



**UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTÀ DI INGEGNERIA EDILE**

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura

---

**Valutazione dell'impatto di coperture a differente albedo sul  
microclima urbano mediante simulazioni parametriche alla  
meso-scala**

---

Assessment of the impact of roof coverings with different albedo  
on the urban microclimate using parametric meso-scale  
simulations

Relatrice:  
Prof.ssa Elisa Di Giuseppe

Tesi di laurea di:  
Rebecca Michelini

Correlatore:  
Prof. Marco D'Orazio



# SOMMARIO

1. INTRODUZIONE.....	1
2. STATO DELL'ARTE.....	5
2.1. Cambiamento Climatico e Isola di Calore Urbano .....	5
2.2. Metodologia per analisi della letteratura.....	7
2.3. Valutazione dei risultati dell'analisi della letteratura .....	11
2.4. Considerazioni generali dall'analisi della letteratura .....	21
3. FASI E METODI.....	25
3.1. Fasi.....	25
3.2. Urban Weather Generator e le simulazioni .....	26
3.3. Le zone climatiche locali .....	27
3.4. Modelli di scambio di calore e città d'interesse .....	28
3.5. Altri parametri di interesse per le simulazioni .....	30
4. RISULTATI .....	32
4.1. Risultati con trasmittanza $U = 0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ .....	32
4.2. Risultati con trasmittanza $U = 0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ .....	47
4.3. Confronto tra i risultati con diversa trasmittanza .....	60
5. CONCLUSIONI.....	63
BIBLIOGRAFIA.....	65
APPENDICE.....	I

# INDICE DELLE FIGURE

Figura 1. I 17 obiettivi per lo sviluppo sostenibile[3].....	6
Figura 2. Diagramma delle parole chiave.....	8
Figura 3. "urban heat island" - produzione scientifica annua.....	9
Figura 4. "urban heat island" - Area di ricerca.....	9
Figura 5. Diagramma software .....	12

Figura 6. Diagramma classificazione Koppen Geiger .....	13
Figura 7. Aree climatiche - classificazione Koppen Geiger.....	14
Figura 8. Schema dei parametri di ricerca .....	16
Figura 9. Istogramma aree climatiche-riduzione della temperatura [°C] per i tetti freddi.....	17
Figura 10. Diagramma dispersivo variazione albedo-riduzione temperatura per i tetti freddi .....	18
Figura 11. Istogramma aree climatiche-riduzione della temperatura per tetti verdi .....	19
Figura 12. Istogramma aree climatiche-riduzione della temperatura per tetti verdi e freddi.....	20
Figura 13. Schema esplicativo -tetti ventilati .....	23
Figura 14.LCZ classificazione.....	27
Figura 15. Schema di funzionamento del software: input- output .....	28
Figura 16. Schema dei diversi modelli di scambio termico: UBL e UCL.....	29
Figura 17. Distribuzione delle LCZ nelle due città di interesse: Reggio Emilia e Rotterdam .....	30
Figura 18. Parametri di input caratteristici per le diverse tipologie di tetti .....	30
Figura 19. Temperature superficiali del manto: Reggio Emilia- LCZ2.....	33
Figura 20. Temperature superficiali del manto: Reggio Emilia - LCZ6.....	34
Figura 21. Temperature superficiali del manto: Rotterdam - LCZ2 .....	34
Figura 22. Temperature superficiali del manto: Rotterdam - LCZ6.....	35
Figura 23. Accumulo di calore entrante: Reggio Emilia – LCZ2.....	38
Figura 24. Accumulo di calore entrante: Reggio Emilia - LCZ6 .....	38
Figura 25. Accumulo di calore entrante: Rotterdam – LCZ2.....	39
Figura 26. Accumulo di calore entrante: Rotterdam – LCZ6.....	39
Figura 27. Calore uscente HVAC: Reggio Emilia – LCZ2 .....	41
Figura 28. Calore uscente HVAC: Reggio Emilia – LCZ6 .....	42

Figura 29. Calore uscente HVAC: Rotterdam– LCZ2 .....	42
Figura 30. Calore uscente HVAC: Rotterdam– LCZ6 .....	43
Figura 31. Temperatura dell'aria: Reggio Emilia - LCZ2 .....	45
Figura 32. Temperatura dell'aria: Reggio Emilia - LCZ6 .....	45
Figura 33. Temperatura dell'aria: Rotterdam - LCZ2.....	46
Figura 34. Temperatura dell'aria: Rotterdam - LCZ6.....	46
Figura 35. Temperature superficiali del manto: Reggio Emilia - LCZ2.....	47
Figura 36. Temperature superficiali del manto: Reggio Emilia - LCZ6.....	48
Figura 37. Temperature superficiali del manto: Rotterdam - LCZ2 .....	48
Figura 38. Temperature superficiali del manto: Rotterdam – LCZ6 .....	49
Figura 39. Accumulo di calore entrante: Reggio Emilia - LCZ2 .....	52
Figura 40. Accumulo di calore entrante: Reggio Emilia - LCZ6 .....	52
Figura 41. Accumulo di calore entrante: Rotterdam - LCZ2 .....	53
Figura 42. Accumulo di calore entrante: Rotterdam - LCZ6 .....	53
Figura 43. Calore uscente HVAC: Reggio Emilia - LCZ2.....	55
Figura 44. Calore uscente HVAC: Reggio Emilia - LCZ6.....	56
Figura 45. Calore uscente HVAC: Rotterdam – LCZ2 .....	56
Figura 46. Calore uscente HVAC: Rotterdam - LCZ6.....	57
Figura 47. Temperatura dell'aria: Reggio Emilia - LCZ2 .....	58
Figura 48. Temperatura dell'aria: Reggio Emilia - LCZ6 .....	59
Figura 49. Temperatura dell'aria: Rotterdam - LCZ2.....	59
Figura 50. Temperatura dell'aria: Rotterdam - LCZ6.....	60

## **INDICE DELLE TABELLE**

Tabella 1. keywords-risutati in ScienceDirect ..... 10

Tabella 2. Risultati dall'analisi della letteratura - case study..... I

# 1. INTRODUZIONE

Il surriscaldamento globale, noto anche come cambiamento climatico, si riferisce all'aumento graduale delle temperature medie della Terra a causa dell'accumulo di gas serra nell'atmosfera. I gas serra, come il biossido di carbonio (CO<sub>2</sub>) e il metano (CH<sub>4</sub>), trattengono il calore del sole nella nostra atmosfera, causando un aumento delle temperature globali. Questo fenomeno ha molteplici effetti sul clima, tra cui l'innalzamento del livello del mare, l'acidificazione degli oceani e il cambiamento di modelli meteorologici.

Il surriscaldamento globale influenza un altro fenomeno che è quello dell'isola di calore urbano. Questo è dovuto al fatto che le temperature medie globali in aumento contribuiscono a rendere le ondate di calore più intense e prolungate, aumentando quindi il rischio di eventi climatici estremi nelle città.

Con il termine “Isola di Calore Urbano” (ICU) si identifica un fenomeno microclimatico che si verifica nei centri urbani, soprattutto d'estate, e determina un surriscaldamento locale e concentrato, caratterizzato da una differenza di temperatura di circa 4°/5°C rispetto alle zone rurali circostanti.

L'ICU è determinato da diversi fattori legati ad una forte urbanizzazione: la riduzione delle aree verdi, superfici pavimentate con asfalto, limitazione della traspirazione dei terreni, incremento del traffico urbano con conseguente aumento delle emissioni di gas serra.

Per limitare tale fenomeno è possibile attuare diverse strategie, come ad esempio interventi sul piano urbanistico, rifacimento delle pavimentazioni in modo che siano più drenanti, riconfigurazione delle strutture al fine di inserire superfici riflettenti, ecc...

Tra le varie soluzioni, quelle più efficaci risultano essere l'installazione dei cosiddetti “tetti verdi” e “tetti freddi”.

Tali strategie risultano particolarmente vincenti perché non solo contribuiscono all'attenuazione del fenomeno dell'Isola di calore, ma favoriscono l'assorbimento, l'evaporazione e la riduzione di fattori inquinanti come le polveri sottili e permettono alla società di guadagnare ulteriori spazi verdi dal notevole impatto estetico e psicologico.

Stanno però emergendo anche altre soluzioni di tetti “raffrescanti” grazie alla ventilazione sottomanto. Queste soluzioni vengono definite tecnologie di “raffrescamento passivo” per gli

edifici. In questo modo è possibile abbattere le temperature dell'involucro degli edifici (tetti e pareti) e di conseguenza dell'aria circostante. In aggiunta questo permette di mantenere l'ambiente più fresco, riducendo la richiesta di energia dal raffreddamento artificiale. Anche questo ultimo aspetto permette di limitare il fenomeno dell'Urban Heat Island.

Tra le soluzioni di raffreddamento passivo per gli edifici, l'utilizzo di tetti ventilati e permeabili (Ventilated and Permeable Roofs, VPR) emerge come l'opzione più sostenibile e promettente.

In particolare, le "HEROTILES," sviluppate nel contesto del progetto precedente LIFE HEROTILE [1], dimostrano una capacità di raffreddamento superiore rispetto ad altre tecnologie per i tetti. Tuttavia, per promuovere efficacemente l'adozione diffusa di tetti VPR e del "tetto basato su tegole HEROTILE" (HBR), ci sono alcune sfide legate a fattori politici, legislativi e di sensibilizzazione da affrontare. Queste sfide derivano principalmente da due fattori chiave quali le barriere legislative e le barriere culturali.

È importante affrontare le barriere normative e legislative che possono ostacolare l'adozione di tali tecnologie. Questo potrebbe includere la necessità di aggiornare i regolamenti edilizi o di introdurre incentivi per l'installazione di tetti VPR e HBR.

Allo stesso tempo, è fondamentale aumentare la consapevolezza e l'educazione sulla sostenibilità delle tecnologie dei tetti VPR e HBR sia tra i professionisti dell'edilizia che tra il pubblico in generale. La sensibilizzazione può contribuire a generare interesse e adozione di queste soluzioni innovative.

In sintesi, mentre le tecnologie dei tetti VPR e le HEROTILES offrono vantaggi significativi per il raffreddamento passivo degli edifici e la mitigazione dell'effetto isola di calore urbano, è necessario superare sfide politiche e di sensibilizzazione per diffonderle in modo efficace.

Per riuscire a studiare in maniera completa tutte le tecniche risolutive al problema dell'isola di calore, è stato deciso di condurre un'approfondita analisi della letteratura scientifica. Tale analisi ha permesso di evidenziare le notevoli performance e i vantaggi apportati dall'applicazione dei tetti verdi rispetto alle varie tipologie di coperture, persino dei sopracitati tetti freddi.

A dimostrazione di quanto riscontrato già in fase di analisi di letteratura, si è deciso di aggiungere dei casi applicativi che potessero supportare con valori numerici quanto confermato dalla ricerca scientifica. I casi applicativi riguardano l'efficacia e l'efficienza dell'installazione di diversi manti



di copertura quali tetti verdi, tetti freddi, tetti in guaina impermeabilizzante, tetti metallici e tetti con tegole in laterizio con forma aereodinamica.

L'obiettivo di questo lavoro di tesi, dal titolo "Valutazione dell'impatto di coperture a differente albedo sul microclima urbano mediante simulazioni parametriche alla meso-scala", è quello di evidenziare le principali differenze e similitudini nell'utilizzo delle diverse tecniche di riduzione dell'impatto dell'Isola di Calore Urbano.

Tra i parametri che influenzeranno la valutazione sulla bontà delle varie tecniche ci sono la variazione della temperatura superficiale della struttura, il guadagno termico interno, e la dispersione di calore generato dall'impianto di climatizzazione.

Nel Capitolo 2 - "Stato dell'Arte" sono stati inquadrati in maniera generale il problema relativo al fenomeno dell'Isola di Calore e la sua correlazione con le diverse strategie per il suo contenimento, portando l'attenzione sui tetti verdi e tetti freddi nelle varie zone climatiche.

A tale scopo, è stata condotta una rassegna degli articoli scientifici sul tema, che hanno contribuito a mostrare l'impatto di alcune tipologie di coperture sul fenomeno.

Nel capitolo 3 - "Fasi e metodi" vengono illustrate le differenti simulazioni realizzate tramite software UWG con relativi parametri per lo studio: tipologie di tetti e proprietà, morfologia urbana, città-studio e modelli di scambio di calore urbano.

Nel capitolo 4 - "Risultati" vengono analizzati e spiegati tutti i risultati ottenuti dalle diverse simulazioni condotte.

In fine il capitolo 5 - "Conclusioni", raccoglie i risultati più rilevanti nella risoluzione del fenomeno dell'Isola di Calore Urbano.



## 2. STATO DELL'ARTE

### 2.1. Cambiamento Climatico e Isola di Calore Urbano

Il cambiamento climatico è uno degli aspetti più critici del nostro tempo che coinvolge e influenza su scala globale la vita quotidiana. Gli effetti di tale fenomeno sono già visibili e impattano sulla vita umana, sull'agricoltura, sulla biodiversità e sull'ambiente in generale. L'innalzamento del livello del mare, l'aumento delle temperature medie, la perdita di biodiversità, eventi meteorologici estremi sempre più frequenti, sono solo alcuni degli effetti con cui questo fenomeno si sta manifestando.

La comunità scientifica internazionale concorda sul fatto che le attività umane sono la principale causa dell'intensificazione e inasprimento del cosiddetto "climate change".

Per evitare che le conseguenze diventino sempre più gravi e con effetti irreversibili, è necessario intervenire sulle attività legate all'uso dei combustibili fossili, produzione dei gas serra, deforestazione, eccessivo sfruttamento delle risorse primarie.

L'Unione Europea ha stabilito tra i suoi obiettivi quello di guidare una lotta contro il cambiamento climatico e per farlo ha adottato politiche e regolamentazioni per ridurre le emissioni di gas serra e incentivare la transizione verso uno sviluppo a basse emissioni di carbonio, principale fattore dell'effetto serra e del conseguente cambiamento climatico. L'UE si impegna a ridurre le sue emissioni di gas serra del 55% entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990, con il fine di raggiungere la neutralità climatica entro il 2050. Ad oggi tale strategia ha portato, nel 2021, a raggiungere una diminuzione del 24% delle emissioni di gas serra rispetto al 1990.

Anche l'Organizzazione delle Nazioni Unite (ONU) si focalizza nella lotta alle emissioni di gas serra, attuando una serie di leggi e convenzioni sui cambiamenti climatici. Tra i principali accordi stipulati tra gli stati membri dell'ONU, è presente l'Accordo di Parigi il quale, a livello internazionale, mira a limitare il riscaldamento globale al di sotto dei 2°C rispetto ai livelli preindustriali, cercando di raggiungere un massimo di 1,5°C.

L'accordo è stato adottato nel 2015, è entrato in vigore nel 2016 e ha coinvolto 125 stati compresa l'Italia [2]. Anche l'Italia si è impegnata nella stesura di nuove leggi a vantaggio della sostenibilità ambientale:

- Legge n. 205/2017 (Legge di Bilancio 2018): questa legge ha fissato l'obiettivo per l'Italia di ridurre le emissioni di gas serra del 43% entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990.
- Legge n. 199/2021 (Legge di Bilancio 2022): questa legge ha fissato l'obiettivo per l'Italia di raggiungere la neutralità climatica entro il 2050.

L'Italia ha inoltre aderito alla “2030 Agenda for Sustainable Development” nel 2016: tale documento stabilisce un piano comune per la prosperità e la pace delle persone e del pianeta. Aderire a questa iniziativa comporta l’impegno nel raggiungimento dei 17 obiettivi di Sviluppo Sostenibile.



Figura 1. I 17 obiettivi per lo sviluppo sostenibile[3]

In particolare, l’obiettivo di sviluppo sostenibile N°11 della Figura 1 si concentra sul rendere le città sicure, resilienti, inclusive e sostenibili, concentrandosi sul mantenimento del microclima e evitando il cambiamento climatico. In particolare, i targets 11.3 e 11.7 hanno come obiettivo quello di rendere le aree urbane più salutarie, più verdi e più sostenibili per gli insediamenti umani. Nello specifico, il target 11.7 evidenzia l’importanza della riduzione dell’Isola di Calore Urbano.

La correlazione tra il cambiamento climatico e l'effetto isola di calore rappresenta un aspetto critico della sfida globale legata all'adattamento ai cambiamenti ambientali. L'isola di calore urbana si verifica quando le aree urbane registrano temperature significativamente più elevate rispetto alle

zone circostanti, a causa dell'assorbimento e della ritenzione del calore da parte dei materiali urbani, nonché delle attività umane.

Questo fenomeno è strettamente collegato all'incremento delle temperature globali causato dal cambiamento climatico.

Studi come quello condotto da Oke et al. [4] hanno dimostrato che il cambiamento climatico può amplificare l'intensità delle isole di calore nelle città, mettendo a rischio la salute e il benessere delle popolazioni urbane. Pertanto, è cruciale comprendere questa correlazione per sviluppare strategie di adattamento e mitigazione efficaci in un mondo sempre più urbanizzato e influenzato dal cambiamento climatico.

L'isola di calore urbano, conosciuta anche come “Urban Heat Island” (UHI), si riferisce a una zona o un'area all'interno di un ambiente urbano che è significativamente più calda delle aree circostanti rurali o meno sviluppate.

Questo fenomeno è causato principalmente dall'urbanizzazione e dalla densità degli edifici, dai materiali da costruzione, dalla mancanza di vegetazione e dall'attività umana nelle aree urbane. L'isola di calore urbano può comportare temperature più elevate sia di giorno che di notte rispetto alle zone circostanti e può influenzare notevolmente il clima locale.

Nel paragrafo successivo verranno investigate le principali cause del fenomeno dell'Isola di Calore Urbano, le strategie più diffuse per limitarne gli effetti e i benefici apportati dall'utilizzo dei cosiddetti “tetti verdi” e “tetti freddi” in contesto urbanistico.

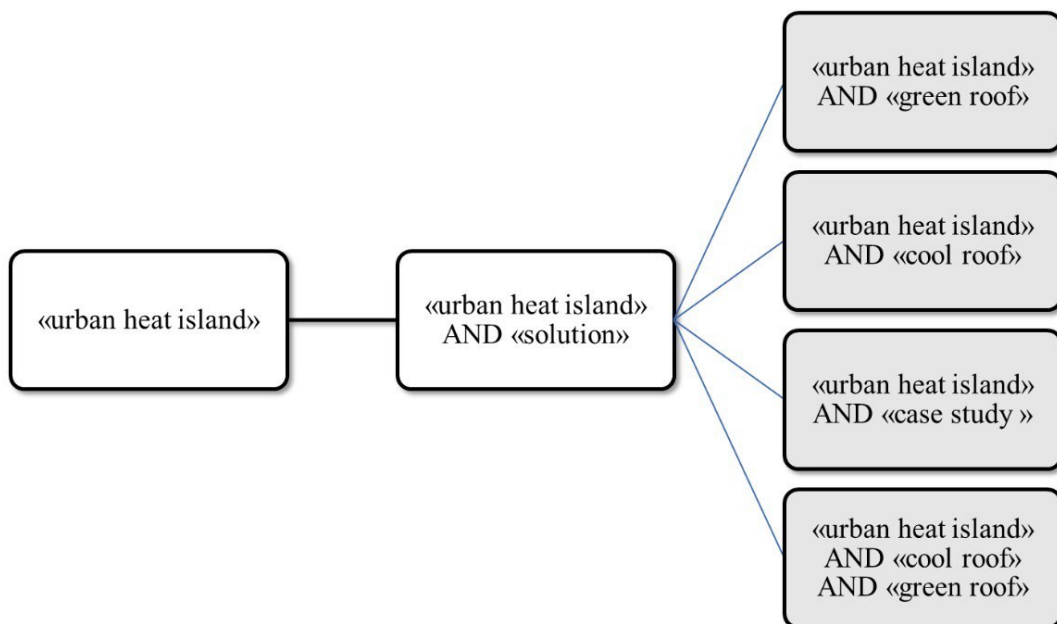
## 2.2. Metodologia per analisi della letteratura

L'analisi della letteratura presentata in questo lavoro di tesi è stata realizzata avvalendosi del database online ScienceDirect. In tale database è possibile ricercare tra articoli, riviste e capitoli di libri scientifici gli argomenti di interesse tramite keywords specifiche.

