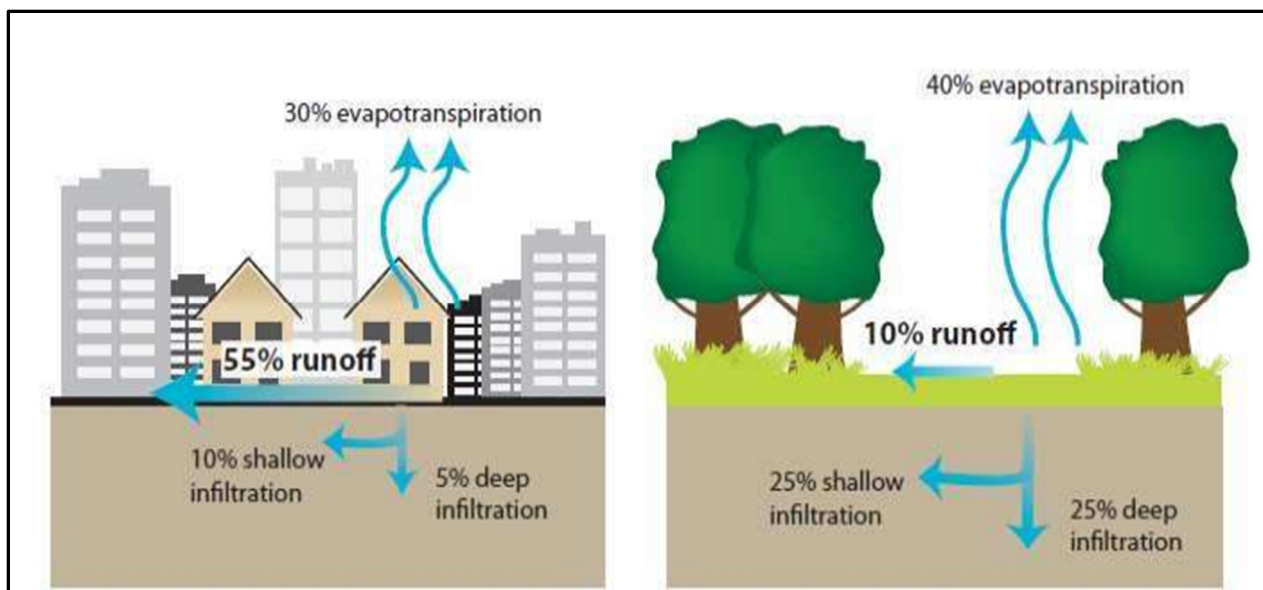


Figura 9. Processo di evapotraspirazione in contesti urbani e naturali (Akbari, 2008)

### 1.3.3. Canyon urbani

Nella formazione dell'isola di calore anche la geometria della città gioca un ruolo cruciale: la presenza di cunicoli, le vie strette o larghe, la proiezione dell'ombra degli edifici alti, una geometria regolare e squadrata come le vie di Barcellona o una forma più frastagliata e discontinua come Parigi influenzano in diverso modo e con diversa intensità il fenomeno dell'isola di calore. La disposizione urbana delle aree edificate rientra sicuramente nelle cause controllabili dell'isola di calore urbana in quanto settore gestito dall'uomo ma, allo stesso tempo, risulterebbe impossibile andare a stravolgere l'organizzazione geometrica di intere metropoli per abbassare il fenomeno dell'UHI. Il fenomeno, per quanto riguarda la problematicità della geometria urbana, che più influenza l'isola di calore urbana è sicuramente la formazione dei cosiddetti "Canyon urbani". Il 'Canyon urbano' è una semplificazione della superficie urbana che consiste in due elementi verticali e uno orizzontale, per lo più una strada lunga compresa tra due serie di edifici alti adiacenti, il volume d'aria del canyon urbano è quello racchiuso da questa disposizione fino all'altezza del tetto più basso (Nunez and Oke, "The Energy Balance of an Urban Canyon" 1977).

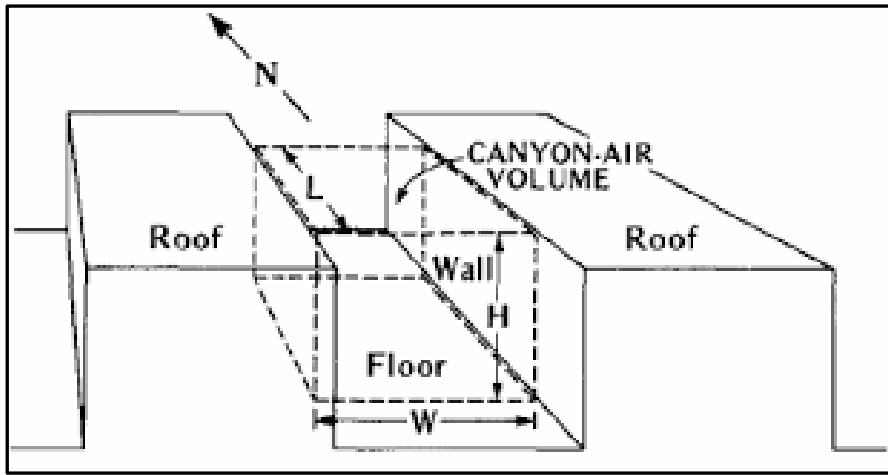


Figura 10. Rappresentazione di un canyon urbano (Nunez and Oke, "The Energy Balance of an Urban Canyon" 1977).

Gli effetti termici del canyon urbano sono tanto più intensi quanto più la strada è stretta e gli edifici sono alti, difatti è un fenomeno molto diffuso nelle metropoli con intere schiere di grattacieli allineati.

I parametri fondamentali, che permettono la semplificazione dello studio e di eventuali simulazioni, del canyon urbano sono:

- il fattore di forma del canyon (Aspect Ratio, AR), è il rapporto tra la larghezza del canyon (W) e l'altezza media degli edifici (H):

$$AR = \frac{W}{H}$$

Se  $AR \geq 2$  si definisce il canyon come poco profondo.

Se  $AR \leq 0.5$  si definisce il canyon come profondo.

- il fattore di forma degli edifici, è il rapporto tra la dimensione longitudinale del canyon (L) e l'altezza media degli edifici (H):

$$F = \frac{L}{H}$$

In seguito, al variare di tutti questi parametri, si ottengono diverse tipologie di canyon con peculiarità differenti. Se le due file di "grattacieli" del canyon hanno stessa altezza il canyon è simmetrico, se il vento nella sua direzione incontra prima una serie di edifici più bassi e poi più alti il canyon è asimmetrico step-up e viceversa è asimmetrico step-down, come rappresentato in figura 11.

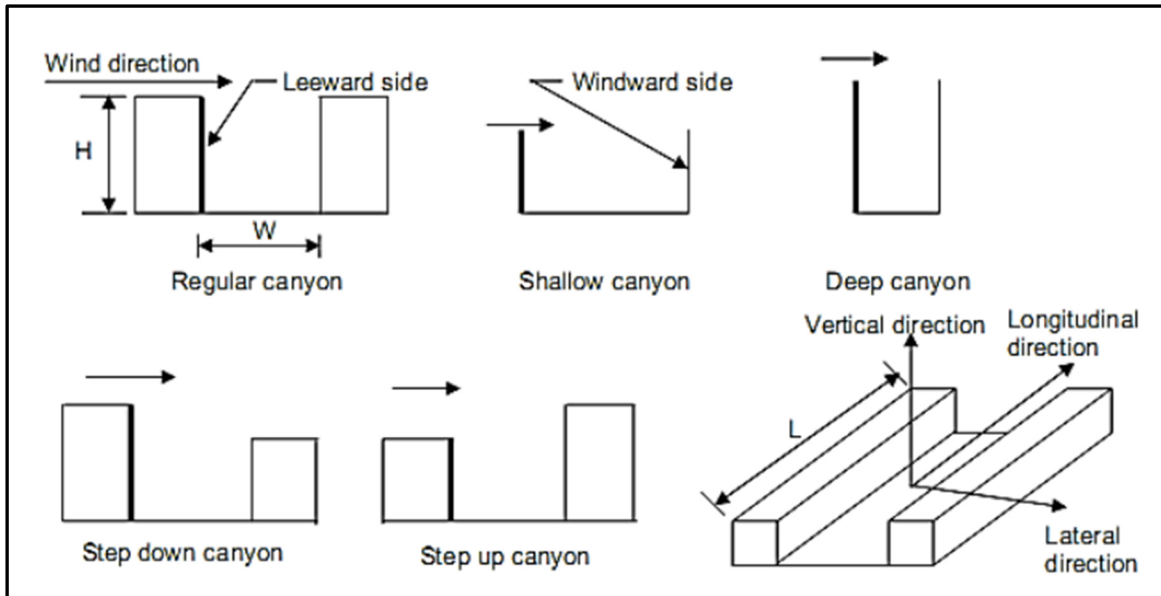


Figura 11. Tipologie di canyon urbano in base alle sue caratteristiche e dimensioni (Investigation of dissipation flow in the urban canyon, 2015).

Le conseguenze che il canyon urbano apporta all'isola di calore urbana si possono così sintetizzare:

- la particolare disposizione degli edifici modifica il normale flusso dei venti, diminuendo la sua turbolenza si creano zone in cui le masse d'aria calda e inquinanti si stagnano. A seconda della direzione del vento si creano due zone distinte (rappresentate in fig.11):
  - la parete sottovento (Leeward), quella in cui più le masse d'aria ristagnano;
  - la parete sopravvento (Windward).
- le radiazioni incidenti le pareti del canyon non vengono riflesse in atmosfera direttamente ma rimbalzano nel suolo o negli edifici adiacenti, si crea così un sistema di riflessioni multiple che favorisce l'assorbimento, diminuisce l'albedo medio urbano ed aumenta la temperatura rispetto ad altre zone urbane;

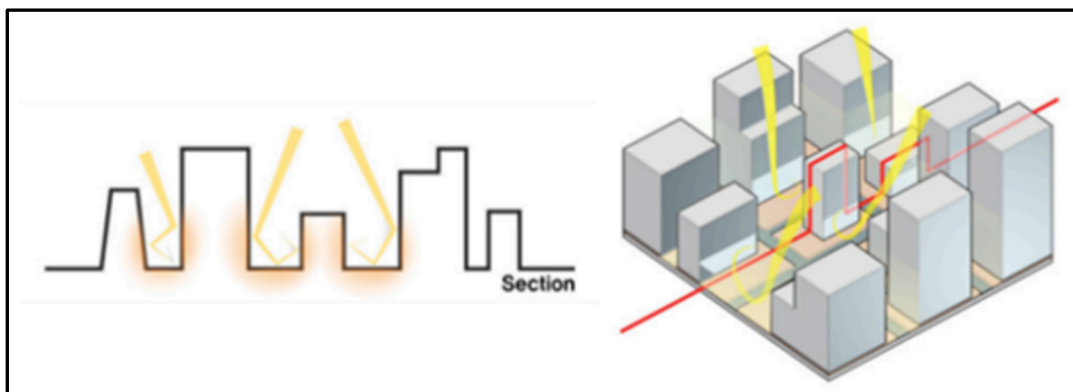


Figura 12. Schematizzazione delle riflessioni multiple in un canyon urbano (Luca Iob, Polito 2023).

- l'altezza degli edifici diminuisce il fattore di vista del cielo (sky view factory SVF), questo limita molto il raffreddamento nelle ore notturne perché le onde infrarosse irradiate dal suolo rimangono intrappolate. Lo 'sky view factory' (SVF) è un parametro adimensionale che varia tra 0 e 1 ed è definito come la porzione di cielo visibile da un punto di osservazione (Wikipedia, giugno 2024). Quando  $SVF=1$  il cielo è completamente visibile a  $360^\circ$  e il raffreddamento radiativo notturno è massimo. Quando  $SVF=0$  il cielo è completamente ostruito e il raffreddamento radiativo notturno è nullo.

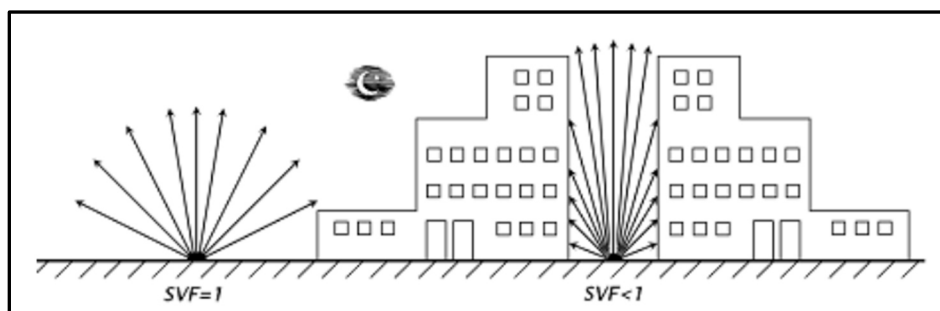


Figura 13. Rappresentazione dello SVF nel canyon urbano (Dursun e Yavas, 2014).

#### 1.3.4. Aumento del calore antropogenico

Secondo alcune previsioni, entro il 2050 il 65% della popolazione mondiale vivrà in un'area urbana e qui, di conseguenza, saranno concentrate tutte le attività antropiche (Needle, giugno 2024). Il calore antropogenico è definito come il calore che deriva da tutte le attività antropiche, quali le attività industriali, l'uso dei mezzi trasporto, i sistemi di condizionamento e l'inquinamento atmosferico. Tutte queste attività dissipano calore per ottenere una specifica conversione di energia necessaria all'attività antropica, ad esempio un'automobile trasforma l'energia chimica del carburante in energia meccanica per ottenere movimento, ma nella conversione parte dell'energia è dissipata nell'ambiente sotto forma di calore. Anche altre attività minori, come ad esempio le azioni di frenata dei mezzi di trasporto o le luci artificiali, generano calore che, anche se può sembrare trascurabile in intensità, moltiplicato per la mole di persone che lo producono in una metropoli diventa un contributo sostanziale al fenomeno dell'isola di calore urbana. Tra tutte le attività antropiche un'attenzione maggiore va riservata sicuramente a tutti i sistemi di condizionamento d'aria, cioè tutti quei sistemi che già di principio lavorano con e per la temperatura. Le persone in inverno utilizzano sistemi di riscaldamento e in estate sistemi di raffrescamento, in entrambi i casi l'energia richiesta genera di per sé un'entità di calore antropogenico, inoltre nel primo caso le temperature interne degli edifici più alte tengono a disperdersi nell'ambiente, nel secondo caso le macchine frigorifere utilizzate per il raffrescamento interno producono un'aliquota di calore rilasciato all'esterno. In estate soprattutto, tutti i sistemi di raffrescamento tendono a lavorare sempre di più e ad essere in maggior numero a causa dell'aumentare del fenomeno dell'isola di calore

urbano ma essi sono allo stesso tempo responsabili del suo aumento, si innesta quindi un circolo vizioso non facilmente risolvibile.

Secondo gli studi fatti da Oke (1987) la variazione del calore antropogenico prodotto tra i vari centri urbani dipende sia dalle diverse densità abitative ma soprattutto dai consumi pro capite caratteristici della città. Secondo uno studio effettuato in America il flusso di calore antropogenico in alcune città americane è di 20-40 W/m<sup>2</sup> durante l'estate e di 70-210 W/m<sup>2</sup> in inverno (Taha, 1997) mentre un altro studio realizzato nella città di Tokyo fornisce valori pari a 200 W/m<sup>2</sup> in estate e 400 W/m<sup>2</sup> in inverno (Ichinose et al., 1999).

Infine, in tempi moderni si stanno intraprendendo studi sempre più approfonditi sugli effetti che l'inquinamento provoca nel mondo, nelle città e nella salute umana. L'inquinamento è responsabile del cosiddetto "effetto serra" in città poiché alcuni gas, come la CO<sub>2</sub>, rilasciati in atmosfera trattengono maggiormente e per più tempo le radiazioni ad onde lunghe emesse dalla superficie e andando ad aumentare l'isola di calore urbana.

#### **1.4. Conseguenze dell'isola di calore urbana**

Le conseguenze che l'isola di calore apporta sono disperate e riguardanti diversi settori. Oltre al discorso energetico, già citato nei sottocapitoli precedenti, le conseguenze dell'UHI, strettamente correlate al cambiamento climatico, influenzano la vita e la salute dell'uomo. La problematicità più evidente è che le isole di calore amplificano gli eventi meteo-climatici estremi come le ondate di calore, questione già complessa nello sviluppo del cambiamento climatico mondiale. Le ondate di calore sono definite come condizioni meteorologiche estreme che prevedono temperature molto elevate, elevati tassi di umidità e scarsa ventilazione per più giorni consecutivi rispetto ad una condizione media standard. Un'ondata di calore è definita in relazione alle condizioni climatiche specifiche di ogni città, pertanto i parametri soglia non sono definiti a priori ma variano a seconda della grandezza, dal clima e dalla latitudine della città interessata, l'importante che tali valori critici siano presenti per almeno 3 giorni (Ministero della Salute, giugno 2024). Le ondate di calore, già esistenti in natura, quando arrivano in città sono amplificate dall'isola di calore urbana, generando condizioni molto avverse per i cittadini. Si stima che il 90% delle morti in Europa negli ultimi decenni legate ad eventi meteo-climatici estremi siano causate proprio dalle ondate di calore (Agenzia Europea per l'ambiente, giugno 2024). A farne le spese sono i soggetti più deboli come anziani, neonati e malati, questi possono contrarre malattie o nei casi più gravi arrivare alla morte. Tralasciando i casi più gravi, le ondate di calore amplificate dall'UHI generano una situazione di disagio in tutte le persone che peggiora la qualità della vita e complica le sue azioni. Per spiegare questo disagio si deve introdurre il concetto di 'Benessere termometrico'. Per benessere



termoigrometrico si intende la soddisfazione termica (sensazione di caldo o freddo) che un individuo prova in un certo ambiente ed è definito da 6 grandezze, 4 caratterizzanti le condizioni ambientali e 2 le condizioni dell'individuo e sono:

- temperatura dell'aria
- temperatura media radiante dalle superfici dell'ambiente
- umidità relativa dell'aria
- velocità dell'aria
- metabolismo energetico dell'individuo
- resistenza termica dell'abbigliamento

Essendo un parametro dipende dalle condizioni dell'individuo non è definibile a priori un range di benessere termoigrometrico ideale ma, per le condizioni ambientali, l'esperienza degli studi fatti ha portato a definire come soddisfacente un ambiente con temperatura intorno ai 20 °C, un'umidità relativa del 60% e un vento con velocità 2-3 m/s, a questi si aggiunge poi un'ottimale salubrità dell'aria, cioè scevra da inquinanti, germi e virus, soprattutto in un ambiente indoor.

Per valutare più scientificamente e tecnicamente il benessere igrometrico la norma UNI EN ISO 7730:2006 ha introdotto i parametri proposti da Fanger:

- PMV (Predicted Mean Vote): il voto medio previsto definisce una scala di comfort che va da -3 (sensazione di freddo) a +3 (sensazione di caldo), passando attraverso 0 (neutralità termica) ed è espresso dall'equazioni di Fanger:

$$PMV = CT (0,303 \cdot e^{-0,036M} + 0,028)$$

Con CT=carico termico e M=dispendio metabolico dell'individuo.

Tabella n. 1	Scala di valutazione dell'ambiente termico secondo il PMV
+3	Molto caldo
+2	Caldo
+1	Leggermente caldo
0	Neutro
-1	Fresco
-2	Freddo
-3	Molto freddo

Figura 14. Correlazione tra i valori del PMV e sensazioni di benessere ottenute (INAIL, 2022).

- PPD (Predicted Percentage Dissatisfied): la percentuale di persone insoddisfatte, rappresenta in termini relativi il numero di individui che non gradiscono l'ambiente dal punto di vista termico, anche se il PMV è pari a 0 però, il PPD non si annulla ma rimane un valore di circa il 5%.

## 1.5. Possibili tecniche di mitigazione dell'isola di calore urbana.

L'aggravarsi del fenomeno dell'isola di calore urbana ha portato ad una continua, profonda e moderna ricerca di possibili tecniche e metodologie per attenuare il fenomeno, a partire da provvedimenti puntuali come i singoli materiali da costruzione fino a quelli più globali come nuove organizzazioni geometriche della città. Per lo studio dell'UHI è necessario semplificare i reali processi fisici che avvengono contemporaneamente così da poter realizzare, grazie al principio di conservazione dell'energia, un bilancio energetico superficiale:

$$Q_{\text{netto}} = Q_{\text{immagazzinato}} + Q_{\text{conduzione}} + Q_{\text{convezione}} + Q_{\text{evapotraspirazione}}$$

Il valore di calore netto che arriva alla superficie è un'aliquota di tutta la radiazione solare in arrivo sulla superficie e non considera il contributo del calore antropogenico  $Q_f$ .

In breve, le soluzioni proposte per lenire l'UHI sono:

- ridurre il flusso di calore immagazzinato modificando la geometria urbana e utilizzando materiali con minor inerzia termica;
- ridurre il calore antropogenico limitando azioni troppo impattanti e migliorando l'efficienza termica;
- ridurre il flusso di calore netto tramite l'utilizzo di superfici e materiali con albedo più elevato;
- aumentare il flusso di calore di evapotraspirazione al fine di diminuire il flusso di calore sensibile ed aumentare quello latente, aumentando la permeabilità delle superfici e la presenza di vegetazione.

### 1.5.1. Cool roofs e cool pavements.

La prima soluzione proposta per mitigare l'isola di calore urbana è quella di sostituire i classici materiali da costruzioni con materiali aventi caratteristiche termiche e radiative più specifiche. L'innalzamento delle temperature nelle città è dovuto principalmente a tutte le superfici che sono esposte direttamente alla radiazione solare come i tetti e le pavimentazioni, è proprio su quest'ultime che gli interventi di miglioria si concentrano. La distinzione tra cool roofs e cool pavements viene fatta perché, seppur il principio e lo scopo con cui agiscono è lo stesso, tetti e pavimentazioni presentano una funzionalità diversa e una diversa modalità di costruzione; pertanto, i materiali utilizzati non possono coincidere completamente.

Il principio di funzionamento dei 'cool roofs' è di avere elevata riflettanza solare (quindi alto albedo) ed allo stesso tempo elevata emissività termica, la prima permette di non assorbire grandi quantità della radiazione solare incidente con conseguimento abbassamento della temperatura superficiale, la seconda permette di irradiare all'atmosfera, sottoforma di onde infrarosse, la maggior parte della radiazione assorbita (USEPA, 2008). Tali proprietà permettono di avere una temperatura delle superfici paragonabili a quelle dell'aria circostante e di non trasmettere elevati flussi di calore all'interno dell'edificio, diminuendo i consumi per il condizionamento e dei carichi elettrici di picco fino anche al 70% (Barozzi et al., 2005).

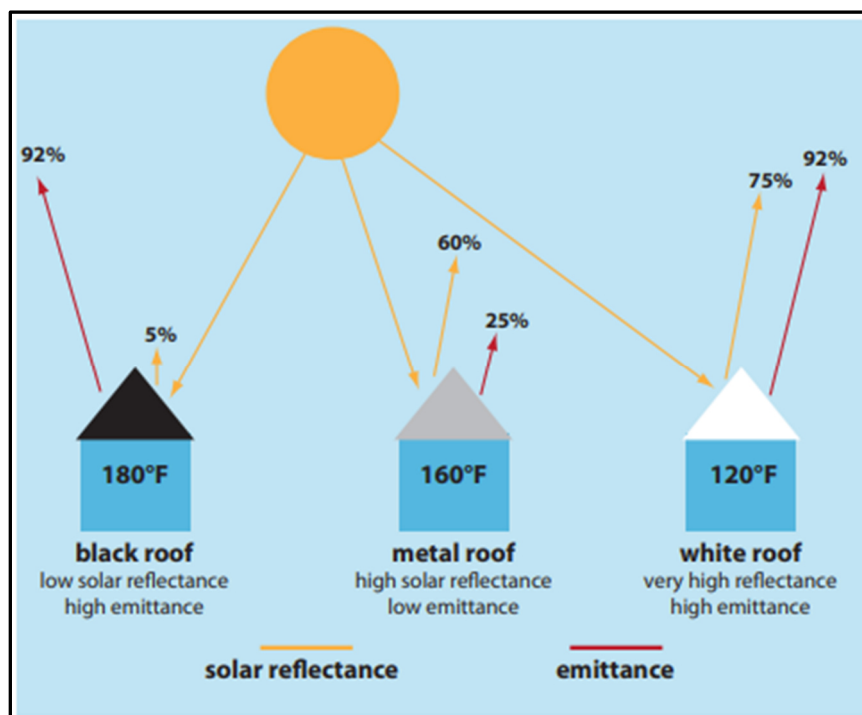


Figura 15. Riflettanza solare ed emissività di diversi tipi di tetti (USEPA, 2008).

I tetti tradizionali, denominati "black roofs" in fig.5, hanno alta emissività ma bassa riflettanza, i tetti metallici hanno maggior riflettanza ma bassa emissività (difatti raggiungono temperature molto alte) mentre i 'cool roofs', in fig.5 "white roofs", hanno elevati valori di riflettanza ed emissività e questo li porterà ad avere temperature superficiali molto più basse. Secondo alcune simulazioni semplificate, portando la riflettanza da 0.25 a 0.40 si può abbassare la temperatura urbana fino a 4°C (Taha, 1997).

Con i vari progressi tecnologici lo sviluppo di 'cool roofs' sempre più prestanti cresce anno dopo anno. I tetti più freddi sono sicuramente quelli realizzati con una superficie liscia, opaca, pulita e con un elevato grado di bianco. La prima generazione di 'cool roofs' è costituita da materiali reperibili in natura con un'elevata presenza di bianco, quelli di seconda generazione sono costituiti da materiali artificiali con una presenza di bianco più alta e maggior riflettanza, quelli di terza generazione hanno un aspetto simile a quelli tradizionali ma alti valori di riflettività nell'infrarosso e quelli di quarta generazione, invece, ottengono i valori termici e radiativi voluti tramite proprietà legate alle

nanotecnologie (vedi i 'phase change materials') (Santamouris, 2014). Secondo uno studio condotto contemporaneamente su due tipologie di 'cool roof', uno in zona tropicale e uno a Singapore, l'adozione di tale strategia ha portato ad un abbassamento di picco della temperatura del tetto di 14.1 °C, un abbassamento dell'aria interna all'edificio di 2.4 °C e un risparmio giornaliero di energia del 54% (Santamouris, 2015).

Gli stessi principi valgono anche per le 'cool pavements' che sono chiamate a sostituire le pessime caratteristiche termico-radiative del conglomerato bituminoso tradizionale con cui sono realizzate la maggior parte delle strade, con un valore di albedo di circa 0.04. Le soluzioni più pratiche e più usate al momento prevedono l'aggiunta di aggregati di colore chiaro, l'applicazione di uno strato sottile di calcestruzzo sopra l'asfalto o l'aumento della permeabilità delle strade che hanno una maggiore superficie specifica e inoltre permettono l'evaporazione di acqua nei pori o nel sottosuolo. Tali semplici accorgimenti possono portare i valori di albedo da 0.04 fino a 0.25 (Sartini, 2022).

Nonostante tutto, però, vanno considerati anche gli aspetti negativi dei 'cool roofs' e delle 'cool pavements' e cioè che di inverno la situazione si inverte, il calore non si accumula e non si trasmette agli edifici, e che superfici molto riflettenti possono portare a stress visivo, in campo architettonico va considerata la quantità di luce riflessa soprattutto nelle strade adibite al traffico veicolare.

### 1.5.2. Raffrescamento passivo

Come già citato nei capitoli precedenti, il calore generato da attività antropiche non può essere trascurato nella valutazione dell'isola di calore urbana e in particolare i sistemi di climatizzazione sono i responsabili del "circolo vizioso" che si viene a creare. Ad esempio, uno studio condotto a Tokyo ha rilevato che le unità esterne dei condizionatori d'aria contribuiscono ad aumentare la temperatura dell'aria di 1-2 °C nei giorni feriali. Un provvedimento sostanziale e migliorativo da adottare è sicuramente quello del raffrescamento passivo. Per definirlo ci avvaliamo della definizione datagli dal geometra Antonio Massari: *"con raffrescamento passivo si intende una soluzione naturale di condizionamento dell'aria, che sfrutta principalmente i moti convettivi dell'aria e i principi geotermici per abbassare le temperature interne"* (Massari, giugno 2024). I sistemi di raffrescamento passivo possono basarsi su principi fisici quali:

- l'effetto camino per differenza di temperatura dell'aria: sfrutta la differenza di pressione e densità dell'aria causata dal gradiente termico tra interno ed esterno che a sua volta crea un movimento d'aria, si può creare sfruttando la verticalità degli edifici tramite camini, vani scala e cavedi climatici e massimizzare tramite ventilatori interni ed una progettualità corretta della radiazione solare incidente;
- il raffrescamento ventilativo 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. Tale fenomeno si verifica negli edifici poiché la parete perpendicolare alla direzione del vento è esposta ad una pressione maggiore (sovra-pressione) rispetto a quello contrapposto (depressione) e l'interno degli edifici, con i suoi infissi rappresenta un ponte di collegamento capace di creare una ventilazione naturale tanto più efficace (veloce) quanto più grande è la strizione e il gradiente anemologico;

- il convogliamento del vento tramite canalizzazioni apposite, tecnica antichissima usata soprattutto nei climi tropicali ed equatoriali che prevede l'uso della torre del vento, questa è un manufatto capace di convogliare l'aria fredda della notte in appositi condotti sotterranei;

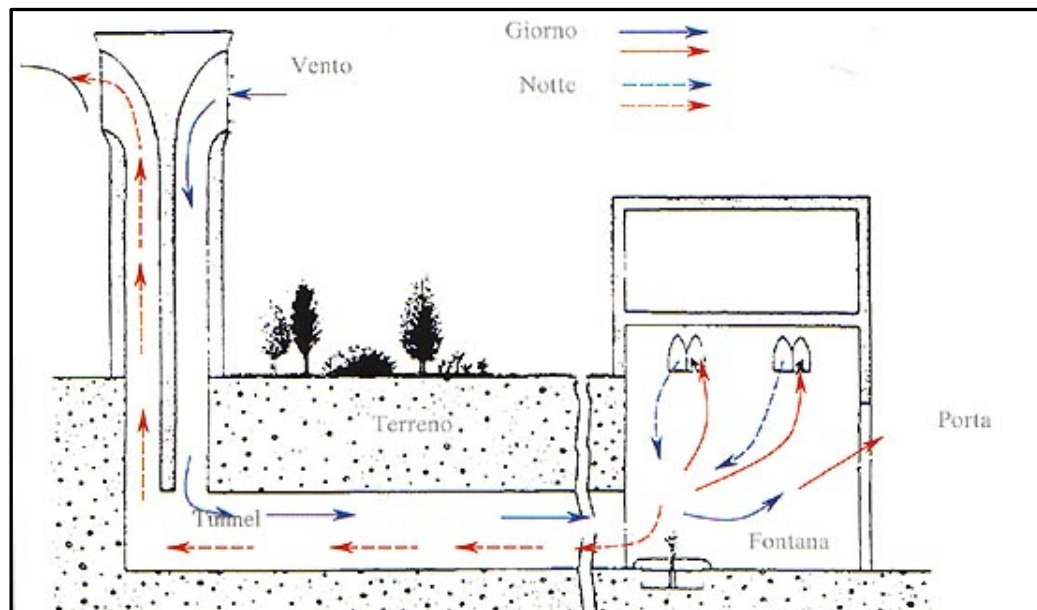


Figura 16. Schema dei flussi d'aria di una torre del vento (Architettura ecosostenibile, giugno 2024).

- il raffrescamento convettivo sfruttando la ventilazione notturna;
- il raffrescamento evaporativo per evaporazione dell'acqua con il vento, dato che nel passaggio di stato tra liquida e gassosa l'acqua sottrae calore all'ambiente esterno (Infobuildenergia, 2013).

### 1.5.3. Vegetazione e green roofs

La differenza più lampante tra una zona urbana, dove si manifesta l'UHI, e una zona rurale è la presenza o meno di vegetazione. È risultato sin da subito ineccepibile che lo sproporzionato disboscamento applicato al fine di rendere sempre più zone naturali edificabili abbia portato danni, non solo in maniera diretta agli elementi naturalistici, ma anche al clima e processi microclimatici. Gli studi che confermano tale questione sono molteplici e ormai molto confutati, secondo la Fao gli alberi in città possono ridurre il fabbisogno di aria condizionata del 30% circa (Fao, giugno 2024), l'ombreggiamento degli alberi ad alto fusto riesce a diminuire le temperature delle superfici fino a 25

°C (Bell, Cole et al. 2008) e la presenza di vegetazione può abbattere la temperatura dell'aria esterna fino a 5 °C (Alessandrelli, 2024) e dell'aria interna di 3 °C (Enea, giugno 2024).