Nel nostro caso è stato deciso di inserire diverse parole chiave a mano a mano sempre più specifiche, in modo tale da restringere il campo di ricerca e riuscire a ottenere i risultati più significativi per il nostro lavoro.

Lo schema generale di ricerca è mostrato in Figura 2. Come detto in precedenza, le chiavi di ricerca cercano di ridurre progressivamente il numero di risultati in modo tale da rendere sempre più specifica la nostra ricerca.

Gli articoli riportati nel lavoro di tesi sono stati individuati attraverso questa crescente selezione.



*Figura 2. Diagramma delle parole chiave*

La prima chiave inserita nel database ScienceDirect è stata “urban heat island” ovvero “isola di calore urbano”. Tale ricerca ha prodotto 13.002 risultati. Analizzando le caratteristiche di questi risultati è stato possibile notare una tendenza crescente rispetto al tema dell’isola di calore urbano.

In particolare, in Figura 3, è possibile notare che nel periodo tra il 2015/2016 si inizia a sviluppare un quantitativo significativo di articoli scientifici relativi a questo tema. Questo improvviso aumento di interesse nei confronti dell’argomento può essere giustificato considerando il panorama politico internazionale in relazione alle normative per il contenimento del cambiamento climatico. Infatti, nel 12 dicembre 2015 viene adottato l’accordo di Parigi, il quale è entrato in vigore il 4 novembre 2016.[2]

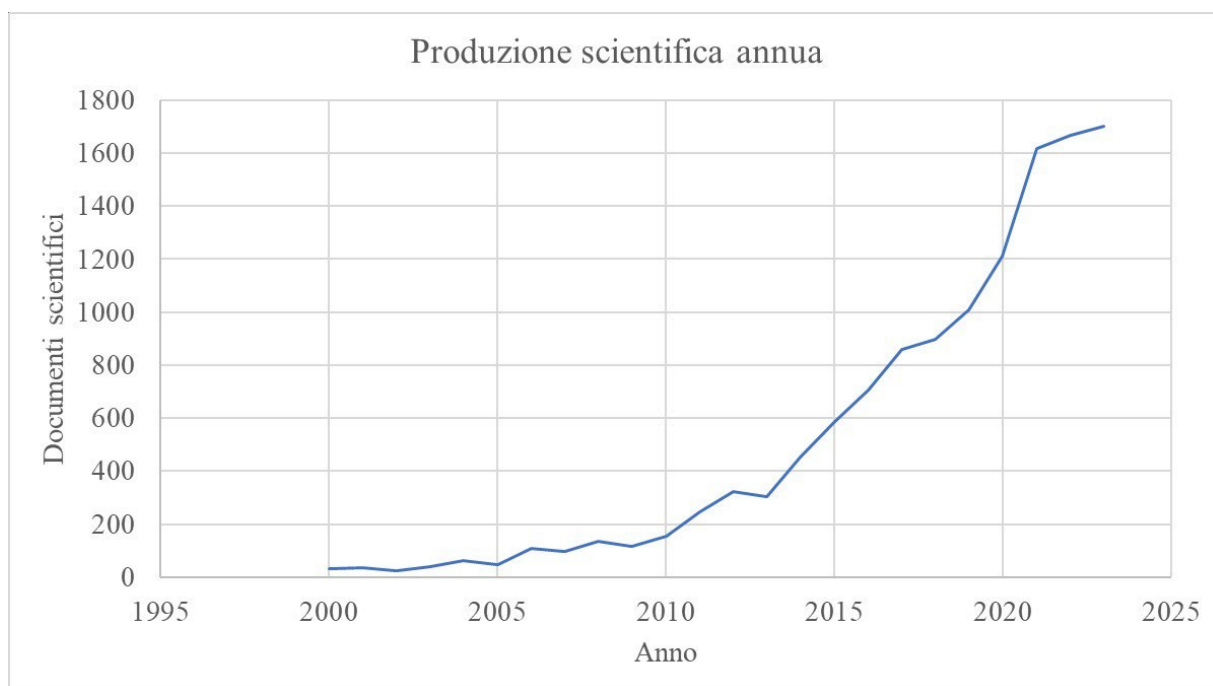


Figura 3. "urban heat island" - produzione scientifica annua

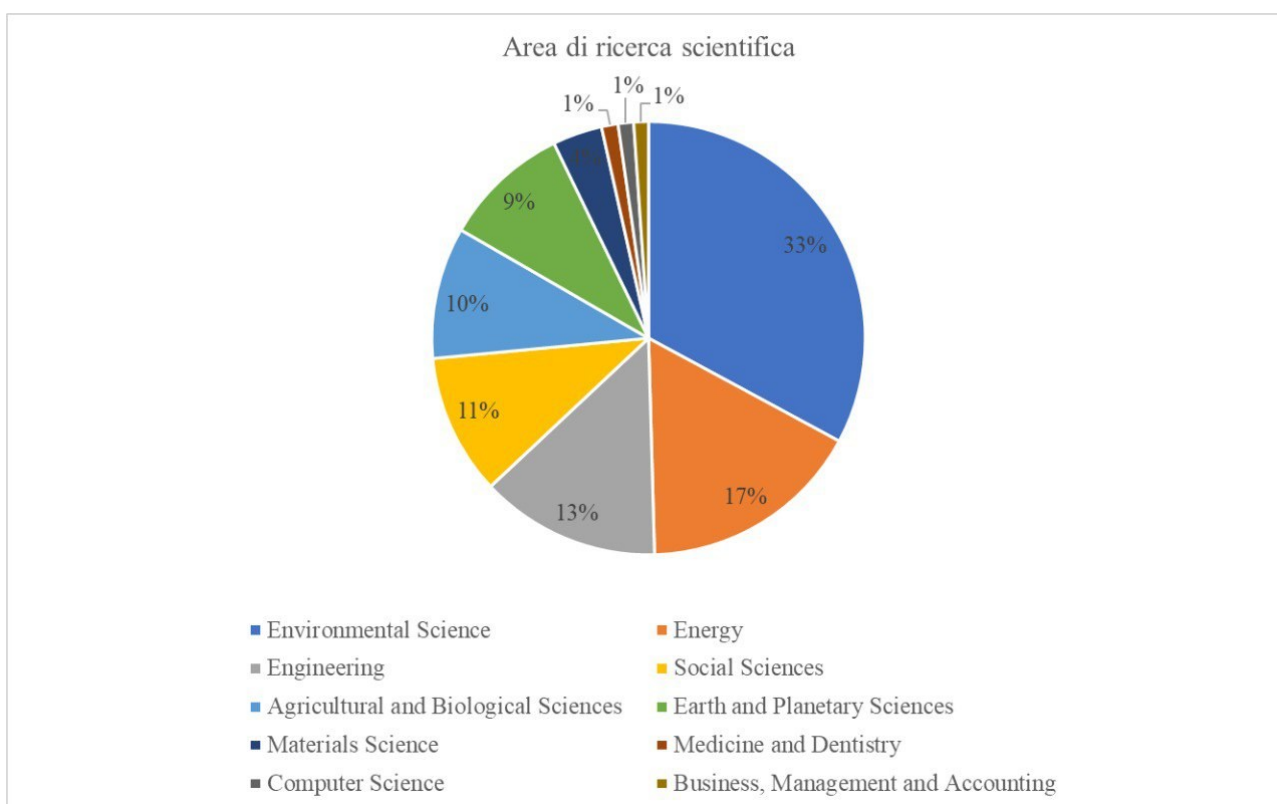


Figura 4. "urban heat island" - Area di ricerca

In aggiunta, continuando a valutare i risultati della chiave di ricerca “urban heat island”, è possibile notare come questo tema non coinvolga solo il settore delle scienze ambientali e ingegneristiche, ma anche il settore sociale e medico. Infatti, come è possibile vedere nella Figura 4, le aree di ricerca sono molteplici e comprendono diversi aspetti che influenzano la vita delle persone e dell’ambiente.

Per cercare di focalizzare l’attenzione su un ambito più specifico sono state aggiunte delle parole chiave rispetto a quella principale. In particolare, siamo andati a ricercare quali potessero essere le principali soluzioni al problema di Isola di Calore Urbano. Pertanto, è stata utilizzata la chiave di ricerca “urban heat island” AND “solution”. Con tale chiave è stato possibile ottenere 6.009 risultati. Da una prima lettura di alcuni articoli, tra quelli risultanti, è stato possibile valutare che le principali soluzioni adottate sono di tre tipologie: intervento sulle pavimentazioni urbane, incremento di aree verdi o riconfigurazione delle coperture degli edifici.

Nel nostro caso ci siamo concentrati sullo studio di quest’ultima soluzione, andando a focalizzare la nostra ricerca con le seguenti chiavi: “urban heat island” AND “case study”, “urban heat island” AND “green roof”, “urban heat island” AND “cool roof” e “urban heat island” AND “green roof” AND “cool roof”.

I risultati ottenuti sono riportati nella Tabella 1 sottostante.

*Tabella 1. keywords-risultati in ScienceDirect*

<b>Keywords</b>	<b>Risultati</b>
“urban heat island” AND “case study”	4.752
“urban heat island” AND “green roof”	2529
“urban heat island” AND “cool roof”	972
“urban heat island” AND “green roof” AND “cool roof”	522

Da una lettura degli abstract è stato possibile selezionare alcuni articoli ritenuti più significativi per la nostra ricerca.

Inoltre, per restringere ulteriormente la ricerca, sono stati scelti articoli che riportassero casi di simulazione analitica in varie condizioni.



Gli articoli selezionati mettono in luce le principali soluzioni adottate per il contenimento e la riduzione del fenomeno dell'Isola di Calore Urbano, ponendo l'accento sulle soluzioni di "tetti verdi" e "tetti freddi" e portando come esempi esplicativi dei casi studio presenti in letteratura.

### 2.3. Valutazione dei risultati dell'analisi della letteratura

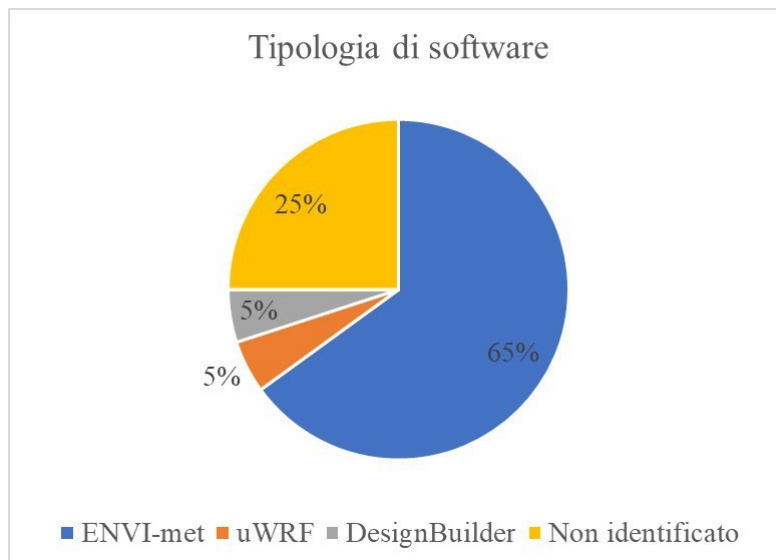
Dallo studio dei risultati prodotti dalla ricerca bibliografica, è stato possibile selezionare solo gli articoli rilevanti che presentavano le seguenti informazioni:

- Identificazione della città: parametro che ci permette di individuare la collocazione del caso studio
- Zona climatica: assegnata secondo la classificazione Koppen Geiger, questo parametro permette di capire la fascia climatica di appartenenza
- Area urbana: questa caratteristica della città indica la morfologia e la densità edilizia
- Software di simulazione: identificazione del software per valutare l'impatto dell'applicazione delle soluzioni di contenimento dell'Isola di Calore Urbano
- Periodo di simulazione: intervallo di tempo individuato per l'acquisizione dei parametri
- Altezza del recettore: viene misurato in metri ed indica l'altezza a cui viene estrapolato l'output delle simulazioni climatiche.

Questi parametri risultano essere fondamentali per realizzare uno studio incentrato sulla comparazione dei risultati ottenuti confrontando l'impatto di diverse tipologie di copertura sull'Isola di Calore Urbano e il suo contenimento e/o riduzione.

Gli articoli selezionati sono riportati nella tabella in Appendice.

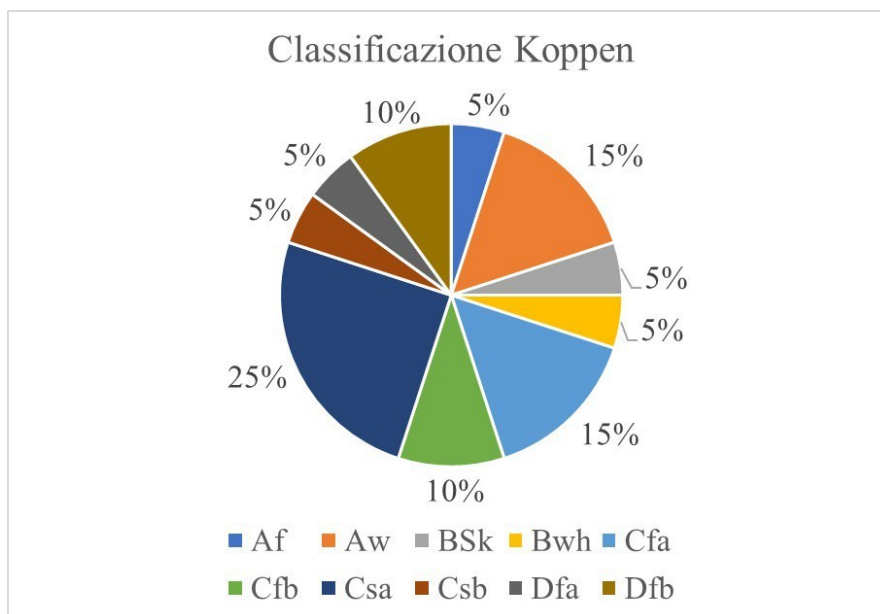
Di seguito, vengono riportati due grafici riguardanti la tipologia di software più usate (Figura 5) e le classificazioni Koppen Geiger, più comuni (Figura 6).



*Figura 5. Diagramma software*

Di seguito viene riportata una breve descrizione dei tre software menzionati nel grafico precedente:

- ENVI-met: è un software di modellazione utilizzato principalmente per simulare e analizzare l'ambiente termico e atmosferico all'interno degli spazi urbani/spazi verdi. È ampiamente utilizzato per valutare l'impatto delle condizioni meteorologiche e delle caratteristiche urbane sulla temperatura, l'umidità, il flusso d'aria e altre variabili ambientali. ENVI-met è spesso impiegato nella progettazione urbana e nella pianificazione del paesaggio per migliorare la sostenibilità e il comfort termico delle aree urbane.[5]
- uWRF: L'acronimo sta per "Weather Research and Forecasting Model", ed è una versione adattata del modello WRF (Weather Research and Forecasting) utilizzata per simulazioni meteorologiche a scala urbana. Questo software consente di eseguire simulazioni atmosferiche ad alta risoluzione per aree urbane specifiche, fornendo previsioni meteorologiche più dettagliate e accurate per tali zone. È prezioso per la comprensione delle condizioni meteorologiche locali e per la gestione dei rischi legati al clima in ambito urbano.[6]
- DesignBuilder: è un software di progettazione energetica ed edilizia utilizzato nella progettazione sostenibile di edifici. Questo strumento consente agli architetti e agli ingegneri di simulare le prestazioni energetiche degli edifici, valutando l'efficienza energetica, l'illuminazione naturale, il comfort termico e altri aspetti ambientali. Con DesignBuilder, è possibile ottimizzare la progettazione degli edifici per ridurre i consumi energetici e le emissioni di carbonio, contribuendo così a edifici più ecologici e sostenibili.[7]



*Figura 6. Diagramma classificazione Koppen Geiger*

Nel nostro caso, la maggior parte degli articoli scelti riportano casi appartenenti alla zona climatica Csa e Cfa.

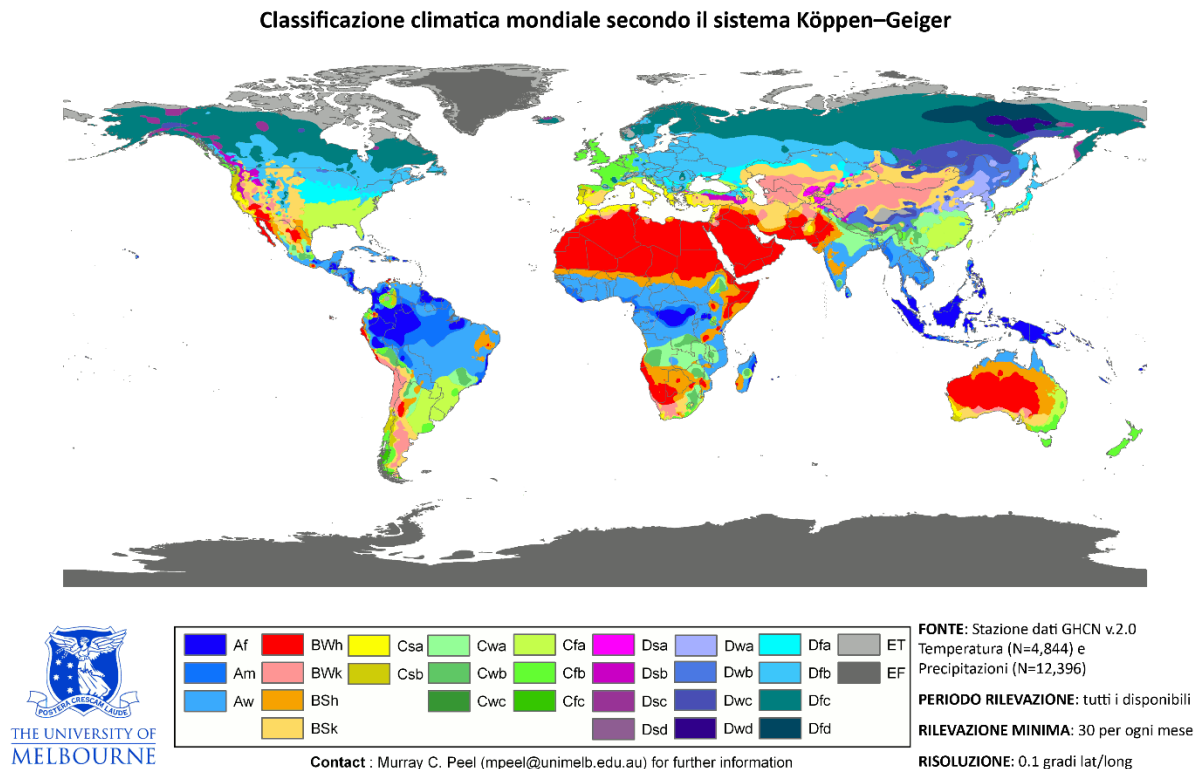
Le aree geografiche appartenenti alla classe Cfa sono caratterizzate da un clima subtropicale umido: la temperatura media mensile più fredda registrata nell'anno risulta inferiore a 18°C, la temperatura media mensile più calda registrata nell'anno è superiore a 22°C e le precipitazioni sono distribuite uniformemente durante tutto l'anno, con il minimo mensile registrato nella stagione invernale.

Fanno parte della Cfa le regioni costiere delle zone temperate, come la costa orientale degli Stati Uniti (e.g. la Florida) e parti dell'Asia orientale (e.g. il sud della Cina).

Le aree geografiche appartenenti alla classe Csa sono caratterizzate da un clima mediterraneo, che implica estati calde e secche e inverni miti e umidi. La temperatura media mensile più fredda registrata nell'anno è superiore a 0°C ma inferiore a 18°C, la temperatura media mensile più calda registrata nell'anno è superiore a 22°C. Inoltre, vi è una forte stagionalità delle precipitazioni, con una maggiore concentrazione delle piogge durante l'inverno. Appartengono a questa classe

climatica, le regioni costiere mediterranee, la costa della California negli Stati Uniti e alcune parti del Cile e dell'Australia.

Le città che appartengono alle zone climatiche Cfa e Csa hanno in comune il fatto che sono caratterizzate da estati calde. Per questo motivo, la maggior parte degli studi, che hanno lo scopo di mitigare il fenomeno di Isola di Calore Urbano, vengono condotti in queste due zone.



*Figura 7. Aree climatiche - classificazione Koppen Geiger*

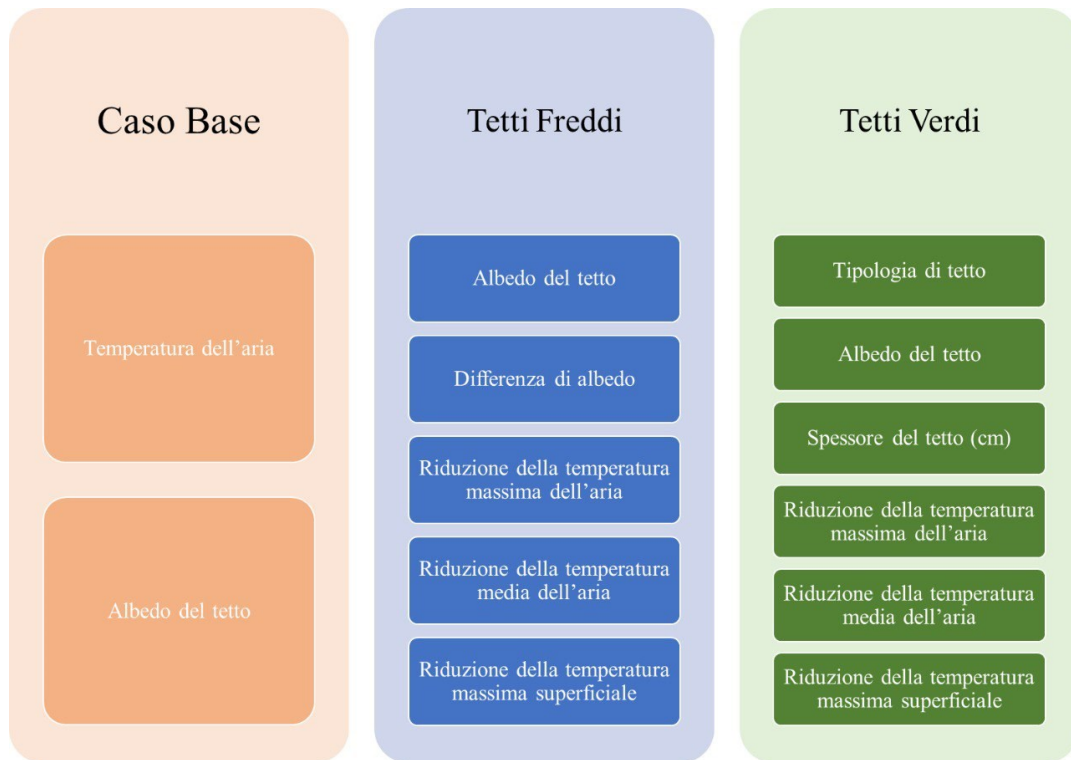
La classificazione Koppen Geiger è un sistema utilizzato per classificare i climi terrestri in base a criteri climatici e divide i climi in diverse categorie principali, ciascuna identificata da una lettera maiuscola. Le categorie principali sono suddivise ulteriormente in sottocategorie identificate da una lettera minuscola e includono:

- Climi tropicali (Categoria A): Questi climi sono caratterizzati da temperature calde tutto l'anno e precipitazioni abbondanti. Le sottocategorie includono il clima equatoriale (Af), il clima monsonico (Am), e altri.
- Climi secchi (Categoria B): Questi climi sono caratterizzati da precipitazioni limitate. Le sottocategorie includono il clima desertico (BWh, BWk) e il clima steppico (BSk, BSh).

- Climi temperati (Categoria C): Questi climi hanno temperature moderate e sono suddivisi ulteriormente in climi con estati calde (Cfa, Cwa), climi con estati fresche (Cfb, Cwb), e altri.
- Climi freddi (Categoria D): Questi climi hanno inverni freddi e temperature medie annuali basse. Le sottocategorie includono il clima subartico (Dfc, Dwc) e il clima polare (ET, EF).
- Climi di alta montagna (Categoria H): Questa categoria è utilizzata per climi che si trovano ad altitudini elevate, come nelle regioni montuose. Questi climi possono variare notevolmente in base all'altitudine e alla posizione geografica.
- Climi asciutti (Categoria E): Questa categoria è utilizzata per aree con condizioni climatiche particolari, come i climi ad alta pressione subtropicale (Es) e i climi polari continentali (E).
- Climi tropicali umidi (Categoria F): Questa categoria è utilizzata per i climi tropicali con un breve periodo secco durante l'anno, come il clima monsonico (Aw).

Per ogni caso studio selezionato con i criteri prima citati, sono stati individuati i parametri relativi a: temperatura dell'aria e albedo del tetto per il caso base; albedo del tetto, la differenza di albedo, la riduzione di temperatura massima dell'aria, la riduzione di temperatura media dell'aria e la riduzione della temperatura superficiale per il caso dei tetti freddi; tipologia di tetto, albedo del tetto, spessore del tetto, la differenza di albedo, la riduzione di temperatura massima dell'aria, la riduzione di temperatura media dell'aria e la riduzione della temperatura superficiale per il caso dei tetti verdi.

Lo schema dei parametri di ricerca è riportato di seguito, in Figura 8.



*Figura 8. Schema dei parametri di ricerca*

L'albedo è una grandezza fisica che rappresenta la riflettanza di una superficie, ovvero la capacità di una superficie di riflettere la luce solare anziché assorbirla. Viene misurata su una scala da 0 a 1, dove 0 rappresenta una superficie che assorbe tutta la luce incidente e 1 rappresenta una superficie che la riflette completamente.

Una volta completata la tabella schematizzata in Figura 8 (Tabella - APPENDICE), è possibile utilizzare i dati ricavati per realizzare dei grafici esplicativi della correlazione tra:

- le varie aree climatiche e relativa riduzione della temperatura dell'aria, differenziando tra la soluzione dei tetti verdi (Figura 11) e tetti freddi (Figura 9);
- la differenza di albedo dei tetti e la relativa riduzione di temperatura, per la soluzione tetti freddi (Figura 10)

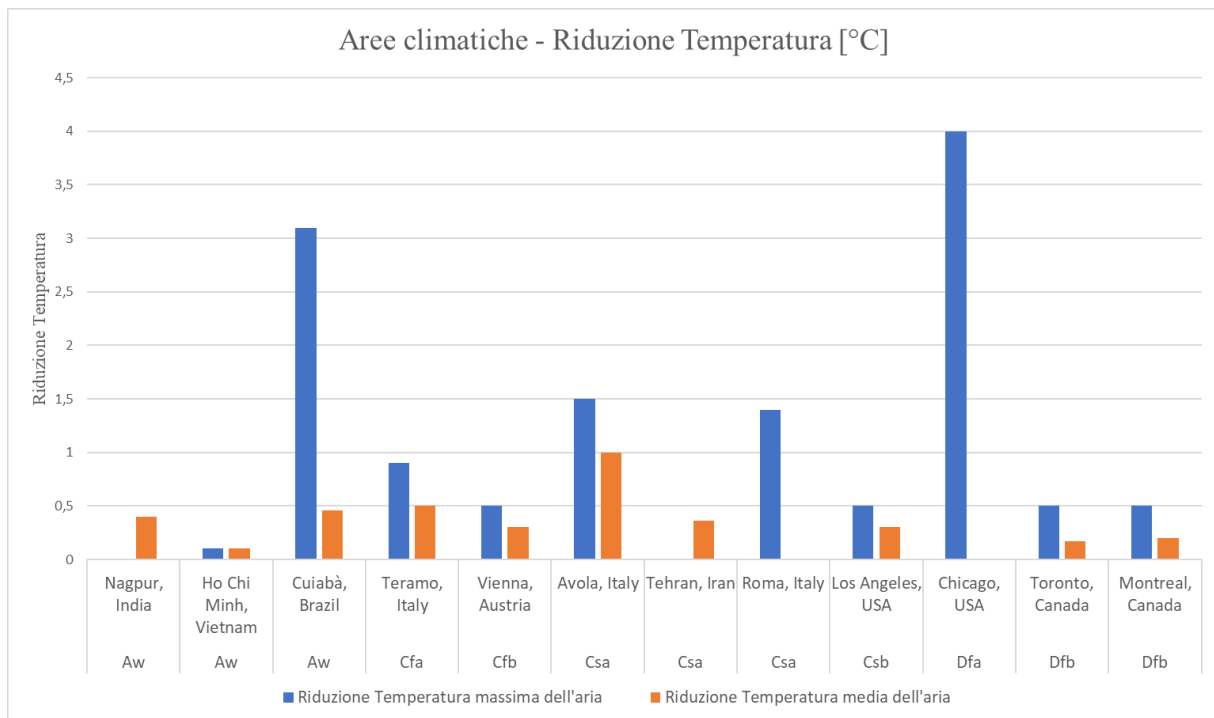


Figura 9. Istogramma aree climatiche-riduzione della temperatura [°C] per i tetti freddi

Per quanto riguarda l'applicazione dei tetti freddi, si è messo in correlazione la riduzione di temperatura e le aree climatiche. Dall'Istogramma si può notare che a seguito dell'applicazione di questa tipologia di copertura, si registra una diminuzione della temperatura massima dell'aria superiore a 0,5°C per ciascuna fascia climatica, con picchi di 3,2 °C e 4 °C per le città di Cuiabà in Brasile e Chicago negli Stati Uniti.

Queste due diminuzioni sono particolarmente significative:

- per la zona di Cuiabà: la sua fascia climatica Aw, indica un clima tropicale in cui le temperature medie sono molto elevate; una riduzione di temperatura massima renderebbe l'ambiente più vivibile per le persone e l'ecosistema in generale [8];
- per la zona di Chicago: la sua fascia climatica Dfa identifica un'area con un clima particolarmente freddo il quale è necessario per lo sviluppo della biodiversità (soprattutto quella limitrofa al lago Michigan) e il regolare ciclo della brezza del lago stesso. Per tale motivo riuscire a ridurre le temperature urbane, lasciando invariate quelle naturali, risulta molto importante. [6]

Analizzando la riduzione delle temperature medie vediamo che l'apporto più significativo si ha in corrispondenza del caso studio di Avola in Italia, città con fascia climatica Csa, dove si ha una riduzione di 1 °C.

Considerando che il periodo di acquisizione dei dati per la zona di Avola comprende il mese di agosto, si deve tener conto dell'incremento della popolazione, dovuta dalla presenza di abitanti stagionali, del traffico che ne consegue e dei sistemi di climatizzazione e illuminazione. Per tale motivo anche una riduzione di un solo grado sulle temperature medie risulta essere vantaggiosa e benefica per la vivibilità della città.

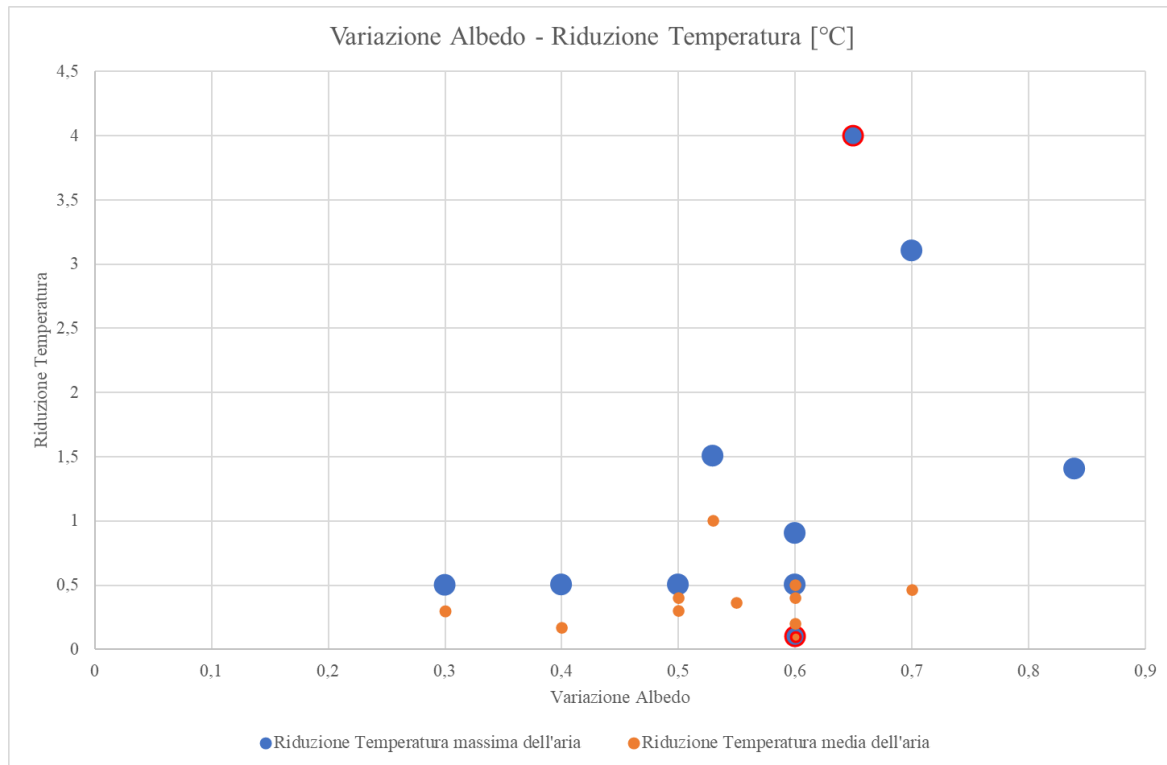


Figura 10. Diagramma dispersivo variazione albedo-riduzione temperatura per i tetti freddi

Il grafico sopra riportato (Figura 10) rappresenta l'aumento dell'albedo e la riduzione della temperatura massima e media dell'aria per i tetti freddi.

Nel grafico sono presenti tre misure differenti evidenziate in rosso: tali misure sono state acquisite con un'altezza del ricevitore differente rispetto alle altre.

Infatti, mentre tutte le altre misurazioni sono state rilevate all'altezza pedonale, i casi cerchiati in rosso sono stati misurati al livello del tetto o superiore. Più precisamente sono i casi studio effettuati a Chicago [6] e a Ho Chi Minh [9].

Si può notare che i casi in cui si registra una maggior riduzione della temperatura massima dell'aria sono quelli in cui si ha anche una elevata differenza di albedo.



Questo può essere giustificato dal fatto che l'albedo indica la misura della riflettanza di una superficie rispetto alla radiazione solare incidente: quindi una maggiore riflessione delle superfici evita l'accumulo di calore sulle superfici stesse e di conseguenza determina un minor scambio termico con l'aria circostante. [5], [7], [10]–[15]

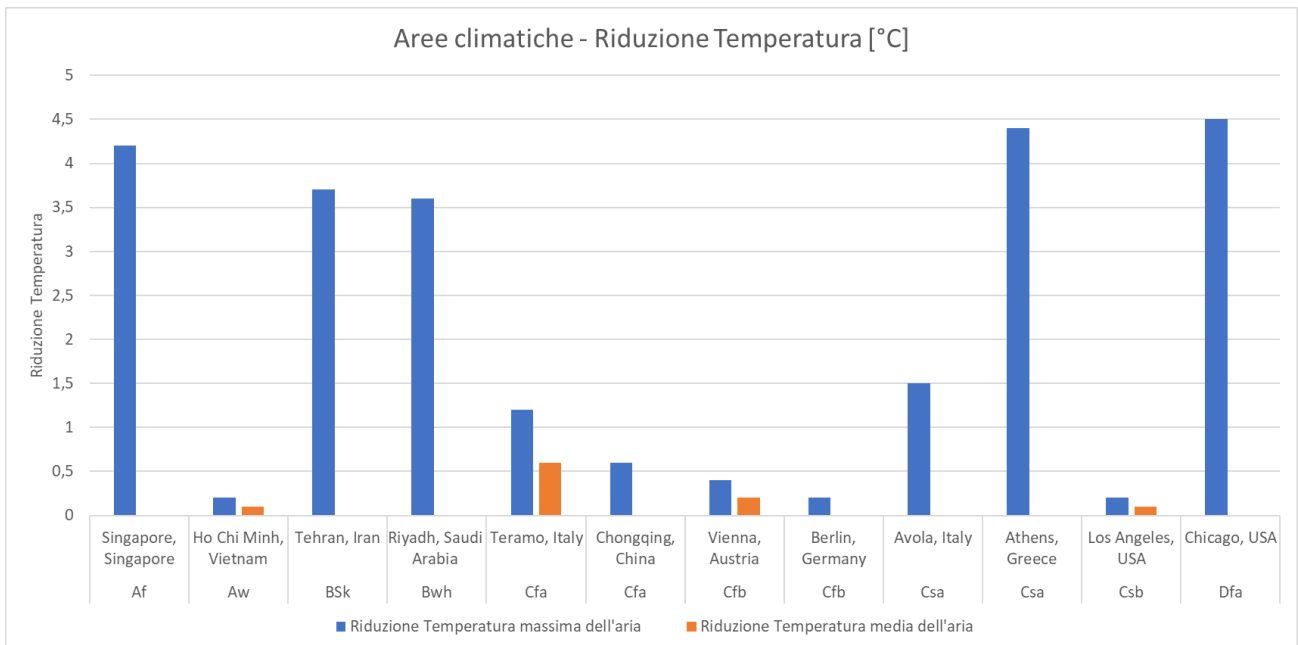


Figura 11. Istogramma aree climatiche-riduzione della temperatura per tetti verdi

Per quanto riguarda l'applicazione dei tetti verdi, nella Figura 11, si è messo in correlazione la riduzione di temperatura, sia massima che media dell'aria, con le diverse aree climatiche riportate per ogni caso studio.