Il verde ha un ruolo primario nella mitigazione dell'isola di calore urbana dato che ha un valore globale di albedo ed inerzia termica ben diverso dai materiali artificiali. Si stima, infatti, che l'albedo globale di una zona contenente vegetazione spontanea o coltivata ha valore 0.3 a differenza dell'albedo globale medio delle città di 0.05 (Mariani e Sovrano Sangallo, 2005). Oltre ad immagazzinare meno energia, la vegetazione usa parte di questa per i suoi processi vitali e tende a riemetterla sottoforma di calore latente a discapito della radiazione infrarossa. Anche l'ombra creata dai grandi alberi tende a creare zone più fresche, la loro ombra risulta essere più efficace sulle superfici di 20 °C rispetto alle ombre create da strutture artificiali (Rinnovabili, giugno 2024), una pianificazione intelligente della disposizione può influenzare direttamente le temperature interne ed esterne degli edifici, risparmiando sulla climatizzazione.



*Figura 17. Esempio di verde urbano, Rambla, Barcellona, Spagna (Google).*

Una tecnica all'avanguardia di inserimento di vegetazione all'interno delle città è sicuramente rappresentata dai "green roofs". Questa tecnica nasce dall'esigenza di inserire spazi verdi in punti



della città dove gli edifici sono molto stretti e ravvicinati pertanto non è possibile piantare alberi o inserire parchi. Il 'tetto verde' è una strategia attuativa che prevede l'inserimento di vegetazione sui tetti degli edifici, che in alcune città americane si stimano essere comunque il 20-25% della superficie urbana. Esso può essere abbinato alla sua tecnica gemella: piantagione di particolari specie di piante che sviluppano in verticale, come le piante arrampicanti, a ridosso delle facciate degli edifici, è il caso del 'bosco verticale' a Milano. Il principio di funzionamento di queste due tecniche si basa sempre sui benefici generali che la vegetazione apporta, quello che cambia è la scelta della vegetazione più idonea e la modalità di costruzione, più delicata e complessa rispetto ad un tetto o una facciata tradizionale.

I 'green roofs' sono caratterizzati da una stratigrafia precisa raffigurata in fig.18 e il Giardino Botanico di Chicago ha individuato, dopo aver effettuato uno studio su 216 diverse specie, le 9 specie di piante più adatte all'inerbimento dei tetti tenendo conto oltreché degli effetti termici, anche della sensibilità agli sbalzi termici, della resistenza alla siccità, della durabilità e della capacità di drenaggio (Infobuildenergia, giugno 2024).

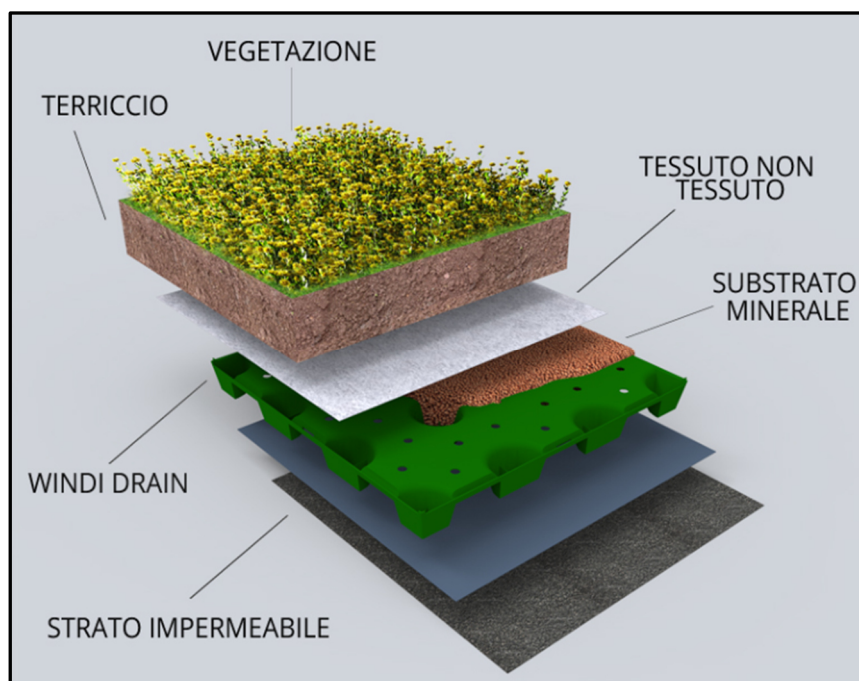


Figura 18. Stratificazione di un green roof (Infobuildenergia, giugno 2024)

L'inerbimento è possibile nei tetti con pendenza fino al 35% ma il peso della coltura che grava nel solaio va tenuto conto in fase di progettazione. Un tetto verde può essere di due tipi: intensivo ed estensivo. La principale differenza tra un tetto verde estensivo e un tetto verde intensivo risiede nello spessore del substrato colturale e, di conseguenza, nella tipologia di vegetazione che può essere piantumata. Un tetto verde estensivo solitamente presenta uno strato di terriccio compreso tra 8 e 15 centimetri, adatto per ospitare erbe, cespugli e piante molto piccole, con un peso complessivo inferiore a 150 kg/m<sup>2</sup>. Questa tipologia di copertura verde richiede poca manutenzione, con interventi

periodici ogni 6 mesi o un anno, e non è calpestabile, se non per i manutentori. Viene spesso utilizzato per coprire superfici molto estese, come i tetti dei capannoni industriali o dei centri commerciali. Un tetto verde intensivo, invece, è progettato per ospitare vegetazione più varia e complessa, grazie a uno strato di terra che va da 25 a 50 centimetri. Questo tipo di tetto richiede una manutenzione più frequente, con interventi superiori a 4-5 volte l'anno, e può arrivare a pesare fino a 2.000 kg/m<sup>2</sup>.



*Figura 19. Tipologie di green roofs: estensivo (sinistra) ed intensivo (destra) (Sottana, 2012).*



## CAPITOLO 2

### VEGETAZIONE E ISOLA DI CALORE URBANA

Il capitolo precedente voleva introdurre, per certi versi anche in maniera nozionistica, alcuni concetti base del fenomeno dell'isola di calore, indagandone le cause e le conseguenze e riportando alcune semplici basi scientifiche del suo "funzionamento". Nei prossimi capitoli e in quello che segue si vuole spostare l'attenzione, in maniera sempre più precisa e puntuale, verso il nostro caso studio. La vegetazione, infatti, oltre ad essere uno dei migliori strumenti di mitigazione dell'UHI in termini costi/benefici/fattibilità, sarà anche il mezzo preso in considerazione per abbattere le temperature in uno scenario ipotetico del nostro caso studio. Pertanto, si vuole dedicare questo capitolo all'approfondimento del verde urbano, ai processi chimico-fisici della vegetazione e ai benefici apportati in una visione olistica.

#### **2.1. Il fenomeno dell'evapotraspirazione**

L'evapotraspirazione è il fenomeno simultaneo di evaporazione e traspirazione. Entrambi sono passaggi di stato dell'acqua dallo stato liquido allo stato gassoso, nel primo caso l'acqua considerata è quella libera, intrappolata nel suolo, residente nelle superfici o negli specchi d'acqua che evapora grazie al calore del sole o quello sottratto dal suolo, nel secondo è l'acqua intrappolata nei tessuti della vegetazione, il cui passaggio di stato avviene tramite la superficie fogliare. L'efficienza dell'evapotraspirazione dipende dalla differenza tra la tensione di vapore sulla superficie di evaporazione (cioè la tensione di saturazione) e quella dell'atmosfera circostante, ed alla velocità del vento, che determina l'intensità degli scambi turbolenti in atmosfera, queste due forzanti sono dette aereodinamiche (Pierluigi Claps e Paola Allamano, 2011). Oltre a queste forzanti, altri fattori climatici influenzano l'intensità dell'evaporazione: la temperatura, l'umidità relativa e la pressione atmosferica. L'evapotraspirazione ha bisogno di calore (energia) per avvenire quindi avviene più velocemente e in modo più prestante quando le temperature sono alte; l'umidità dell'aria, invece, provoca una pressione sulla superficie di evaporazione che ostacola il processo, ecco perché l'evapotraspirazione avviene più velocemente in presenza di aria secca. In aggiunta vanno citati i fattori biologici, agronomici e pedologici, questi sono fattori legati alla natura stessa della vegetazione, al tipo di verde e alle sue condizioni attuali di benessere.

L'entità (o tasso) di evaporazione è proporzionale al flusso netto di calore latente. Il calore latente di vaporizzazione, indicato con  $\lambda_v$ , è la quantità di calore necessaria per rompere i legami a idrogeno durante l'evaporazione di un'unità di massa d'acqua. La stessa quantità di calore viene rilasciata

quando questi legami si riformano durante la condensazione. Il fenomeno dell'evaporazione da una superficie d'acqua è quindi sempre accompagnato da un flusso di energia verso l'aria che riceve il vapore acqueo. Questa energia può essere rilasciata durante la condensazione. Di conseguenza, il raffreddamento notturno dell'aria è contrastato dal calore rilasciato dalla condensazione del vapore in condizioni di alta umidità relativa.

È proprio l'insieme di questi fenomeni che permette di immagazzinare il calore in arrivo dalla radiazione solare sotto forma di calore latente invece che di calore sensibile che è responsabile dell'aumento delle temperature delle superfici. Si ricorda che il rapporto tra calore sensibile e calore latente definisce il rapporto di Bowen  $\beta$ , mediamente più alto nelle zone urbane rispetto alle zone rurali.

Data la varietà di fattori che influenzano l'evapotraspirazione, risulta evidente che il suo studio e le sue stime sono complesse da realizzare pertanto nel corso degli anni si è cercato un modello matematico che meglio approssimasse il fenomeno.

Nel 1955 si è introdotta un'astrazione, una semplificazione del fenomeno, definendo il concetto di 'Evapotraspirazione potenziale di riferimento  $ET_0$ ': è la quantità d'acqua (mm) evapotraspirata, in un determinato intervallo di tempo, da una superficie interamente coperta da una coltura ideale di 'Festuca arundinacea' con caratteristiche standard: fitta, bassa, uniforme, in piena attività vegetativa, posta in condizioni di rifornimento idrico del terreno ottimali. La coltura, inoltre, deve essere allevata in condizioni tali che: la qualità dell'acqua, le caratteristiche del terreno, la disponibilità di elementi nutritivi, attacchi di patogeni e insetti non limitino la produzione (Santonoceto, 2016). L'adozione di questo parametro fa sì che l'evapotraspirazione dipenda esclusivamente dal potere evaporante dell'atmosfera in quanto tutti gli altri fattori sono stati normalizzati. In seguito, per ottenere una stima sui bilanci idrici di ogni singola coltura ed ad ogni singolo stato vegetativo, si introduce un coefficiente  $K_c$  (coefficiente colturale) tipico per ogni specie di pianta ad un determinato stato vegetativo che se moltiplicato per l'evapotraspirazione potenziale di riferimento fornisce un valore di evapotraspirazione ( $ET_c$ ) collegato alla fisiologia della pianta e al suo stato di crescita:

$$ET_c = ET_0 \times K_c$$

Per ottenere il valore finale di evapotraspirazione  $ET_{c_{adj}}$ , detto 'reale', bisogna moltiplicare per un nuovo coefficiente  $K_c$  che tenga in considerazione non solo del quantitativo d'acqua di cui la coltura ha bisogno ma anche della reale offerta di acqua di cui il terreno dispone (Santonoceto, 2016). Dato che le condizioni di terreno e coltura non sono sempre quelle standard, si moltiplica il valore ottenuto anche per un coefficiente  $K_s$  (coefficiente di stress).

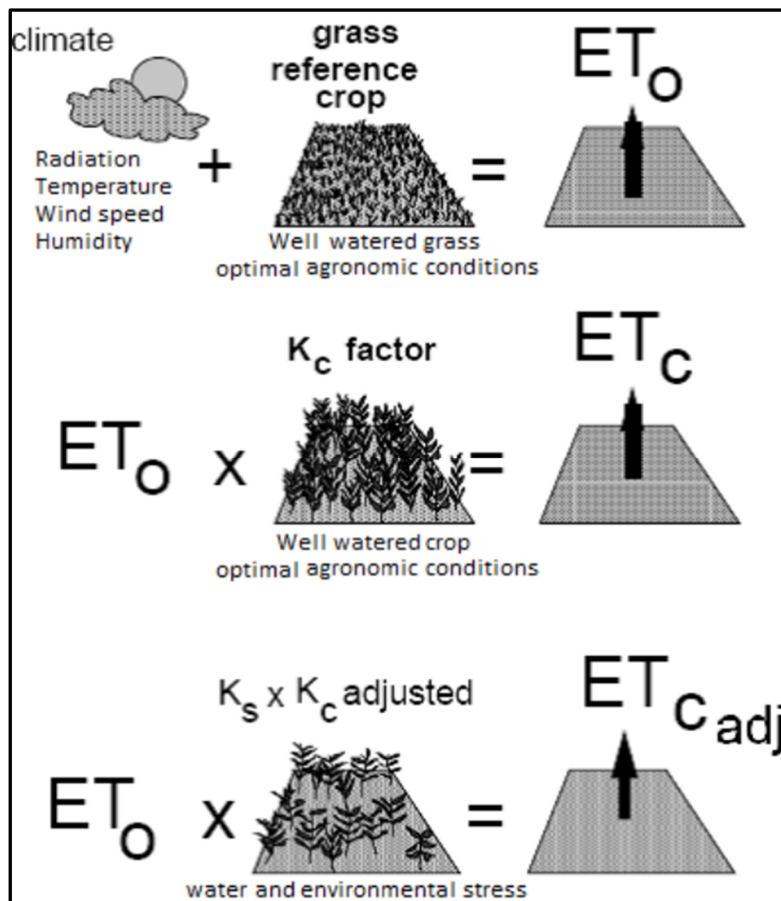


Figura 20. Coefficienti per il calcolo dell'evapotraspirazione reale a partire da quella potenziale (Santonoceto, 2016).

Una volta definite queste linee guida semplificative per il calcolo dell'evapotraspirazione, i ricercatori negli anni si sono impegnati a trovare una legge matematica per definire numericamente l'evapotraspirazione potenziale di riferimento. Al giorno d'oggi la legge più giusta sembra essere quella di FAO Penman-Monteith, con un margine di errore di solo 10% (Wikipedia, giugno 2024).

Tutti i modelli matematici per l'evapotraspirazione sono stati elaborati a partire dall'idea di conservazione dell'energia e quindi dalla realizzazione dei bilanci energetici, sia in termini di radiazioni che di acqua (riportati brevemente qua sotto).

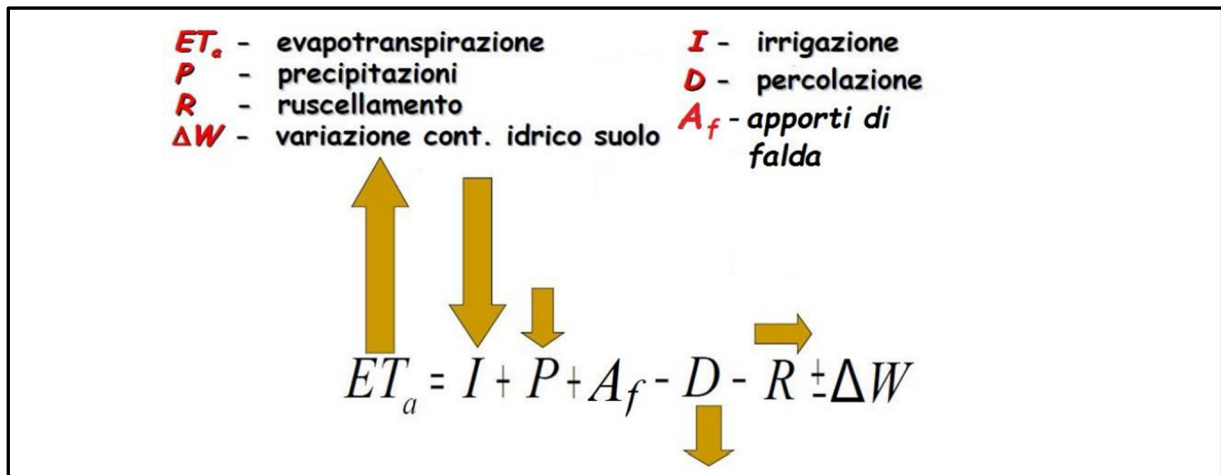


Figura 21. Equazione di bilancio idrico dell'evapotraspirazione (Santonoceto, 2016).

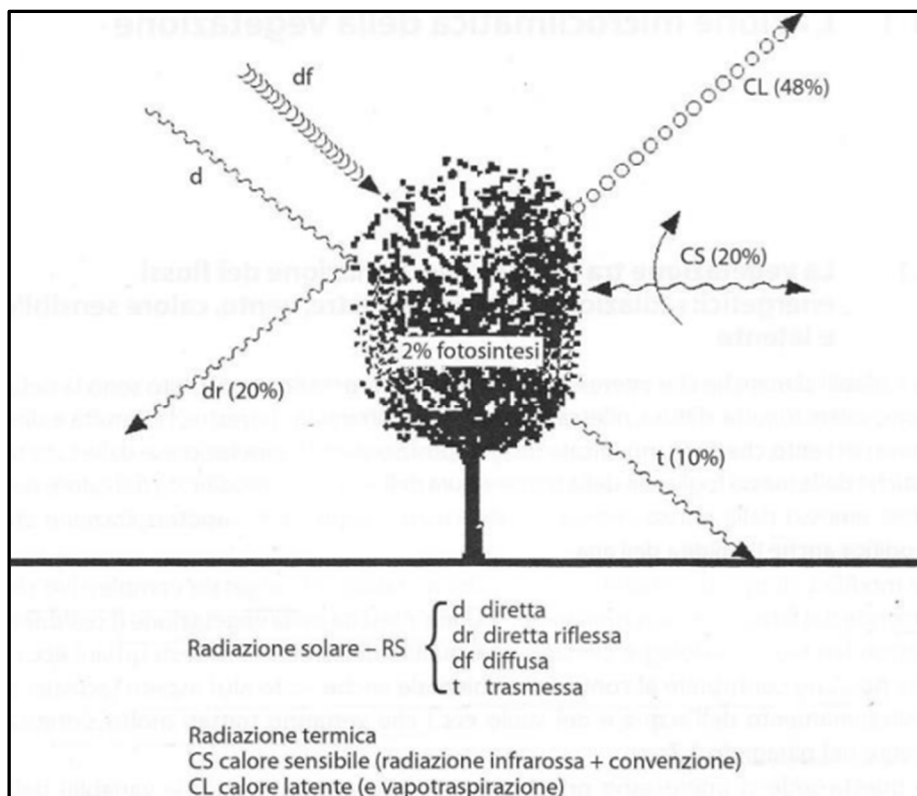


Figura 22. Schema dei flussi energetici tra vegetazione e ambiente circostante (G. Scudo, J.M.O de la Torre 2003)

## 2.2. Ulteriori benefici della vegetazione

L'ombreggiamento e l'immagazzinamento di energia sottoforma di calore latente sono sicuramente i benefici più vantaggiosi offerti dalla vegetazione e gli aspetti più mirati del nostro caso studio. Tuttavia, si vuole citare brevemente anche altri aspetti positivi che la vegetazione può portare nella convivenza con l'essere umano e negli spazi urbani.

### 2.2.1. *Variazione direzione e velocità del vento*

Come tutti gli elementi presenti nel suolo, anche la vegetazione tende a modificare la rugosità aerodinamica, influenzando così il moto del vento. In questo caso specifico, con il termine vegetazione, si intende, in particolare, l'insieme di tutti quegli alberi di una certa dimensione che possono offrire una sostanziale ostruzione alla direzione e alla velocità del vento, ostruzione che varia a seconda della chioma, dell'altezza e della forma dell'albero stesso.

Nel capitolo 1.5.2. abbiamo già citato come il vento, a seconda che si infranga in modo perpendicolare o no nelle pareti degli edifici, è responsabile della creazione di zone di diversa pressione nel perimetro e nell'altezza degli edifici. Una disposizione strategica degli alberi potrebbe permettere una creazione studiata di zone di alta e bassa pressione, favorendo l'effetto venturi all'interno degli edifici. Le azioni che gli elementi vegetali possono svolgere per controllare il vento sono diverse:

1. Ostruzione: quando bloccano il flusso d'aria in una determinata zona;
2. Deflessione: quando deviano il vento, riducendone la velocità;
3. Filtrazione: quando agiscono come barriere permeabili, diminuendo la velocità del vento;
4. Incanalamento: quando modificano la direzione del vento, convogliandolo verso un'area che necessita di ventilazione.

È chiaro che l'occorrenza di un'azione piuttosto che un'altra dipende dalla posizione geografica e dalla stagione, in genere, nei climi mediterranei, durante l'inverno è necessaria una protezione dai venti provenienti da nord-est e nord-ovest, che può essere realizzata utilizzando piante sempreverdi. Queste sono particolarmente adatte perché non ostacolano l'irraggiamento solare. In estate, invece, è possibile impiegare barriere vegetali permeabili a sud-est e sud-ovest, utilizzando piante con alta capacità di evapotraspirazione. Questo aiuta ad abbassare la temperatura dell'aria nelle zone di brezza, oppure si possono canalizzare i venti per ottenere un effetto rinfrescante. La gestione dei flussi di vento intorno agli edifici in contesti urbani è di grande importanza, poiché può contribuire a ridurre i consumi energetici. Questo avviene minimizzando le infiltrazioni d'aria fredda in inverno e massimizzando i flussi d'aria rinfrescante in estate.

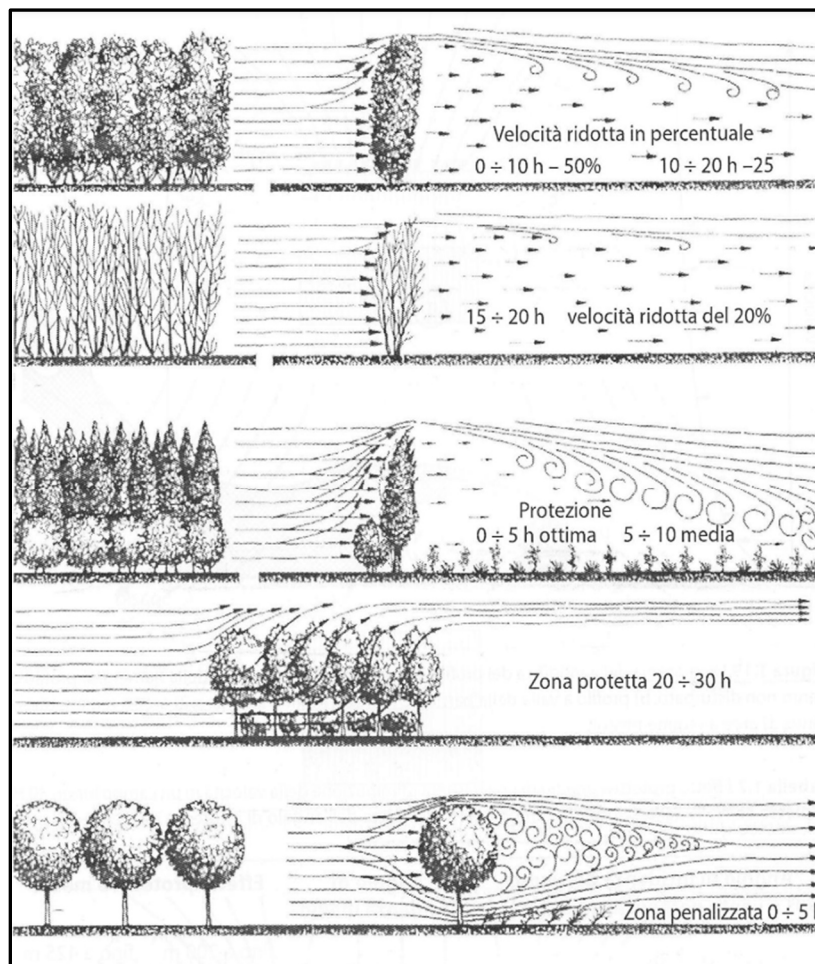


Figura 23. Diversi tipi di barriere verdi con indicazioni qualitative sulla modifica dei flussi di vento. (Scudo, de la Torre, 2003)

### 2.2.2. Funzione anti-inquinamento

Il ruolo che la vegetazione ricopre nel contesto urbano comporta sicuramente effetti climatici, significativi nel nostro caso studio, ma anche effetti non-climatici che influenzano ugualmente il benessere di vita della specie umana e non solo. Nel caso della convivenza alberi-ambiente ci si trova in una posizione di mezzo tra i due effetti.

Tutte le specie arboree, infatti, svolgendo la fotosintesi clorofilliana, hanno la capacità di assorbire CO<sub>2</sub> e rilasciare in atmosfera ossigeno; il ruolo svolto è sia climatico, dato che l'anidride carbonica è un gas serra che intrappola la radiazione infrarossa, sia non-climatica perché fornisce un'aria con una concentrazione di ossigeno simile a quella di una zona naturale, facendo percepire all'uomo la cosiddetta 'aria pulita'. Ad esempio, un acero riccio (*Quercus cerris*) di grandi dimensioni e in salute può assorbire fino a 3800 kg di anidride carbonica nell'arco di 20 anni (Finnova, giugno 2024).

Sebbene la rimozione di CO<sub>2</sub> da parte delle piante sia il fenomeno più conosciuto da molti anni, questo non è l'unico beneficio che esse apportano dal punto di vista dell'inquinamento cittadino. La vegetazione, infatti, ha anche la capacità di abbassare la percentuale di particolato presente in atmosfera. Il particolato è l'insieme di sostanze solide e gocce liquide di ridotte dimensioni che sono presenti in atmosfera, si divide in PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> o PM<sub>0,1</sub> a seconda che il diametro delle particelle sia nell'ordine, rispettivamente, di 10, 2.5 o 0.1 micrometri. Gli alberi sono capaci di abbattere queste sostanze in due modi: diretto o indiretto. Nel primo caso si fa riferimento all'adsorbimento di queste particelle inquinanti da parte della superficie fogliare, il loro accumulo e la loro disattivazione tramite ossidazione metabolica. Nel secondo caso si considera la schermatura fisica che gli alberi possono offrire alle masse d'aria che trasportano particolati. In generale tutte le vegetazioni con un'alta rugosità ed un'alta densità della chioma funzionano efficacemente come barriera per l'abbattimento delle polveri sottili: le conifere sono più efficienti nella cattura del particolato rispetto alle latifoglie grazie alla maggiore superficie fogliare e complessità strutturale. Quest'ultima funzione degli alberi non è una soluzione definitiva della rimozione dell'inquinamento poiché il particolato, abbattendosi contro gli alberi, tende a depositarsi sul suolo e ad essere dilavato dalle acque piovane. Con una corretta pianificazione urbanistica però, la barriera offerta dalla vegetazione può evitare l'accumulo di elevate concentrazioni di polveri sottili e la conseguente respirazione polmonare da parte dell'uomo, soluzione non da poco dato che il particolato è ritenuto una delle principali cause dell'aumento di tumori. Un esempio di barriera protettiva è offerto dalle 'green belts' che si stanno sviluppando in Cina per separare le zone residenziali da quelle industriali (Passerini, 2023). Al momento della pianificazione urbanistica, inoltre, va tenuto conto anche dell'emissione dei BVOC, composti organici volatili, da parte della vegetazione, che in condizioni di aria pulita riducono la quantità di ozono nell'atmosfera ma in presenza di elevate concentrazioni di NO<sub>x</sub> possono portare ad aumento di ozono troposferico (Galliani, 2017).

Infine, alcuni studi recenti hanno evidenziato come alcune specie di piante siano incline a rimuovere dal suolo e dall'atmosfera metalli pesanti come cromo, piombo, cadmio e mercurio. Il Consiglio per la Ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria, in collaborazione con il Ministero delle Politiche Agricole, Alimentari e Forestali, ha individuato 8 arbusti mediterranei dalle ottime prestazioni: l'eleagno, il ligustro, il viburno, l'agrifoglio, il corbezzolo, la fotinia e l'alloro, tutte ottime piante per realizzare siepi nei punti di emissioni di sostanze nocive (Finnova, giugno 2024).

### *2.2.3. Funzione ecologica*

La funzione ecologica della vegetazione riguarda quegli aspetti intrinseci che, in ambiente incontaminato dalla specie umana, ha sempre sviluppato. Ci si riferisce per esempio agli aspetti che riguardano il ciclo dell'acqua, all'erosione del suolo, alla stabilità dei versanti e alla tutela della biodiversità. Le piante, infatti, hanno la capacità di trattenere l'acqua piovana, diminuendo il

ruscellamento superficiale (che in città ha valori di portata molto alti) e immagazzinando acqua di scorta, e di difendere il suolo dall'erosione superficiale o dal rischio di frane su versanti pendenti grazie alla struttura intricata di radici, foglie e rami (Galliani, 2017). Per ultima, ma non meno importante, è la funzione naturalistica degli alberi: il microcosmo dell'albero accoglie innumerevoli forme di vita e permette il compimento del loro ciclo biologico, aspetto sempre più difficile da quando l'urbanizzazione cresce a dismisura e gli spazi verdi sono sempre più confinati. Ad esempio, basta pensare che una piccola associazione di alberi collegati da un suolo verde possono ospitare oltretutto funghi, insetti e batteri, anche diverse specie di uccelli, ghiri, rospi e scoiattoli (Tugnoli, 2015).

#### 2.2.4. Controllo delle onde sonore e luminose

Gli alberi piantati in città vanno a schermare i raggi solari, contenenti anche la radiazione nella lunghezza della luce visibile, e non permettono che la radiazione luminosa vada a colpire materiali molto più riflettenti delle loro chiome, in tal modo si evitano bagliori e abbagliamenti che possono ridurre la qualità della vita dell'uomo. Stessa cosa per combattere il pericolo di abbagliamento da parte dei fari delle auto nel traffico veicolare urbano.

L'inquinamento acustico, invece, rappresenta uno degli svantaggi più grandi per chi vive in città, esso diminuisce sicuramente il benessere di vita dell'uomo ma addirittura, secondo l'Oms, un'esposizione prolungata ad elevati livelli di rumore può aumentare la pressione sanguigna ed essere causa di infarto, sia sull'uomo che sulla fauna (Lifegate, giugno 2024). Da anni ormai si cerca di diminuire il rumore in città, proveniente soprattutto dal traffico dei mezzi di trasporto e dai sistemi industriali, tramite pannelli fonoassorbenti ma sempre più frequentemente si sta pensando di sostituirli con sistemi di verde urbano, essendo il contributo estetico nemmeno comparabile. La riduzione del rumore permessa da barriere vegetali è dell'ordine di 0.1-0.2 dB per metro di spessore della barriera (Beck, Bernatzky, Alessandro S. et al.), quindi per avere riduzioni apprezzabili (5-10 dB) occorrono barriere di 40/100 metri, spazio non sempre disponibile in città. Per tale motivo in contesti urbani si può utilizzare congiuntamente un sistema con un materiale inerte come legno o fioriere (Teknoring, giugno 2024). Uno studio condotto da un gruppo di ricercatori dell'University college di Londra, pubblicato sulla rivista Applied Acoustics, ha individuato il Larice, ma in genere tutte le conifere, come l'albero più adatto allo smorzamento del rumore (Lifegate, giugno 2024). La capacità degli alberi di abbattere le onde sonore è dovuta alle operazioni di riflessione, rifrazione e assorbimento operate dalle sue foglie, dalla rugosità e dallo spessore della corteccia e dalla sua età.





Figura 24. Esempio di alberi e arbusti disposti al fine di realizzare una barriera antirumore (Teknoring, giugno 2024).

#### 2.2.5. Funzione sociale e culturale

Come ultimo beneficio apportato dalla presenza di verde in città si vuole citare un aspetto non prettamente tecnico e non totalmente centrale in questo studio ma ugualmente importante in quanto cittadini ed esseri umani. Vari studi sociali dimostrano che la presenza e l'accessibilità del verde urbano sono requisiti fondamentali per città sane, sostenibili ed inclusive. Il verde urbano, migliorando la qualità dell'aria, migliora la salute e di conseguenza la psiche umana. Uno studio effettuato in Gran Bretagna nel 2013 ha seguito più di 10 mila persone nel corso di 18 anni, monitorando la loro salute psicologica, il benessere e lo stress, durante la loro vita condotta vicino o lontano dal verde, e i risultati hanno rivelato che le persone che abitano vicino a spazi verdi tendono a 'sentirsi più felici' (White MP, 2013).

La facile accessibilità a parchi, percorsi verdi e aree gioco suggestionano le persone a camminare, andare a correre, usare la bicicletta e uscire per socializzare, si promuove così uno stile di vita sano, che limita il rischio di obesità, e una maggiore interazione tra le persone, a discapito di stati di emarginazione e solitudine. I già citati PMV e PPD quantificano poi uno stato di benessere fisico della persona, direttamente collegato alle sue sensazioni personali e al suo stato di salute mentale. Più precisamente, uno studio condotto in campo medico-sanitario ha dimostrato che pazienti ricoverati in camere da cui è visibile il verde riducono il tempo di permanenza in ospedale ( Kaplan & Kaplan, 1989).



*Figura 25. Esempio di spazio verde sociale e culturale, Central Park, New York (Google, giugno 2024).*

In conclusione, possiamo affermare che le funzioni degli alberi in città sono molteplici, dalle più concrete alle più astratte, ma la loro pianificazione non va trascurata. Infatti, un albero è un essere vivente con le sue necessità, non si può pensare, a livello amministrativo, di piantare più alberi possibili e in modo casuale pensando che essi siano comunque un beneficio. Si debbono considerare tutti gli aspetti della vita utile della vegetazione come, per esempio, il quantitativo di acqua di cui necessitano e di cui dispongono, quanto le radici e i rami contrastino le strutture urbane e quanto l'eventuale caduta di foglie, frutti, fiori e resina influisca sulle normali attività umane. Tutta la tipologia di verde richiede un investimento iniziale e dei costi di gestione che permettono il corretto funzionamento di essa: basti pensare ad un albero mai potato o infetto o fonte di intralcio, da elemento di arredo passa ad essere un segno di degrado (Beretta, 2018). Non è da trascurare, in fase di progetto, nemmeno la tipologia di alberi da inserire nell'arredo urbano: alcuni hanno caratteristiche ottime per alcune funzioni ma pessime per altre, e viceversa, va anteposto uno studio a 360° sulla specifica natura dell'albero ipotizzato e della sua convivenza con gli elementi artificiali. La buona norma di progettazione prevede di scegliere specie autoctone o alloctone importante non invasive e di variegare la scelta delle specie al fine di favorire la biodiversità e di abbassare il rischio che rari eventi naturali (come temperature impreviste, grandi nubifragi o l'attacco di patogeni specie-specifici) possano abbattere intere schiere di alberi mono-specifiche. È il caso di Milano che tra luglio e agosto del 2023 si è vista abbattere più di 5000 alberi a causa delle impreviste piogge, provocando danni da milioni di euro. Il WWF ricorda che entro il

2050 oltre l'80% dei cittadini europei vivrà in contesti urbani. Per affrontare questa sfida, propone la regola del "3-30-300", che prevede: la possibilità di vedere almeno 3 alberi da ogni casa, una copertura arborea di almeno il 30% in ogni quartiere e la presenza di uno spazio verde entro un massimo di 300 metri da ogni abitazione. (Infobuildenergia, giugno 2024).

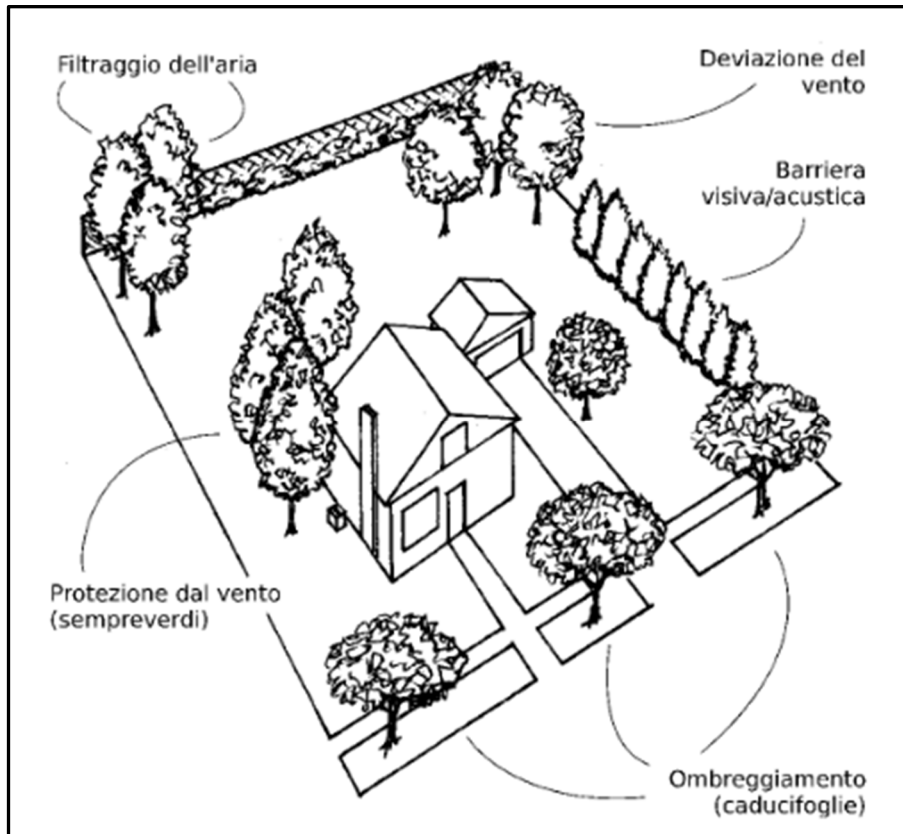


Figura 26. Riassunto di alcune delle principali funzioni svolte dagli alberi in città (Sia, giugno 2024).

### 2.3. Urbanistica: il verde in città

Un buon progetto di urbanistica moderna e verde prevede che la vegetazione, oltre ad essere ben scelta, si intrecci armoniosamente nel tessuto urbano, senza creare nette separazioni tra gli elementi naturali e quelli artificiali. Avere una zona verde circoscritta e separata dal fulcro della città non risulta efficiente per tutte le funzioni di cui abbiamo prima parlato: dalla mitigazione dell'isola di calore al miglioramento delle condizioni psico-fisiche della popolazione.

Al fine di progettare al meglio una corretta vivibilità degli spazi urbani grazie alla vegetazione, il verde urbano può essere classificato in:

- verde di arredo:
  - giardini storici
  - spazi verdi di quartiere
  - parchi urbani
  - verde stradale, viale alberati, aiuole spartitraffico, parcheggi
- verde funzionale:
  - sportivo
  - scolastico
  - sanitario
  - cimiteriale
  - orti urbani

Con il termine verde di arredo si intende tutta quella vegetazione fruibile a tutte le persone in tutte le loro azioni quotidiane mentre il verde funzionale è quello destinato ad attività più specifiche, non sempre accessibile a tutti i cittadini.

I giardini storici sono la dimora di tutto quel verde che ha un valore artistico, culturale e storico, lo si ritrova in siti archeologici, musei o ville storiche. I benefici climatici apportati dai sopracitati sono sicuramente limitati ma rappresentano una forma di patrimonio culturale da salvaguardare. Al suo interno si trovano in genere specie arboree di origine protetta e volte all'estetica, come siepi e fiori, e sono garanzia di sviluppo della biodiversità. La loro delicatezza comporta che non siano accessibili sempre e completamente e richiede un piano di gestione rigoroso, con interventi restaurativi frequenti e mirati al mantenimento dell'armonia del giardino, al fine di garantire la conservazione della biodiversità e della bellezza. Nella città di Roma i giardini storici archeologici ricoprono una superficie pari a 5.7 km<sup>2</sup> (ACOS Roma, giugno 2024).

Con il termine 'spazi verdi di quartiere' si intende l'insieme delle zone non edificate all'interno della città, sono zone che sono sfuggite alla sfrenata cementificazione realizzata durante l'accrescimento demografico e urbano compreso tra gli anni '70 e '90. Mentre in passato molti di questi spazi venivano dismessi per far spazio a nuove opere edilizie, oggi se ne sta rivalutando l'importanza. Per molti tratti della città questi rappresentano l'unico suolo naturale che presenta caratteristiche di permeabilità simili a quelle delle zone rurali. Gli spazi verdi di quartiere sono spazi di passaggio pedonale o luoghi di svago se ospitano piccoli parchi giochi e panchine, la loro progettazione mira alla semplicità di gestione e di interventi da effettuare. Infatti, è necessario che la vegetazione in questi luoghi sia autosufficiente, non ci sia lo sviluppo di vegetazione incolta e non si predispongano aiuole o fiorerie elaborate che, se manchevoli di una periodica manutenzione, possono diventare segno di degrado e trascuratezza. Il loro scopo principale è, quindi, quello di mantenere un suolo naturale, possibilmente inerbito, nei cosiddetti "vuoti urbani" dato che spesso e troppo questi luoghi vengono rivestiti da piazzali pavimentati (Beretta, 2012). Tali spazi migliorano la vivibilità del quartiere solo se opportunatamente riqualificati e bonificati, un'ottima progettazione dovrebbe prevedere, oltre che al prato inerbito, alla piantagione di alberi per creare un 'boschetto urbano'. Naturalmente gli spazi verde di quartiere si trovano maggiormente nelle zone residenziali e periferiche, sono praticamente assenti man mano che ci si avvicina al centro città.

I parchi urbani sono zone più o meno estese progettate con l'idea a priori di avere un ruolo sociale e climatico all'interno del tessuto urbano. I parchi, in questo caso pubblici, sono pensati come spazio sociale, motorio e ricreativo per l'uomo e come 'polmone verde' della città. Il loro apporto alla popolazione è tanto più benefico quanto maggiore è la loro fruizione. Il concetto moderno di parco urbano è quello di creare un'ampia zona di vegetazione che non sia confinata rispetto all'arredo urbano artificiale, bensì un luogo di passaggio e frequentazione quotidiano (Archweb, giugno 2024). La finalità originaria con cui nasce l'idea di parco urbano è di garantire una zona di svago e relax in cui i cittadini possono rifuggire dal caos e dalla frenesia della città, sentimento che si inizia a manifestare con l'avvento della rivoluzione industriale tra il 18° e il 19° secolo. Il primo parco si attesta essere nato nel 1847, a Liverpool, dal progetto di Joseph Paxton e approvato da decreto parlamentare. Per lo sviluppo del concetto di parco urbano, un ruolo centrale è stato rivestito dall'avvento del "paesaggismo inglese", un movimento artistico-culturale, che si è contrapposto al più antico giardino squadrato francese. Il "paesaggismo inglese" prevedeva di creare aree verdi dalla forma irregolare e curvilinea, più simili alla natura incontaminata, e di assimilare al suo interno varie forme di vegetazione ed altri elementi architettonici artificiali (DipintoSucci, giugno 2024).



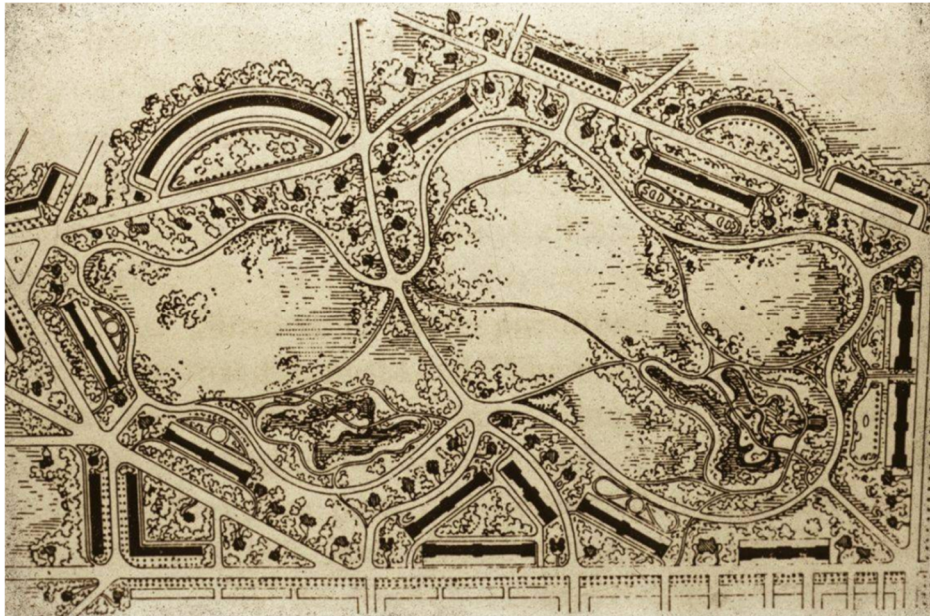


Figura 27. Progetto del primo parco pubblico, Joseph Paxton, Liverpool (DipintoSucci, giugno 2024).

Tutte le caratteristiche del paesaggismo inglese furono ritenute efficaci anche nel 20° secolo, quando si cominciò a formare una visione di parco non solo socialmente ma anche ambientalmente utile. È proprio in questo periodo che nelle metropoli più grandi si progettano grandi parchi che offrono, tra le altre cose, un riparo dall'alto tasso di inquinamento e dalle alte temperature delle zone fortemente urbanizzate. È il caso del famoso Central Park a New York, di Park Guell a Barcellona o del parco dell'Appia Antica a Roma (Infobuildenergia, giugno 2024). La creazione di parchi in città permette la creazione di singoli 'polmoni verdi' che possono attenuare l'isola di calore urbana, ridurre la presenza di agenti inquinanti e assicurare ad ogni cittadino 15 m<sup>2</sup> di verde (il minimo richiesto dalla legge è di 9 m<sup>2</sup> ma non tutte le città italiane rispettano tale requisito). Molti studi effettuati confermano che i benefici climatici-ambientali portati dal parco pubblico non influenzano la zona circoscritta del parco stesso ma anche zone a chilometri di distanza. Lo sviluppo dei parchi urbani, e in generale di tutto il verde di arredo, è incentivato dall'OMS che da tempo propone di inserire in un disegno di legge il principio, già citato, del "3-30-300" (WWF, giugno 2024).

Ad oggi, a causa della forte urbanizzazione, la progettazione ex-novo di un parco pubblico è sempre più rara, più probabile è invece l'ampliamento o l'aumento di efficienza di quelli già esistenti. Le linee guida suggeriscono di pensare prima all'aspetto vegetale del parco: al suo interno l'andamento altimetrico deve essere mantenuto il più possibile naturale, ancor meglio se presenta dislivelli o collinette, il suolo deve essere per lo più ricoperto da prato e devono comparire varie tipologie di vegetazione (SIA, giugno 2024). La tipologia di verde deve alternarsi tra alberi di varie dimensioni, aiuole, siepi e distese di prato. Il prato permette la creazione di un suolo comodo ed accogliente, le aiuole e le siepi hanno il compito di creare una zona di privacy e distacco dalla città e gli alberi sono i responsabili dell'ombreggiamento e del mantenimento dell'aria fresca e pulita. Nella progettazione si deve considerare che il parco urbano occupa una piccola fetta di tutto il contesto

urbano e risiede in un ambiente tipicamente inquinato, motivo per il quale vanno preferite specie autoctone, meno sensibili ad eventi catastrofici e più abituate agli agenti esterni, e una varietà di specie tali che il parco diventi un elemento di salvaguardia della biodiversità. Il parco urbano ha sicuramente un costo elevato a causa dell'ampia superficie che occupa ma i costi possono essere ridotti facendo intelligenti scelte progettuali. L'inserimento di specie che necessitano di poca manutenzione, sia in termini di potatura che di irrigazione, e una morfologia non maniacale in termini di precisione permettono al parco di essere quasi autosufficiente, con una pianificazione di interventi molto rara (Beretta, 2012). La creazione di una fitta rete di vegetazione ha anche una funzione ecologica per quanto riguarda la vita della fauna, parchi di sostanziali dimensioni possono diventare rifugio e tana per molti animali come nel celebre caso degli scoiattoli al St. James's Park a Londra.

Come la città ospita il parco, allo stesso modo il parco deve "ospitare la città". Quindi dopo aver progettato la parte naturalistica, si deve realizzare la parte architettonica del parco, volta al miglioramento della sua fruizione da parte dell'essere umano. Il parco è chiamato a "ricucire" il rapporto natura-città, per tale motivo deve fornire una serie di servizi di cui l'uomo necessita quotidianamente. Un parco urbano moderno deve ospitare, oltre alla vegetazione, ampi spazi ricreativi, ad esempio parchi giochi per bambini, spazi destinati all'attività motoria, campi da calcio o da tennis o aree fitness, elementi architettonici, che aiutano a migliorare l'aspetto estetico, zone relax, con la predisposizione di panchine o specchi d'acqua, e passaggi pedonali e ciclabili, per rendere il parco una zona di passaggio all'interno della città. Tali elementi artificiali devono mantenere un connubio armonico con il verde, creando una visione di ambiente naturale e incontaminato seppur in realtà molto studiato (Archweb, giugno 2024).

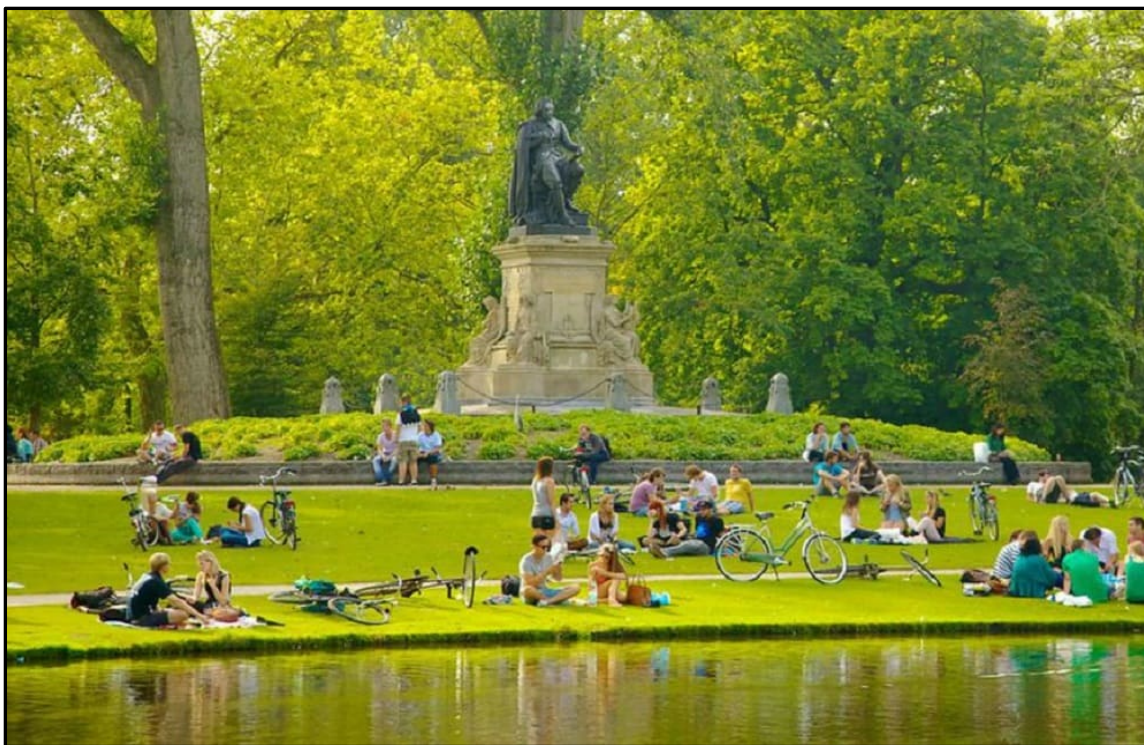


Figura 28. Vondelpark, Amsterdam. Esempio di parco urbano che connette il verde con elementi artificiali (statua, muretto, pista ciclabile e passaggio pedonale) (Google, giugno 2024).

Man mano che ci si avvicina al “centro” delle metropoli, cioè alla zona maggiormente urbanizzata, la probabilità di vedere spazi verdi di quartiere, giardini o parchi pubblici diminuisce a causa della scarsità di suolo inutilizzato. L'unica forma di verde presente in queste zone è rappresentata dal verde stradale, che consiste nell'inserimento puntuale di forme di vegetazione con funzionalità paesaggistiche e pratiche che in passato erano svolte da elementi artificiali. L'inserimento di verde stradale va praticato immediatamente laddove ci sono spazi destinati al traffico veicolare che non possono essere usati in altro modo ma anzi, storicamente verrebbero piastrellati con materiali artificiali: un esempio è la rotatoria il cui spazio interno è di difficile utilizzo, invece di cementificare tutto si può prevedere un inerbimento. Lo scopo del verde stradale è di attenuare l'inquinamento ambientale, acustico e luminoso prodotto dalla circolazione dei mezzi di trasporto ma anche di creare un numero sempre crescente di zone ombreggiate al fine di diminuire l'isola di calore urbana (Piano del verde del comune di Padova).

Le adozioni più comuni di verde stradale si verificano nei viali alberati o nelle aiuole spartitraffico, entrambi risultano particolarmente efficienti per migliorare la percezione di chi guida e di chi passeggia nel marciapiede, sentendosi più o meno coinvolto nel traffico (Repubblica e Cantone Ticino, giugno 2024). Una tipologia di verde stradale all'avanguardia è rappresentata invece dalle pensiline green costruite in Olanda, queste prevedono un tetto verde ricoperto dai fiori che, oltre a catturare micropolveri e mitigare le temperature, attira le api e altri insetti a favore della conservazione della biodiversità in città (WeForGreen, giugno 2024).

Per quanto riguarda la progettazione del verde stradale è sempre consigliata l'adozione di specie diverse ma in aggiunta subentrano nuovi aspetti da considerare. Bisogna sempre tener conto che questa tipologia di verde è continuamente soggetta a stress meccanico e all'attacco di inquinanti; quindi, vanno favorite specie resistenti e resilienti. In aggiunta, ogni albero necessita di uno spazio sopra e sottoterra, la loro altezza deve essere di massimo 20 metri e a terra deve essere garantita una zolla di terra direttamente proporzionale alla larghezza del tronco e alla lunghezza delle radici. I progettisti sono chiamati a decidere come disporre gli alberi, se in filari singoli con alberi più grandi o doppi con alberi più piccoli, la distanza fra essi e la distanza di essi dai marciapiedi e dalla carreggiata. In linea di massima, ove possibile, è preferibile la progettazione di linee di terra continue in cui inserire i filari di alberi, in tal modo si aumenta notevolmente il deflusso delle acque superficiali (Repubblica e Cantone Ticino, giugno 2024).





*Figura 29. Rotatoria inerbita e alberata (esempio di verde stradale), piazza Istria, Roma.*

Nel caso del verde funzionale, le caratteristiche e le funzionalità non sono generalizzabili a priori come nel caso del verde di arredo, esso varia da caso a caso a seconda dell'esigenza che è chiamato a svolgere. Il principio guida del verde funzionale è quello di sostituire con elementi naturali tutti quegli artifici a servizio delle attività antropiche, valutando la vegetazione, seppur di estensioni ridotte, come miglioria a livello estetico e a livello ambientale. Anche in fase di progettazione, le soluzioni da scegliere variano da caso a caso. Nel caso di verde cimiteriale, l'obiettivo maggiormente perseguibile è quello di assicurare privacy e solennità al luogo, strategia attuabile con la creazione di una rete esterna di alberi di notevoli dimensioni e sempreverdi. Anche nel caso del verde sportivo la privacy è fondamentale, qui si aggiunge poi la necessità di un'aria pulita e sana, consona durante lo svolgimento delle attività motorie. Nel caso del verde scolastico, invece, la vegetazione deve svolgere il ruolo di 'polo naturalistico', in cui gli studenti possano apprendere l'evoluzione delle specie vegetali, e di ruolo ricreativo, dove gli alunni possano giocare in sicurezza. In fase di progettazione si devono evitare specie velenose, piante con le spine o alberi dai frutti tossici. Il verde sanitario è quello strettamente legato alle case di cure, agli ospedali o alle cliniche, il suo dovere è di creare spazi all'aperto che possano essere di supporto psicofisico alle persone non in salute, la vegetazione deve creare giardini freschi e con aria pulita ma anche una percezione di armonia, bellezza e relax che possa aiutare al benessere psicologico e allo stato umorale dei pazienti. Rientrano nel verde funzionale anche gli orti urbani e i giardini pubblici, gestiti praticamente a piacimento dell'utente.



*Figura 010. “Stadio dei pini”, Macerata, esempio di verde sportivo (verde funzionale) (Google, giugno 2024).*

Dopo aver dispiegato molteplici parole per introdurre il fenomeno di isola di calore e dell'uso della vegetazione come possibile tecnica di mitigazione per essa, si vuole cominciare ad inquadrare gli aspetti tecnico-scientifici che più riguardano questo caso studio. Scendendo più nel particolare, la presente tesi ha come obiettivo quello di indagare come un classico parcheggio per autovetture possa cambiare il suo comportamento termico-ambientale se creato, o arricchito, in parte da vegetazione. Lo studio, quindi, inquadra un particolare tipo di verde cui prima abbiamo già accennato: il verde da parcheggio, “sottocategoria” del verde stradale. Il verde da parcheggio è, come tutto il verde stradale, una soluzione alla rapida diffusione di automobili in circolazione, a partire dal 19° secolo, e a tutti gli artifici incoscienti che questa ha portato. In maniera frenetica e nevrotica l'uomo ha adibito, alle sempre crescenti autovetture, delle apposite zone di sosta definite “aree parcheggio”. In un contesto di pianificazione urbana o extra-urbana le aree parcheggio giocano un ruolo centrale, basti pensare che per ogni posto auto si necessita mediamente di 15 m<sup>2</sup> e, secondo l'Istat, a Roma, Milano e Napoli ogni 1000 automobili circolanti vi sono 30 parcheggi (Noè e Passino, 2012).

È di facile intuizione quindi, e ormai provato, che le aree parcheggio occupano una fetta sostanziosa di tutta la superficie urbana; pertanto, non possono essere esenti da una precisa regolamentazione e da una definita progettazione che permetta loro il miglior funzionamento dal punto di vista pratico e il minor impatto dal punto di vista socio-ambientale. Dal momento in cui si è manifestata l'esigenza di realizzare zone per la sosta delle auto, sono stati creati parcheggi che prevedevano, nella maggior parte dei casi, un'ampia gettata di asfalto che veniva contrassegnata con vernici di vario tipo e colore, per delimitare i singoli posti auto, a discapito di suoli naturali, con maggiori permeabilità e migliori

proprietà termiche-radiative. Tutto questo è stato possibile fino al protocollo di Kyoto, il quale ha imposto ai singoli progettisti di avere una visione delle aree parcheggio più olistica, cioè di non progettare parcheggi che tengano conto solo della loro funzionalità ma anche dell'aspetto organico, ambientale e paesaggistico. Con la definizione di “parcheggio verde” si intende un nuovo elemento di arredo urbano che si differenzia dal classico “parcheggio inverdito”, il passaggio dall'uno all'altro è stato possibile anche grazie all'attuazione di norme urbanistiche e burocratiche che sono state capaci di realizzare linee guida per il verde, oltre che per la mobilità veicolare e per gli aspetti edilizi. La realizzazione dei parcheggi verdi deve condurre non solo alla riduzione del fenomeno dell'isola di calore urbana e alla riduzione degli inquinanti atmosferici ma anche a creare spazi perfettamente intrecciati con il contesto urbano e socialmente fruibili ad ogni ora del giorno, a differenza degli storici parcheggi creati per soddisfare esigenze in determinati orari del giorno.

La necessità di avere criteri e norme che regolamentino i parcheggi verdi ha portato l'uomo e le amministrazioni ad indagare più specificamente la natura e la fisiologia del verde stesso e come queste si sposino con gli elementi artificiali urbani. Ad oggi, nella progettazione di un parcheggio si devono rispettare i cosiddetti Criteri Ambientali Minimi (CAM) che dipendono dalla tipologia di vegetazione scelta, dalla sua grandezza e dal suo posizionamento. In primis bisogna considerare che vi deve essere almeno una pianta ogni 80 m<sup>2</sup> (Il piano del verde del comune di Padova, 2024) e almeno il 15% della superficie totale deve essere ricoperta da vegetazione. Un buon progetto di parcheggio verde deve garantire la presenza di alberi, aiuole o siepi e pavimentazioni permeabili (sia che siano naturali che artificiali). La pavimentazione deve avere un coefficiente di deflusso compreso tra 0 e 0.6 quindi vanno favorite scelte progettuali come terre solide stabilizzate, calcestruzzo drenante, ghiaio sciolto o posti auto pixellati. L'utilizzo di superfici drenanti offre un duplice beneficio: garantisce acqua nel sottosuolo che funge da riserva vitale della vegetazione e permette un abbassamento della temperatura superficiale grazie all'evapotraspirazione dell'acqua incastonata nei pori. Naturalmente le alternative più "green" come i parcheggi pixellati o totalmente verdi necessitano di una gestione più complessa e interventi più frequenti.



Figura 31. Esempio di parcheggio verde pixellato (Google, giugno 2024).



Per quello che riguarda gli alberi, essi hanno un ruolo centrale nella progettazione vista la loro dimensione e dato che sono i soli responsabili dell'ombreggiatura. L'ombreggiatura fornisce riparo dalla radiazione solare sia alle pavimentazioni, evitando l'eccessivo accumulo di calore che potrebbe essere rilasciato durante le ore notturne, sia alle autovetture, garantendo così una situazione di benessere per l'uomo. "Il modello di riferimento di un parcheggio verde deve essere quello della savana: alberi radi, di bassa statura e chioma espansa" (Roberto Mercurio, giugno 2024). Il rapporto tra alberi e parcheggio deve tener conto di una serie di aspetti tecnico-scientifici non banali, tanto che nella scelta della tipologia di albero sono chiamati in causa esperti agronomi e arboricoltori. Le linee guida suggeriscono di scegliere, per prima cosa, alberi di 2° tipo, in alcuni casi si può pensare anche ad alberi del 3° tipo. Tale nomenclatura si riferisce all'altezza dell'albero: un albero del 2° tipo è alto dai 10 ai 16 metri, uno del 3° non supera i 10 metri (Il piano del verde del comune di Padova, giugno 2024). L'altezza dell'albero è responsabile dell'oscillazione della proiezione d'ombra a terra. Altre caratteristiche direttamente correlate all'ombreggiatura sono la forma della chioma, lo spessore della foglia e l'addensamento dei rami. La forma della chioma può variare molto da albero ad albero, in generale si devono favorire chiome che si sviluppano tanto in altezza quanto in larghezza affinché l'ombra ricopra una superficie maggiore, quindi, come mostrato in fig.31, vanno favorite forme ombrelliforme, globose o espanse.

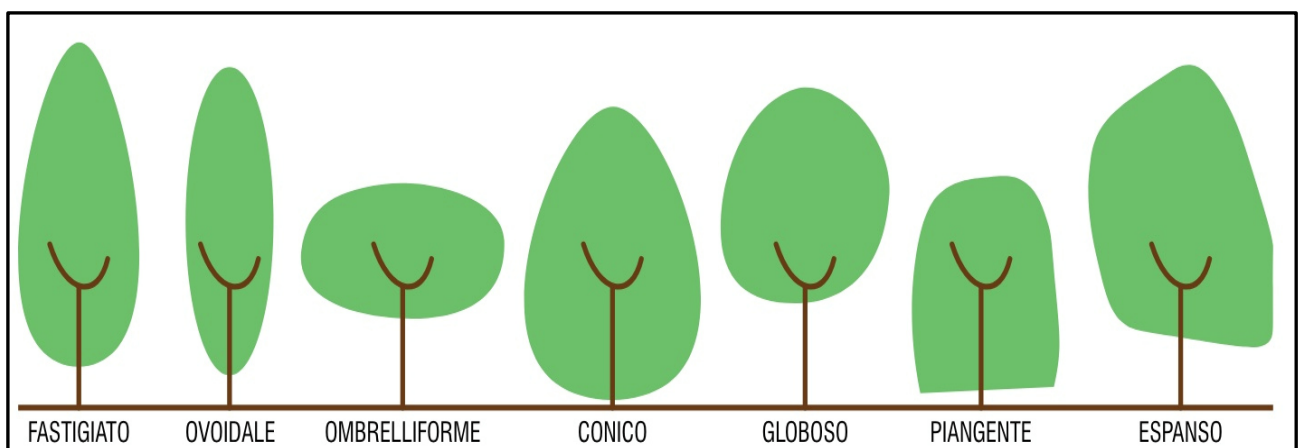


Figura 32. Tipologie di portamento degli alberi (Il piano del verde del comune di Padova, giugno 2024).

La fogliazione, cioè lo spessore e la quantità delle foglie, sono importanti per determinare la qualità dell'ombra, più le foglie sono spesse e fitte meno radiazione solare passa e più lo spazio sottostante l'albero sarà scuro e fresco. Per quanto riguarda la sosta dei veicoli è suggerita in media una fogliazione media ma nei climi molto soleggiati anche la scelta di un albero a fogliazione spessa può essere contemplata (Roberto Mercurio, giugno 2024).