Per i tetti verdi esistono due diverse tipologie: i tetti verdi estensivi e i tetti verdi intensivi. La differenza sostanziale tra i due sta principalmente nella struttura in quanto quelli intensivi richiedono una struttura portante più robusta, per sostenere il peso delle piante più grandi e del terreno più spesso, mentre per quelli estensivi possono essere installati su una struttura portante meno pesante, poiché il substrato è più leggero.

Dall'istogramma si può notare che per la maggior parte dei casi studio in cui sono stati installati i tetti verdi di tipo estensivo, si è registrata una diminuzione di temperatura massima dell'aria maggiore rispetto ai casi studio in cui viene analizzata l'applicazione dei tetti verdi intensivi.

Infatti, per i casi di Singapore, Riyadh, Atene, Tehran, e Chicago si ha una riduzione di temperatura massima superiore ai 3,6°C mentre per i casi studio di Berlino e Chongqing le riduzioni delle temperature massime sono di 0,2°C e 0,6°C.

Da notare che in questi ultimi due casi, Berlino e Chongqing, si ha l'impiego di tetti verdi intensivi, i quali vengono progettati per sostenere una vasta gamma di piante, arbusti e anche alberi di grandi dimensioni, per essere accessibili per scopi ricreativi o funzionali e offrono spazio per crescere diverse specie di piante, compresi fiori ed erbe aromatiche.

I tetti intensivi richiedono una manutenzione più "intensiva", come esplicitato già nel nome, rispetto ai tetti estensivi, a causa del loro design più complesso e della varietà di piante che ospitano. Possono richiedere irrigazione, potatura e altre cure regolari per garantire che le piante rimangano sane e in crescita. Tuttavia, offrono anche maggiori opportunità per il design paesaggistico e l'uso di spazio all'aperto. Per questo motivo questa tipologia di tetto verde è poco realizzata.

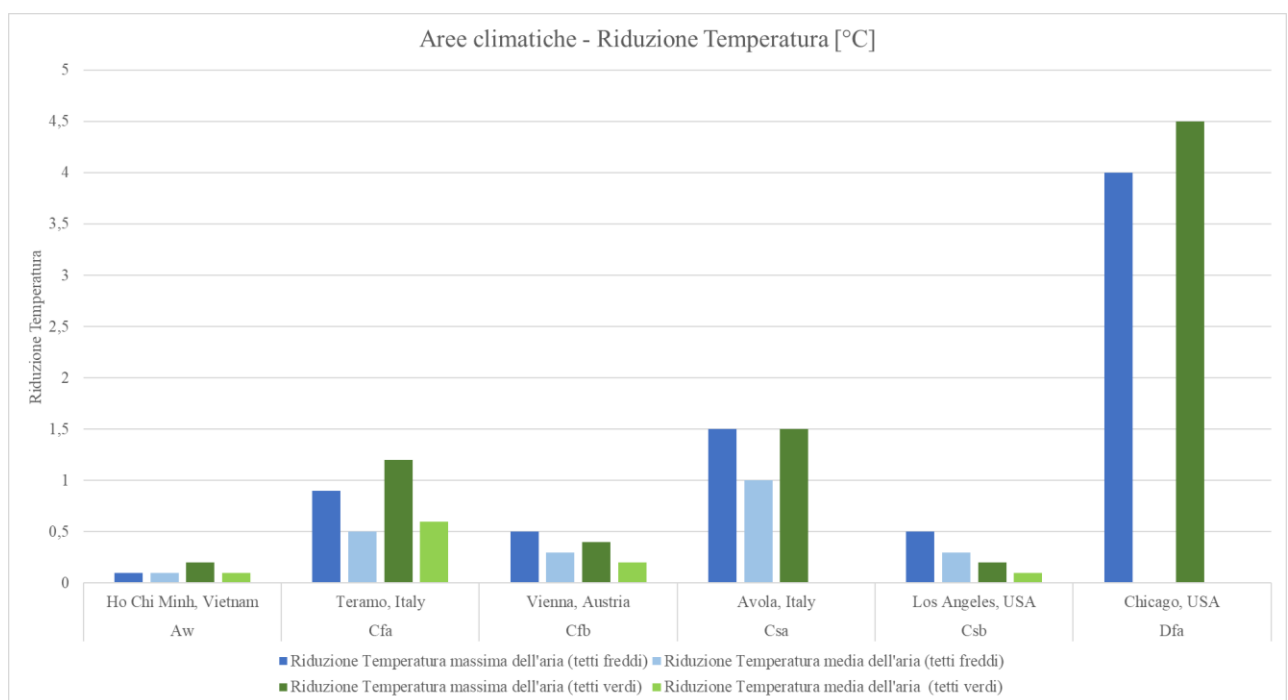


Figura 12. Istogramma aree climatiche-riduzione della temperatura per tetti verdi e freddi

In Figura 12, per completare la valutazione dei risultati ottenuti dall'analisi della letteratura, sono stati messi a confronto sei casi studio attraverso un istogramma che mette in correlazione le aree climatiche e la riduzione di temperatura massima e media dell'aria per tetti freddi e tetti verdi.

Sono stati scelti gli articoli [6], [7], [9], [11], [13], [15] perché in essi viene studiata la stessa città in due diversi scenari: uno in cui vengono installati solo tetti freddi; l'altro in cui vengono installati solo tetti verdi.

In linea generale, si può dedurre che la soluzione più efficace sia l'applicazione dei tetti verdi, perché apporta una riduzione più significativa delle temperature per la maggior parte dei casi presi in considerazione: Ho Chi Minh, Teramo, Avola e Chicago.

#### 2.4. Considerazioni generali dall'analisi della letteratura

Negli anni, i cambiamenti climatici e lo sviluppo urbano hanno intensificato enormemente l'effetto di "Isola di Calore Urbano": fenomeno microclimatico che comporta un surriscaldamento locale con un aumento delle temperature fino a 3,5-4,5°C rispetto alle zone periferiche rurali, e si presume che aumenti di circa 1°C per decennio [16].

Questo effetto è dovuto a una serie di fattori che contribuiscono al riscaldamento delle città di tutto il mondo. Alcuni dei principali fattori che determinano l'isola di calore urbano sono: le proprietà dei materiali adoperati per la realizzazione delle infrastrutture ed edifici (come l'assorbanza), la morfologia urbana e la densità edilizia, la zona climatica e la topografia locale, l'assenza di vegetazione e il calore antropico, cioè quello derivante dalle attività umane soprattutto legate ai veicoli e agli impianti ad aria condizionata.

Gli edifici urbani immagazzinano il calore a causa della loro disposizione ravvicinata e della loro forma, elementi che limitano la circolazione dell'aria: questo determina una differenza di temperatura tra le aree urbane e quelle rurali, dovuta all'impossibilità di un raffrescamento naturale e smaltimento dell'aria calda. Tutti questi fattori contribuiscono all'incremento delle temperature.

Questa elevata densità di edifici in città porta a sottrarre sempre più spazio alle aree verdi. Infatti, nei centri urbani si hanno spesso meno alberi e vegetazione rispetto alle aree rurali causando un aumento della temperatura. L'introduzione di alberi nel contesto urbano potrebbe mitigare l'effetto dell'Isola di Calore Urbano: gli arbusti forniscono ombra e rinfrescano l'aria tramite il processo di evapotraspirazione, riducendo così la temperatura locale.

L'assorbimento termico è determinato dalle superfici urbane, come l'asfalto e i tetti delle case. Tali superfici assorbono il calore durante il giorno e lo rilasciano lentamente durante la notte. Questo processo, noto come "accumulo termico", contribuisce all'incremento delle temperature urbane perché più energia solare viene assorbita e più ne viene convertita in calore nelle città.

Le attività umane nelle città generano calore, sia attraverso i veicoli a motore che attraverso le attività industriali. Queste fonti di calore aggiuntive possono innalzare le temperature locali. Anche l'uso di elettrodomestici, sistemi di riscaldamento e raffreddamento, nonché l'illuminazione notturna, contribuiscono all'emissione di calore antropogenico nelle città.

La zona climatica e la topografia locale della città incidono molto sulla temperatura dell'aria. Ad esempio, le città situate in valli o aree con limitata ventilazione possono essere più soggette al fenomeno dell'Isola di Calore Urbana.

Quindi, in sintesi, la morfologia urbana, costituita da edifici, strade e superfici pavimentate, oltre ad ostacolare il vento e a sottrarre spazio alle aree verdi, assorbe gran parte della radiazione solare durante il giorno e la riemette durante la notte non permettendo il raffrescamento della città nelle ore notturne.

L'innalzamento della temperatura dell'aria nelle aree urbane comporta gravi impatti economici, ambientali e sociali, soprattutto relativi alla salute umana. È per questo che esistono molteplici strategie che hanno lo scopo di mitigare il fenomeno dell'ICU. [5]

La mitigazione del fenomeno dell'isola di calore urbano è fondamentale per migliorare la qualità della vita nelle città, ridurre i consumi energetici e minimizzare l'impatto ambientale. Per farlo, esistono varie tecniche che permettono la riduzione della temperatura dell'aria nei centri urbani.

Quelle più efficaci e fattibili adottate dalle città di tutto il mondo riguardano l'aumento della vegetazione urbana, l'utilizzo di superfici riflettenti e materiali ad alto albedo, l'utilizzo di pavimentazioni chiare o riflettenti anziché asfalto scuro, la progettazione di edifici a basso consumo energetico e la pianificazione urbana sostenibile.

Tra le strategie più consigliate, volte ad alleviare le condizioni estive calde esterne, ci sono quelle che riducono o bloccano la quantità di radiazione che raggiunge una superficie. In particolare, la superficie del tetto degli edifici, che comprende il 20-25% di tutte le superfici urbane. In aggiunta a ciò, la radiazione solare ricevuta sullo strato superiore di un tetto può aumentare la temperatura della superficie fino a 50–60 °C, che è più alta di 10–15 °C rispetto alle aree verdi circostanti. [17]

Pertanto, le applicazioni dei tetti verdi e dei tetti freddi, sono considerati strumenti promettenti sia dagli studiosi che dagli sviluppatori urbani per la mitigazione degli ICU. Entrambe le strategie funzionano riducendo il flusso di calore sensibile, che a sua volta allevia gli effetti di un ICU, anche se attraverso meccanismi diversi. Infatti, la radiazione solare viene riflessa verso il cielo quando

cade su un tetto con materiali riflettenti, su un tetto verde la radiazione solare viene convertita in calore latente.

Un'altra strategia che mitiga l'effetto dell'ICU è quella che si realizza adoperando i tetti cosiddetti ventilati (VPR). Lo schema dei tetti ventilati è riportato nella Figura 13. Tra le diverse tipologie di tetti ventilati quelle che risultano più innovative sono quelle degli "Herotile Based Roof" (HBR).

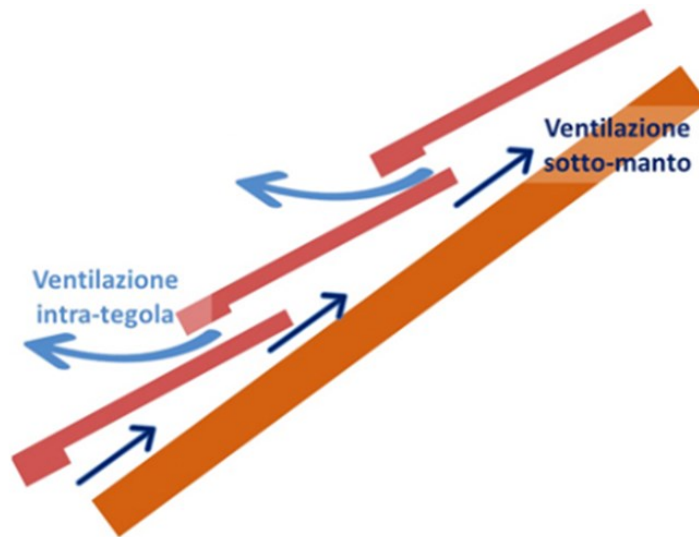


Figura 13. Schema esplicativo -tetti ventilati

HBR è una tipologia di tetto ventilato e permeabile che utilizza tegole in laterizio prodotte da Herotiles. I tetti HBR sono costituiti da tre strati principali:

- Tegole in laterizio: le tegole in laterizio sono progettate per essere traspiranti e permeabili al vapore acqueo.
- Isolante: l'isolante è posizionato tra le tegole e il manto di copertura.
- Manto di copertura: il manto di copertura è posizionato sopra l'isolante e protegge il tetto dalle intemperie.

Il sistema HBR consente di migliorare il comfort abitativo e ridurre i consumi energetici degli edifici. In particolare, i tetti HBR sono studiati per permettere:

- Raffreddamento dell'ambiente interno, specialmente in estate: il sistema di ventilazione consente di allontanare il calore dal tetto e dall'ambiente interno.
- Isolare l'ambiente interno, specialmente in inverno: l'isolante protegge l'ambiente interno dalle temperature fredde esterne.

- Permettere il passaggio del vapore acqueo: le tegole in laterizio sono traspiranti e consentono al vapore acqueo di fuoriuscire dall'ambiente interno, evitando la formazione di condensa.

I tetti HBR sono una soluzione efficace per ridurre il consumo di energia e migliorare il comfort abitativo degli edifici.

Infatti, tra i principali benefici riscontrati dall'applicazione di tale tecnologia, ci sono l'efficientamento energetico e del comfort termico, il prolungamento della vita utile del tetto e la conseguente riduzione dell'impatto ambientale.

È stato dimostrato che l'applicazione di tetti HBR riduce il consumo di energia per il raffreddamento e il riscaldamento fino al 50%; si riscontra un netto miglioramento del comfort abitativo in quanto i tetti HBR mantengono l'ambiente interno fresco d'estate e caldo d'inverno; l'utilizzo di tegole Herotiles aumenta la durata del tetto e, in aggiunta, il sistema di ventilazione aiuta a proteggere le tegole e il manto di copertura dall'umidità e dagli agenti atmosferici.

In fine, come detto precedentemente, sono una soluzione sostenibile: i tetti HBR sono realizzati con materiali naturali e riciclabili, contribuendo a ridurre l'impatto ambientale degli edifici.

I tetti HBR sono una soluzione valida per tutti gli edifici, sia nuovi che esistenti. Sono una soluzione efficace per ridurre i consumi energetici e migliorare il comfort abitativo, con benefici economici e ambientali.

## 3. FASI E METODI

### 3.1. Fasi

Dall'analisi della letteratura è stato possibile constatare come esistano diverse strategie volte a compensare o mitigare l'effetto dell'Isola di Calore Urbano.

Tra le soluzioni più comunemente utilizzate e sostenibili abbiamo l'integrazione di aree verdi, l'utilizzo di materiali ad alto albedo, la limitazione dell'utilizzo di sistemi di climatizzazione e/o illuminazione, la costruzione di edifici più sostenibili ecc...

Tutti questi aspetti possono essere racchiusi e realizzati tramite l'applicazione di nuove tipologie di tetti in contesti urbani.

Infatti, anche dall'analisi della letteratura è evidente che tra le soluzioni più efficaci e meno invasive del contenimento del fenomeno dell'ICU. Tra le tipologie di copertura più usate ci sono sicuramente i tetti verdi, i tetti freddi, i tetti HBR ma anche piani con membrane impermeabili e tetti metallici.

Per rafforzare e dimostrare quanto rilevato dall'analisi della letteratura, sono state condotte diverse simulazioni microclimatiche.

Le "simulazioni microclimatiche" permettono di ottenere modelli (computerizzati) utili per studiare e predire il comportamento climatico in piccole aree geografiche o spazi localizzati, come una città. Queste simulazioni mirano a fornire una comprensione dettagliata delle condizioni locali, considerando fattori come la topografia, la vegetazione, la presenza di edifici e altre caratteristiche specifiche dell'ambiente.

Nello specifico, le simulazioni condotte in questo lavoro di tesi sono state realizzate con il software Urban Weather Generator (UWG), per mezzo del quale è stato possibile comparare le seguenti tipologie di copertura:

- HBR
- Tetti freddi con diversi valori di albedo (tenendo conto dell'invecchiamento)
- Tetti verdi
- Tetti piani con membrane impermeabili
- Tetti metallici non freddi

Le varie tecnologie di copertura sono state studiate sia in termini di tecniche di costruzione che in termini di differente tipologia dei materiali.

Di seguito viene riportata una spiegazione sul software utilizzato e i parametri in input al software stesso.

### 3.2. Urban Weather Generator e le simulazioni

Lo studio di ricerca prevede la simulazione di una condizione urbana utilizzando i dati raccolti dalle stazioni meteorologiche rurali e i dati della geometria urbana. Lo strumento scelto a questo scopo è l'Urban Weather Generator. Il suo codice è stato integrato e tradotto nel linguaggio di programmazione Python per ottenere risultati rilevanti per la valutazione della tecnologia VPR-HBR.

Lo strumento UWG [18] utilizza un modello TEB (Town Energy Balance) per simulare il microclima urbano. Questo modello si concentra sulla simulazione degli scambi termici tra l'atmosfera e le superfici urbane, compresi edifici, strade e altre strutture antropiche. Ciò consente di valutare l'impatto di varie tecnologie di copertura, come il VPR-HBR, sulle temperature urbane e sul microclima.

L'integrazione tra TEB e il Building Energy Model (BEM) descrive l'interazione tra gli edifici e il microclima urbano, consentendo una previsione accurata delle condizioni all'interno del contesto urbano [19]

Un Building Energy Model è una rappresentazione virtuale del comportamento energetico di un edificio. I BEM vengono creati utilizzando software specializzati che tiene conto di una serie di fattori, tra cui la geometria dell'edificio, i materiali utilizzati per costruire l'edificio, sistemi di riscaldamento/raffreddamento e ventilazione dell'edificio, le condizioni climatiche locali.

Lo strumento UWG parte da dati climatici raccolti in file (.epw), che descrivono le condizioni rurali presso le stazioni meteorologiche, e modifica i dati orari di temperatura e umidità per simulare le condizioni microclimatiche in un canyon urbano generalizzato.

Questo file climatico raccoglie i dati relativi alla temperatura esterna (bulbo secco e umido), alla velocità e alla direzione del vento, alla radiazione solare, all'umidità relativa e altro ancora.



Il software UWG necessita in input di ulteriori parametri come la morfologia, ovvero la zona climatica.

### 3.3. Le zone climatiche locali

Stewart e Oke, nel loro libro "Urban Climate" [20], definiscono formalmente le zone climatiche locali come regioni con copertura superficiale, struttura, materiale e attività umana uniformi, che si estendono da centinaia di metri a diversi chilometri su scala orizzontale. Questa classificazione dei paesaggi urbani consiste in 17 Local Climate Zones (LCZs) standard.

L'insieme standard è suddiviso in "tipi costruiti" (1-10) e "tipi di copertura del suolo" (A-G). L'uso delle LCZs consente di ricreare contesti urbani utilizzando variabili di input predefinite, riducendo così la complessità computazionale dei parametri urbani.

In realtà, il software non è in grado di analizzare modellare la città nella sua reale morfologia urbana ma usa dei modelli preimpostati di morfologie, regolati e modellati in base a una generalizzazione della zona climatica.

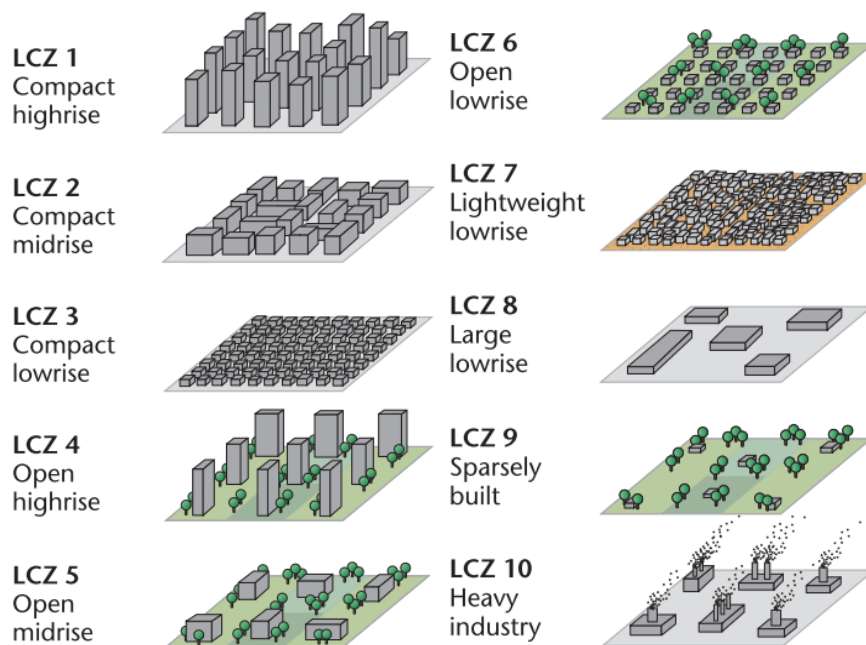


Figura 14.LCZ classificazione

Il lavoro è stato svolto attraverso una serie di simulazioni utilizzando UWG e analizzando gli output in termini di temperatura e flussi di calore. In particolare, sono stati analizzati:

- due diversi scambi di calore (tetto con canyon - tetto con strato limite);
- due distribuzioni urbane (LCZ6-LCZ2);
- due file climatici (Reggio Emilia e Rotterdam);
- i cinque tipi di copertura richiesti.

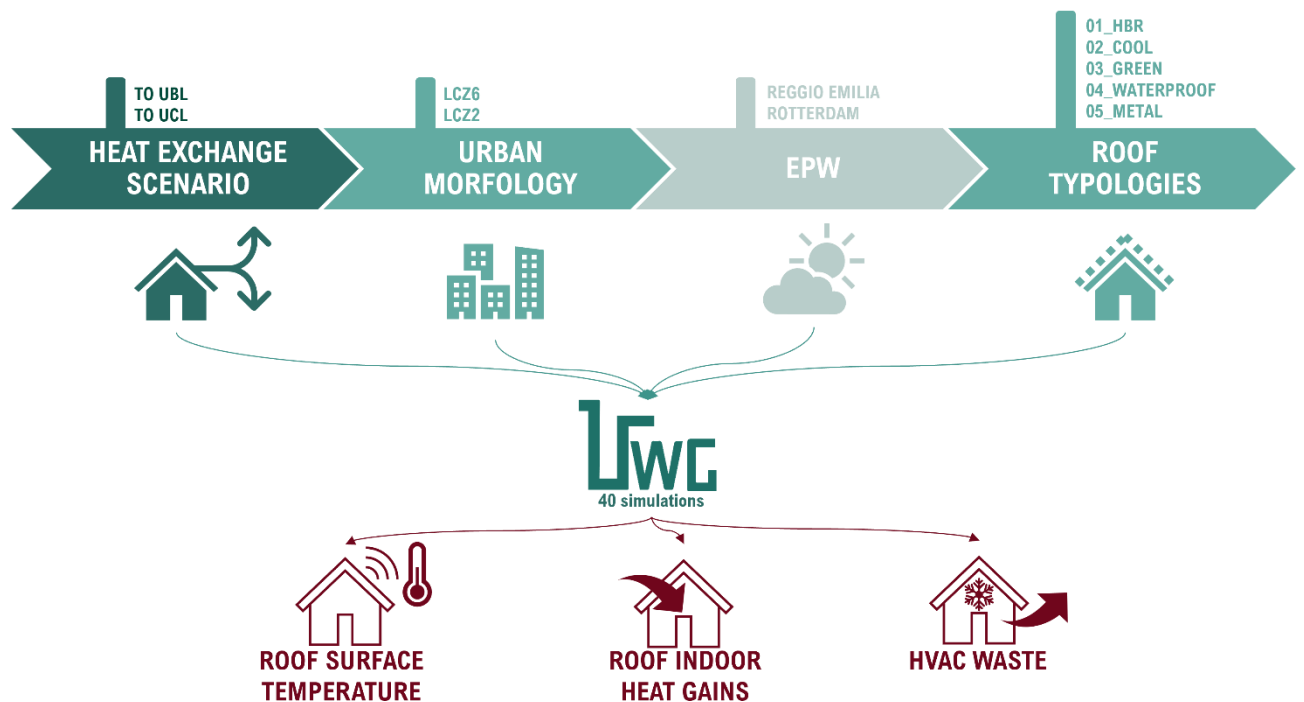


Figura 15. Schema di funzionamento del software: input- output

### 3.4. Modelli di scambio di calore e città d'interesse

Il software simula che il calore del tetto si diffonda solo in atmosfera poiché, nella logica del software, tutti i tetti sono piani. Nella realtà, la maggior parte delle coperture sono di tipo inclinato, quindi è stato necessario effettuare una modifica al codice del software.

Tale modifica ha permesso di ottenere due scenari alternativi, rispetto ai quali la condizione reale risultante si collocherà nel mezzo.

Per quanto riguarda il modello di scambio termico con lo scenario urbano, vengono considerati due casi diversi. Lo scenario A è il più comune e considera che il calore convettivo emesso dal tetto venga aggiunto direttamente allo strato limite (Urban Boundary Layer, UBL).

Nello scenario B, meno comune e possibile solo in scenari urbani con canyon molto ampio, il calore del tetto viene scambiato direttamente con il canyon (Urban Canopy Layer, UCL).

Questi "canyon urbani" rappresentano il volume che separa differenti edifici, pertanto, la loro entità deve essere valutata in fase di simulazione. Nello scenario B si considera l'interazione termica tra tetto e canyon in quanto quest'ultimi possono influenzare significativamente la circolazione dell'aria, il flusso termico e la dispersione degli inquinanti nell'atmosfera circostante.

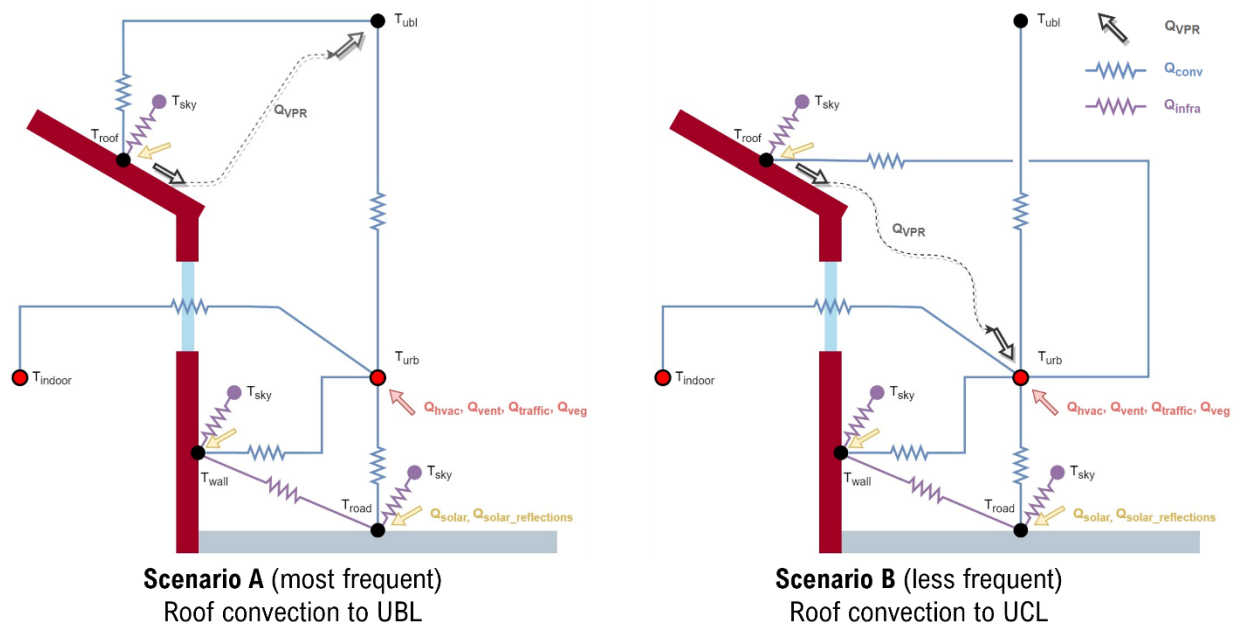


Figura 16. Schema dei diversi modelli di scambio termico: UBL e UCL

Per quanto riguarda la morfologia urbana, sono stati utilizzati i dati derivati dalle LCZ.

Attraverso le mappe GIS abbiamo ottenuto le Zone Climatiche Locali più diffuse delle nostre città: Reggio Emilia e Rotterdam. Si tratta della LCZ6 e LCZ2.

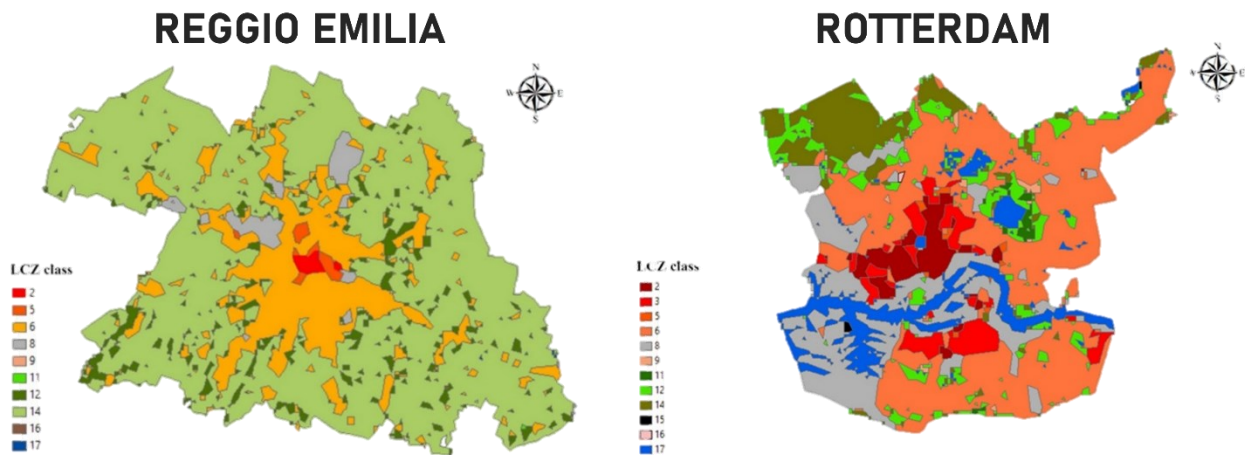


Figura 17. Distribuzione delle LCZ nelle due città di interesse: Reggio Emilia e Rotterdam

### 3.5. Altri parametri di interesse per le simulazioni

Le simulazioni sono state condotte considerando tetti con elevate prestazioni termiche, Zona climatica E (Zona E) e trasmittanza pari a  $U=0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Successivamente ulteriori test sono stati effettuati variando come unico parametro quello della trasmittanza portandolo a un valore  $U=0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Per quanto riguarda la tipologia di copertura, i tetti hanno una struttura fissa in calcestruzzo, uno strato isolante in pannelli di poliuretano e differiscono per le tipologie di manto.

Le proprietà delle coperture sono state definite attraverso la raccolta di dati sulle schede tecniche dei produttori. I dati in questione si riferiscono a conducibilità termica, capacità termica volumetrica, albedo ed emissività. È stato definito un intervallo di valori minimi e massimi per eseguire simulazioni probabilistiche su UWG.

	Thermal conductivity [W/mK]	Volumetric Heat Capacity [J/mcK]	Emissivity $\epsilon$ [-]	Albedo $\alpha$ [-]
<b>METAL</b>	109 - 386	2396800 - 3426500	0.84	0,3 - 0,7
<b>WATERPROOF</b>	0,159 - 0,26	1808302 - 1857508	0.84	0,04 - 0,16
<b>COOL</b>	0,159 - 0,26	1808302 - 1857508	0.84	0,53 - 0,8
<b>HBR</b>	0,8502	1685000	0.84	0,37 - 0,42
<b>GREEN</b>	0,046 - 0,7	585760 - 1298714	0.84	0,13 - 0,26

Figura 18. Parametri di input caratteristici per le diverse tipologie di tetti

Nella Figura 18 sono riportati i range di valori rappresentativi per ciascuna classe di tetti. I range sono per alcuni casi più limitati rispetto ad altri più ampi: questo implica che nei casi in cui le proprietà sono più variabili si riscontrano degli output più diversificati tra loro. In sintesi, nei risultati si ottengono degli intervalli di output e non un valore fisso: si ha un output in forma stocastica.

La morfologia urbana verrà studiata separatamente per le due zone climatiche LCZ2 e LCZ6, in modo da comprendere meglio l'effetto che ciascun parametro ha sugli output.

Dalle 40 simulazioni è possibile definire 4 importanti output utili per evidenziare le differenze tra i tetti:

- Temperatura della superficie del tetto
- Guadagni di calore interni dal tetto
- Dispersione di calore HVAC nel canyon urbano.
- Temperatura dell'aria

L'analisi di questi risultati ha consentito di valutare come le diverse condizioni climatiche, i dati urbani e i tipi di tetto possano influenzare questi output.

## 4. RISULTATI

Di seguito vengono illustrati i risultati delle diverse simulazioni condotte tramite il software UWG. I primi risultati ad essere analizzati riguardano tetti che hanno una trasmittanza di  $U=0,24$   $W/m^2K$ . Tali risultati vengono riportati nel paragrafo 4.1.

Nel Paragrafo 4.2 vengono riportati i risultati ottenuti variando il parametro di trasmittanza a  $U = 0,6$   $W/m^2K$ .

I valori di trasmittanza pari a  $0,24$   $W/m^2K$  e  $0,6$   $W/m^2K$  sono stati scelti per rappresentare due condizioni differenti.

Le superfici con valore di trasmittanza pari a  $0,24$   $W/m^2K$  sono coperture con buona trasmittanza: questo aspetto fa sì che le superfici risultino più isolanti e quindi più performanti nella limitazione della dispersione di calore.

Nel caso con trasmittanza  $0,6$   $W/m^2K$  si vuole rappresentare una superficie con capacità prestazionali intermedie per quanto riguarda l'isolamento.

È stata fatta questa scelta per capire se è necessario avere un elevato isolamento, nel caso in cui si abbia come obiettivo quello di mitigare il fenomeno dell'ICU.

Alcuni studiosi sostengono che non sia necessario, oltre che poco conveniente, diminuire la trasmittanza per aumentare l'isolamento di un edificio: tale soluzione porterebbe beneficio nella stagione invernale, quando l'isolamento garantirebbe un maggiore comfort termico all'interno dell'edificio, ma un eccessivo surriscaldamento in estate perché il calore immagazzinato all'interno non riuscirebbe a defluire.

In questo modo la riduzione di trasmittanza rischia di essere una mossa controproducente ed altamente impattante, dato l'aumento del materiale isolante.

### 4.1. Risultati con trasmittanza $U = 0,24$ $W/m^2K$

Per comprendere al meglio i risultati ottenuti dalle 40 simulazioni, è stato deciso di rappresentare i diversi scenari attraverso dei box plot, grafici utili per visualizzare la distribuzione e la variabilità

di un insieme di dati, e istogrammi, che rappresentano il valore medio di ciascun parametro di output analizzato.

Per ogni figura viene indicata:

- la città presa in considerazione per la simulazione (Reggio Emilia oppure Rotterdam),
- la LCZ (LCZ2 oppure LCZ6)
- i due differenti modelli di scambio termico (urban boundary layer e urban canopy layer).

Come si può notare in Figura 18, i tetti in metallo e quelli freddi, forniscono come risultato un range di valori più ampio rispetto ai tetti in guaina, gli HBR e i tetti verdi.

Infatti, i range dei valori di input dell'albedo e/o della conducibilità termica dei tetti freddi e tetti in metallo sono più ampi rispetto alle altre tipologie. Questo è dovuto alle proprietà del materiale utilizzato per la realizzazione dei manti di copertura. Dall'ampiezza dei range deriva che i risultati di output avranno una maggiore variabilità: saranno in forma stocastica.