Altri aspetti da considerare riguardano come l'albero interagisce con le attività antropiche e con le componenti edilizie esistenti. Si deve prestare particolare attenzione all'orientamento e all'espansione delle radici, se queste si sviluppano in profondità o in larghezza e di quanto spazio

necessitano. Il “fico”, per esempio, presenta buone caratteristiche di ombreggiatura, foglie spesse e chioma espansa, ma le sue radici si sviluppano in larghezza e ciò può portare alla rottura dei marciapiedi, delle strade o alla creazione di dislivelli. Anche l’altezza dell’albero è una componente da valutare in funzione delle attività antropiche, in fase di progettazione va considerata la rapidità di accrescimento e la massima altezza raggiungibile. Se si piantano alberi, a partire dal seme, e il loro accrescimento è lento, per molti anni questi non forniranno l’ombra prevista da progetto. È il caso del leccio, ha tutti i requisiti adatti per essere inserito in un parcheggio ma ha bisogno di tempo per la crescita di una chioma ampiamente che possa offrire ombreggiatura. Si consiglia sempre di piantumare alberi già maturati, con un tronco avente circonferenza di 14-16 cm (Vetivaria, giugno 2024). L’altezza massima raggiungibile invece va considerata per una corretta gestione: alberi troppo alti potrebbero interferire con le parti sopraelevate delle costruzioni urbane e, in caso di eventuale caduta, rappresentano un elemento pericoloso e dannoso per macchine e persone (Roberto Mercurio, giugno 2024). Se la specie scelta rischia di svilupparsi troppo in elevazione si devono prevedere potature più frequenti per mantenere gli alberi ad un’altezza massima di 3.5 m (Giardinoirregolare, giugno 2024).

Gli alberi offrono un servizio migliore agli utenti che usufruiscono del parcheggio verde grazie alla loro ombra ma, d’altra parte, non devono creare nuovi disagi. I disagi potrebbero essere portati dalla scelta di specie che producono fiori e frutti grandi, capaci di imbrattare il parcheggio e le autovetture, sostanze organiche, come resine e peci, o produttori di pollini ad alto potere allergenico che possono infastidire gli utenti sensibili. Inoltre, non si deve appesantire neanche il piano di gestione scegliendo alberi il più possibile autosufficienti, che non necessitano di potatura o trattamenti frequentemente.

Specie autoctone e naturalizzate			Specie alloctone		
Alberi di II grandezza	Alberi di III grandezza	Arbusti	Alberi di II grandezza	Alberi di III grandezza	Arbusti
Acer platanoides	Acer campestre	Cornus mas	Albizia Julibrissin	Catalpa bignonioides	Cornus florida
Carpinus betulus	Acer monspessulanum	Laburnum anagyroides	Liquidambar styraciflua	Koelreuteria paniculata	Hibiscus syriacus
Celtis australis	Amelanchier lamarckii	Phillyrea latifolia	Sophora japonica	Pyrus calleryana	Lagerstroemia indica
Frassino angustifolia	Cercis siliquastrum	Tamarix gallica			
Fraxinus ornus	Prunus dulci				
Quercus ilex					

Figura 33. Tipologie di alberi e arbusti ritenuti particolarmente adatti per la realizzazione dei parcheggi verdi (Prontuario del verde del comune di Vicenza, 2023).

Come si nota dalla fig.33, le indicazioni per la vegetazione consigliata non riguardano soltanto alberi ma anche arbusti. In questa tesi, ma anche nelle moderne progettazioni urbanistiche, si vuole fare riferimento alla creazione di “parcheggi verdi”, opere ben diverse dai “parcheggi inverditi” arricchiti di qualche albero piantato singolarmente e sporadicamente (Noè e Passino, 2012). L’idea di parcheggio verde è di creare uno spazio più fruibile e più gradevole a livello paesaggistico, che possa fungere anche da “biglietto da visita” per gli utenti/clienti all’ingresso di strutture pubbliche o private. Il verde al suo interno deve avere una certa continuità e non dare l’impressione di elemento forzato e oppresso, il parcheggio verde deve quindi combinare la presenza di alberi, prati, aiuole, siepi, arbusti e pavimenti permeabili di origine naturale (DipintoSucci, Giungo 2024). La partecipazione di questi elementi vegetali di dimensioni più piccole svolgono ruoli sia estetici ma anche funzionali; in primis, il processo di fotosintesi clorofilliana da loro svolto aumenta il tasso di evapotraspirazione e i terreni su cui nascono aumentano il tasso di permeabilità del parcheggio stesso, in seguito potrebbero essere usati come escamotage progettuali per la suddivisione dei singoli posti auto, per la suddivisione interna del parcheggio in aree più piccole, per la realizzazione di barriere anti-urto naturali o per la recinzione perimetrale (Noè e Passino, 2012). La presenza di arbusti, siepi e prato è richiesta categoricamente alla base di ogni singolo albero piantato per almeno una superficie di 4 m<sup>2</sup>, considerando che per alberi di 2° grandezza la distanza reciproca deve essere di 5 metri, va considerata e favorita, dove possibile, la realizzazione di un cordolo continuo di vegetazione (Il piano del verde del comune di Padova, 2012).

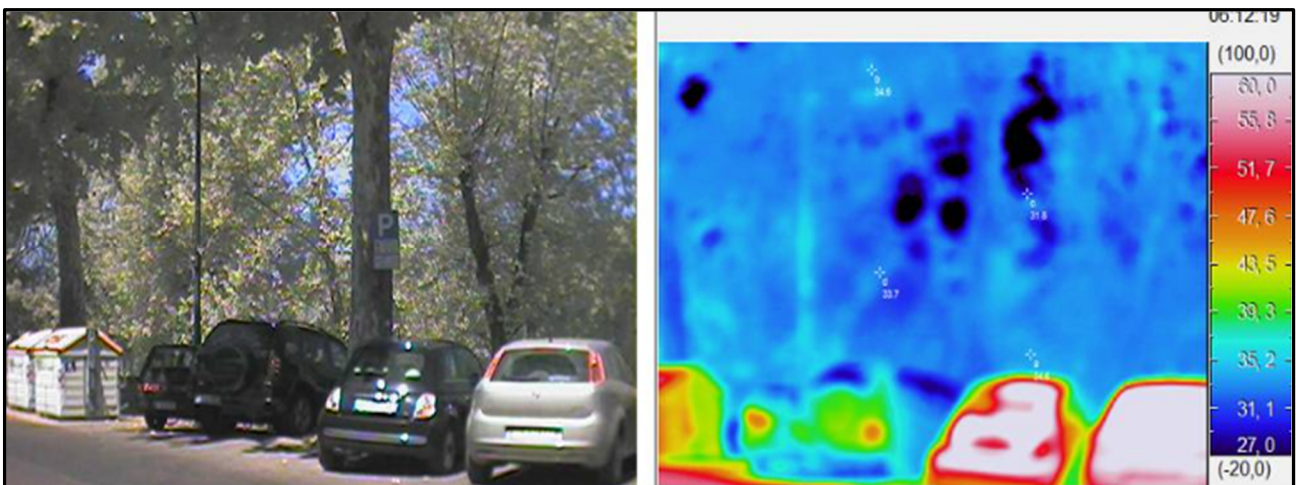


Figura 34. Differenza di temperature, individuate tramite termocamera, di macchine situate al sole e macchine poste sotto l’ombra degli alberi (DipintoSucci, giugno 2024).





Figura 35. Progetto di un parcheggio verde a Strasburgo, in Francia che ha favorito la creazione filari continui di verde ed ha usato “la piccola vegetazione” per dividere i singoli posti auto. (Google, giugno 2024).

Per ultimo, ma non meno importante, si deve progettare la planimetria e la disposizione spaziale del parcheggio. Si deve valutare sin da subito la posizione degli elementi artificiali funzionali al parcheggio o alla struttura cui il parcheggio sottostà; elementi come gli ingressi, i dossi, le pedane o le rampe d’accesso possono essere ripensate ma vanno mantenute, l’edificio (che può essere un’attività commerciale o altro) avrà sicuramente bisogno di una distanza minima all’esterno per le manovre lavorative o per il passaggio della folla. Per il mantenimento di tutte queste componenti obbligatorie e l’inserimento di superfici verdi potrebbe occorrere diminuire il numero di posteggi fino ad un 15%, laddove i posti auto scarseggiano (centro città) si deve progettare una disposizione degli alberi che limiti al massimo la riduzione di questi (Il piano del verde del comune di Padova, 2012). In termini generali, la disposizione degli alberi dovrebbe essere progettata dopo aver studiato la posizione geografica del luogo così da conoscere l’orientamento dei posti auto al fine di ottenere un’ombreggiatura maggiore, per più tempo e nelle ore più calde del giorno. Le soluzioni più facili e più efficaci sono:

- parcheggi a pettine con filare continuo di alberi;
- parcheggi a pettine con alberi dislocati;
- parcheggi a spina di pesce con filare continuo di alberi.

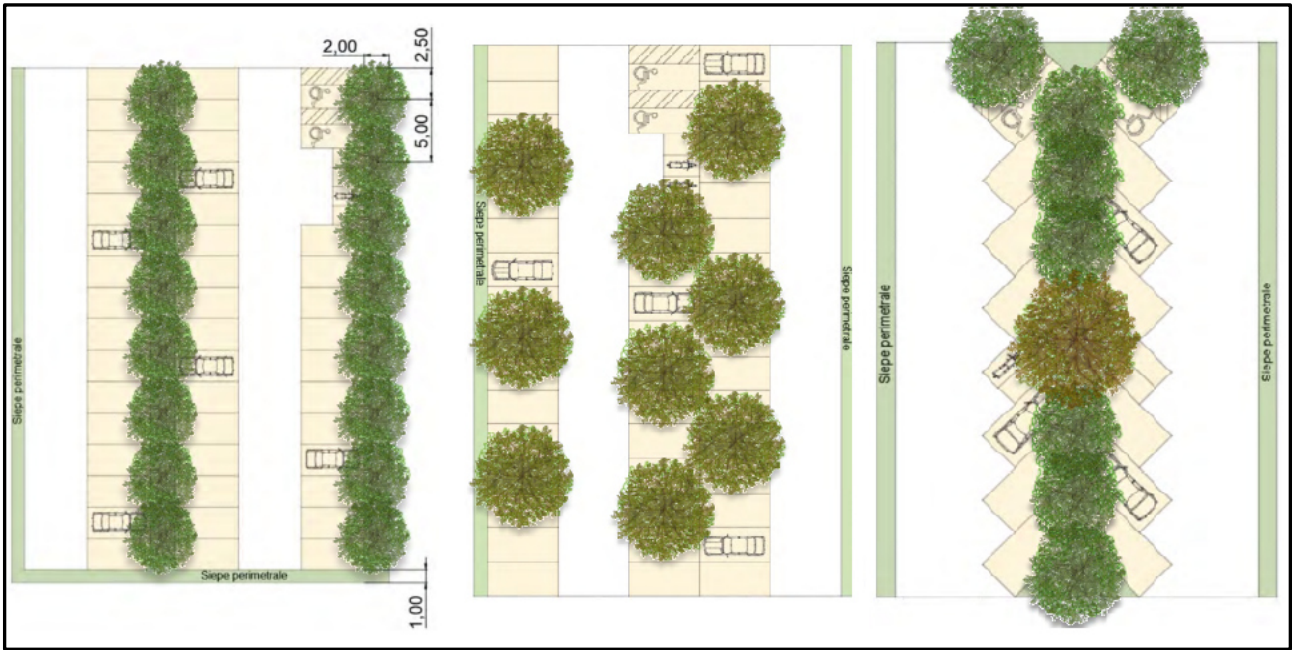


Figura 36. Disposizioni più facili di alberi in un parcheggio. Da sinistra verso destra: a pettine con filare continuo, a pettine con alberi dislocati e a spina di pesce con filare continuo (Prontuario del verde di Vicenza, 2023).



## CAPITOLO 3

### SOFTWARE UTILIZZATO: ENVI-MET

ENVI-met è un software di simulazione tridimensionale progettato per analizzare il microclima urbano e i suoi effetti sulle condizioni ambientali locali. Sviluppato da Michael Bruse presso l'Università di Mainz, il software è utilizzato principalmente per studi su scala locale e si concentra sulla modellazione dell'interazione tra il clima, le costruzioni e la vegetazione. Il software può essere usato sia in fase di progettazione che in fase di verifica dato che il suo reale vantaggio, rispetto ad altri software, è di avere un approccio più olistico. I suoi potenti sottomodelli di calcolo, infatti, permettono di considerare contemporaneamente molti aspetti microclimatici, della vegetazione e della morfologia urbana e tutte le loro possibili interconnessioni, a differenza di altri software tradizionali che si concentrano solo su singoli componenti come vento, sole o efficienza energetica. I risultati che si ottengono dalle simulazioni di ENVI-met risultano, quindi, particolarmente precisi per conoscere lo stato termico, riscaldamento o raffreddamento, degli edifici e il confort termico delle persone. I benefici offerti fanno sì che ENVI-met risulti particolarmente soddisfacente per l'architettura, la paesaggistica e la pianificazione urbana.

La struttura del software prevede al suo interno una divisione gerarchica e cronologica di varie interfacce che regolamentano singoli aspetti della modellazione dell'area di studio; la simulazione vera e propria è il "cuore" del software ed è rappresentata da tutti i modelli matematici di calcolo, modelli fluidodinamici computazionali (CFD: Computational Fluid Dynamics Models), ma questi devono essere coadiuvati da file input e programmi di lettura dei file output.

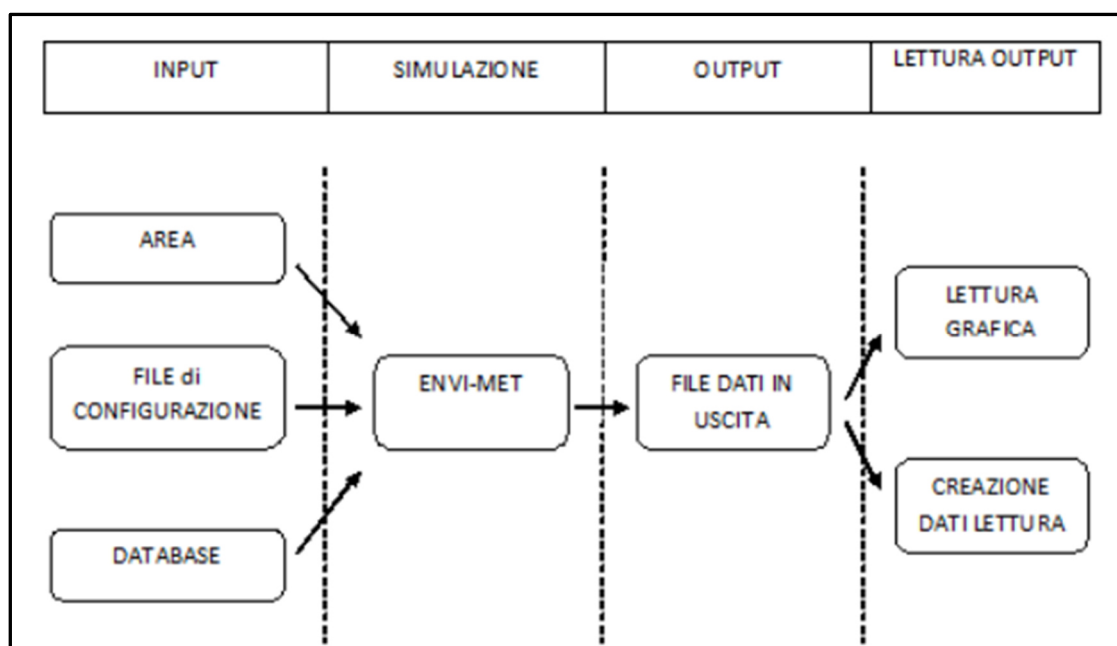


Figura 37. Struttura schematizzata del software ENVI-met (Bisson, 2010).

In aggiunta, ENVI-met risulta innovativo poiché le sue interfacce sono semplici ed intuitive, è disponibile in versione gratuita (nella versione LITE) e il calcolo delle simulazioni è relativamente veloce.

### 3.1. Modelli di calcolo

ENVI-met tratta fenomeni che sono rappresentati da modelli fisici teorici non facili, questi sono tradotti in sistemi di equazioni complessi che il software tenta di risolvere tramite l'ausilio di modelli matematici opportunamente semplificato.

- **Modello interno.** È il modello responsabile della grafica, della programmazione e dei calcoli, permette una fruizione schematica e regolare del software. I suoi sottomodelli sono il linguaggio di programmazione (nella maggior parte dei casi è "Fortran"), i metodi numerici e la discretizzazione numerica. I metodi numerici di ENVI-met permettono di risolvere le equazioni che rappresentano i processi fisici, sono in parte impliciti e in parte espliciti, i più comuni sono il metodo delle differenze finite per risolvere le equazioni delle derivate parziali e il metodo iterativo. La discretizzazione numerica prevede la suddivisione in celle dell'ambiente studiato tramite una griglia ortogonale a diversa risoluzione, la topografia è inserita in ogni cella considerando l'altezza di terreno sottostante, ed una risoluzione temporale che individua il passo con cui il tempo avanza. La discretizzazione spaziale e temporale permette un'accuratezza maggiore nel calcolo delle derivate parziali e permette una simulazione integrata, che consideri l'interazione complessa tra diversi fattori e in diversi punti dello spazio.
- **Modello atmosferico.** Ha il compito più di tutti gli altri modelli di trasformare in pratico qualcosa che tendenzialmente è sempre di tipo teorico-approssimato. Al suo interno si trovano sottomodelli per il flusso radiativo, il vento, la turbolenza, la dispersione di inquinanti e per la temperatura e l'umidità. Il modello della radiazione valuta la radiazione solare diretta, riflessa e diffusa a secondo dell'angolo di incidenza, l'ombreggiatura e i coefficienti di riflessione dei vari elementi. Lo schema tiene conto delle riflessioni multiple e l'ombreggiamento dovuto a geometrie complesse. La Versione Expert introduce il nuovo metodo IVS, in cui ogni elemento urbano viene considerato utilizzando il suo stato attuale (riflessione solare, radiazione termica) anziché i flussi medi. Il modello del vento ha il ruolo di risolvere il sistema di equazioni differenziali di Navier-Stokes e Boussinesq tramite Reynolds per ogni cella dello spazio e per ogni passo temporale. Il sistema di equazioni deriva da tre principi fisici di base: conservazione della massa (equazione di continuità), secondo principio della dinamica (bilancio della quantità di moto) e primo principio della termodinamica (conservazione dell'energia). Il processo è di tipo iterativo e ciò può portare a divergenza dei risultati, lo scopo di ENVI-met però è di portare a termine la simulazione con risultati attendibili anche a discapito di un'estrema precisione dei parametri del vento, accuratezza che si può ottenere utilizzando software dedicati. Per una simulazione dettagliata i parametri del vento devono essere calcolati anche a ridosso delle pareti e dei tetti degli edifici,

introducendo variabili di pressione e viscosità. Le nuove funzionalità di “single walls” permettono di calcolare la velocità e la direzione del vento anche a ridosso di strutture complesse e semi-aperte. La turbolenza viene calcolata tramite il modello E-epsilon 1.5 che è un sistema di due equazioni che si basa su due variabili: la turbolenza locale (E) e il tasso di dissipazione ( $\epsilon$ ), funzioni della stratificazione delle temperature, dell'umidità e della rugosità delle superfici. I coefficienti di scambio (K) nell'aria sono calcolati utilizzando la relazione Prandtl-Kolmogorov. Il modello di dispersione degli inquinanti di ENVI-met permette la simulazione sincrona del rilascio, dispersione e deposizione di massimo sei diversi inquinanti, inclusi particelle, gas passivi e gas reattivi. Il modello considera fenomeni come la sedimentazione e la deposizione su superfici e vegetazione, oltre alle reazioni fotochimiche tra NO, NO<sub>2</sub> e ozono (O<sub>3</sub>). La versione Expert di ENVI-met consente inoltre di simulare l'effetto delle superfici fotocatalitiche attivate sulla qualità dell'aria. Il modello è semplificato, rispetto alla condizione reale, mediante l'utilizzo di sorgenti e fonti puntuali, è governato da equazioni di trasporto tridimensionali che dipendono da dati di ingresso quali le condizioni meteorologiche. Infine, il modello della temperatura e dell'umidità subentra dopo aver studiato il vento, si stima l'avvezione e la diffusione in aria e lo scambio che il vento stesso può avere con sorgenti o assorbitori, i quali sono rappresentati dalle facciate e dai tetti degli edifici, dalle foglie della vegetazione e dalle superfici permeabili. Il modello si basa sulla risoluzione di equazioni di bilancio energetico e di massa dell'acqua.

- **Modello del suolo.** Il suolo è il luogo dove avvengono gli scambi termici e radiativi che influenzano le caratteristiche dell'aria e il benessere dell'uomo, a sua volta, il suolo, è influenzato dai processi che avvengono nel sottosuolo. ENVI-met usa un modello di suolo che arriva fino a 2 metri di profondità e, a parte per lo strato superficiale in cui i processi sono calcolati in 3-d, è trattato come un sistema monodimensionale verticale. Il suolo è diviso in 14 strati fittizi, che passano da una risoluzione di 0.01 m per gli strati più superficiali a 0.5 m per gli strati più profondi, e per ogni strato si descrive la conducibilità termica in funzione del suo contenuto d'acqua tramite le formule di Clapp e Hornberger. Il modello del suolo si serve di sottomodelli capaci di calcolare o stimare: la temperatura superficiale e del sottosuolo (fino a -4 m), l'apporto di trasmissione e assorbimento di onde corte di eventuali corpi idrici (senza considerare eventuali moti turbolenti), il contenuto idrico del suolo (risoluzione dinamica dello stato idraulico con la legge di Darcy) e l'approvvigionamento idrico della vegetazione (il modello radice 3-d simula l'estrazione di acqua dal sottosuolo per opera delle piante).
- **Modello della vegetazione.** La vegetazione è uno degli elementi più efficaci per accrescere il benessere termoisolante in una zona, motivo per il quale risulta molto usata anche in campo progettuale. I reali benefici che il verde apporta sono calcolabili solo post esecuzione dato che, parlando comunque di esseri viventi, i processi che lo coinvolgono sono tanto fisici quanto biologici e difficili da riassumere in una legge matematica certa. Per la modellazione della vegetazione ENVI-met dispone di modelli più piccoli che, uniti, danno una visione globale della vegetazione abbastanza accurata. La scrupolosità del software riesce a modellizzare

tutte le tipologie di verde: prati, siepi e alberi; per i prati si considera essenzialmente una tipologia di pavimentazione bidimensionale che ha un diverso albedo e una diversa permeabilità, per le piante e gli alberi è disponibile una geometria 3-d che individua, a seconda della specie in esame, le dimensioni medie di estensione, delle quali la più importante è l'altezza, un valore medio di densità fogliare (LAD), un valore medio per la distribuzione (direzione, lunghezza e densità) delle radici (RAD), un valore di resistenza allo stress e il bilancio caratteristico. Tale modellizzazione permette di calcolare fenomeni fisici con cui la pianta si rapporta all'ambiente. Tramite l'algoritmo raytracing si analizza la schermatura solare e la proiezione d'ombra al suolo in funzione della chioma e dell'angolo con cui i raggi solari incidono; la conoscenza della disposizione radicale permette di stabilire un bilancio di massa d'acqua da cui si ricava il quantitativo di acqua che il suolo può apportare alla pianta; la temperatura fogliare si ricava dal complesso bilancio energetico della superficie fogliare, essa dipende dal fenomeno dell'evapotraspirazione che, a sua volta, è funzione della fisiologia della pianta, dell'apporto idrico dal sottosuolo, delle condizioni meteorologiche e dalla disponibilità di CO<sub>2</sub>. Inoltre, la tecnologia "treepass" valuta, a seconda del posizionamento della pianta, il suo stato di salute e il rischio di danni da vento e tempesta. In fase di progettazione è utile conoscere il punto ottimale dove l'albero ha assicurata una crescita robusta e un'aspettativa di vita più lunga. In fase di verifica si possono conoscere quelle piante che sono a rischio e costituiscono un pericolo.

- **Modello del sistema di costruzioni.** La turbolenza del vento e i bilanci radiativi al suolo hanno come condizioni al contorno la morfologia degli edifici urbani che ostacolano e mutano i processi fisici naturali. D'altra parte, è interesse prioritario delle simulazioni realizzate con ENVI-met conoscere le caratteristiche che l'edificio stesso presenta, strettamente legate al benessere percepito dagli utenti. Il software permette una modellazione geometrica completa in 3-d degli edifici, realizzabile usando materiali da costruzione, contenuti nel database del software, separatamente per tetti e facciate. Per ogni facciata/tetto si può inserire fino ad un massimo di 3 stati di materiale da costruzione, ognuno di questi presenta dei valori dettagliati di albedo, capacità termica e conduttività termica. Nelle nuove versioni, tramite il Green Wall System, si possono inserire anche tetti e facciate verdi, con caratteristiche specifiche a seconda della vegetazione e della forma. Per le geometrie di edifici più complessi, dal punto di vista della forma, non ci sono limitazioni a meno che la struttura non segua andamenti curvilinei (come uno stadio da calcio), in tal caso si devono approssimare le parti curvilinee alla sola consentita base cubica. L'obiettivo finale è quello di ottenere informazioni riguardo la temperatura e le prestazioni energetiche degli spazi interni all'edificio e, a tal fine, ENVI-met si deve servire di nozioni di fisica edilizia ad alta risoluzione. Tale scienza prevede che ciascun segmento di parete e tetto sia rappresentato da un proprio modello termodinamico costituito da 7 nodi di calcolo predittivo. La temperatura del nodo esterno è aggiornata a seconda delle condizioni meteorologiche, del vento e della radiazione solare che sono già state calcolate o stimate. La temperatura del rispettivo

nodo interno è calcolata in base alla legge di conduzione del calore di Fourier e dipende dalle caratteristiche fisiche dei materiali scelti. La temperatura interna dell'edificio è continuamente aggiornata effettuando un calcolo dinamico dei flussi entranti e uscenti, dati rispettivamente dai nodi interni e quelli esterni (Envi-met, giugno 2024).

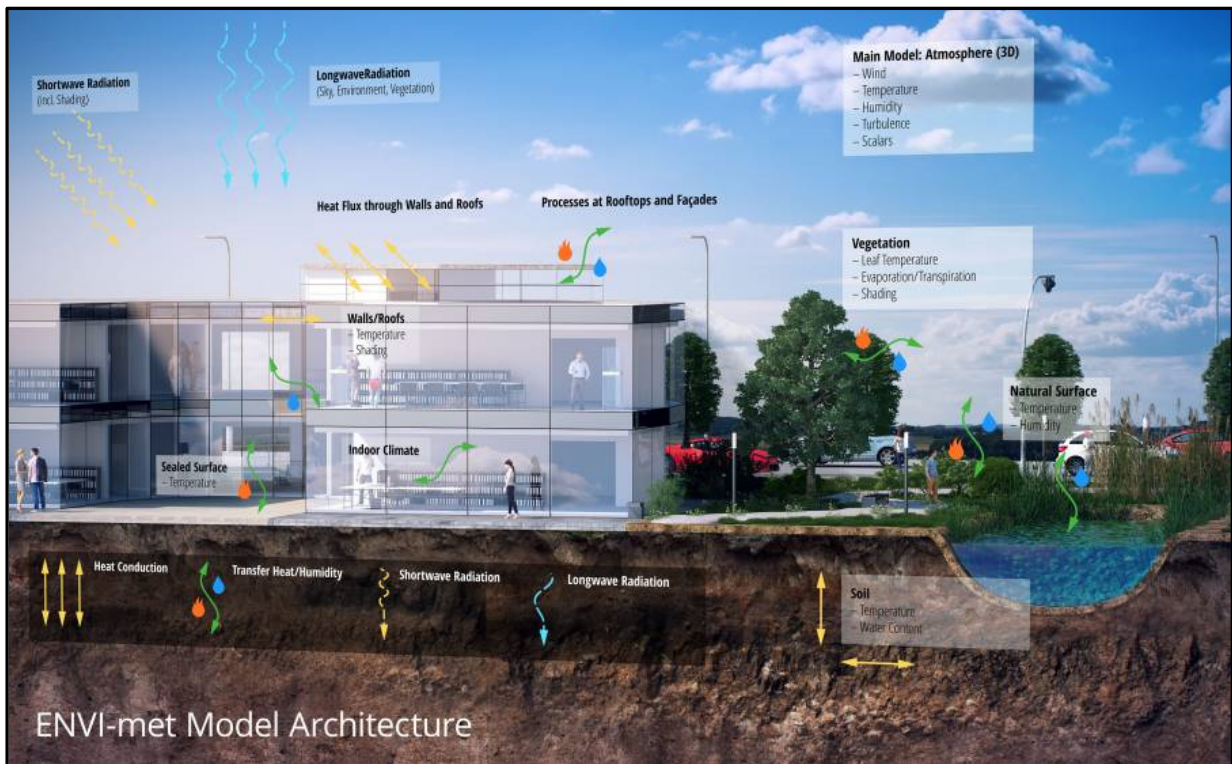


Figura 38. Recap dei principali modelli di calcolo di ENVI-met (ENVI-met, giugno 2024).

### 3.2. Interfacce del software

Il software ENVI-met è il risultato finale di questi complessi modelli matematici, il prodotto risulta intuitivo per come è stato concepito e progettato ma le funzionalità al suo interno sono una moltitudine e molto dettagliate. Il principio di utilizzo si basa su interfacce grafiche che collaborano e si susseguono. Si vuole, ora, passare in rassegna tali interfacce di ENVI-met, considerando che per il nostro caso studio è stato usata la versione 5.5 LITE del software.

Cliccando sull'icona di ENVI-met, precedentemente scaricato in un computer, si apre il pannello iniziale del software in cui compaiono tutte le macro-sezioni: "ENVI-met", "Data and Settings", "System" e "Help". La prima azione da operare è di creare, nella sezione "Data and Settings", un percorso di destinazione all'interno del computer ("Workspaces") per tutti i file e al suo interno inserire sub-cartelle dei vari progetti ("Projects") che si vogliono realizzare. Una volta create le cartelle per tutti i progetti, il software aiuterà a concatenare tutte le interfacce a patto che si mantenga una certa precisione di destinazione dei file nei giusti progetti.

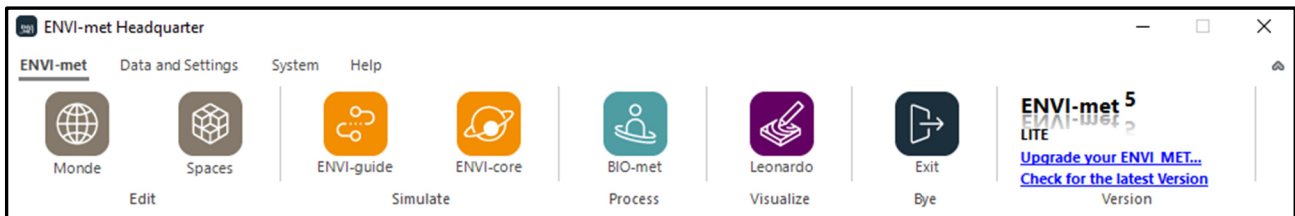
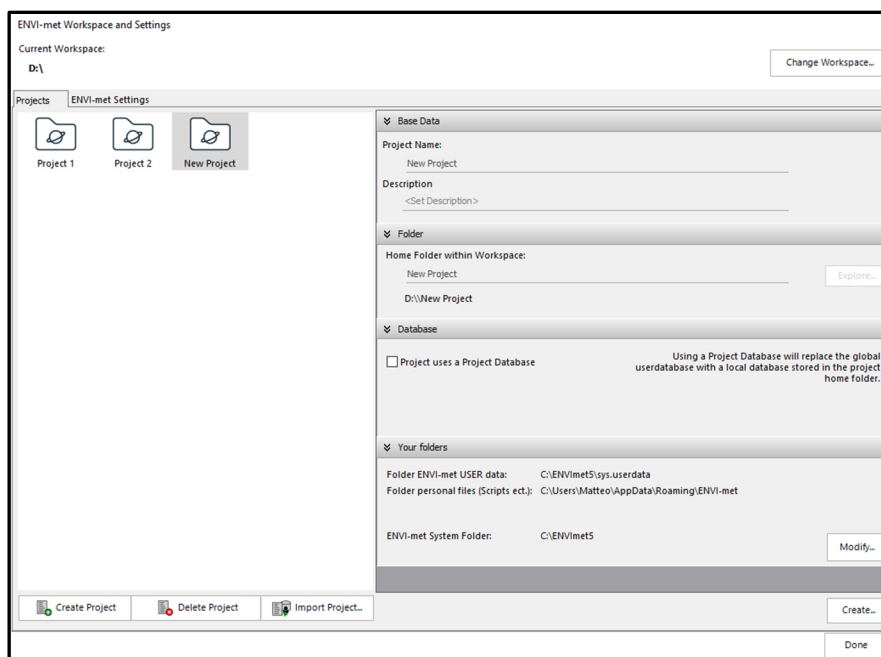


Figura 29. Pannello iniziale all'apertura di Envi-met.



Figura 30. Pannello iniziale della macro-sezione "Data and Settings".



Le interfacce operative vere e proprie si trovano nel pannello di apertura del software, sono posti in ordine cronologico di utilizzo in quanto si parte dalla creazione di dati input, si passa per i processi simulativi e si arriva alle sezioni di lettura dei dati output, in totale sono 7 sezioni.

- **Monde:** è la sezione riservata ai dati input, nel nostro caso studio non è stata approfondita ma offre la possibilità di convertire dei dati vettoriali provenienti da software GIS direttamente in un file .INX rasterizzato con cui ENVI-met può lavorare.
- **Spaces:** anche questa sezione è dedicata ai dati input, in questo caso, a differenza di "monde", si procede alla creazione manuale del file .INX. Spaces ha il compito di graficare

l'area di interesse (definita con il termine dominio) dal punto di vista planimetrico-geografico e dei materiali degli elementi che la compongono.

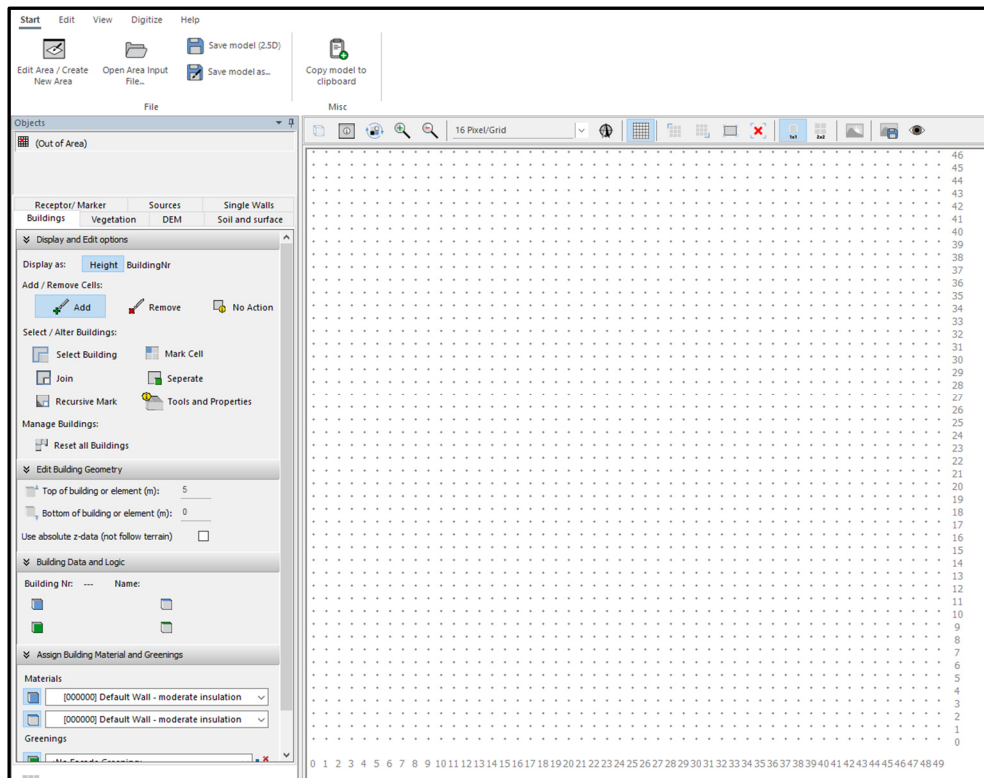


Figura 42. Interfaccia apertura Spaces, ENVli-met.

Al momento dell'apertura la prima cosa che salta all'occhio è la griglia quadrata/rettangolare formata da singole celle che rappresentano la discretizzazione numerica delle aree. Per realizzare una griglia che discretizzi in maniera corretta il dominio scelto si deve aprire l'icona "Edit Area/Create New area", in alto a sinistra. Questa consente, in primis, di inserire la posizione geografica in cui ricade il dominio tramite la ricerca del nome proprio su Google o con l'inserimento manuale delle coordinate, nella sezione "Model Location".

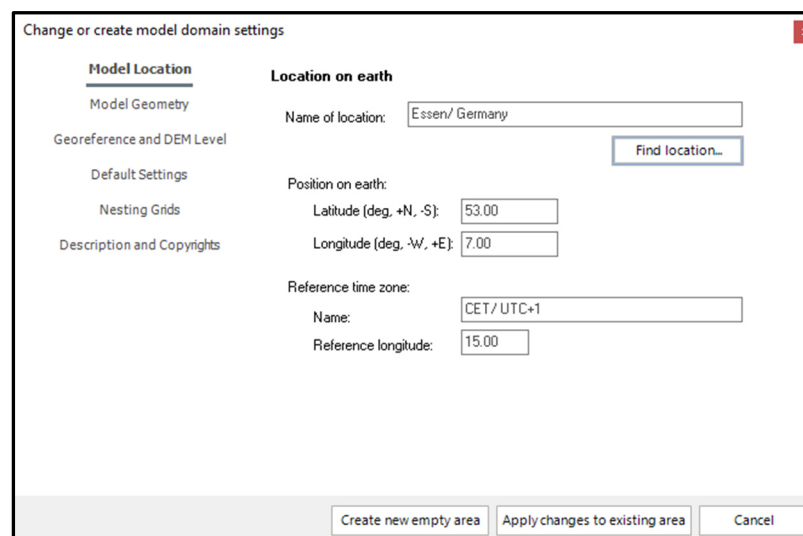


Figura 43. "Model Location"; "Change or create model domain settings", Spaces.



Successivamente si passa alla sezione “Model Geometry”, qui si può inserire il numero di celle in x, y, z e la loro risoluzione  $d_x$ ,  $d_y$ ,  $d_z$ . Si deve considerare che nella versione LITE il numero massimo di celle è 50x50x40 mentre, nella versione premium, 250x250x50. La risoluzione serve per scalare l’area reale nella griglia di Spaces, naturalmente più il valore della risoluzione è basso più la simulazione verrà accurata e realistica dato che una risoluzione più bassa significa un volume di cella più simile, come grandezza, a quello reale e il calcolo delle derivate parziali risulta facilitato. La risoluzione si ricava facendo una proporzione delle dimensioni reali del dominio con il numero delle celle scelto. Ad esempio, se abbiamo una zona di 400 metri x 400 metri e vogliamo graficarla su spaces con un retino 50x50 la risoluzione  $d_x$ ,  $d_y$  sarà pari a 8. In questa sezione si deve anche inserire la rotazione della zona rispetto al Nord così che si può lavorare su un’area disposta longitudinale alla griglia.

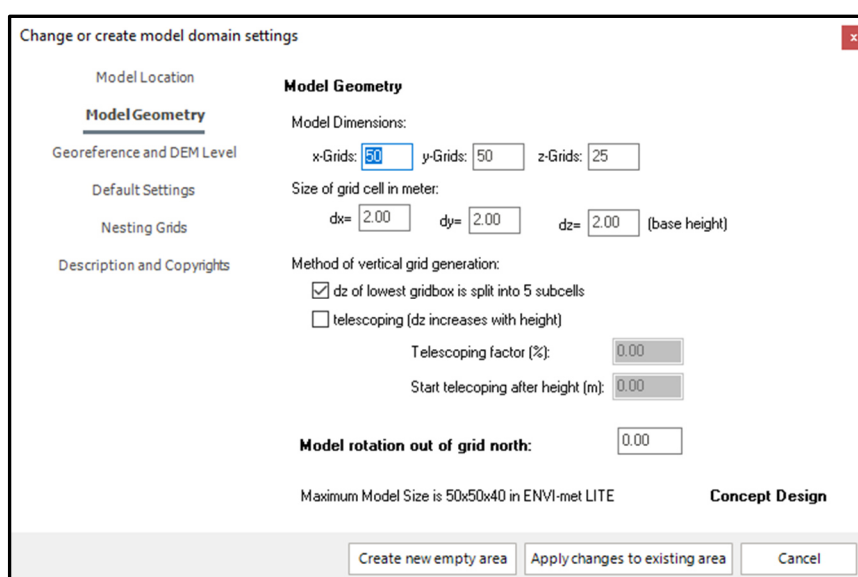


Figura 44. “Model Geometry”, “Change or create model domain settings”, Spaces.

Una volta impostata la griglia nel modo corretto si può procedere alla rappresentazione del dominio nello spazio rasterizzato. Spaces è dotato di un ampio database che contiene diverse tipologie di suolo, materiali e vegetazioni (di cui ne conosce le proprietà) che possono essere inseriti nelle singole celle della griglia al fine di graficare strade, edifici ed aree verdi con la stessa geometria e posizionamento della realtà. Nella versione a pagamento di ENVI-met si può anche cambiare il materiale per ogni singola facciata degli edifici tramite il comando “Single Walls” o creare facciate e tetti verdi nella sezione “Buildings”. Oltre alla scelta della posizione e della tipologia di materiale dei vari elementi che compongono il dominio, si possono inserire anche recettori ed emittenti di sostanze inquinanti ma soprattutto l’elevazione del suolo rispetto alla quota del mare. Le quote altimetriche sono introdotte tramite la sezione “DEM” (Digital Elevation Model) ma bisogna conoscere in anticipo il valore da attribuirgli, stesso discorso vale per l’altezza degli edifici, introdotte nella sezione “Buildings”. La quota del suolo è ricavabile dal software “Copernicus” mentre per l’altezza



degli edifici: se si è in fase progettuale si inserisce quella da calcolo, se è possibile misurarla si misura altrimenti, nel sito della regione di interesse, nella sezione “genio civile”, sezione “paesaggio, territorio e urbanistica”, si può ottenere la carta tecnica regionale della regione in formato .dwg, può essere convertita in formato .dxf, e grazie al software Q.GIS, che è capace di leggere i file .dxf, si può conoscere l’altezza degli edifici.

Per facilitare la creazione e la visione del dominio in spaces, l’interfaccia permette di importare un’immagine in formato bitmap, che funge da sagoma per il ricalco, e una modalità di visione 3-d.

Il prodotto finale delle operazioni su Spaces è un file .INX.

- **ENVI-guide:** ultima sezione dedicata ai dati input, apporta dati che servono per la modellazione di un microclima urbano, si basa essenzialmente su dati metereologici. L’interfaccia di ENVI-guide è divisa in due parti: general settings e meteorology. Nella prima è richiesto di selezionare il giorno scelto per la simulazione, l’orario di inizio e la durata; la durata massima nella versione LITE è di 24 ore, nella versione premium 48 ore, la simulazione è tanto più accurata quante più ore è fatta girare. Inoltre, in questa parte, va caricato il file .INX del dominio a cui la simulazione si riferirà, va inserito un nome con cui identificare la simulazione e va impostata la funzione single-core, poiché la versione LITE non supporta il calcolo in parallelo.

The screenshot shows the 'General Settings' interface. It is divided into four main sections:

- Simulation Date and Time:** Includes a date picker set to 2021 07 01, a time picker set to 5:00, and a dropdown for Total Simulation Time (h) set to 24.
- Simulation name and Settings:** Includes a text field for 'Full name of simulation task' (New Simulation), a text field for 'Short name for file names' (New Simulation), and a folder selection field for 'Folder for model outputs'.
- Model area:** Includes a folder selection field for 'Load model area (INX) file'.
- CPU Cores (Parallel Computing):** Includes radio buttons for 'Multi Core (parallel)' (selected) and 'Single Core'. A note below states: '(Parallel Computing is not supported in LITE and STUDENT)'. A larger note explains: 'Decide whether the simulation should utilize all available CPU cores. While this typically increases speed, other applications might not run as smoothly.'

Figura 45. “General settings”, “ENVI-guide”.

Nella seconda parte di ENVI-guide, invece, è possibile inserire i dati metereologici del giorno stabilito nella sezione “Use simple forcing”. In particolare, si può specificare la temperatura

e l'umidità relativa per ogni ora del giorno scelto, l'umidità assoluta, la velocità e la direzione del vento, la copertura del vento (espressa in ottavi) e la scabrezza superficiale.

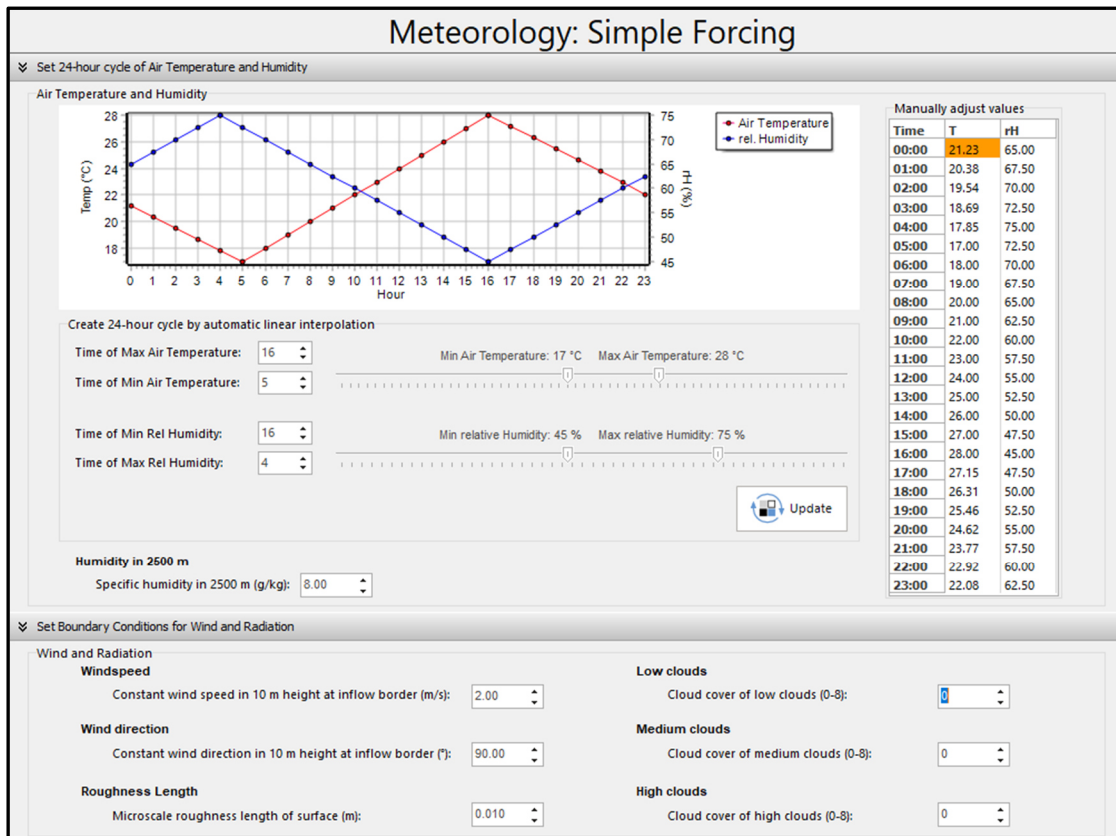


Figura 46. "Simple forcing", "Metereology", "ENVI-guide".

I dati metereologici del giorno in esame possono essere trovati nei siti delle rispettive Regioni in cui ricade l'area di studio, nel caso delle Marche dal "Sirmip" online.

Il prodotto finale delle operazioni svolte su ENVI-guide è un file .SIMX.

- **ENVI-core:** è l'interfaccia di simulazione, il "cuore" del programma vero e proprio. La sua grafica è molto semplice e il suo funzionamento è praticamente autosufficiente: per avviare una simulazione basta importare il file .SIMX proveniente da ENVI-guide, eseguire un controllo per scongiurare errori e avviarla tramite il bottone "Run simulation". Tale sezione ingloba al suo interno la maggior parte dei modelli matematici, di cui si è parlato al capitolo 3.1., ed ha la funzione di calcolatore di tutti questi modelli incrociati con i dati input.

Il tempo necessario allo svolgimento della simulazione dipende dalla potenza del computer che ospita il programma e dalla durata impostata in ENVI-guide.

Il prodotto finale delle simulazioni svolte su ENVI-core è un insieme di 7 cartelle: Atmosphere, Buildings, Inflow, Log, Radiation, Receptors, Soil, Surface e Vegetation; ognuna di queste ha il suo interno 2 file per ogni ora della simulazione, uno in formato .EDT e l'altro in .EDX.

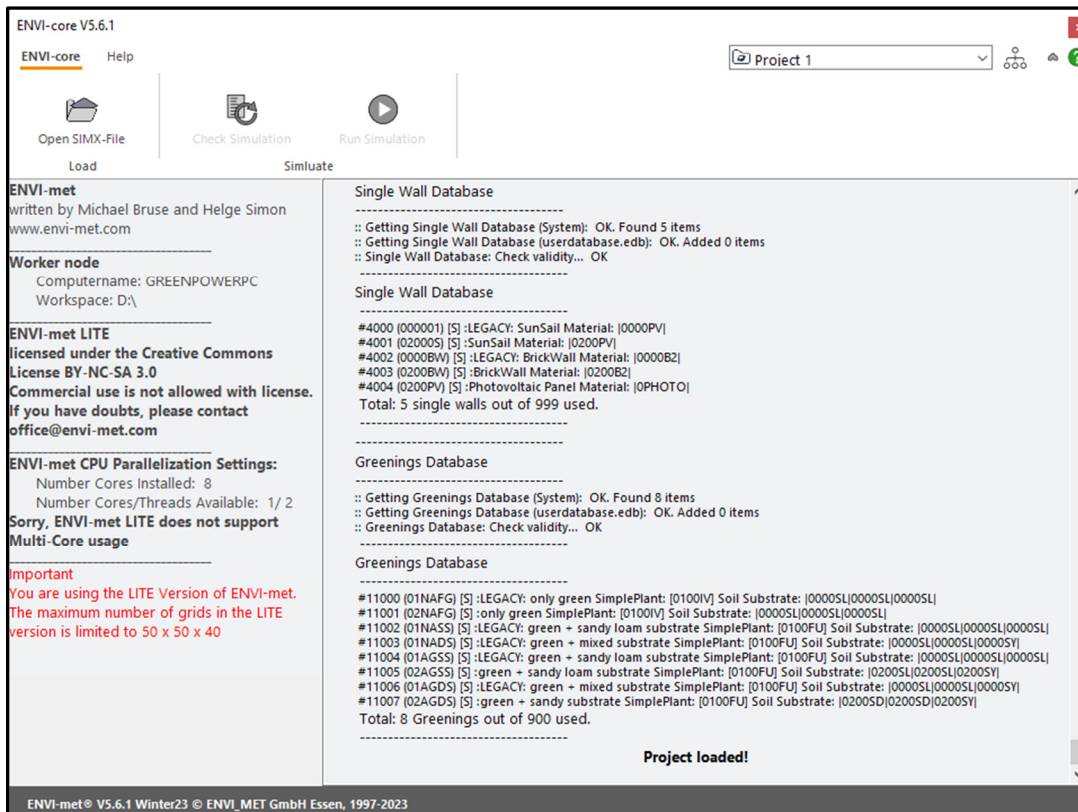


Figura 47. “ENVI-core”, “ENVI-met”.

- **BIO-met:** anche in questo caso si parla di un’interfaccia di simulazione, si contraddistingue, però, dal fatto che i file input di cui necessita sono i file output di ENVI-core. Il suo ruolo è di calcolare gli indici di comfort PMV/PPD che dipendono da variabili atmosferiche come vento, temperatura e umidità.

Il prodotto finale delle simulazioni svolte su BIO-met è una cartella che prende il nome dall’interfaccia contenente all’interno un file .EDT e uno .EDX.

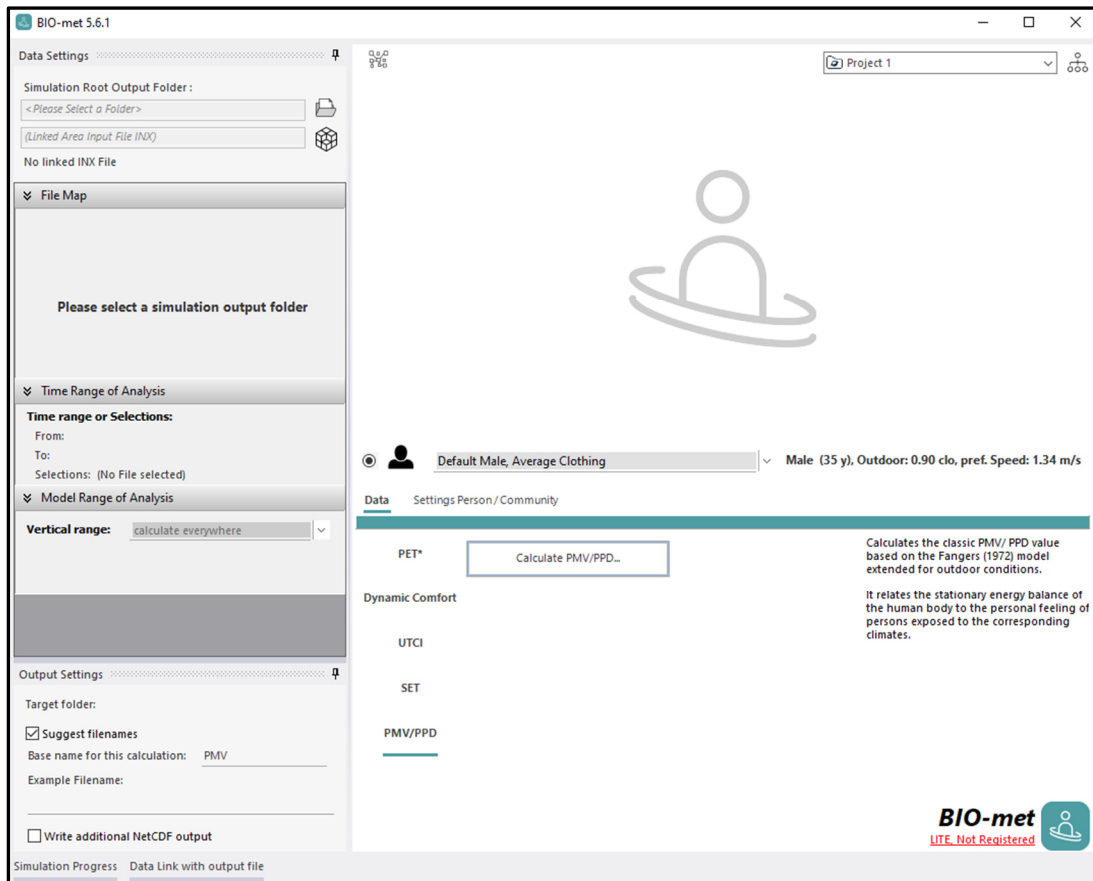


Figura 48. Interfaccia “BIO-met”, “ENVI-met”.

- **Leonardo:** è l’interfaccia grafica di ENVI-met capace di mostrare gli output, i risultati, il fine per cui si è svolta la simulazione. Leonardo è capace di aprire i file .EDX contenuti nelle cartelle prodotte da ENVI-core e da BIO-met. Esso si contrappone ad un altro file di lettura degli output di ENVI-met: Xtract, questo fornisce gli output in fogli di calcolo. Leonardo, a differenza, fornisce risultati tramite una rappresentazione grafica della lettura degli output. Dato che i file .EDX sono relativi ad ogni ora della simulazione, si può ottenere un singolo output per ogni singola ora, non c’è la possibilità di graficare tutta la simulazione in un unico file, competenza che invece possiede Xtract. Successivamente, una volta estratto il file .EDX di interesse, ad un’ora precisa di interesse, nella tendina a destra si può scegliere quale dato andare a graficare e a che altezza dal suolo conoscere tale dato. Nella nuova versione di ENVI-met per ottenere i dati ad un’altezza più vicina all’altezza media dell’uomo bisogna, nella sezione “Follow terrain” impostare K=0 che corrispondenti ad un’altezza di 1 metro. Il prodotto finale restituito da Leonardo è un file .WMF e un’immagine .LEOX.

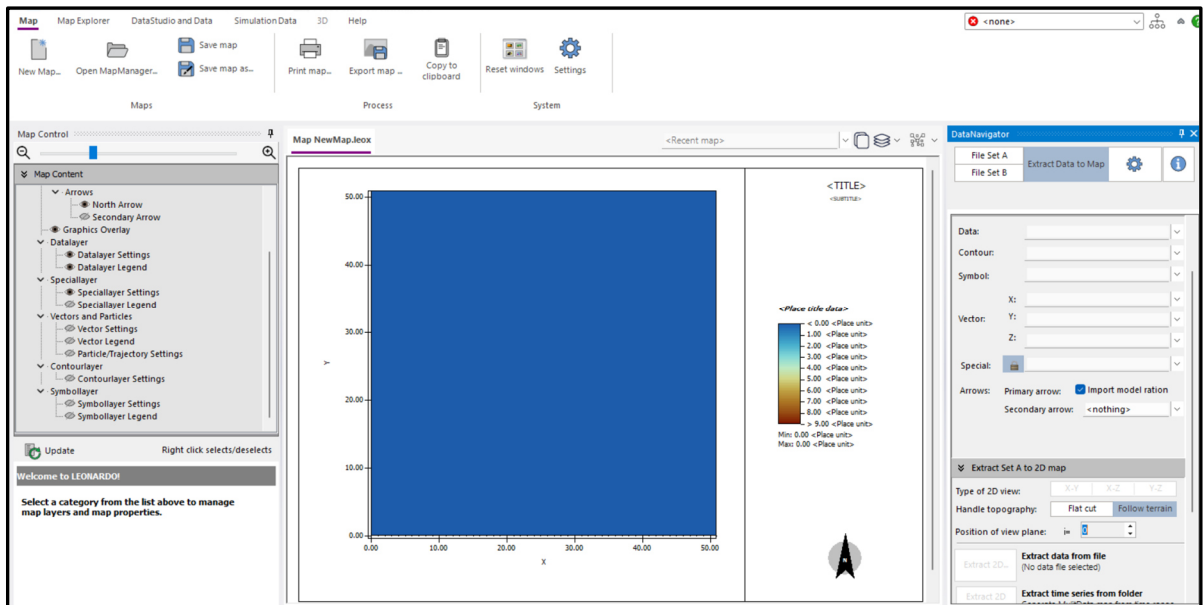


Figura 49. Interfaccia “Leonardo”, ENVI-met.

Nella sezione “Data and Settings” compaiono altre 3 interfacce che svolgono un ruolo di sostegno alla progettazione su Spaces e sono:

- **Albero:** è il database di ENVI-met che contiene le piante e gli alberi, offre una rappresentazione 3-d cubica di esse e ne conosce le caratteristiche e le dimensioni;
- **DB Manager:** è il database di ENVI-met per i vari materiali da costruzione e del suolo, ad ognuno di esso associa un valore di albedo, emissività e colore;
- **Forcing Manager:** è l’interfaccia che permette di inserire dettagliatamente le condizioni al contorno.

# CAPITOLO 4

## SIMULAZIONI DEL CASO STUDIO

### 4.1. Presentazione del caso studio e dominio scelto

La presente tesi nasce con lo scopo di valutare, tramite il software ENVI-met, come la vegetazione possa mitigare il fenomeno dell'isola di calore. Dati i limiti di ENVI-met e la complessità del fenomeno dell'UHI è stato necessario fare delle scelte progettuali iniziali che semplificassero e circoscrivessero lo studio da effettuare. In termini pratici, il primo step compiuto è stato quello di cercare una zona adatta che potesse fungere da dominio delle simulazioni. L'idea iniziale è stata quella di cercare un parcheggio adiacente a una grossa attività commerciale o produttiva affinché il caso studio fosse più realistico possibile dato che, come discusso nel capitolo 3, i parcheggi sono luoghi in cui si manifesta ampiamente l'isola di calore urbana ma anche luoghi dove è più facile pensare ad un inserimento di vegetazione, a differenza di altre zone residenziali in cui la gestione urbanistica è più complessa e la modifica della sua struttura per l'inserimento del verde risulta più difficile o non sempre realizzabile. Un altro provvedimento per rendere il caso studio più realistico è stato quello di selezionare un parcheggio di cui si conosce la struttura, la geometria e l'organizzazione così che le modifiche effettuate potessero essere veritiere per la collaborazione con le parti edilizie di stretta necessità già esistenti.

Dopo un breve sondaggio nella provincia di residenza del sottoscritto, la scelta è ricaduta nel parcheggio del supermercato "Conad" di Castelfidardo, situato in via Musone. Tale luogo risulta particolarmente adatto per la sua vastità e per la completa assenza di vegetazione al suo interno. Le modifiche ipotizzate in questo caso studio sono attualmente di difficile conciliazione con la realtà, in quanto, da pochi anni, il supermercato e le zone ad esso funzionali sono state soggette a ristrutturazione. Nonostante questo è stata considerata la disposizione reale degli spazi, come ad esempio la posizione dell'ingresso del parcheggio e del supermercato, chissà mai che un giorno possa servire da spunto per un nuovo intervento.

Una volta scelto il luogo, è stato necessario riflettere su come trasmutare in ENVI-met tutti i dati input di questo. Considerando che SPACES nella versione LITE del software permette di creare al massimo una griglia 50x50, si è individuata una zona rettangolare di 100x80 metri nella zona Sud del parcheggio dato che, come visibile dalla fig.50, la zona Nord del parcheggio è costituita da pannelli fotovoltaici che svolgono anche la funzione di tettoia e quindi garantiscono già l'ombreggiatura. Tale opzione ci ha permesso di creare una griglia 50x40 avente una risoluzione  $d_x=d_y=2$ .





Figura 50. Zona del caso studio, parcheggio "Conad Superstore", Castelfidardo (Google Earth, giugno 2024).



Figura 41. Dominio in formato BitMap del caso studio.

Nel processo di creazione del dominio rasterizzato è stato inserito un DEM pari a 10 metri, un suolo naturale (Default Sandy Loam) nella parte sottostante il supermercato, una pavimentazione asfaltata (Asphalt Road) nel resto del parcheggio, un edificio di 20 metri di altezza ed uno di 10 metri, costruiti con pareti e tetto di default (Default Wall-moderate insulation). Questi dati sono stati ottenuti nelle modalità spiegate nel cap.3.2. e hanno permesso la creazione del dominio del cosiddetto “stato dell’arte”, cioè lo stato attuale-reale della zona, utilizzato per la prima simulazione.

A partire da questo dominio-base, sono stati creati altri domini, arricchiti con diverse tipologie e diverse disposizioni di vegetazione con cui sono state effettuate nuove simulazioni. Seppur l’idea finale è quella di “parcheggio verde”, le simulazioni effettuate hanno un dominio che somiglia più ad un “parcheggio alberato” a causa delle obbligatorie semplificazioni che ENVI-met richiedeva. Gli alberi scelti, dal database “Albero”, per creare nuovi domini sono stati l’Acer Campestre (“Acero campestre”) e la Catalpa Bignonioides (“Albero dei sigari”), ritenuti particolarmente idonei per la progettazione di parcheggi, strade strette o passaggi pedonali dal Prontuario del Verde del comune di Vicenza e dal Piano del Verde del comune di Padova.

L’Acer Campestre è una specie autoctona caducifoglie, ormai molto utilizzato come arredo urbano, alcune specifiche varietà di questo in particolari condizioni possono raggiungere anche i 18 metri di altezza ma in linea di massima si aggira intorno a 8-11 metri (di 3° grandezza). I rami e le foglie sono fitti, la forma rotondeggiante/ovale e densa della chioma favorisce un’alta capacità di assorbimento di anidride carbonica e di polveri sottili, possiede una corteccia e un tronco duro e resistente e sopravvive efficacemente alla siccità, ai terreni compatti, calcarei e aridi (tipico nei parcheggi) (“Vivai Frappetta”, giugno 2024).



Figura 52. Varietà di Acer Campestre tipicamente usata per l’arredo urbano (“Vivaio di Castelletto”, giugno 2024).