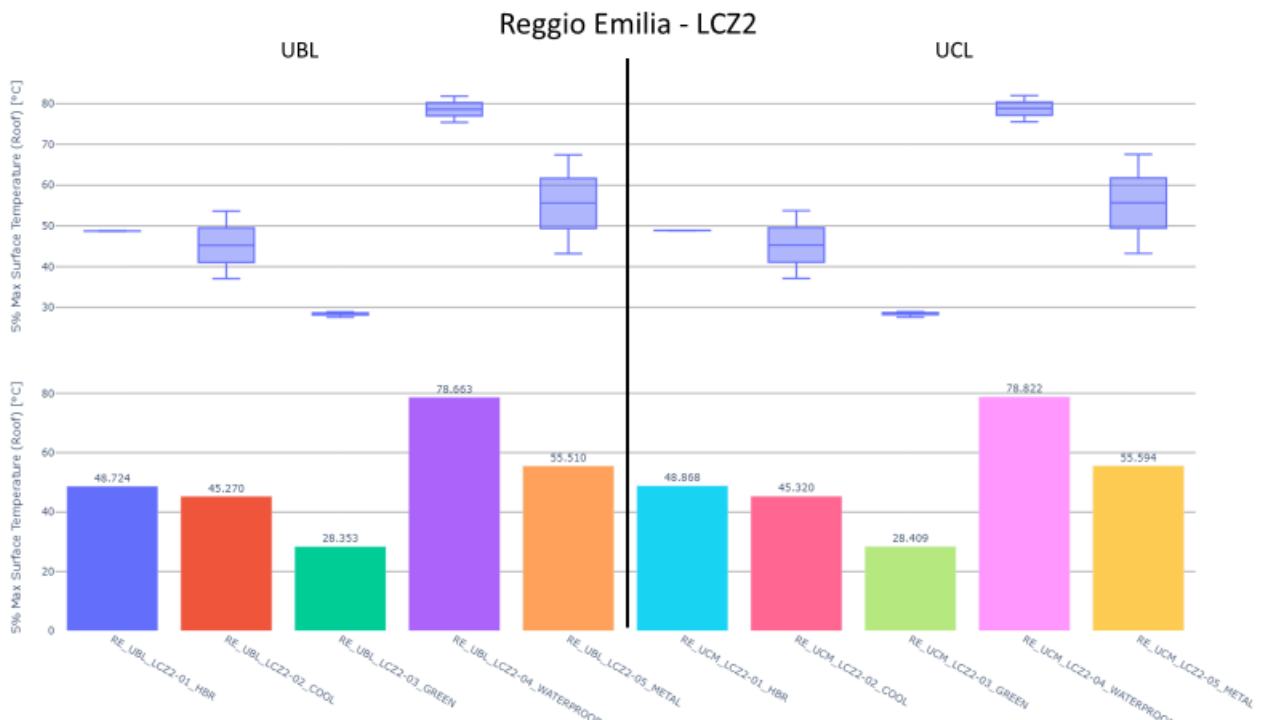


Figura 19. Temperature superficiali del manto: Reggio Emilia- LCZ2

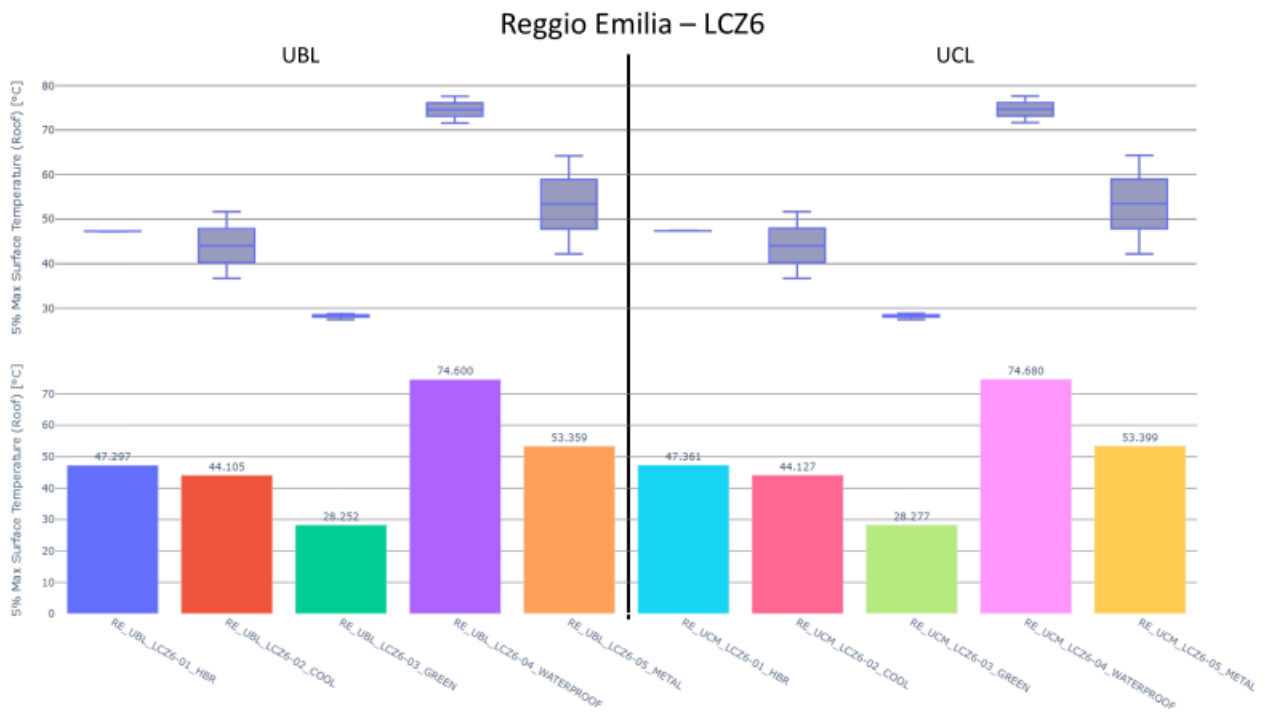


Figura 20. Temperature superficiali del manto: Reggio Emilia - LCZ6

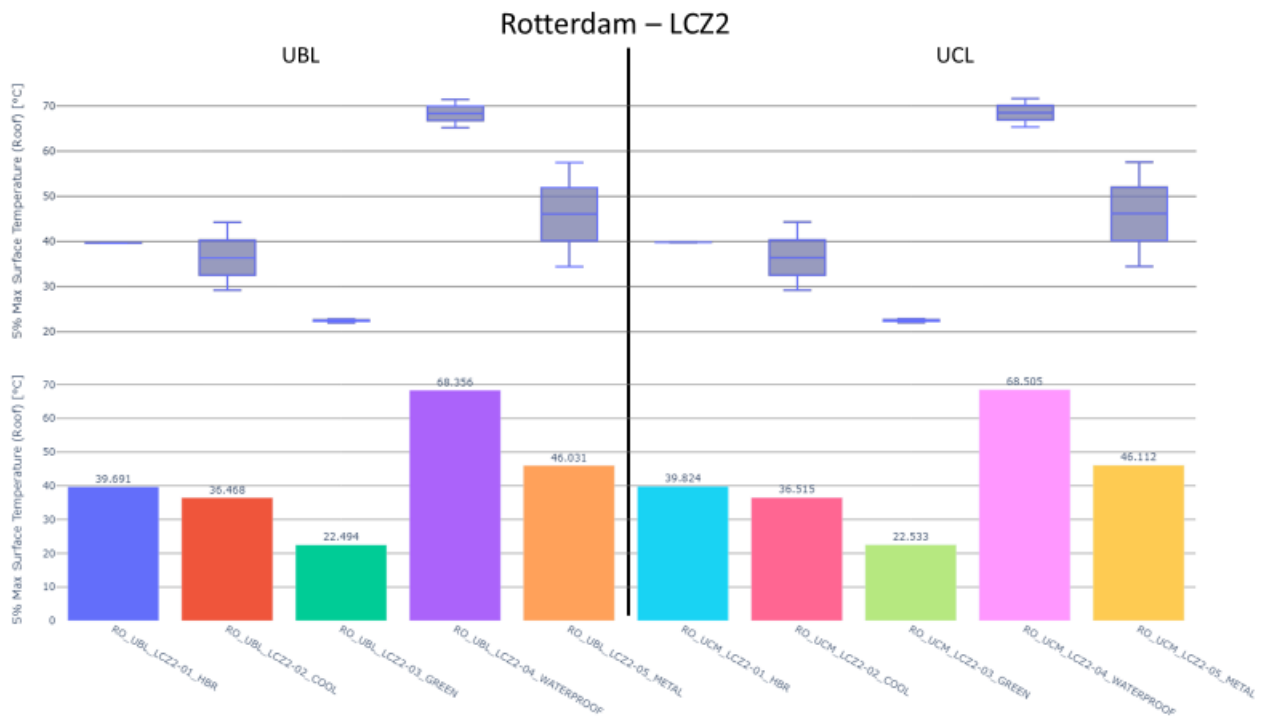


Figura 21. Temperature superficiali del manto: Rotterdam - LCZ2



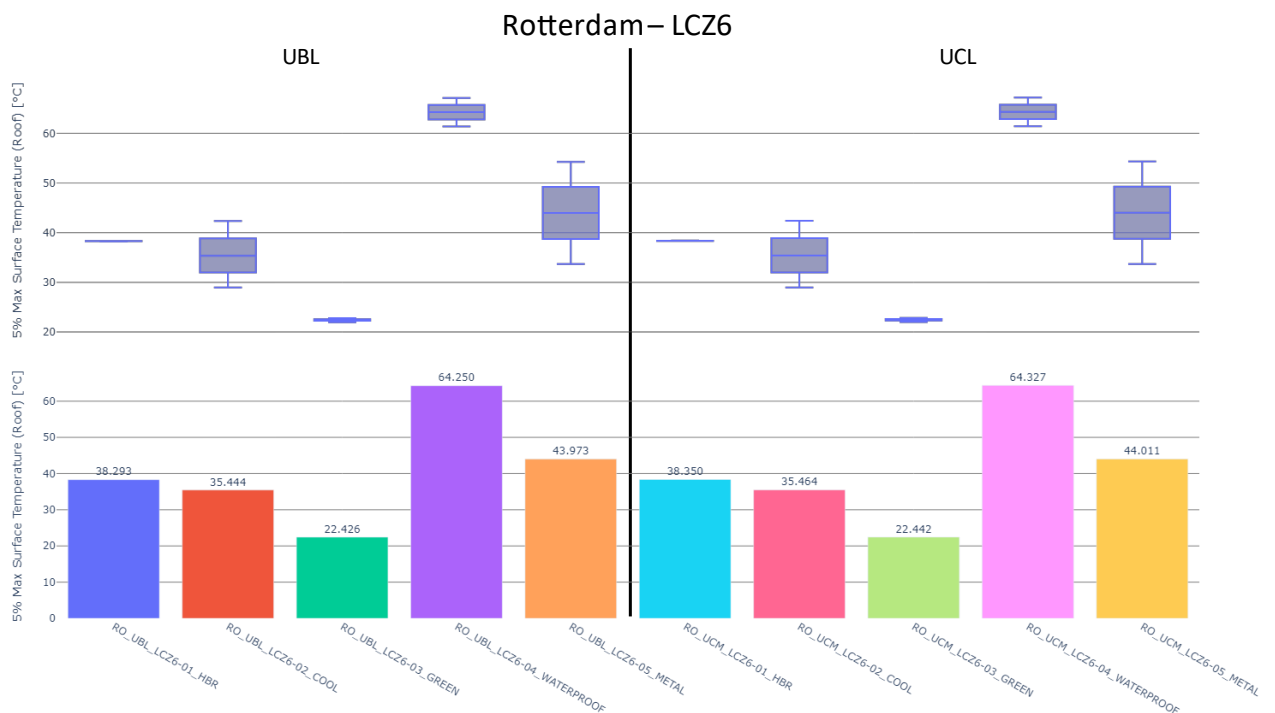


Figura 22. Temperature superficiali del manto: Rotterdam - LCZ6

Nelle precedenti figure (Figura 19, Figura 20, Figura 21, Figura 22), vengono rappresentati i risultati ottenuti relativi alla temperatura superficiale, più precisamente il 5% delle temperature superficiali massime registrate, delle diverse tipologie di tetti: HBR, tetti freddi, tetti verdi, tetti piani con membrane impermeabili, tetti metallici.

Osservando, nel complesso, gli istogrammi in Figura 19, Figura 20, Figura 21, Figura 22, si può notare una ricorrenza di un andamento generale dei valori medi assoluti, sia per lo scenario UBL che per quello UCL: i tetti con guaina impermeabilizzante hanno una temperatura superficiale più elevata, superiore rispetto a tutte le altre tipologie di copertura. Tale temperatura ha un valore medio compreso tra 64-78,5°C. Per quanto riguarda le altre tipologie, sempre valutando entrambi i modelli di scambio termico, la temperatura assume un valore tra 44-55,5°C per i tetti metallici, tra 38,5-49°C per i tetti HBR, 35,5-45,5°C per i tetti freddi e in fine tra 22,5-28,5°C per i tetti verdi, la tipologia con minor temperatura superficiale registrata in assoluto.

Notando che il tetto con membrana impermeabilizzante è la tipologia in cui vengono registrate temperature più elevate, quindi la peggiore sotto un punto di vista prestazionale, si può analizzare l'andamento generale attraverso valori percentuali, mettendo a confronto quest'ultima con le restanti tipologie. In linea generale, risulta che: i tetti metallici presentano una temperatura

superficiale più bassa in media del 30,5%, i tetti HBR del 39,2%, i tetti freddi del 43,7% e i tetti verdi del 64,6%.

Per quanto riguarda il confronto dei due scenari di scambio di calore cioè UBL e UCL, per ciascun caso, non si riscontrano sostanziali differenze.

Al contrario considerando le due diverse città, Reggio Emilia e Rotterdam, è possibile notare che per la città di Reggio Emilia sono state registrate temperature superficiali più elevate rispetto a quelle misurate nella città di Rotterdam.

Infatti, prendendo in esame la zona climatica LCZ2, in termini assoluti, nella città di Reggio Emilia (Figura 19) i tetti in guaina hanno una temperatura superficiale superiore di 10,3°C rispetto a quelli di Rotterdam (Figura 21), quelli metallici di 9,4°C, quelli HBR e quelli freddi differiscono di 9°C, mentre i tetti verdi solo 6°C.

In termini percentuali, per la LCZ2, possiamo dire che nella città di Rotterdam le temperature superficiali sono più basse rispetto alla città di Reggio Emilia del 13% per i tetti con guaina impermeabilizzante, del 17% per i tetti metallici, del 18,6% per gli HBR, del 19,4% per i tetti freddi e del 21% i verdi.

Analoghe considerazioni possono essere fatte nel caso della zona urbana LCZ6 (Figura 20, Figura 22), ma in questo caso le temperature superficiali della città di Reggio Emilia superano quelle di Rotterdam di: 10,3°C per i tetti con membrana e 9,4 °C per i tetti metallici, 9°C per i tetti HBR, 8,6°C quelli freddi e 6°C per i tetti verdi.

In termini percentuali, per la LCZ6, possiamo dire che nella città di Rotterdam le temperature superficiali sono più basse rispetto alla città di Reggio Emilia del 13,8% per i tetti in guaina, del 17,6% per i tetti in metallo, del 19% per i tetti HBR, del 19,5% per i tetti freddi e del 21% i tetti verdi.

Mettendo a confronto la LCZ2 con la LCZ6 di ogni città, si può notare che nella prima le temperature superficiali sono, in linea generale, più elevate che nella LCZ6.

Infatti, prendendo come riferimento la città di Reggio Emilia, la temperatura superficiale del caso LCZ2 (Figura 19) supera quella del caso LCZ6 (Figura 20) di 4°C per i tetti in guaina, 2°C per i tetti metallici, 1,5°C per gli HBR, 1,2°C per i tetti freddi e 0,1°C per i tetti verdi. Mentre, in termini percentuali, le temperature registrate nella LCZ6 sono più basse del 5,2% per i tetti in membrana,

del 3,8% per i tetti metallici, 3% per i HBR, 2,6% per i freddi e 0,4% per i verdi. Tali differenze sono uguali per entrambi gli scenari UBL e UCL.

Analogamente, considerando la città di Rotterdam, si registra una variazione tra la LCZ2 e la LCZ6 di 4°C per i tetti in guaina, 2°C per i tetti metallici, 1,4°C per i tetti HBR, 1°C per i tetti freddi e una differenza quasi nulla, solo 0,1°C per i tetti verdi. In termini percentuali la variazione tra LCZ2 e LCZ6 è del 6% per i tetti in guaina, del 4,6% per i tetti metallici, del 3,5% per gli HBR, del 2,7% quelli freddi e del 0,4% i tetti verdi.

Anche in questo caso, le differenze sono uguali per entrambi gli scenari UBL e UCL.

Si può notare che, a prescindere dal luogo, scenario, zona climatica considerata, la soluzione dei tetti verdi non subisce grandi variazioni. Questo dimostra che l'efficacia di tale soluzione non è influenzata da fattori urbani e pertanto risulta essere un metodo valido per il contenimento dell'effetto dell'Isola di Calore Urbano in qualsiasi città e contesto.

Al contrario, la soluzione dei tetti con membrana impermeabilizzante risulta essere poco efficace in qualsiasi contesto e in qualsiasi scenario.

È importante sottolineare l'ampiezza dei range di valori che caratterizzano i vari tetti. I tetti metallici hanno un range ampio perché vengono analizzati tetti con una importante differenza di albedo e/o di conducibilità termica come riportato Figura 18.

Infatti, sono state registrate temperature più elevate per quelli con albedo basso. Lo stesso vale per i tetti freddi ma hanno temperature minori in media e si può notare che un tetto freddo, con un basso albedo, ha la stessa temperatura superficiale di un tetto in metallo che albedo medio.