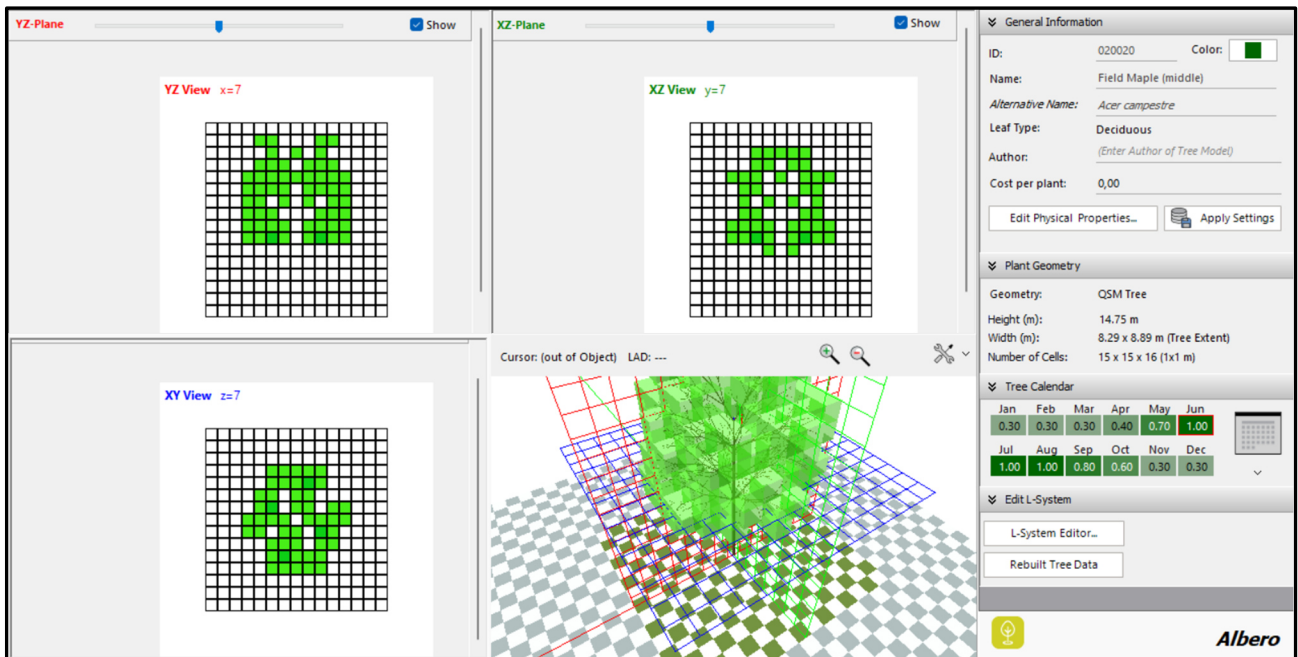


Figura 53. Rappresentazione 3-d e proprietà Acer Campestre, “Albero”, “ENVI-met”.

La Catalpa Bignonioides è una specie alloctona, originaria del Nord America ma ormai naturalizzata in Europa. È un albero di 3° specie a crescita rapida, può raggiungere i 18 metri di altezza, la chioma è tondeggiante e folta grazie alle sue foglie molto grandi (fino a 25 cm), è usata come pianta per l’arredo urbano perché si adatta a tutti i tipi di terreno, non ha bisogno di potatura, è molto resistente all’inquinamento urbano e i suoi voluminosi fiori e frutti avvalorano la funzione ornamentale per il paesaggio. Le sue problematiche possono essere l’eccessiva sensibilità al vento e la sua tendenza medio-alta a sporcare a causa della caduta dei fiori e dei frutti (“Vivai Guagno”, giugno 2024).

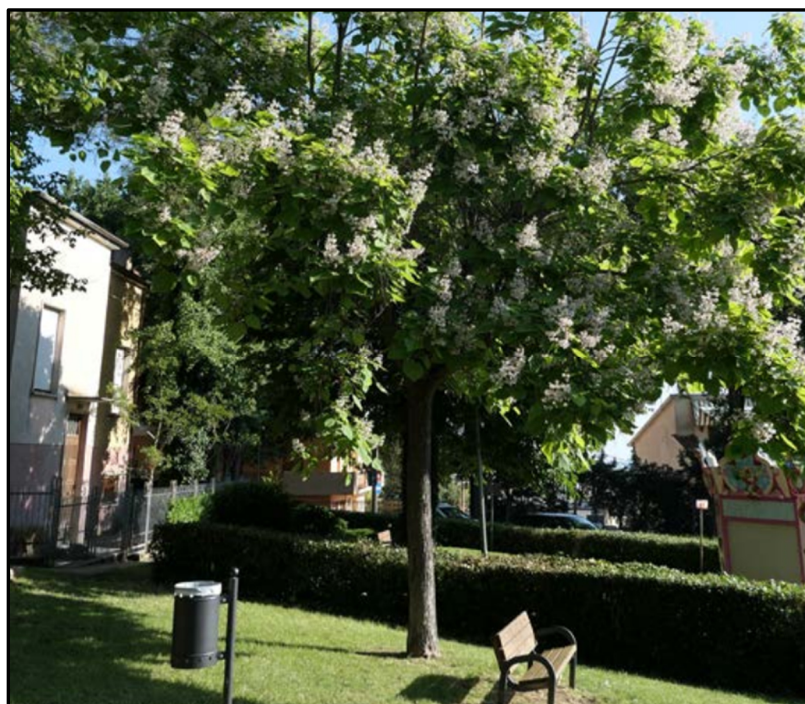


Figura 54. Varietà di Catalpa Bignonioides tipicamente usata per l’arredo urbano (“Servizi ambiente, Emilia Romagna”).

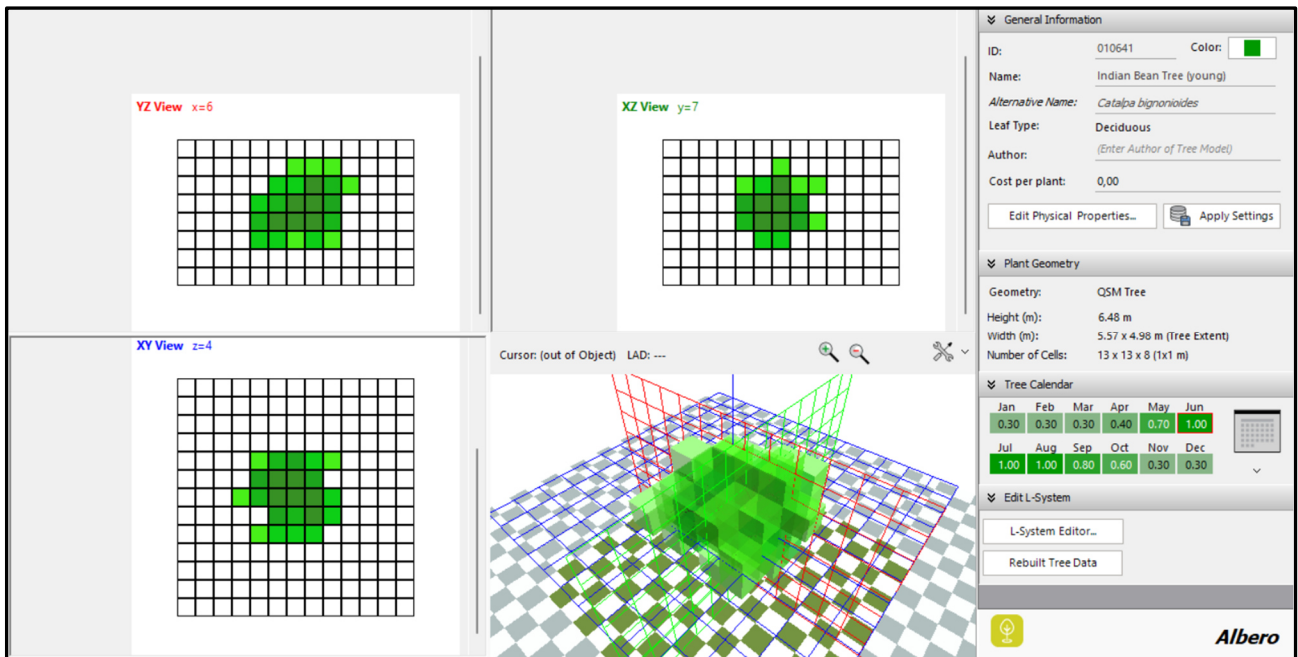


Figura 55. Rappresentazione 3-d e proprietà *Catalpa Bignonioides*, “Albero”, “ENVI-met”.

In seguito, per ogni specie di albero, si è pensato a due schemi disposizionali differenti che rispettassero le buone norme di progettazione di parcheggio verde.

Dopo aver ottenuto in totale 5 domini, per ogni dominio sono state effettuate 2 simulazioni: una estiva ed una invernale. Dato che in ENVI-guide è necessario inserire un giorno in cui effettuare la simulazione, sono stati individuati 2 giorni con la teoria statistica del giorno rappresentativo, di cui parleremo in seguito.

Le simulazioni sono state fatte partire alle ore 6:00 dei rispettivi giorni rappresentativi e fatte durare per 24 ore.

Per quanto riguarda gli output, si è deciso di valutare la simulazione usando come parametro indicatore la temperatura potenziale dell'aria alle ore 14:00:01, oltreché gli indici di confort PMV e PPD per le simulazioni estive.

## 4.2. Teoria del giorno rappresentativo

La necessità di introdurre il concetto di “giorno rappresentativo” nasce dal fatto che il software può simulare uno scenario per un solo giorno preciso e, di conseguenza, gli output sono attinenti a quello specifico giorno; pertanto, in che giorno valutare l'intensità dell'UHI e l'efficacia di mitigazione della vegetazione?

Il giorno adatto alla valutazione dei fenomeni è proprio il giorno rappresentativo, individuato con un criterio statistico. Esso non è il giorno in cui si registrano picchi massimi e minimi di temperatura, umidità o altri fattori, questi sono ritenuti giorni atipici, bensì è un giorno, comunque reale, con misurazioni effettuate dalle stazioni, che meglio rappresenta il periodo in questione, nel nostro caso l'estate e l'inverno. In termini statistici è il giorno in cui la somma dello scarto quadratico medio di ogni ora risulta essere il più piccolo tra tutti gli altri (Tirabassi, et al. 2005).

In termini pratici, le prime procedure operative per l'individuazione del giorno rappresentativo sono: determinare un periodo che necessita essere rappresentato da un singolo giorno e ottenere i dati orari giornalieri di quel periodo. Il nostro caso studio necessita di due periodi: uno invernale e uno estivo, dato che il comportamento della vegetazione nei parcheggi varia di molto a seconda dei due periodi. Per descrivere il periodo invernale sono stati selezionati i mesi che vanno da ottobre a maggio, per il periodo estivo i mesi di giugno, luglio, agosto e settembre. Successivamente, si è scelto come dato discriminante il valore di temperatura rilevato ora dopo ora dalle centraline e si è proceduto a scaricarli tramite il SIRMIP-online, selezionando la centralina “Svarchi”, la più vicina al luogo di interesse. Il sito fornisce i dati già raggruppati in tabelle Excel e divisi secondo i periodi sopracitati. Per l'elaborazione statistica di ogni periodo si procede definendo la matrice:

$$A_{ij} = \sum_{K=1}^{24} (C_{ki} - C_{kj})^2$$

Con:

$i, j = 1, 2, \dots, N$ , giorni

$k$ =ora del giorno

$C$ =variabile di interesse, nel caso specifico la temperatura

La matrice  $A_{ij}$  è una matrice simmetrica con una diagonale di zeri:

$$A_{11}=0$$

$$A_{12}=(C_{01}-C_{02})^2+(C_{11}-C_{12})^2+(C_{21}-C_{22})^2+\dots+(C_{24\ 1}-C_{24\ 2})^2$$

...

0	426,1195	845,9485	995,6843	546,6647	492,4181	634,3561	672,5461	388,924	176,1235	835,4141	2268,282	1294,672	1731,332	1917,816	1618,991	1270,929
426,1195	0	198,2022	434,4436	269,8844	255,122	268,2864	739,4476	266,9613	366,4454	245,6518	842,1687	472,5196	550,6642	712,1972	644,8658	419,0146
845,9485	198,2022	0	107,9944	151,1964	212,239	122,2046	504,787	220,1647	485,8156	320,0322	548,4937	105,8714	219,6352	262,2846	185,5646	89,0572
995,6843	434,4436	107,9944	0	95,9838	162,7222	60,5626	283,22	169,4823	522,845	469,1488	844,9039	105,5006	346,0206	300,8084	133,467	73,5004
546,6647	269,8844	151,1964	95,9838	0	29,5172	24,9656	173,0866	30,4597	217,6092	330,6648	1091,613	278,9986	605,7556	620,6944	393,694	250,1574
492,4181	255,122	212,239	162,7222	29,5172	0	34,9022	251,5284	44,3689	184,6838	307,3762	1224,6	394,6256	695,1598	720,0028	499,6692	317,0388
634,3561	268,2864	122,2046	60,5626	24,9656	34,9022	0	237,2228	55,9269	270,3842	344,2344	1043,456	239,6208	497,8728	496,3332	305,0906	168,315
672,5461	739,4476	504,787	283,22	173,0866	251,5284	237,2228	0	147,4799	303,5762	903,4672	1836,753	596,4036	1160,886	1120,529	744,3354	620,3934
388,924	266,9613	220,1647	169,4823	30,4597	44,3689	55,9269	147,4799	0	127,5639	405,8505	1305,253	399,5163	760,0201	795,6881	543,7321	361,2157
176,1235	366,4454	485,8156	522,845	217,6092	184,6838	270,3842	303,5762	127,5639	0	560,578	1889,999	867,6104	1287,543	1376,704	1075,46	795,437
835,4141	245,6518	320,0322	469,1488	330,6648	307,3762	344,2344	903,4672	405,8505	560,578	0	779,2969	531,3798	630,7048	740,982	667,5498	450,5198
2268,282	842,1687	548,4937	844,9039	1091,613	1224,6	1043,456	1836,753	1305,253	1889,999	779,2969	0	424,4281	224,0223	326,9323	495,1171	515,5911
1294,672	472,5196	105,8714	105,5006	278,9986	394,6256	239,6208	596,4036	399,5163	867,6104	531,3798	424,4281	0	132,2936	120,0374	49,074	49,6852
1731,332	550,6642	219,6352	346,0206	605,7556	695,1598	497,8728	1160,886	760,0201	1287,543	630,7048	224,0223	132,2936	0	37,0306	119,8384	117,4506
1917,816	712,1972	262,2846	300,8084	620,6944	720,0028	496,3332	1120,529	795,6881	1376,704	740,982	326,9323	120,0374	37,0306	0	52,7252	91,5224
1618,991	644,8658	185,5646	133,467	393,694	499,6692	305,0906	744,3354	543,7321	1075,46	667,5498	495,1171	49,074	119,8384	52,7252	0	35,0514
1270,929	419,0146	89,0572	73,5004	250,1574	317,0388	168,315	620,3934	361,2157	795,437	450,5198	515,5911	49,6852	117,4506	91,5224	35,0514	0

Figura 56. Estratto della matrice simmetrica del periodo invernale.

Successivamente si prosegue l'elaborazione impostando l'operazione:

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

che altro non è che un vettore avente come componenti le somme delle rispettive righe della matrice:

$$A_1 = A_{11} + A_{12} + A_{13} + \dots + A_{1N}$$

$$A_2 = \dots$$

Infine si confrontano tutti i valori di somma di tale vettore, il giorno rappresentativo è quello dove si registra il valore più basso.

Nel nostro caso studio si è ottenuto come giorno rappresentativo estivo il 25 giugno 2023 e come giorno rappresentativo invernale il 23 febbraio 2023.

Dato che il giorno rappresentativo si differenzia dal giorno tipico in quanto realmente misurato, i dati di interesse per le future simulazioni sono riportati in fig.57 e in fig.58.

Si tiene a precisare che il sito Sirmip-online fornisce valori ogni mezz'ora ma poiché ENVI-guide necessita di solo dati orari, sono stati presi in considerazione solo quelli dell'orario in punto e scartati quelli riferiti alla mezz'ora.

Altra precisazione riguarda il fatto che i giorni rappresentativi sono stati individuati utilizzando come valore discriminante la temperatura e poi, una volta individuati, sono state scaricati anche i valori di umidità relativa di tali giorni.

Giorno	Ora	Temperatura [C]	Umidita' [%]
25	0	19.06	91.58
25	1	18.65	93.24
25	2	18.35	93.15
25	3	18.08	93.72
25	4	17.86	93.06
25	5	17.31	95.39
25	6	18.61	91.71
25	7	21.09	84.56
25	8	23.82	68.27
25	9	25.11	54.98
25	10	25.59	54.16
25	11	26.74	49.39
25	12	26.84	44.44
25	13	27.23	38.32
25	14	26.92	47.58
25	15	26.73	50.88
25	16	26.35	51.57
25	17	26.08	46.73
25	18	25.47	46.43
25	19	24.42	49.77
25	20	22.45	59.71
25	21	20.18	69.88
25	22	18.62	79.20
25	23	17.70	81.32

Figura 57. Valori orari di temperatura e umidità relativa del giorno 25 giugno 2023 (Sirmip-online, giugno 2024).

Giorno	Ora	Temperatura [C]	Umidita' [%]
23	0	9.43	91.22
23	1	9.25	91.41
23	2	9.17	91.36
23	3	9.10	91.46
23	4	8.93	91.36
23	5	9.09	90.55
23	6	8.35	93.84
23	7	8.40	94.89
23	8	8.87	94.24
23	9	10.14	90.17
23	10	12.27	79.39
23	11	14.37	69.76
23	12	15.61	63.09
23	13	15.77	58.93
23	14	14.84	61.72
23	15	14.54	63.04
23	16	13.36	73.23
23	17	12.96	72.34
23	18	11.57	82.61
23	19	11.02	85.56
23	20	10.98	88.65
23	21	10.10	91.10
23	22	8.23	93.91
23	23	7.22	96.13

Figura 58. Valori orari di temperatura e umidità relativa del giorno 23 febbraio 2023 (Sirmip-online, giugno 2024).







Dopo aver fatto girare la simulazione per 24 ore con i dati meteo del giorno rappresentativo, si mostrano gli output in Leonardo tramite la mappa cromatica dallo stile "Old default". Gli output sono rappresentati alle ore 14.00.01, orario ritenuto più gravoso dell'UHI, in termini di temperatura potenziale dell'aria ad 1 metro dal suolo.

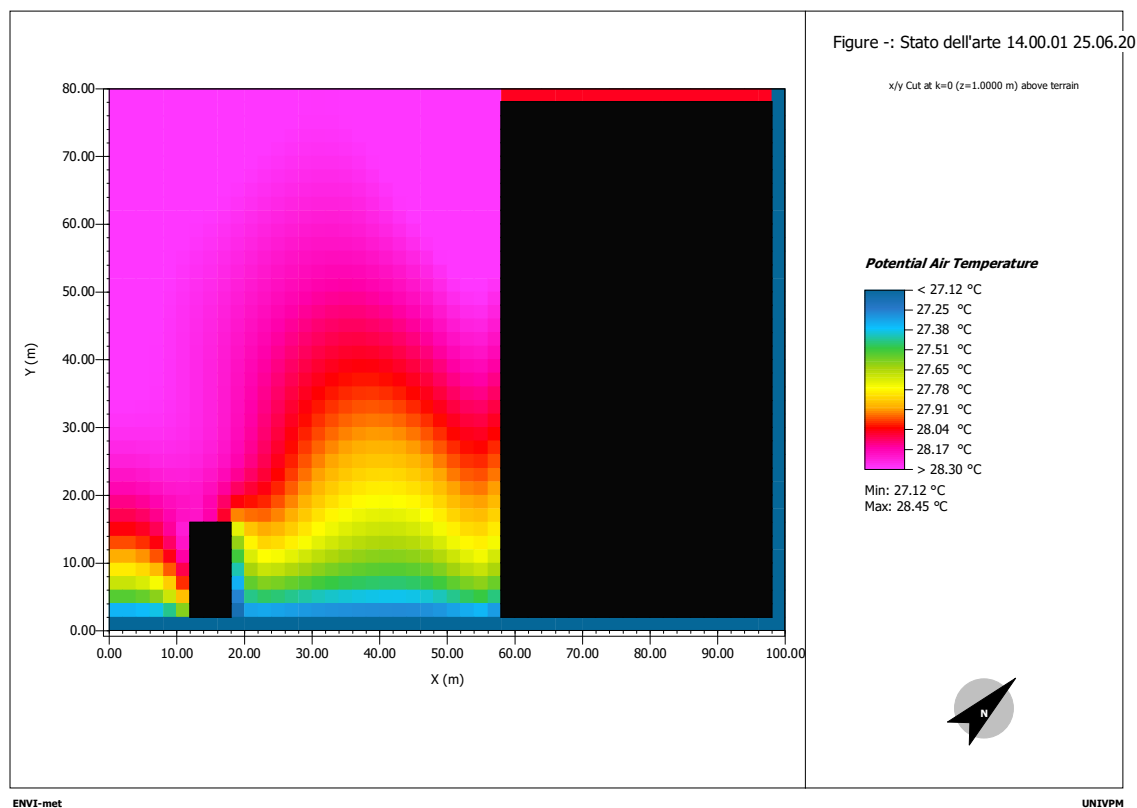


Figura 60. Output in termini di temperatura potenziale dell'aria, simulazione estiva stato dell'arte.

Come facilmente intuibile dalla rappresentazione grafica in fig. 60, la simulazione ha evidenziato una distribuzione della temperatura pressoché omogenea in tutto il piazzale dedicato al parcheggio, con temperature sempre superiori ai 27.12 °C. I due terzi dell'area presentano temperature maggiori ai 28 °C fino ad un massimo di 28.30 °C, rappresentate rispettivamente in rosso e in viola. Le temperature più basse si presentano nella zona sud del parcheggio e a ridosso degli edifici, sono raffigurate da una colorazione che va dal giallo, al verde, all'azzurro/blu man mano che la temperatura decresce. Non si conosce specificamente il motivo di tale distribuzione di temperatura ma possiamo plausibilmente ipotizzare che sia dovuto all'orientamento geografico, alla direzione dei venti e alla disposizione delle ombre degli edifici nel suolo.

Per quello che riguarda gli indici di comfort PMV e PPD, anche in tal caso la lettura grafica degli output ci fornisce risultati omogenei in tutta l'area con valori di PMV che superano costantemente il valore di 3.05 (raffigurato dalla colorazione viola in fig.61) e valori di PPD che stanziano al di sopra del 94.27% (raffigurato dalla colorazione viola in fig.62). Si evidenziano valori leggermente favorevoli al benessere nella zona circoscritta alla facciata nord dell'edificio più basso.

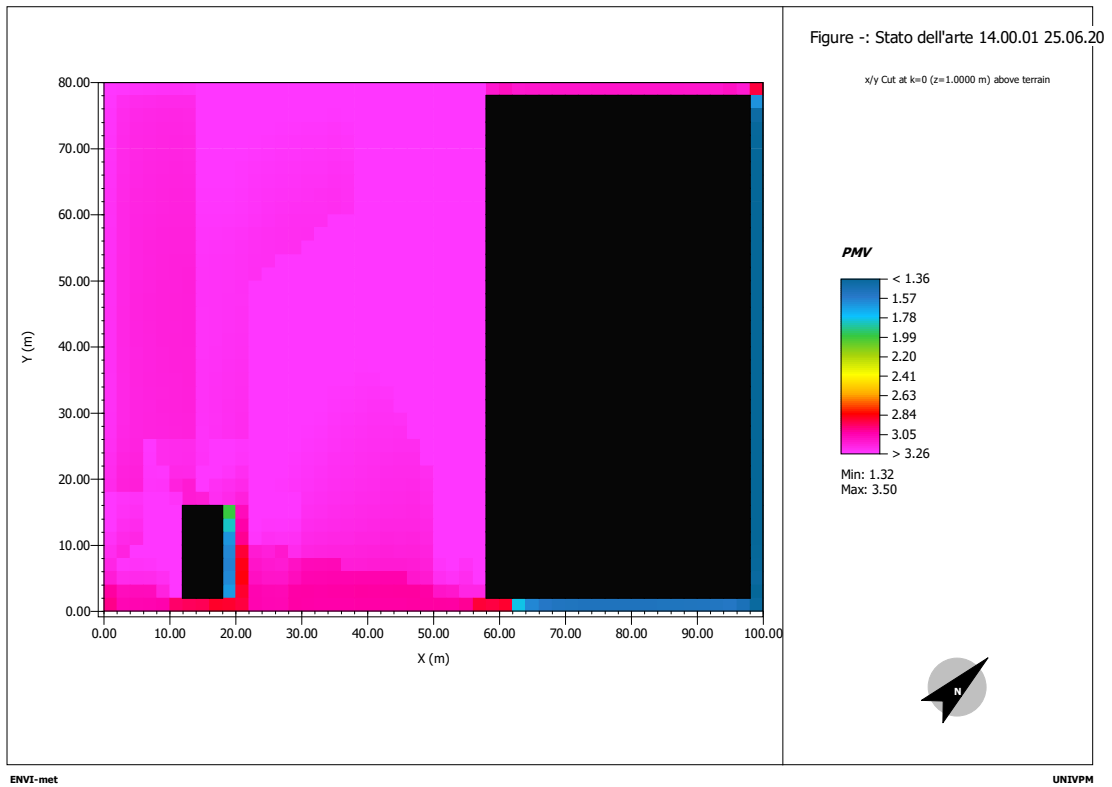


Figura 61. Output in termini di PMV, simulazione estiva stato dell'arte.

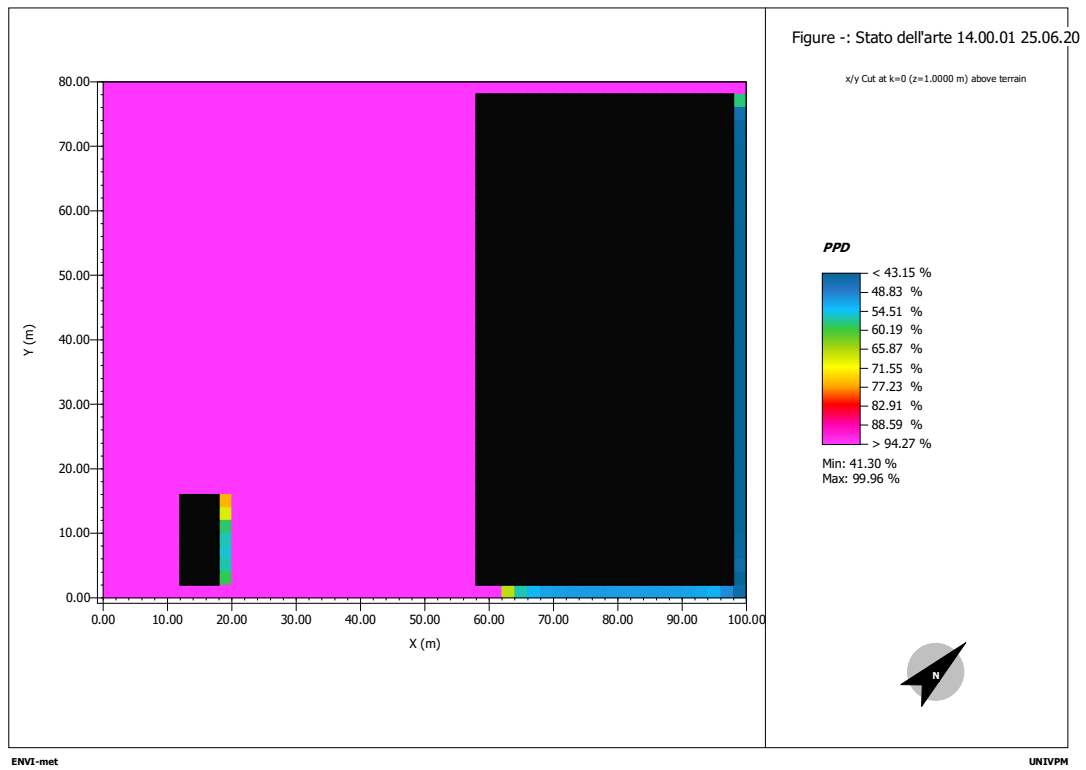


Figura 62. Output in termini di PPD, simulazione estiva stato dell'arte.

### 4.3.2. Disposizione di tipo 0 Acer Campestre

In questo caso, invece, si è pensato di progettare su Spaces un dominio ipotetico, non reale ma immaginando il parcheggio, si con la stessa struttura e geometria, ma con la presenza di alberi. L'albero scelto per tale simulazione è l'Acer campestre e la disposizione scelta è la disposizione di tipo 0, che abbiamo accennato al cap.4.1. Il dominio, come visibile in fig.63, è progettato su Spaces a partire dal dominio di stato dell'arte e poi arricchito inserendo l'albero Acer Campestre (A9) in singole celle scelte. Sono stati inseriti in totale 42 alberi con una disposizione che voleva fornire, il più possibile, un senso realistico alla simulazione. Facendo riferimento alla fig.63, si nota che è stato lasciato un corridoio più largo tra gli alberi nella parte alta della figura e nella parte a ridosso dell'edificio alto 20 metri; nel primo caso la scelta è stata dovuta alla presenza dell'ingresso/uscita del sito commerciale, nel secondo la scelta è dovuta al fatto che si vogliono lasciare due corsie per la circolazione delle autovetture e per lasciare libero l'ingresso e l'uscita dal supermercato vero e proprio dove si devono prevedere zone funzionali all'attività commerciale (ad esempio il box carrelli).



Figura 63. Dominio Acer Campestre disposizione di tipo 0 visto dalla sezione "Buildings" di Spaces.

Si immagina, invece, di piantare: 8 alberi nella parte Ovest, che dividono l'altra zona del parcheggio (dalla tesi non contemplata), e 10 alberi perimetrali, con il compito di dividere il parcheggio dalla strada che corre lungo tale lato. Successivamente si predispongono 5 file di alberi composte ciascuna da 5 alberi, tranne quella più in basso nella figura in cui sono solo 4, al centro del dominio. Si ipotizza di creare posti auto un po' ovunque, nella parte interna del filare perimetrale e in ambo i

lati dei filari al centro. Nei filari ogni albero è staccato dall'altro di due celle che corrispondono a 4 metri, si parla quindi di un'alberazione abbastanza fitta. Il database "Albero" di ENVI-met, però, fornisce varianti di Acer Campestre molto grandi, ai quali molto probabilmente 4 metri non basterebbero per lo sviluppo della chioma. Tale sovradimensionamento può essere giustificato considerando che la nostra simulazione non inserisce un filare continuo di prato e aiuole che è consigliato predisporre alla base degli alberi, quindi nel dominio il sistema alberi di grandezza adatta, aiuole e linee di prato sono accorpate all'interno dell'albero Acer Campestre di grandi dimensioni fornitoci dal database. I filari di alberi centrali, invece, distano fra loro 5 celle, distanza pari a 10 metri; per inserire i parcheggi sia da un lato che dall'altro bisogna presupporre di inclinare leggermente l'orientamento dei posti auto e di inserire una sola corsia di circolazione a senso unico.

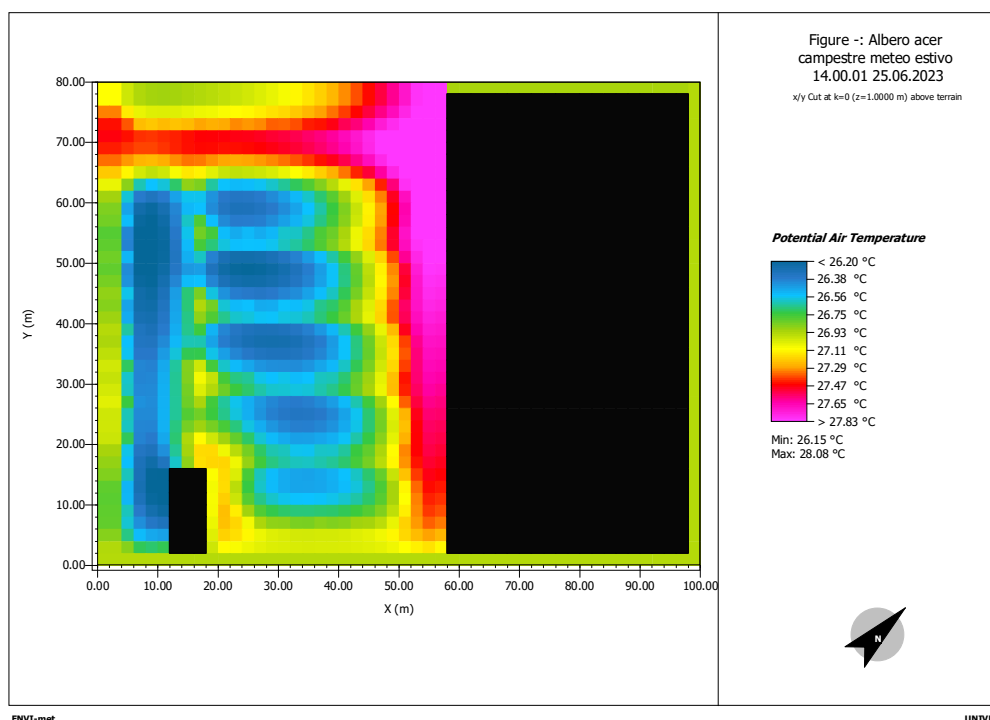


Figura 64. Output in termini di temperatura potenziale dell'aria, simulazione estiva Acer Campestre disp. 0.

Gli output ottenuti dalla simulazione ci indicano una distribuzione di temperatura in linea con il posizionamento degli alberi, laddove questi sono piantati si registrano temperature inferiori fino a quasi 2 °C rispetto alle parti cementate sprovviste di vegetazione. Nelle zone di infittimento di vegetazione si registrano temperature pari a 26.15 °C, raffigurate dalla colorazione blu in Leonardo. Nella parte alta della fig.64 la presenza del filare di alberi di divisione interna del parcheggio risulta meno efficiente nella mitigazione delle temperature, facendo registrare intervalli che vanno da 26.75 °C (in verde) a 27.29 (in giallo/arancione).

Dal punto di vista degli indici di comfort, le simulazioni forniscono risultati significativi di miglioramento nelle zone che ospitano gli alberi ma una situazione di poco migliorata nelle zone sprovviste di esse rispetto allo stato dell'arte. Come osservabile dalle fig.65 e fig.66, le mappe cromatiche ricalcano la disposizione degli alberi e indicano valori di PMV che arrivano fino a 0.6 (colorazione blu) e valori di PPD minori del 17.05% (colorazione blu).

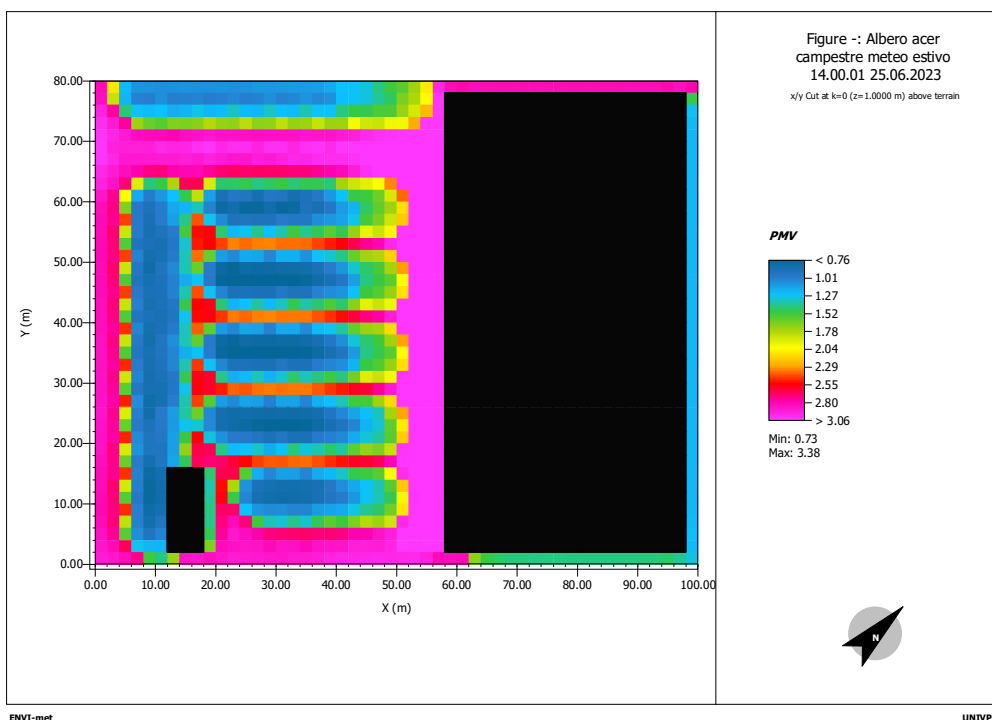


Figura 65. Output in termini di PMV, simulazione estiva Acer Campestre disp. 0.

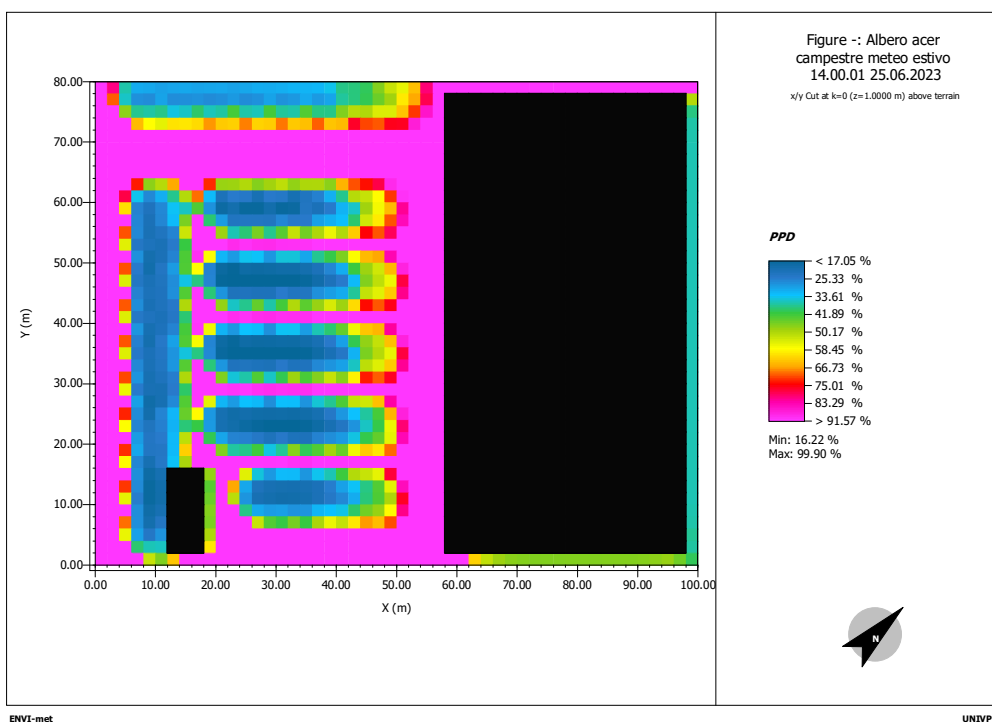


Figura 66. Output in termini di PPD, simulazione estiva Acer Campestre disp. 0.



### 4.3.3. Disposizione di tipo 1 Acer Campestre

Questa simulazione prevede la creazione di un nuovo dominio su Spaces che ricorra ugualmente all'inserimento di alberi Acer Campestre ma ne cambi la disposizione interna, mantenendo però l'idea di rispettare i fabbisogni reali della struttura che ospita il parcheggio. La disposizione spaziale di questa simulazione, denominata di tipo 1, diminuisce sicuramente il numero di posti auto che il parcheggio può offrire ma prevede l'inserimento di più alberi, ben 54 in totale, rispetto alla disposizione precedente. In particolare, tale disposizione rafforza la presenza di alberi perimetrali e divisorii, quelli che nella griglia del dominio di fig.67 compaiono in alto a sinistra e in basso.

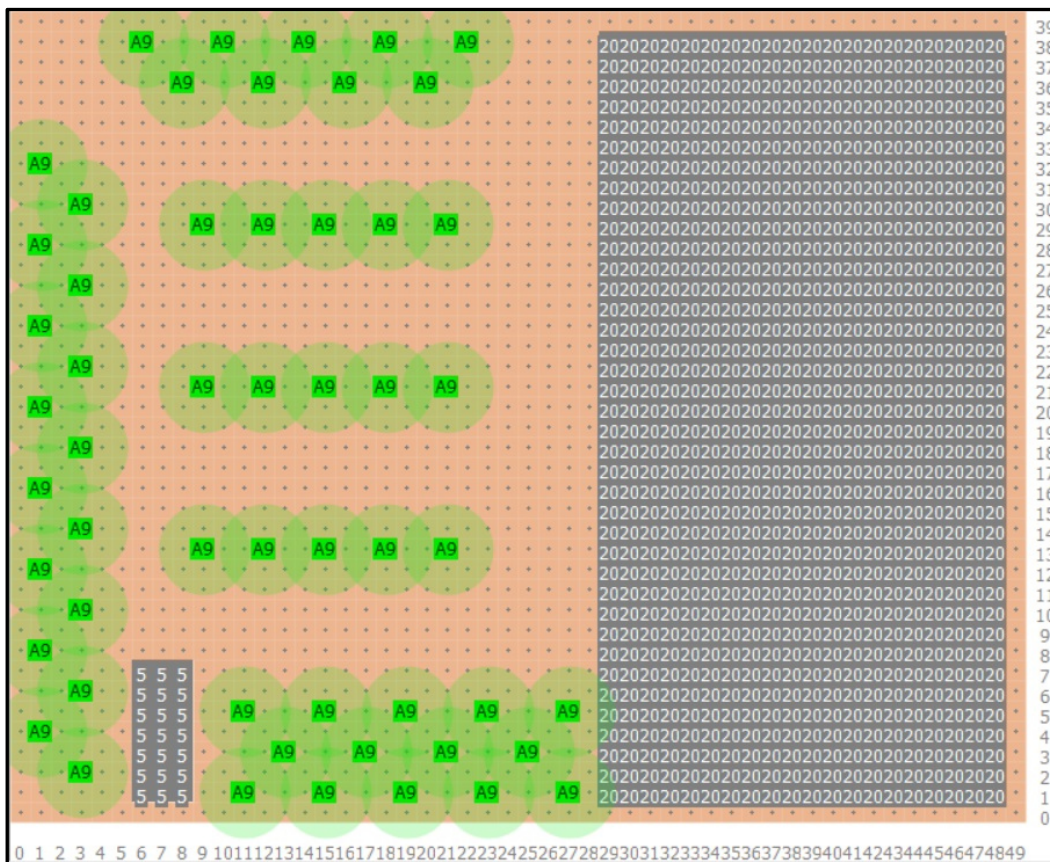


Figura 67. Dominio Acer Campestre disposizione di tipo 1 visto dalla sezione "Buildings" di Spaces.

L'idea è di incrementare il ruolo paesaggistico degli alberi all'interno del parcheggio, creando una "recinzione verde" che crei uno spazio totalmente separato dal contesto urbano. Gli alberi perimetrali devono creare visivamente una specie di "boschetto", per tale motivo non si usa un filare singolo di alberi ma filari doppi o tripli disallineati così da dare l'idea di continuità di verde. La stessa continuità deve essere considerata nel suolo, dove si possono predisporre ampie zone di prato e aiuole che non vengono considerate nella nostra simulazione ma possono essere approximate dall'adozione, da parte di ENVI-met, di una varietà di albero più grande rispetto a quello che realisticamente si adotterebbe.



Per quello che concerne i risultati, gli output mostrano una mappa cromatica consona a quella che è la disposizione degli alberi, le temperature più basse sono intorno a 25.7 °C (colore blu della legenda) e si registrano nel lato sud-ovest del parcheggio; si potrebbe pensare di usufruire di questa condizione privilegiata inserendo parcheggi singoli anche in questo lato. La temperatura massima registrata è invece pari a 28.05 °C e, anche in questo caso, la si ritrova nella parte alta della griglia, a ridosso dell'edificio. L'inserimento di alberi, in questo caso, porta a zone che differiscono al massimo di 2.5 °C.

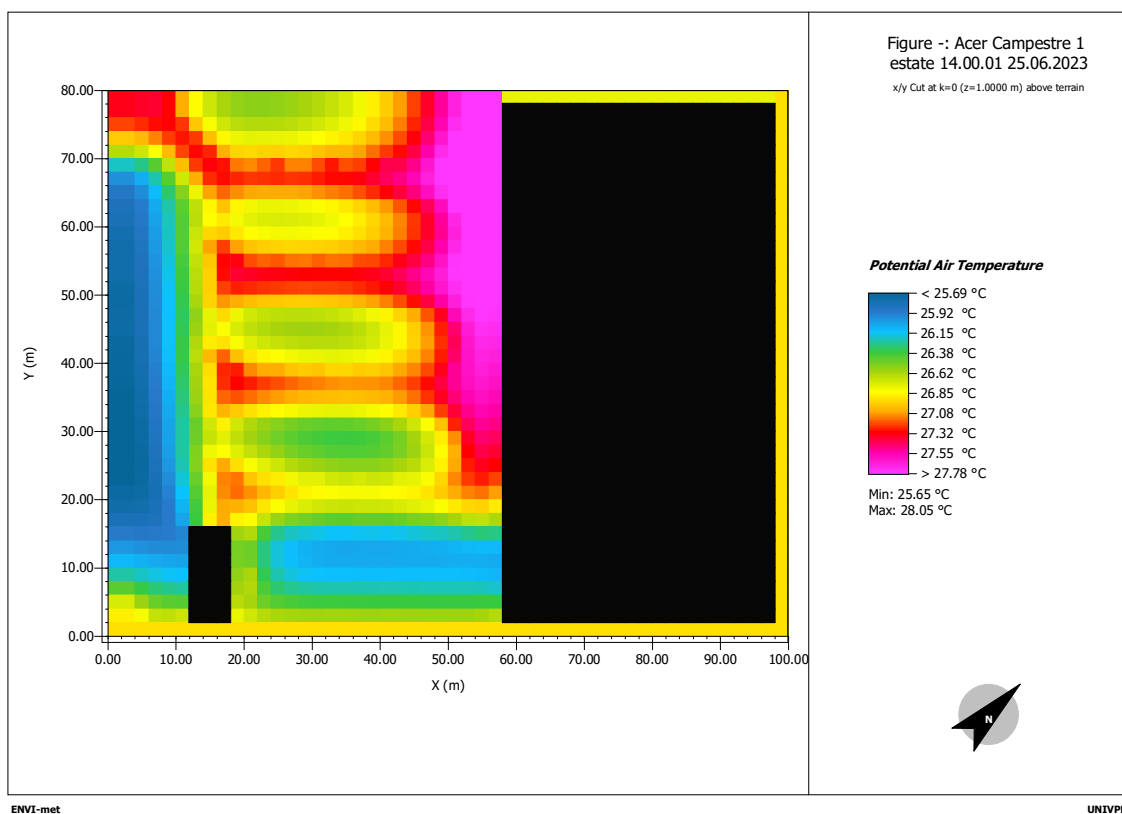


Figura 68. Output in termini di temperatura potenziale dell'aria, simulazione estiva Acer Campestre disp. 1.

Essendo i filari di alberi centrali più distanziati, non si crea una zona di temperatura omogenea come nel caso della disposizione di tipo 1. Le temperature sotto al filare di alberi (dove si adibiranno i parcheggi) e nella stradina che passa attraverso 2 filari differiscono di circa 1 °C, la soluzione sembrerebbe offrire benefici alla macchina in sé durante la sosta ma meno alle azioni dell'uomo all'interno del parcheggio. I risultati dettagliati ottenuti sono visibili in fig.68, sono riportati tramite l'utilizzo di 10 valori di temperatura associati ad un colore o ad una sfumatura di colore.

I risultati di PMV e PPD delle simulazioni, invece, sono riportati in fig.69 e in fig.70. Essi non differiscono di molto rispetto alla disposizione precedente, si registrano nuovamente zone in cui il PMV è pari a 3.34 e il coefficiente di insoddisfatti risulta essere pari a quasi il 100%. Tuttavia, i "boschetti" perimetrali risultano zone particolarmente confortevoli, con valori di PMV uguali a 0.66 e

PPD minore al 15% anche per aree mediamente estese, si potrebbe pensare ad una fruizione più completa per l'uomo di tali zone, anche in termini sociali.

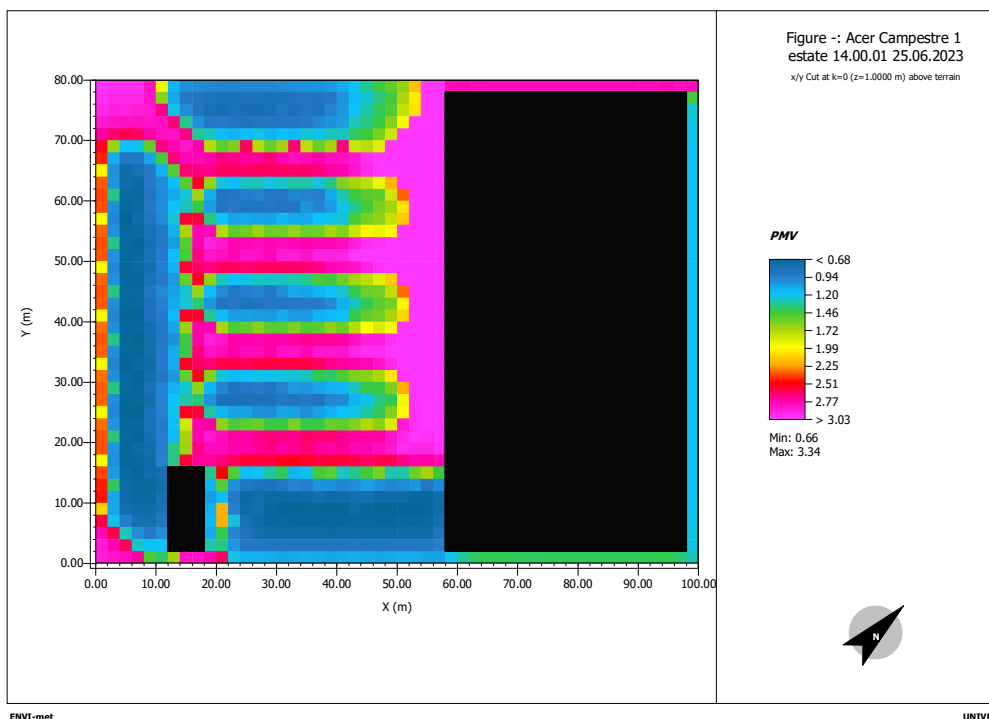


Figura 69. Output in termini di PMV, simulazione estiva Acer Campestre disp. 1.

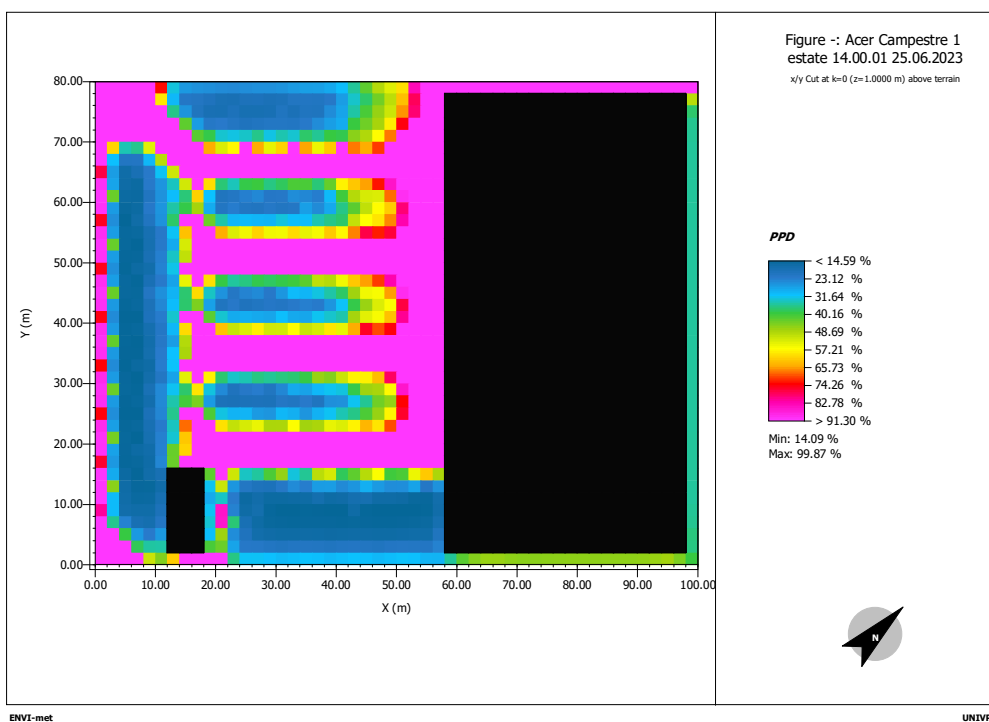


Figura 70. Output in termini di PPD, simulazione estiva Acer Campestre disp. 1.

#### 4.3.4. Disposizione di tipo 0 *Catalpa Bignonioides*

Una volta effettuate le simulazioni con l'Acer Campestre disposto secondo due schemi differenti, si è voluto realizzare altre due simulazioni con i medesimi schemi ma utilizzando un altro tipo di albero: l'albero dei sigari. Tale decisione è dovuta al fatto che nella progettazione di un parcheggio verde si dovrebbero considerare, con dati alla mano, altri aspetti della vegetazione come il costo di acquisto e di gestione, il fabbisogno di acqua e di potatura, il costo di un eventuale pulizia al suolo, ecc..., aspetti che nella presente tesi non vengono approfonditi dettagliatamente, per questo si vuole analizzare al meglio quale albero, in termini prettamente climatologici, porti maggiori benefici alla temperatura dell'aria. La disposizione di tipo 0, quella con i filari singoli ma che garantisce un numero maggiore di parcheggi, fornisce gli output riportati in fig.71. La maggior temperatura registrata risulta più alta rispetto alla stessa disposizione con l'Acer Campestre e tende ad avvicinarsi a quelle dello stato dell'arte, arrivando al valore massimo di 28.21 °C. Inoltre, le zone che superano i 28 °C (colorazione viola), oltre a trovarsi, come prima, a ridosso dell'edificio più grande, si ritrovano anche nelle stradine di percorrenza tra i filari di alberi, indice che il contributo degli alberi alla temperatura dell'aria è circoscritto alla loro posizione, probabile che l'effetto di mitigazione di questa specie sia dovuto più alla loro ombreggiatura che alla loro evapotraspirazione. Anche le zone più fresche sembrano risentire di questo fenomeno dato che sono circoscritte in un'area più piccola e di 1 °C maggiori rispetto alla stessa disposizione con l'Acer Campestre, rimane invariato il loro posizionamento nella parte bassa della griglia.

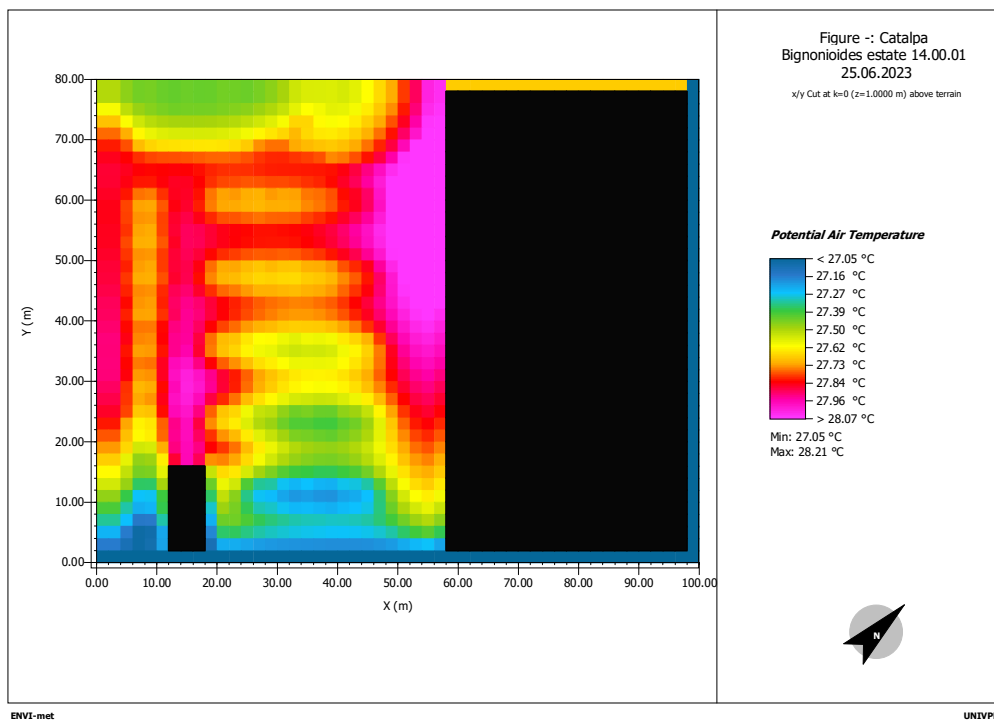


Figura 71. Output in termini di temperatura potenziale dell'aria, simulazione estiva *Catalpa Bignonioides* disp. 0.

Di conseguenza, anche gli output di PMV e PPD si associano al comportamento della temperatura dell'aria. I valori minimi di PMV si alzano, rispetto all'Acer Campestre, da 0.73 a 1.29, quelli minimi di PPD da 16.22% a 40.70%. La questione principale, però, riguarda la distribuzione di tali valori (rappresentati dalle mappe cromatiche rispettivamente in fig.72 e in fig.73): la maggior parte dell'area parcheggio risulta avere indici di comfort non giovevoli per il benessere umano ma anche per l'edificio più piccolo (in basso a sinistra della griglia) che è circondato da alti valori di PMV e PPD che potrebbero rendere meno confortevole l'attività al suo interno.

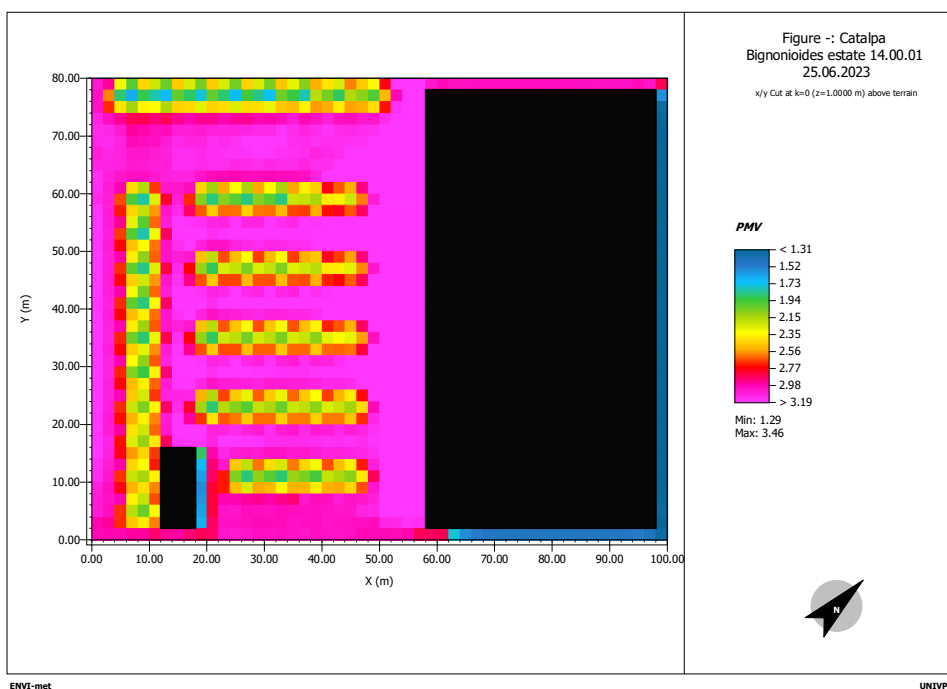


Figura 72. Output in termini di PMV, simulazione estiva Catalpa Bignonoides disp. 0.

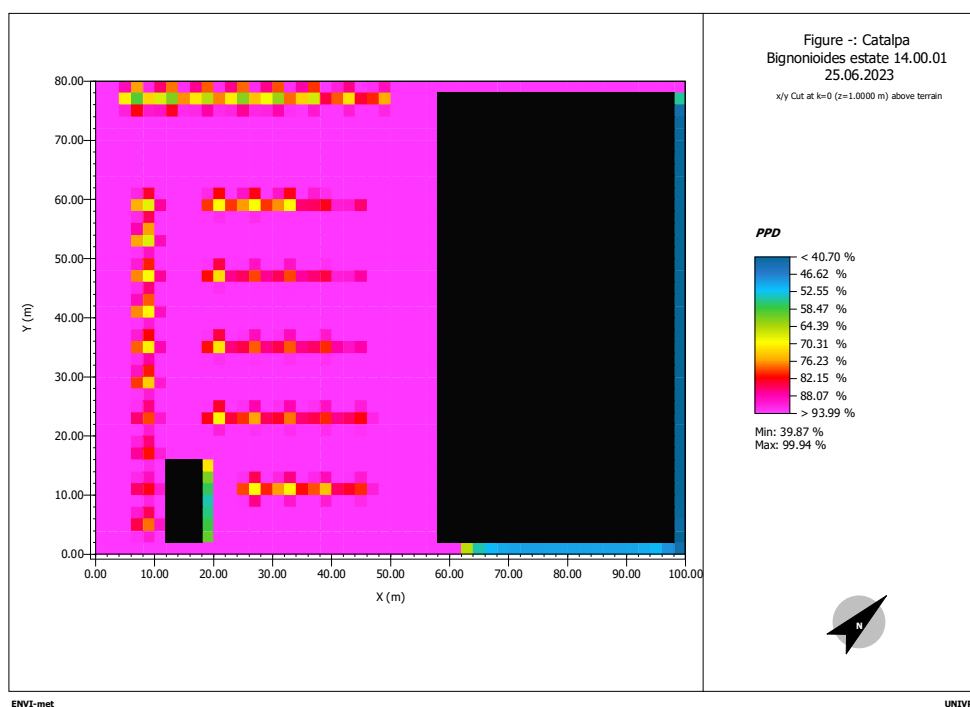


Figura 73. Output in termini di PPD, simulazione estiva Catalpa Bignonoides disp. 0.

#### 4.3.5. Disposizione di tipo 1 *Catalpa Bignonioides*

A questo punto si è deciso di riprovare la simulazione “piantando” lo stesso albero ma con la disposizione di tipo 1, che prevede un numero maggiore di alberi. I risultati ottenuti sono in linea con i ragionamenti fatti finora, la disposizione 1 permette un abbassamento maggiore delle temperature e in un’area più vasta, specialmente laddove si sono predisposti i “boschetti”. In questa simulazione il filare triplo di alberi *Catalpa Bignonioides* riporta la temperatura sotto i 27 °C ma è comunque distante dalla temperatura di 25.7 °C ottenuta con gli aceri campestri. Addirittura, la temperatura più alta registrata cresce rispetto alla simulazione precedente ed arriva a 28.33 °C, sintomo che il numero di alberi è garanzia di efficienza tanto quanto la disposizione e la tipologia. Nel complesso si registra un range di temperatura che varia di 1.5 °C, valore non inconcludente ma comunque molto minore dei 2.5 °C constatati nella simulazione con l’Acer Campestre in disposizione 1. Gli output completi sono riportati con la solita mappa cromatica di Leonardo in fig.74.

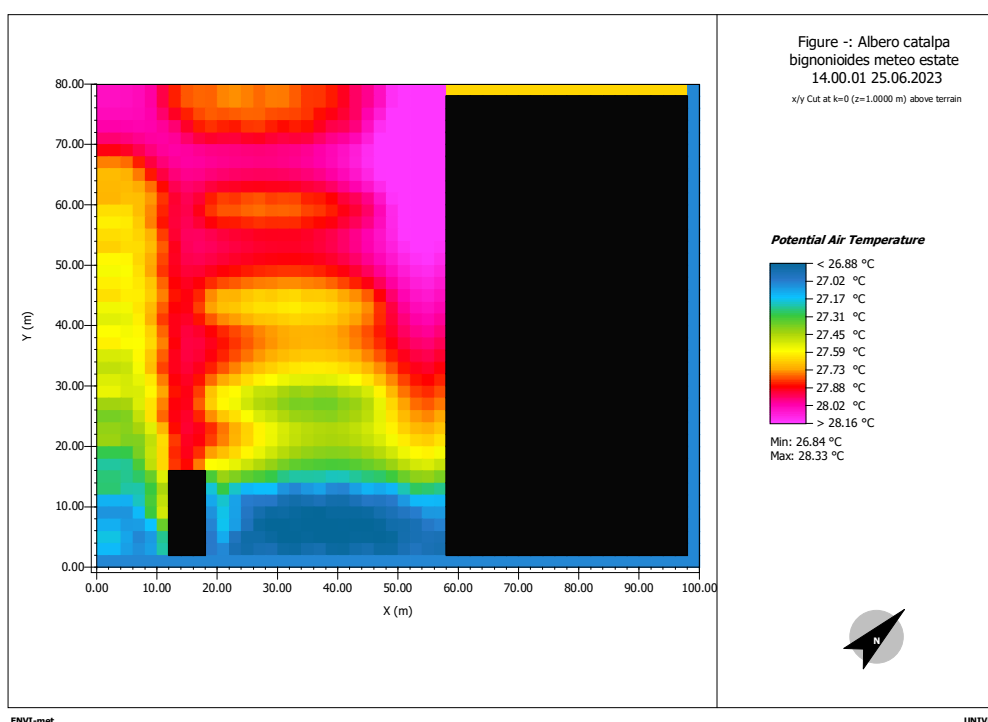


Figura 74. Output in termini di temperatura potenziale dell’aria, simulazione estiva *Catalpa Bignonioides* disp. 1.