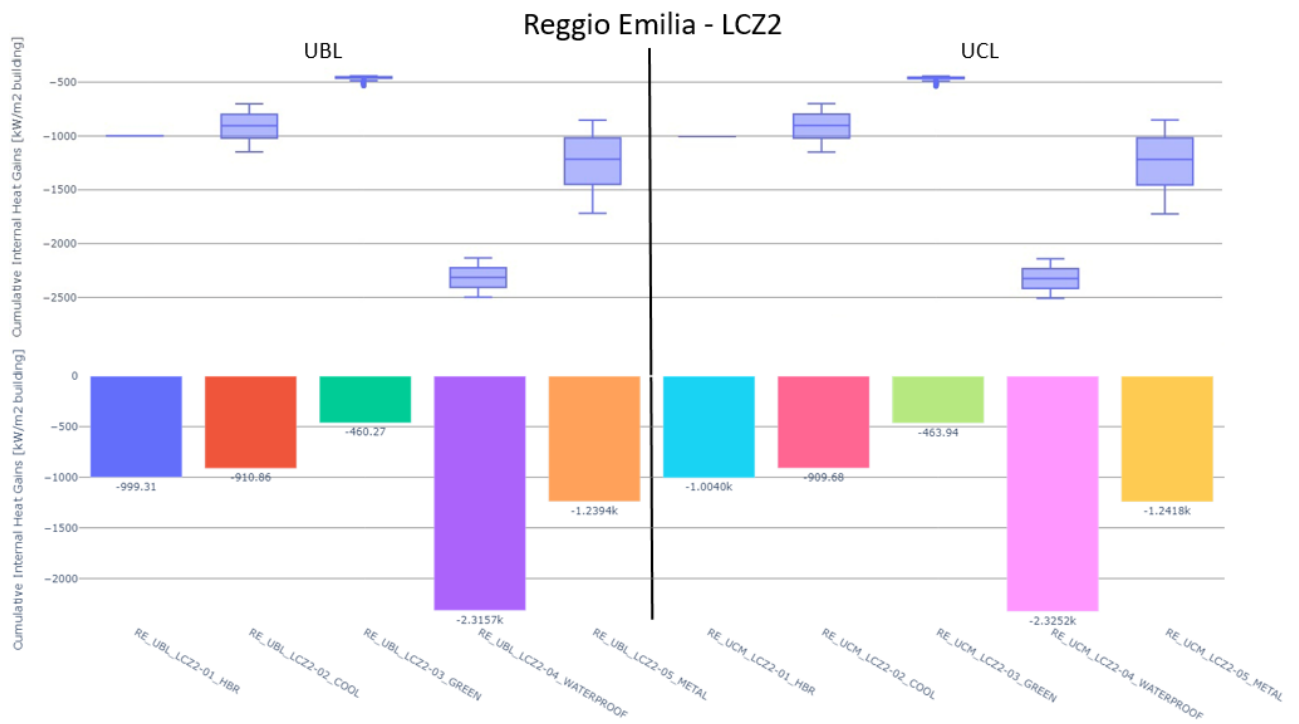


Figura 23. Accumulo di calore entrante: Reggio Emilia – LCZ2

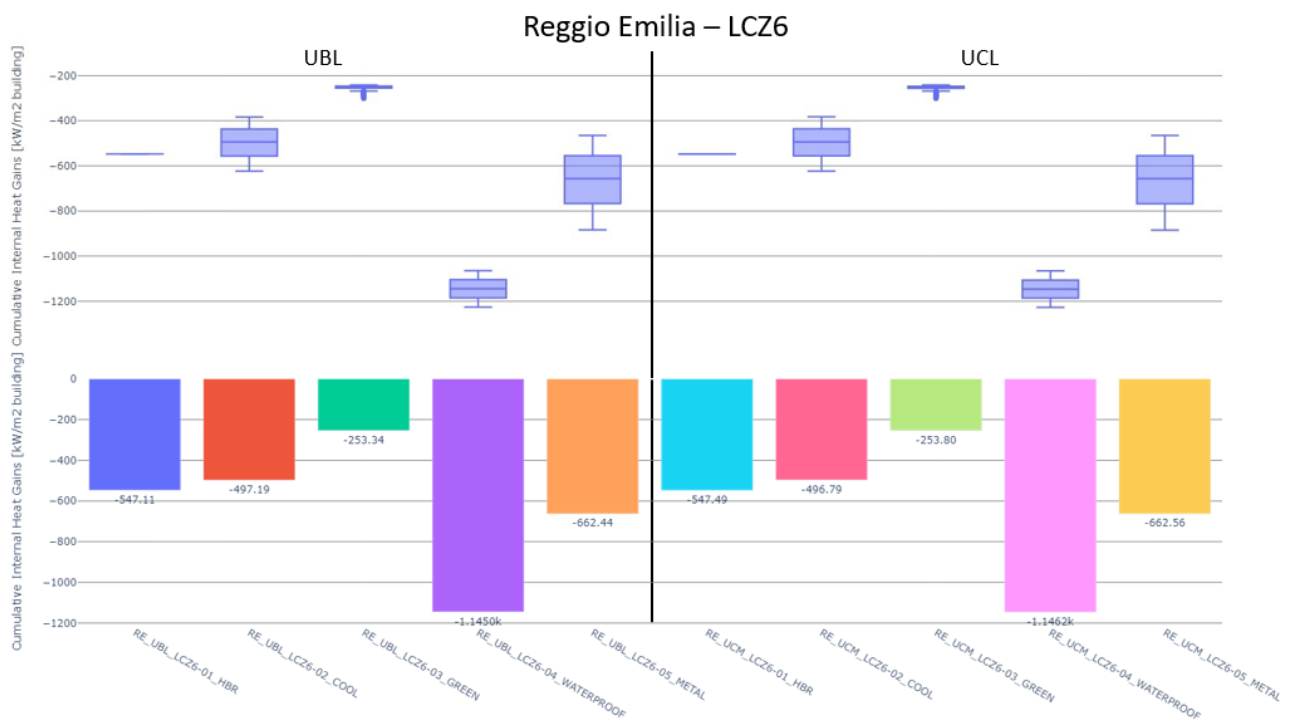


Figura 24. Accumulo di calore entrante: Reggio Emilia - LCZ6

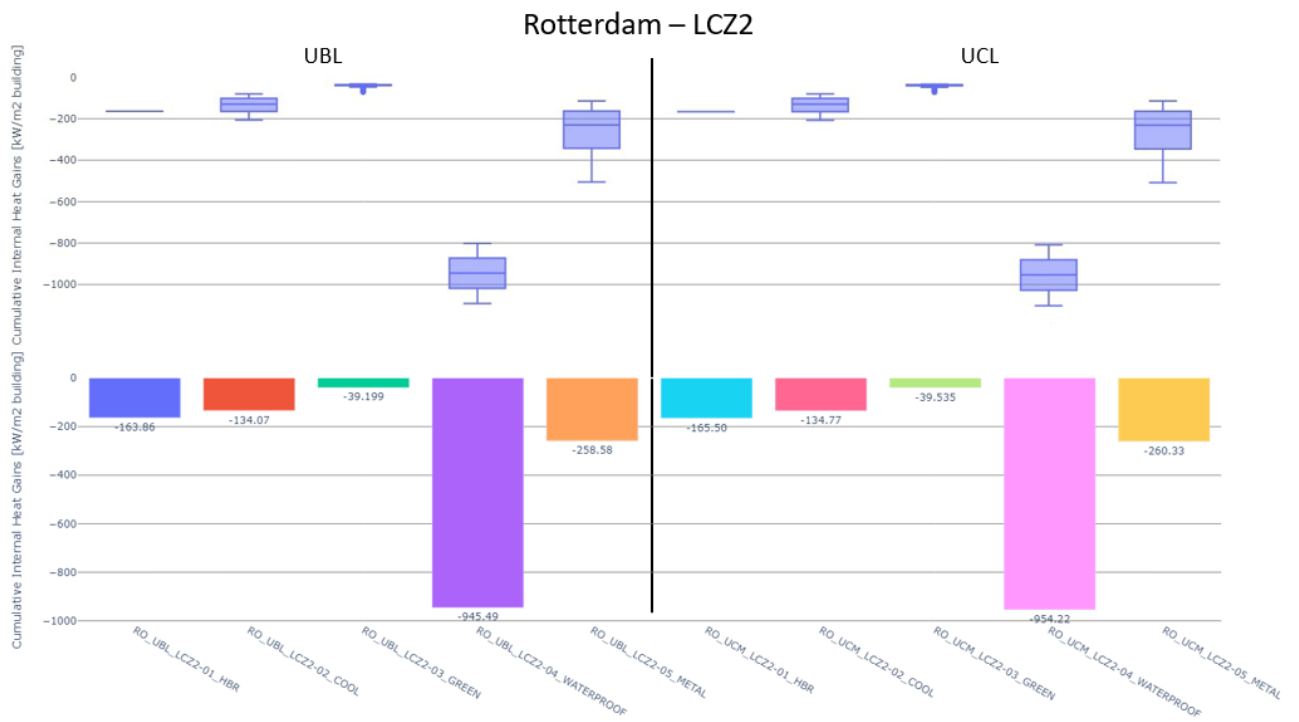


Figura 25. Accumulo di calore entrante: Rotterdam – LCZ2

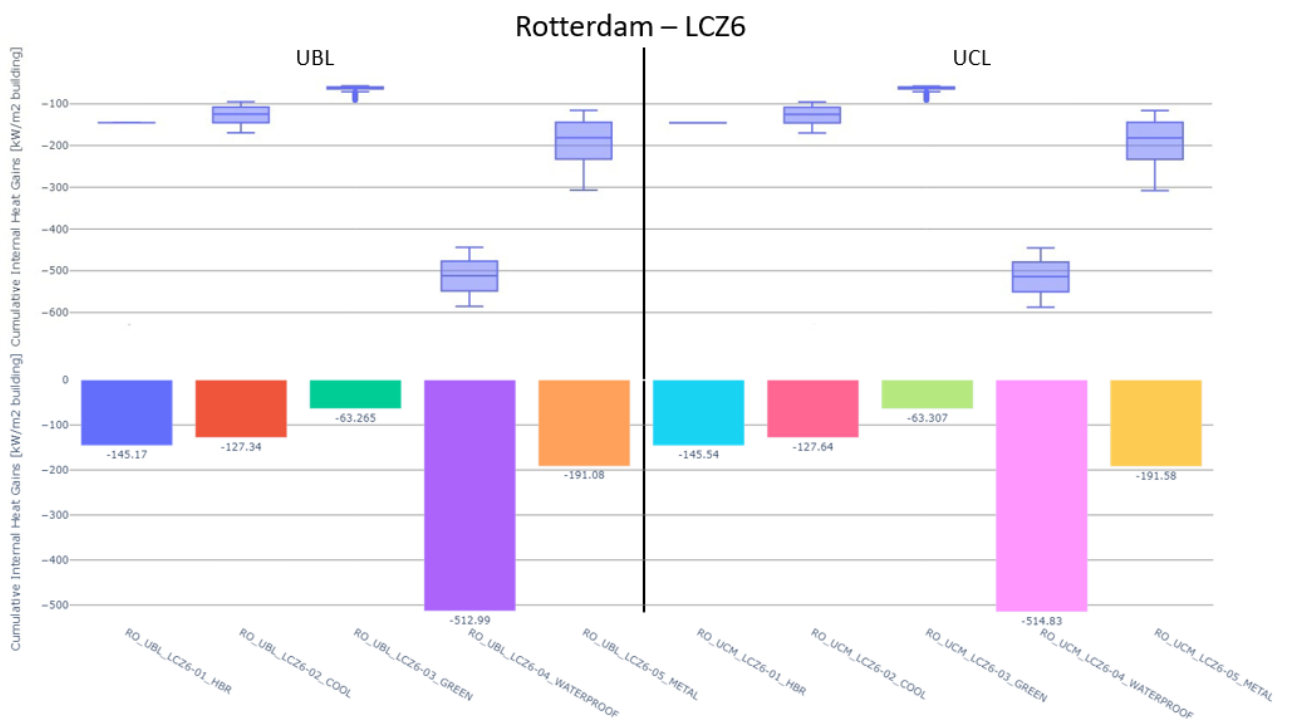


Figura 26. Accumulo di calore entrante: Rotterdam – LCZ6

Figura 23, Figura 24, Figura 25 e Figura 26 rappresentano la somma di calore entrante nell'edificio attraverso il tetto, considerando un arco temporale di tre mesi.

Analizzando tutti i possibili scenari, riportati in Figura 23, Figura 24, Figura 25, Figura 26, si può notare che, in generale, tra le coperture analizzate quella che permette il passaggio di calore in modo più consistente è quella in guaina impermeabilizzante. Seguono i tetti metallici, quelli in HBR, i tetti freddi e i verdi.

La somma dell'accumulo di calore che entra negli edifici ha un valore che oscilla tra 513,5-2320 kW/m<sup>2</sup> per i tetti con membrana, tra 191-1240 kW/m<sup>2</sup> per i tetti metallici, tra 145-1000 kW/m<sup>2</sup> per i tetti HBR, tra 127,5-911 kW/m<sup>2</sup> per i tetti freddi e tra 39-462 kW/m<sup>2</sup> per i tetti verdi. In termini percentuali, risulta che: i tetti metallici presentano una temperatura superficiale più bassa in media del 56%, i tetti HBR del 66%, i tetti freddi del 69,6% e i tetti verdi del 85,4%.

Anche nel caso del guadagno di calore interno non si registrano variazioni significative tra lo scenario UBL e lo scenario UCL.

Si può notare che, in linea generale, nella città di Reggio Emilia il calore entrante registrato è superiore a quello misurato nella città di Rotterdam.

Infatti, considerando la zona climatica LCZ2 la situazione che si registra in Reggio Emilia (Figura 23) rispetto a Rotterdam (Figura 25) è la seguente: in termini assoluti, la differenza di calore accumulato nel caso di coperture in guaina è di 1370 kW/m<sup>2</sup>, di 981 kW/m<sup>2</sup> nel caso di tetti metallici, 835,5 kW/m<sup>2</sup> nel caso di HBR, 777 kW/m<sup>2</sup> per i freddi mentre di 423 kW/m<sup>2</sup> nel caso dei tetti verdi; in termini percentuali, nella città di Rotterdam l'accumulo di calore misurato rispetto alla città di Reggio Emilia è minore del 59% per i tetti in guaina impermeabilizzante, del 79% per i tetti metallici, del 83,6% per i tetti HBR, del 85,3% per i freddi e del 91,6% per i tetti verdi.

Le situazioni sono analoghe in entrambi i casi di UBL e UCL.

Considerando invece la LCZ6, in termini assoluti, si ha una differenza di 632,5 kW/m<sup>2</sup> per i tetti con membrana, 471,5 kW/m<sup>2</sup> per i metallici, 402 kW/m<sup>2</sup> per gli HBR, 369,5 kW/m<sup>2</sup> per i tetti freddi e 190 kW/m<sup>2</sup> per i verdi. Mentre, in termini percentuali, si ha una differenza del 55,2% per i tetti in guaina, del 71,2% per quelli metallici, del 73,5% per gli HBR, del 74,3% per i freddi e del 75% per i tetti verdi.

Per quanto riguarda la città di Reggio Emilia, confrontando gli scenari che si verificano nel caso LCZ2 (Figura 23) rispetto a LCZ6 (Figura 24), si ottiene che le coperture con guaina presentano un calore cumulato superiore di 1174 kW/m<sup>2</sup>, di 577,5 kW/m<sup>2</sup> per i tetti metallici, di 453 kW/m<sup>2</sup> per i tetti HBR, di 414 kW/m<sup>2</sup> per i freddi e di 208,5 kW/m<sup>2</sup> per i tetti verdi. In termini percentuali,

nella LCZ2 si è misurato un calore accumulato superiore rispetto alla LCZ6 del 50,6% per i tetti in guaina, del 46,6% per i tetti metallici, del 45,3% per gli HBR e i freddi, del 45% per i tetti verdi.

Per la città di Rotterdam, confrontando gli scenari che si verificano nel caso LCZ2 (Figura 25) rispetto a LCZ6(Figura 26), si nota che la differenza nel caso dei tetti con guaina è di 436,5 kW/m2, di 68 kW/m2 nel caso dei tetti metallici, di 19,5 kW/m2 nel caso dei tetti HBR, di 6,5 kW/m2 nel caso dei tetti freddi. Unica differenza per il caso dei tetti verdi in cui la condizione LCZ6 permette l'accumulo di calore superiore dei 24,3 kW/m2 rispetto al caso LCZ2. In termini percentuali, i valori del calore accumulato nella LCZ2 sono superiori rispetto a quelli della LCZ6 del 46% per i tetti in membrana, del 26,3% per i metallici, dell'12% per gli HBR, del 5% per i freddi ma per i tetti verdi, come detto in precedenza, c'è un'anomalia perché nella LCZ6 il valore calcolato è maggiore del 38,4% del valore nella LCZ2.

Infine, paragonando i due modelli di scambio termico UBL e UCL, delle figure sopra riportate, non esistono differenze sostanziali.