Se per la temperatura i valori meriterebbero uno studio più approfondito, per quelli di PMV e PPD possiamo affermare quasi fermamente che sono inadatti ad una progettazione moderna di parcheggio verde. I valori rimangono pressoché gli stessi della simulazione precedente, con valori di PMV e PPD che non auspicano situazioni di benessere elevato nemmeno nelle zone a ridosso degli alberi stessi. Nell’area del parcheggio vero e proprio si registra un valore di insoddisfazione superiore al 90%. Gli output completi sono raffigurati in fig.75 e in fig.76.

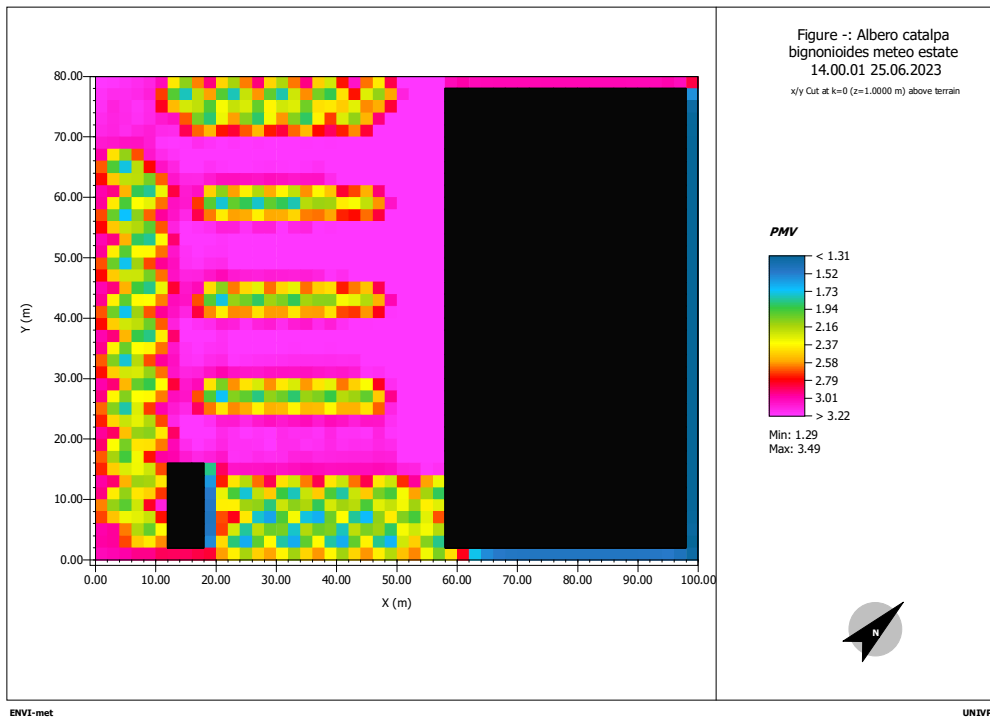


Figura 75. Output in termini di PMV, simulazione estiva Catalpa Bignonioides disp. 1.

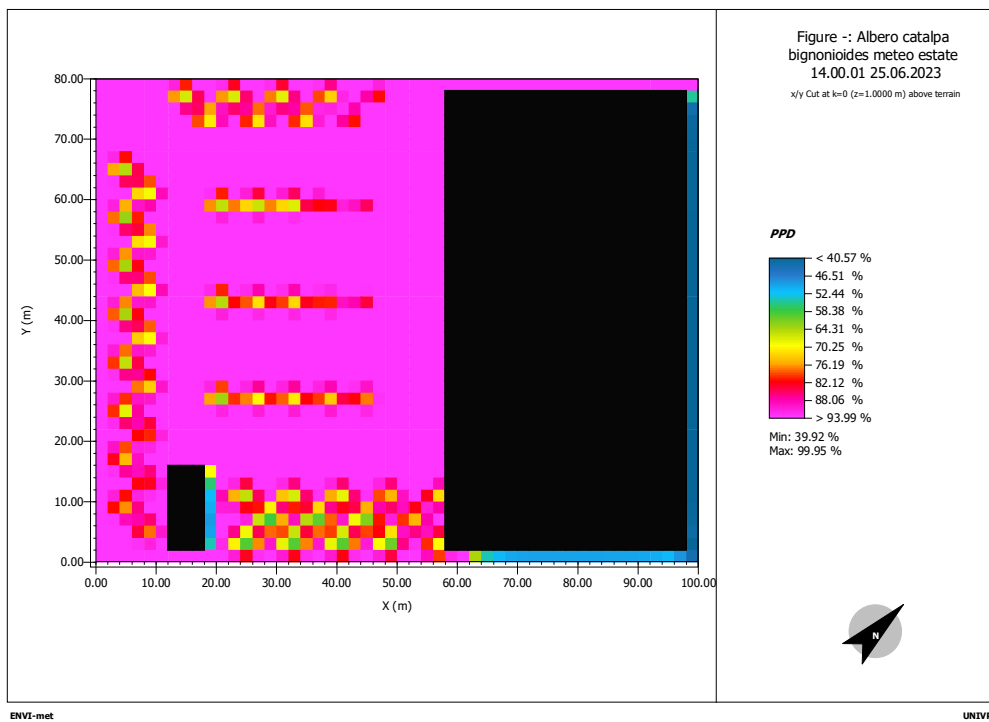


Figura 76. Output in termini di PPD, simulazione estiva Catalpa Bignonioides disp. 1.



## 4.4. Simulazioni invernali

Per dover di completezza, tutte le simulazioni fatte fino a questo a momento sono state rifatte alla stessa maniera per il periodo invernale, inserendo in Envi-guide il giorno rappresentativo invernale: il 23 febbraio 2023. Tutte le simulazioni invernali mostrano, come previsto dalla letteratura, risultati meno interessanti di quelle estive. In questo caso si è deciso di mostrare solo gli output della temperatura potenziale dell'aria tralasciando quelli di PMV e PPD.

In generale si può affermare che lo stato dell'arte presenta già delle disuniformità di temperatura all'interno del dominio, con temperature che variano di massimo 1 °C da parte a parte, dovute al posizionamento degli edifici, all'orientamento e la posizione geografica. Nel caso delle simulazioni realizzate con l'albero Catalpa Bignonioides la situazione, salvo una diversa disposizione delle temperature, rimane pressoché invariata. Nel caso dell'Acer Campestre le temperature medie scendono di circa 0.5 °C e le varie parti differiscono di massimo 1.5 °C, risultati praticamente trascurabili se confrontati con i benefici apportati durante il periodo estivo.

Possiamo concludere confermando gli studi trovati nella letteratura: la scelta di alberi caducifoglie risulta ideale nella progettazione di parcheggi verdi e nell'arco temporale di un anno i benefici estivi sono sicuramente di più di quanti sono i disagi invernali.

### 4.4.1. Stato dell'arte

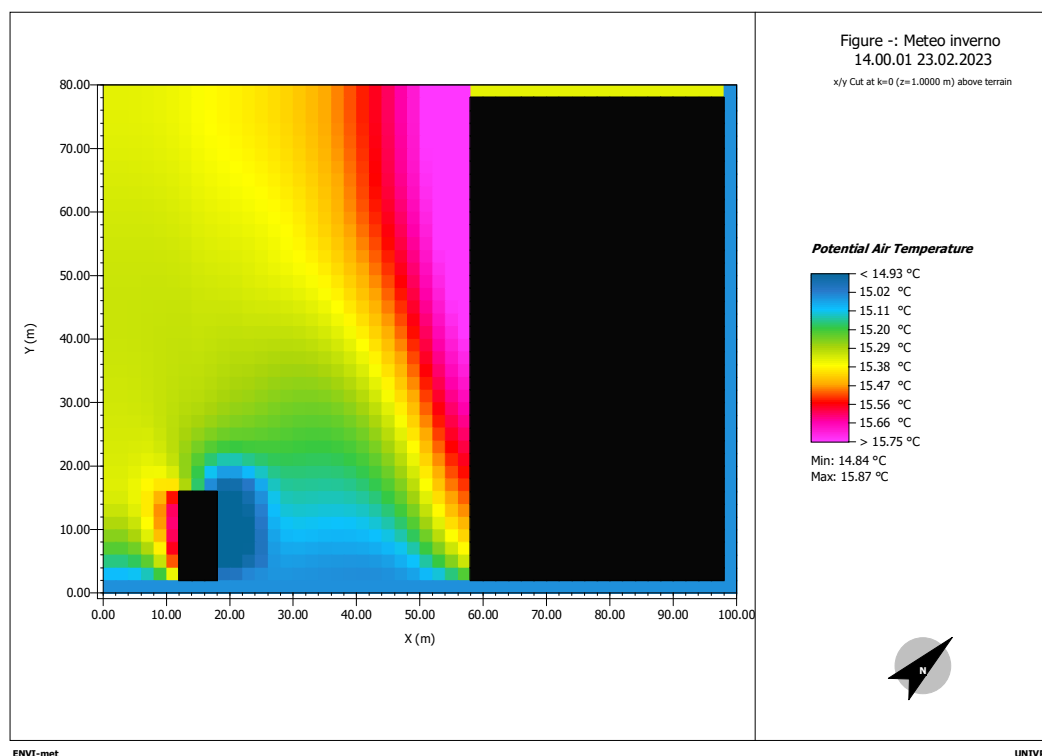


Figura 77. Output in termini di temperatura potenziale dell'aria, simulazione invernale stato dell'arte.

#### 4.4.2. Disposizione di tipo 0 Acer Campestre

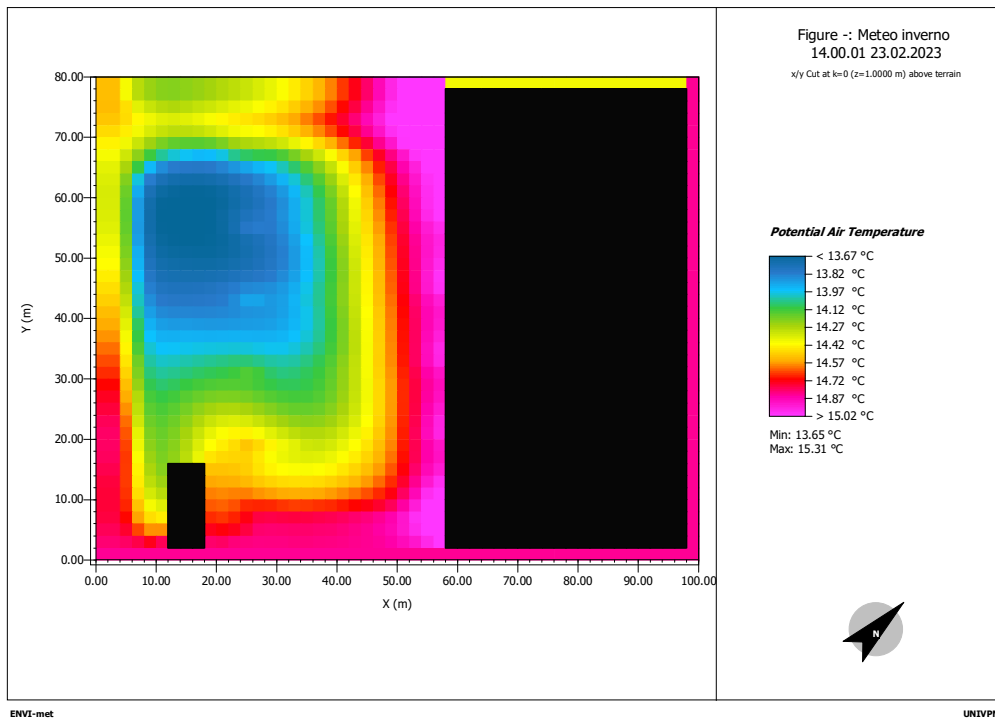


Figura 78. Output in termini di temperatura potenziale dell'aria, simulazione invernale Acer Campestre disp. 0.

#### 4.4.3. Disposizione di tipo 1 Acer Campestre

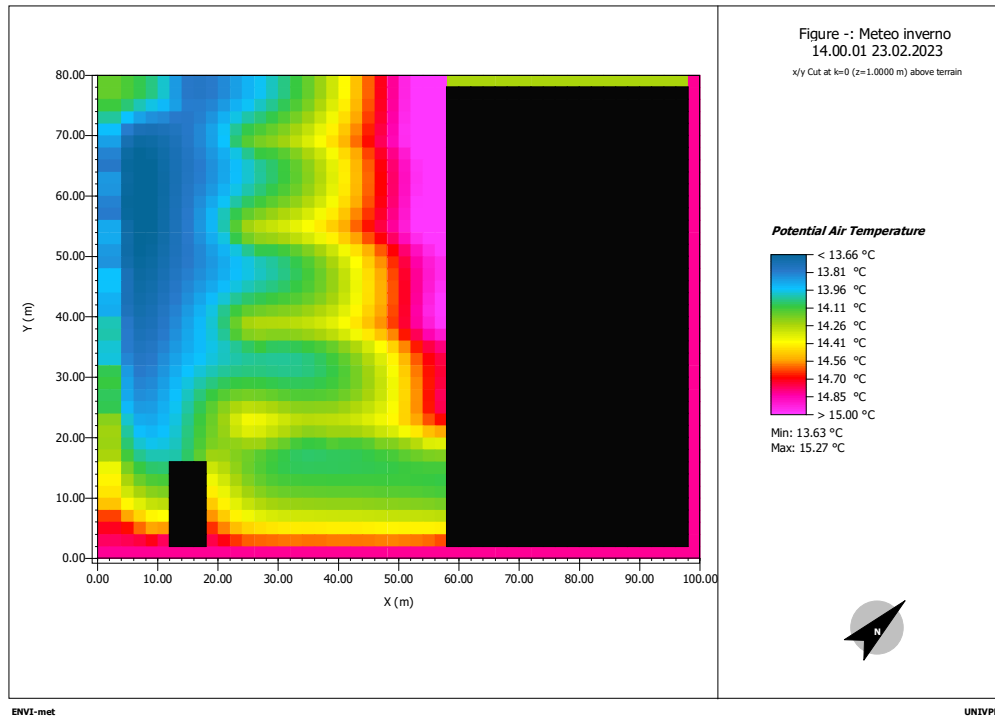


Figura 79. Output in termini di temperatura potenziale dell'aria, simulazione invernale Acer Campestre disp. 1

#### 4.4.4. Disposizione di tipo 0 Catalpa Bignonioides

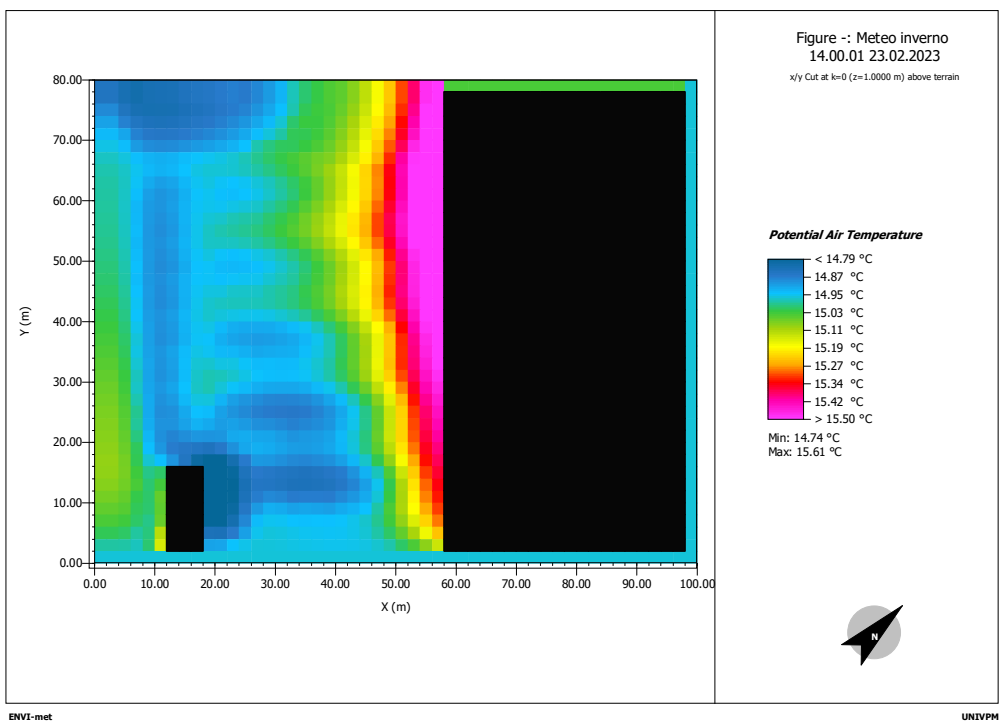


Figura 80. Output in termini di temperatura potenziale dell'aria, simulazione invernale Catalpa Bignonioides disp. 0

#### 4.4.5. Disposizione di tipo 1 Catalpa Bignonioides

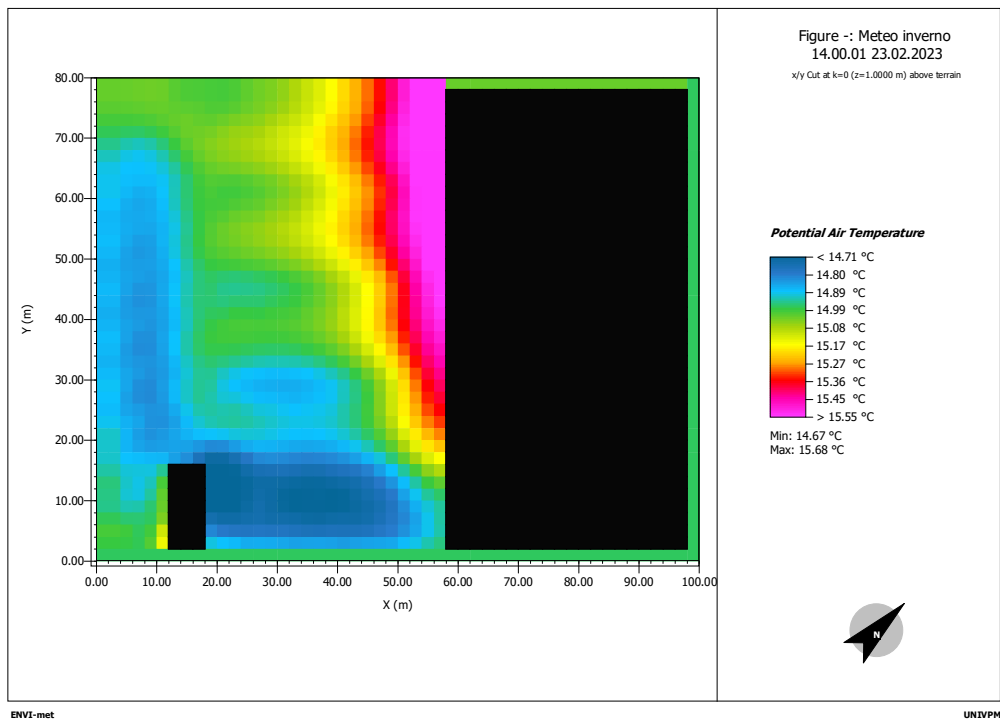


Figura 81. Output in termini di temperatura potenziale dell'aria, simulazione invernale Catalpa Bignonioides disp. 1.

## CONCLUSIONI

Alla fine della presente tesi possiamo confermare che le simulazioni effettuate tramite ENVI-met forniscono risultati che sono in linea con quanto previsto dalla letteratura, confermando le ipotesi iniziali e fornendo ulteriore evidenza a supporto delle teorie esistenti.

Nel caso studio specifico si può affermare che l'albero più idoneo alla realizzazione di un parcheggio verde è l'Acer Campestre, grazie alla sua capacità di abbassare la temperatura di circa 2 °C e di migliorare gli indici di comfort. La supremazia in campo termico dell'Acer Campestre nei confronti della Catalpa Bignonioides non è l'unico beneficio apportato nel campo progettuale dell'urbanistica, tale risultato favorisce un'inclusione di una specie autoctona, sprovvista di fiori e frutti che possono sporcare e che si adatta ottimamente ai tipici suoli urbani, requisiti che l'albero dei sigari non possiede.

Per quanto riguarda la disposizione ottimale degli aceri, si dovrebbero realizzare studi più approfonditi a livello urbanistico; la disposizione di tipo 1 assicura un abbassamento delle temperature in più zone del parcheggio, grazie al maggior numero di alberi inseriti, ma prevede un forte calo del numero di posti auto al suo interno; non va dimenticato che le buone pratiche di progettazione del verde devono assicurare, prima di tutto, che sia mantenuta la funzionalità dell'attività urbana e antropica. La copertura perimetrale e la creazione dei cosiddetti "boschetti" offre sicuramente la creazione di zone ampiamente più fresche, con eccellenti valori di PMV e PPD, ma va effettuata una progettazione più approfondita per l'inserimento di parcheggi a ridosso di questi o per una fruizione sociale maggiore al loro interno.

Inoltre, dalle simulazioni realizzate, emerge che il fatto che, in un contesto critico come un parcheggio completamente asfaltato, la piantumazione di qualche albero non può risolvere tutte le problematiche ambientali al suo interno bensì si necessita di una progettazione integrata e minuziosa. Dato che il lotto analizzato è già esistente, non è previsto al momento un piano di riqualifica ed è stato recentemente sottoposto a rinnovamento, non sono state effettuate simulazioni cambiando il tipo di pavimentazione con un altro con albedo più elevato, soluzione che sicuramente gioverebbe e sarebbe indispensabile per un'area così vasta e totalmente asfaltata ma al giorno d'oggi poco probabile nella realtà.

In tutte le simulazioni, l'area a ridosso dello stabile più grande, nella parte alta della griglia discretizzata, risulta non risentire dei benefici termici introdotti dalla vegetazione. Essendosi attenuti alla realtà del sito, si conosce che in quel punto si trova l'ingresso del supermercato in questione e ciò non permette l'inserimento di alberi a suo ridosso. Si deve pensare a strategie operative di diverso tipo per migliorare la sensazione di benessere nel punto di accesso, una di queste potrebbe essere l'inserimento di un verde diffuso come i green walls o i green roofs; tali scenari, seppur molto

interessanti, non possono essere stati approfonditi perché non presenti nella versione LITE di ENVI-met.

Infine, si vuol sottolineare che lo studio e le analisi effettuate hanno riguardato essenzialmente l'aspetto termico della vegetazione, in quanto elemento di mitigazione dell'isola di calore urbana, ma non sono stati approfonditi con simulazioni e calcoli aspetti come l'inquinamento e la capacità di abbattimento di questo da parte della vegetazione, analisi che potrebbero ribaltare e ravvedere quali siano le tipologie e le disposizioni ottimali.

# BIBLIOGRAFIA

*Akbari H., R. Bell et al. (2008) "Urban heat island basics", EPA-U.S. Environmental Protection Agency*

*Alessandrelli F., "Metodi di riduzione dell'effetto isola di calore: valutazione dei materiali per infrastrutture mediante il software ENVI-met", UNIVPM, A.A 2022/2023*

*Battistella, L., "Il fenomeno dell'isola di calore urbana a Padova: analisi dei dati e scenari di mitigazione" (2014)*

*Bell R., Cole D., DeAngelo B. et al. (2008) "Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. Tree and Vegetation", EPA-U.S. Environmental Protection Agency*

*Benedetta Barozzi, Alice Bellazzi, M.Cristina Pollastro, "The Energy Impact in Buildings of Vegetative Solutions for Extensive Green Roofs in Temperate Climates" (2016), 10.3390/buildings6030033*

*Beretta Sara, "Gli effetti del verde sulla mitigazione dell'isola di calore urbana", POLIMI, Facoltà di Architettura e Società, Corso di laurea in Progettazione dell'architettura sostenibile A.A. 2011-2012*

*Bisson Marta, "Simulazione del microclima urbano di Milano mediante il software ENVI-metStudio degli effetti dell'inserimento di aree verdi sulla sollecitazione termica degli edifici" A.A. 2009/2010*

*Chiara Colucci, "Studio dello scambio radiativo in un canyon urbano: Analisi delle riflessioni multiple come una delle cause del fenomeno UHI e di un possibile intervento di mitigazione". Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica Dottorato in Energia e Ambiente, 32° ciclo, A.A. 2016/2019*

*CNR, "Radiazione e suolo: Albedo"*

*Dogan Dursun and Merve Yavas "Climate-Sensitive Urban Design in Cold Climate Zone: The City of Erzurum, Turkey" (2015), International Review for Spatial Planning and Sustainable Development*

*Domenico D'Olimpio, "L'adattamento climatico nei contesti urbani: principali strategie di mitigazione dell'isola di calore urbana" (2022), ISBN: 978-88-351-3831-0*



*Evyatar Erell, David Pearlmutter and Terry Williamson “Urban Microclimate – Designing the Spaces Between Buildings” (2011)*

*Federica Gaglione “Città e climate change. La vulnerabilità delle aree urbane alle isole di calore” (2022), FedOA - Federico II University Press, ISBN: 8868871394, 9788868871390*

*G. Scudo, J.M.O de la Torre “Spazi verdi urbani” (2003)*

*Galliani Pasqualini Giulia “Progetto del verde e comfort ambientale negli spazi aperti. Un caso studio a Vado Ligure” (2011/2012)*

*Gordon Manley “Quarterly Journal of the Royal Meteorology Society” (1958)*

*J.A. Voogt, T.R.OKE, “Thermal remote sensign of urban climates. Remote sensing of enviroment” (2003)*

*Kaplan R., & Kaplan S. “The experience of nature: A psychological perspective” (1989). New York: Cambridge University Press*

*Luca Iob, “Studio del fenomeno delle isole di calore urbane nella città di Torino e relativa mitigazione del fenomeno tramite soluzioni sostenibili” (2023), Polito*

*Luke Howard “The Climate of London” (1818)*

*M. Santamouris, C. Cartalis, A. Synnefa, D. Kolokotsa, “On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings - A review” (2015), 10.1016/j.enbuild.2014.09.052*

*Mariani L. e Sovrano Sangallo, G., “Approccio quantitativo all’analisi degli effetti urbani sul clima”, (2005) Rivista Italiana di Agrometeorologia*

*Michele Munafò. “L’impatto dell’impermeabilizzazione” (2006), ISPRA*

*Noè Nicola & Passini Roberto “Il parcheggio verde – nasce un nuovo soggetto urbanistico” (2012), Napoli parcheggi verdi*

*Nunez and Oke, “The Energy Balance of an Urban Canyon” (1977)*

*P. White, Ian Alcock, Benedict W. Wheeler and Michael H. Depledge, "Would You Be Happier Living in a Greener Urban Area? A Fixed-Effects Analysis of Panel Data, Mathew" (2013), Psychological Science, DOI: 10.1177/0956797612464659*

*Pesci Silvia, "Effetti di piantumazione locale sul microclima urbano", UNIVPM, Facoltà di ingegneria, corso di laurea in Ingegneria Civile e Ambientale, A.A. 2021-2022*

*Piano del Verde del Comune di Padova*

*Pierluigi Claps e Paola Allamano, "Evapotraspirazione da specchio liquido e vegetazione e bilancio radiativo alla superficie terrestre" (2011), Politecnico di Torino*

*Prontuario del verde del comune di Vicenza (2023)*

*Rizwan Ahmed Memon, Leung Dennis Y.C. e Chunho Liu (2008), "A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island", Journal of Environmental Sciences*

*Santamouris, M. "Cooling the Cities - A Review of Reflective and Green Roof Mitigation Technologies to Fight Heat Island and Improve Comfort in Urban Environments" (2014), /10.1016/j.solener.2012.07.003*

*Santonoceto Carmelo, "Evapotraspirazione" (2016), Corso di Laurea Magistrale in Scienze e Tecnologie Agraria, Corso Gestione agronomica delle risorse idriche, Dipartimento di Agraria, Università Mediterranea*

*Sartini Elena "Metodi di riduzione dell'effetto di isola di calore: valutazione dei materiali per infrastrutture", UNIVPM, A.A 2021-2022*

*Seyyed Hossein Hosseini, Amir Hosein Peyman Rad, Eslam Kashi, "Investigation of dissipation flow in the urban canyon" (2015)*

*Sottana Matteo, "Analisi sperimentale del fenomeno "Isola di calore" nella città di Padova". Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Tecnica e Gestione dei sistemi industriali. Tesi di laurea magistrale in ingegneria gestionale. A.A. 2011-2012*

*T.R.OKE "Applied Climatology: Principles & Practices" (1997)*

*T.R.OKE "The Heat Island of the Urban Boundary Layer: Characteristics, Causes and Effects" (1995)*

*T.R.OKE, G. Mills, A. Christen, J. A. Voogt, "Urban Climates" (1987)*

*Taha, H. "Urban Climates and Heat Islands: Albedo, Evapotranspiration and Anthropogenic heat" (1997)*

*Tirabassi, T. and Nasseti, S. "Short communication: The representative day', Atmospheric Environment" (1999)*

*Tirabassi, T., Grifoni, R. C., & Passerini, G. (2005). The representative day technique in the study of photochemical smog pollution in falconara industrial area. Water, Air, and Soil Pollution, 166*

*Toshiaki Ichinose, Kazuhiro Shimodozono, Keisuke Hanaki, "Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo" (1999), S1352231099001326*

*Voogt J., 2006, "How Researchers Measure Urban Heat Islands Department of Geography", University of Western Ontario London ON Canada*

*Yunus A. Çengel, "Termodinamica e trasmissione del calore" 4ª edizione (2013), McGraw-Hill Education, ISBN: 8838665117, 9788838665110*

## SITOGRAFIA

<https://www.enea.it/it/>

<https://www.ohqa.it/>

<https://www.rinnovabili.it/>

<https://www.isac.cnr.it/>

<https://www.idrotecnicaitaliana.it/>

<https://it.wikipedia.org/>

<https://needlecrowd.com/>

<https://www.sciencedirect.com/>

<https://www.researchgate.net/>

<https://www.salute.gov.it/>

<https://www.eea.europa.eu/it>

<https://www.inail.it/>

<https://www.epa.gov/>

<https://www.geometraantoniomassari.it/>

<https://www.infobuildenergia.it/>

<https://www.architetturaecosostenibile.it/>

<https://www.fao.org/>

<https://www.finnovasrl.it/>

<http://www.mircotugnoli.com/>

<https://www.lifegate.it/>

<https://www.teknoring.com/>

<https://www.isaitalia.org/>

<https://www.agenzia.roma.it/>

<https://www.archweb.it/>

<https://www.dipintosucci.com/>

<https://www.wwf.it/>

<https://www4.ti.ch/tich/>

<https://www.weforgreen.it/>

<https://robertomercurio.wordpress.com/>

<https://www.vetivaria.com/>

<https://giardinaggioirregolare.com/>

<https://envi-met.com/>

<https://envi-met.info/>

<https://www.regione.marche.it/Regione-Utile/Protezione-Civile/Console-Servizi-Protezione-Civile/SIRMIP-online>

<https://www.google.it/maps/>

<https://www.google.it/intl/it/earth/>

<https://vivaiguagno.com/>

<https://vivaifrappetta.it/>

<https://www.vivaiodicastelletto.it/>



# RINGRAZIAMENTI

*Al mio relatore Giorgio Passerini per avermi dato questa opportunità e per avermi fatto interessare a tematiche cui ero molto poco incline e di cui sapevo ben poco.*

*Alla mia correlatrice Alessandra Chiappini per avermi accompagnato in questo percorso di stesura con estrema disponibilità e gentilezza.*

*A mamma e babbo per avermi sempre messo al primo posto e per avermi insegnato che la resa non è contemplabile, che il duro lavoro ripaga e che insieme si è più forti.*

*A mio fratello Enrico per avermi spronato nei periodi più bui e per avermi fatto capire che, anche quando tutto sembra certo, c'è sempre una controparte pronta a farti ricredere.*

*A zia Laura, Lucia, Luca e Paolo per avermi fatto sempre sentire speciale e insegnato che la vita va comunque avanti, nonostante tutto, nonostante tutti.*

*A zio Mauro e nonna Valeria, vi porto nel cuore, siete i custodi della mia infanzia e l'infanzia ha sempre un filo conduttore con il futuro.*

*A Davide, Michele, Edoardo, Federico per la vostra fedeltà e semplicemente per rispettare la definizione di "amico".*

*A tutto il gruppo RP per le risate, le avventure, le esperienze e anche le litigate fatte insieme, la socialità salva la vita.*

*A Francesco, Riccardo, Noemi e Lorenzo per avermi facilitato il percorso di studio negli ultimi anni grazie alle risate e ai ragionamenti fatti nelle aule di Ingegneria, vi porto dentro.*

*A Marco, Jessica e tutti i colleghi di lavoro avuti in questi anni per avermi fatto capire che siamo fortunati, anche quando tutto sta andando storto.*

*A Ivan per la fiducia dimostratami e per avermi fatto avvicinare al lavoro reale di ingegnere.*

*A Greta per avere più fiducia in me di quanta io ne abbia in me stesso, per essere la miglior compagnia di viaggio che io possa desiderare, per colorare la mia vita.*

*A Tommaso, abbi coraggio!*