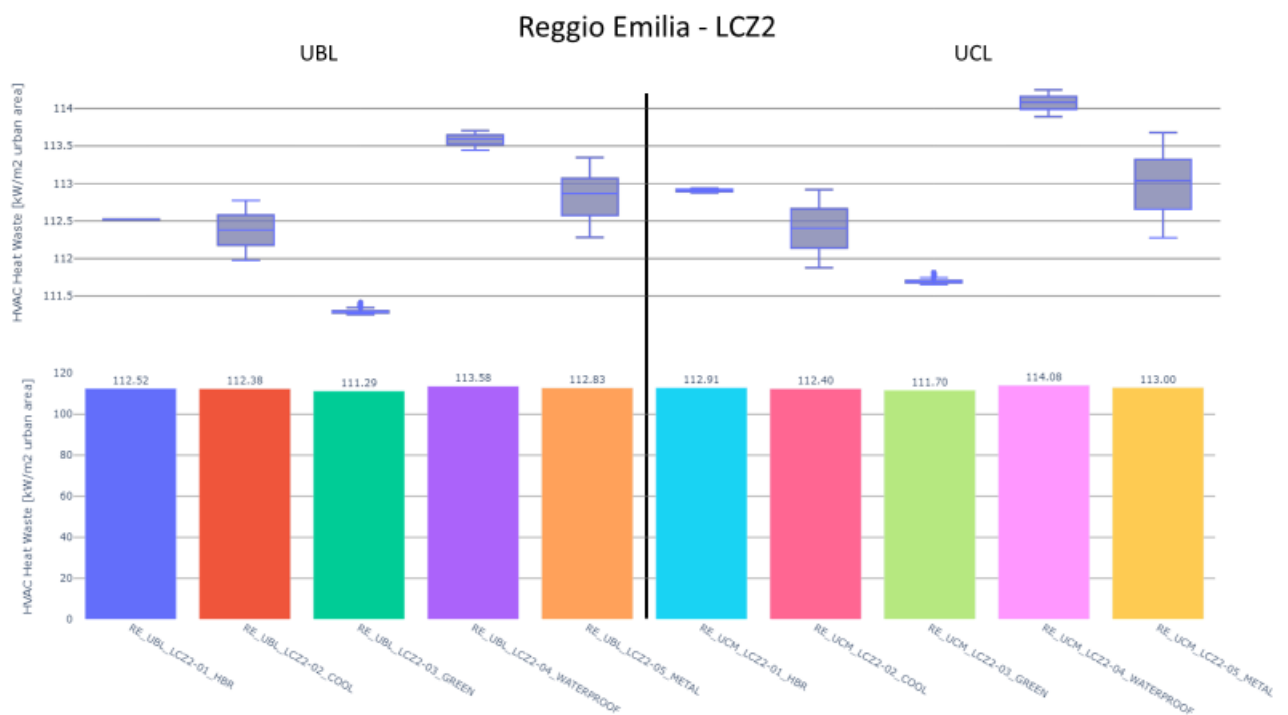


Figura 27. Calore uscente HVAC: Regio Emilia – LCZ2

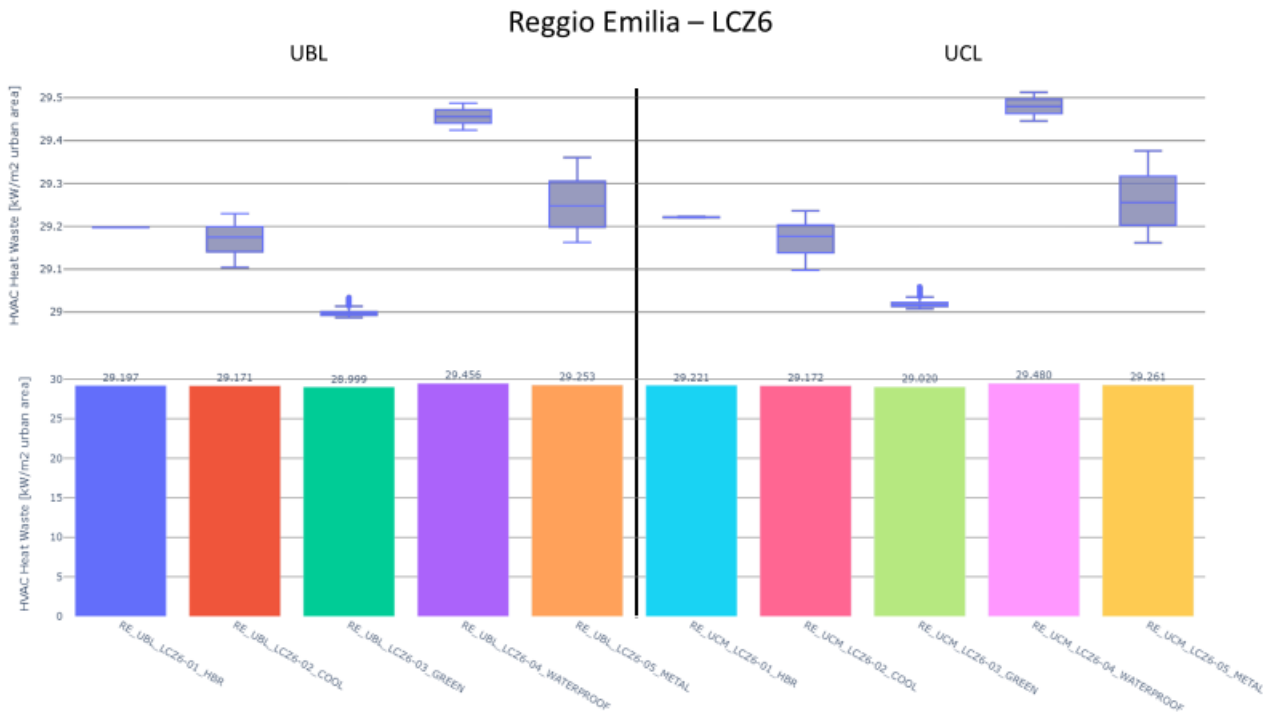


Figura 28. Calore uscente HVAC: Reggio Emilia – LCZ6

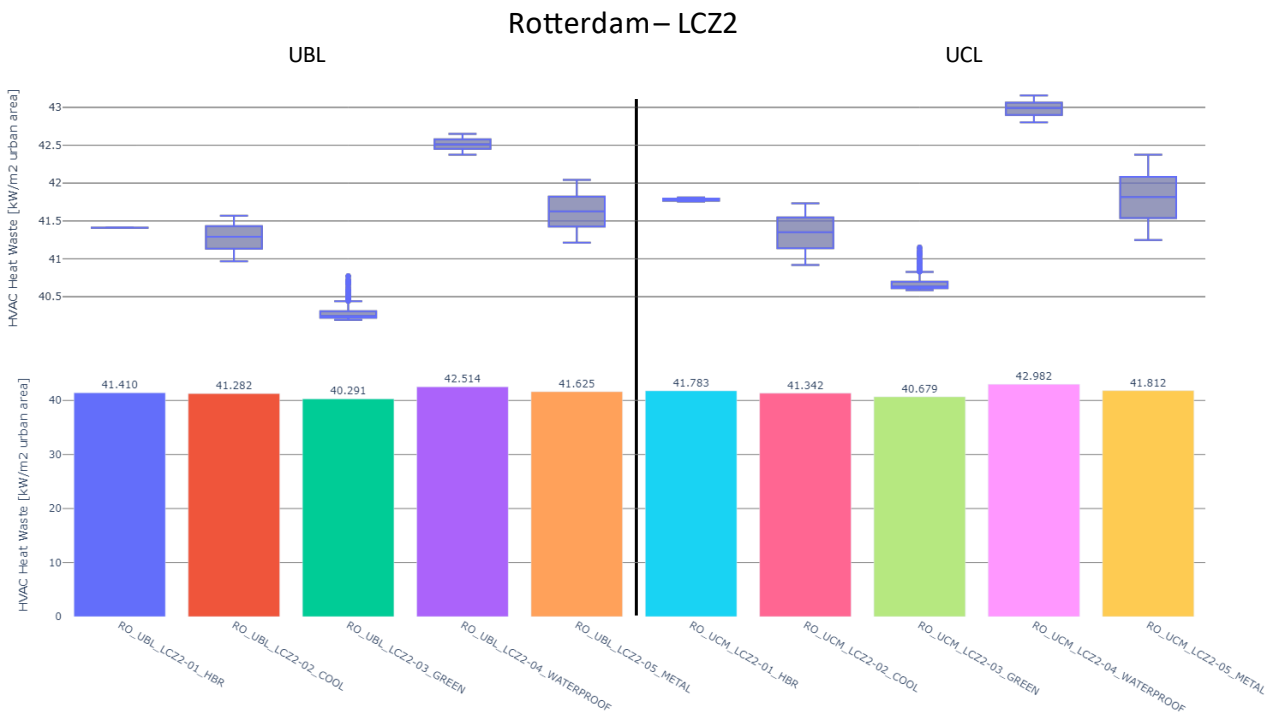


Figura 29. Calore uscente HVAC: Rotterdam – LCZ2



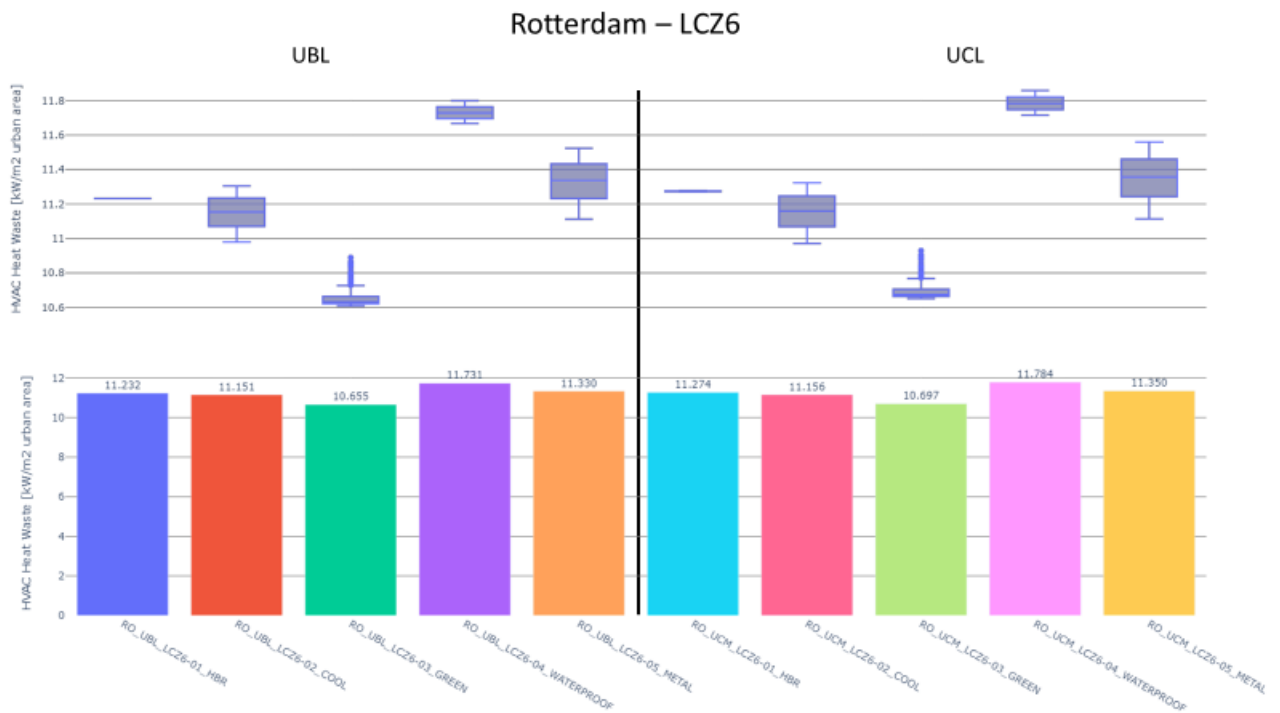


Figura 30. Calore uscente HVAC: Rotterdam– LCZ6

Gli ultimi grafici, Figura 27, Figura 28, Figura 29, Figura 30, rappresentano i valori di calore uscente dall'edificio attraverso i tetti, prodotto dagli HVAC.

L'acronimo HVAC sta per "Heating, Ventilation, and Air Conditioning", che in italiano si traduce come "Riscaldamento, Ventilazione e Condizionamento dell'Aria". Si tratta di un sistema o di un insieme di tecnologie e dispositivi utilizzati per regolare la temperatura, l'umidità, la qualità dell'aria e la circolazione dell'aria all'interno degli edifici, sia residenziali che commerciali.

Tra questi dispositivi sono compresi tutti i sistemi di ventilazione, impianti di climatizzazione e riscaldamento, e i dispositivi per il filtraggio e deumidificazione/umidificazione dell'aria.

Gli HVAC durante il loro funzionamento rilasciano calore – che viene disperso nell'ambiente urbano incrementando il fenomeno dell'Isola di Calore Urbano. Per questo motivo è stato importante inserire una valutazione della correlazione tra coperture e calore uscente prodotto da questi dispositivi.

In realtà dai risultati ottenuti dalla simulazione si può notare che a prescindere dal tipo di copertura, modello di scambio termico, i valori ottenuti sono piuttosto simili. Questo dipende dal fatto che il contributo di dispersione dovuto ai tetti è limitato rispetto ai contributi dovuti ad altri fattori che

influiscono nella dispersione del calore all'esterno, come le pareti, le finestre, il calore antropico prodotto all'interno, ecc...

I risultati differiscono considerando le due città e le diverse zone climatiche.

Infatti, per la città di Reggio Emilia, si ha una maggiore dispersione termica nella LCZ2 (Figura 27) rispetto alla LCZ6 (Figura 28) con una differenza di circa 83,5 kW/m<sup>2</sup> per ciascuna superficie; per la città di Rotterdam, invece, la differenza tra LCZ2 (Figura 29) e LCZ6 (Figura 30) è di circa 30,3 kW/m<sup>2</sup> per ciascuna copertura.

In termini percentuali, per la città di Reggio Emilia, nella LCZ2 c'è una maggior dispersione del 74% rispetto a quella registrata nella LCZ6; mentre nella città di Rotterdam, c'è una maggiore dispersione nella LCZ2 rispetto alla LCZ6 del 73%.

Confrontando invece la città di Reggio Emilia e di Rotterdam, nel caso LCZ2 (Figura 27, Figura 29), la differenza di calore disperso è maggiore in Reggio Emilia ed è di circa 71 kW/m<sup>2</sup> per ciascuna tipologia di tetto, mentre nel caso LCZ6 (Figura 28, Figura 30) la differenza tra le due città è di circa 18 kW/m<sup>2</sup> per ciascuna tipologia di tetto. In percentuale, per la LCZ2, nella città di Reggio Emilia c'è una dispersione del 63% in più rispetto a Rotterdam, mentre, per la LCZ6, è presente una dispersione di calore del 61,6% in più a Reggio Emilia rispetto a Rotterdam.

L'andamento generale, anche con piccole differenze, è sempre lo stesso: i tetti in guaina sono quelli che fanno uscire più calore all'esterno; quindi, sono quelli meno performanti e i tetti verdi invece sono quelli più efficaci.

Nel UBL e nel UCL il calore uscente registrato è pressoché lo stesso per ogni tipologia di manto.

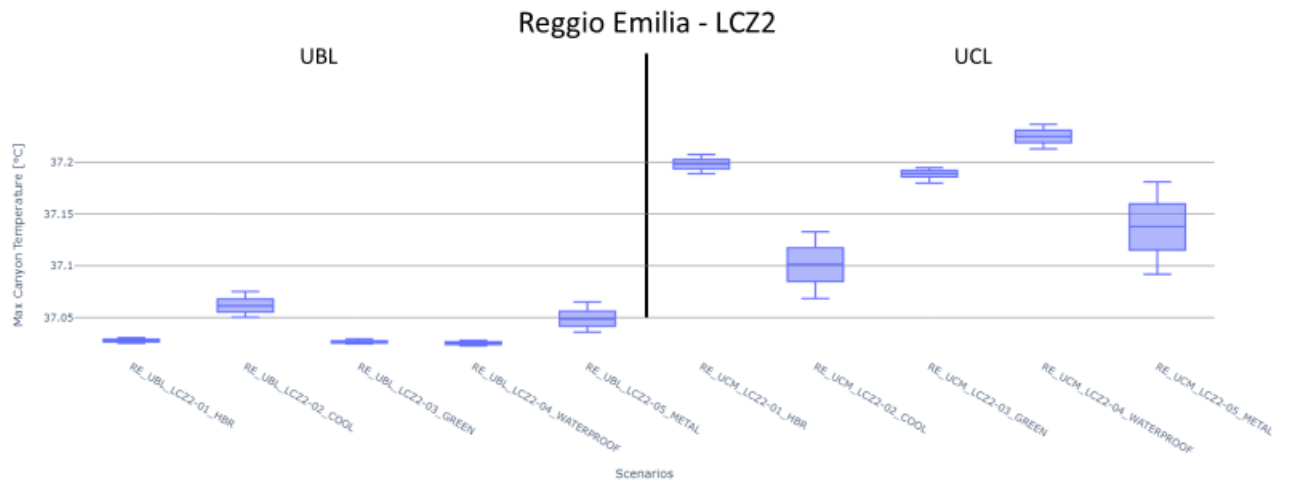


Figura 31. Temperatura dell'aria: Reggio Emilia - LCZ2

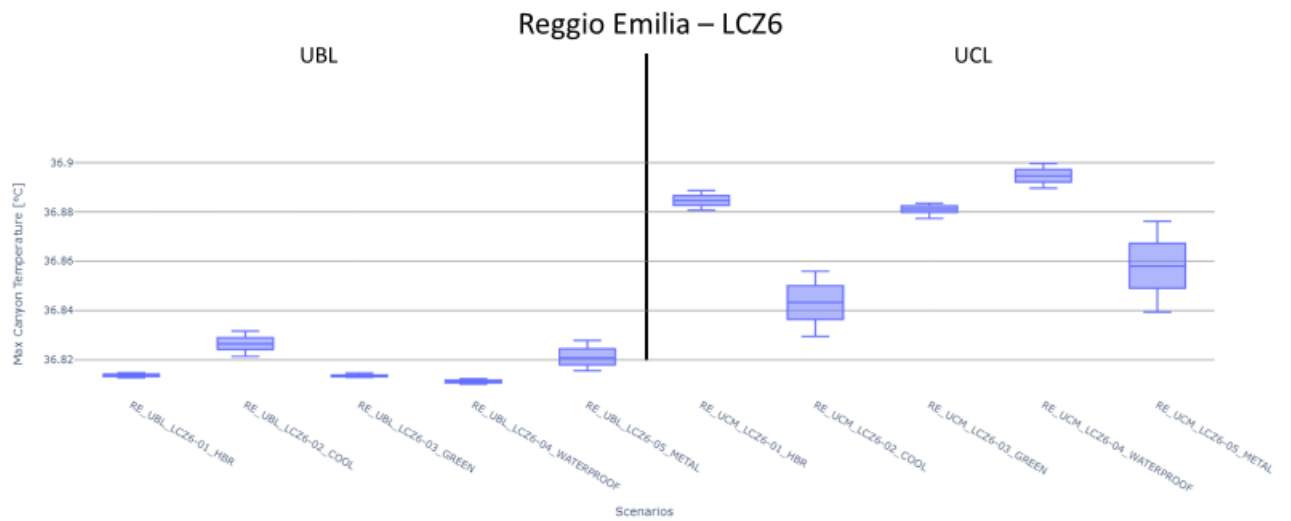


Figura 32. Temperatura dell'aria: Reggio Emilia - LCZ6

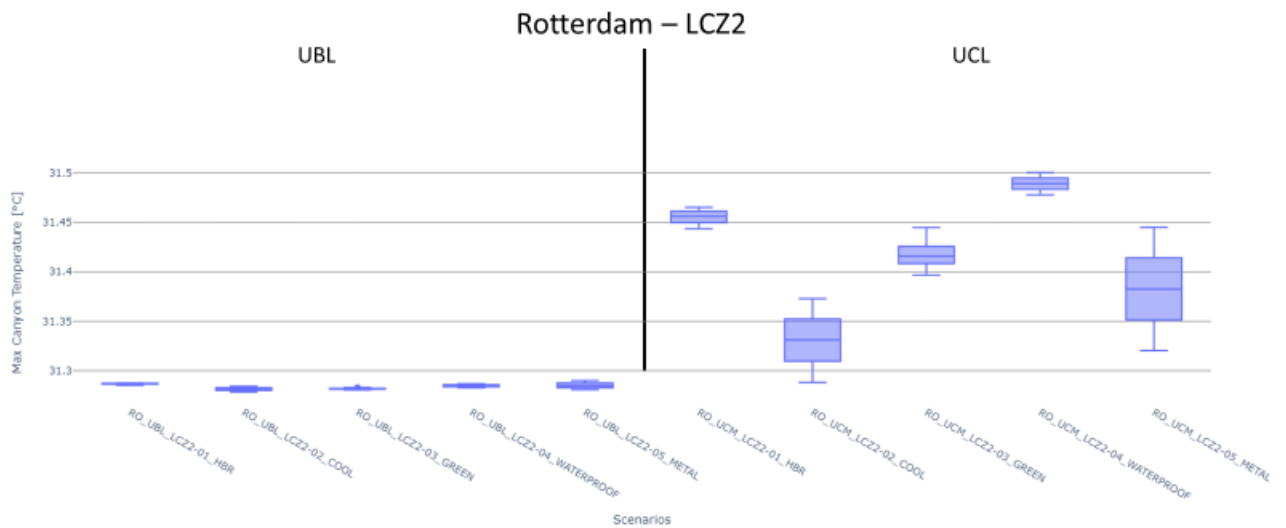


Figura 33. Temperatura dell'aria: Rotterdam - LCZ2

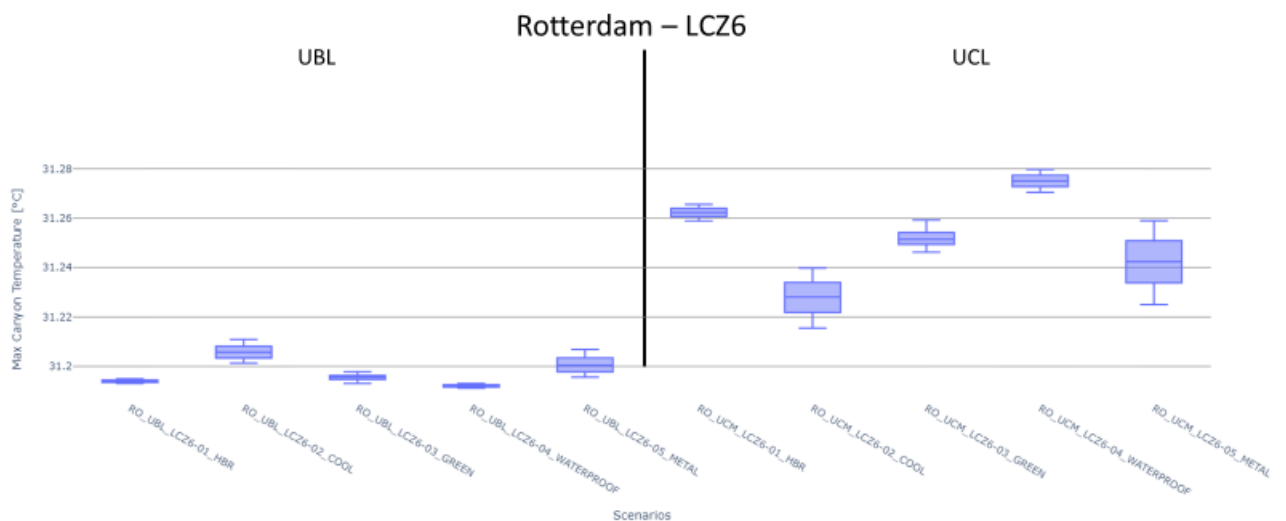


Figura 34. Temperatura dell'aria: Rotterdam - LCZ6

Nelle precedenti Figura 31, Figura 32, Figura 33, Figura 34, vengono riportati i risultati inerenti alla temperatura dell'aria del canyon urbano. Nonostante le piccolissime differenze che ci sono tra le diverse tipologie di coperture, si può notare un'influenza data dal modello di scambio termico.

Infatti, nel UCL, per il caso del tetto in guaina, sono state registrate temperature dell'aria superiori rispetto a tutti gli altri.

Sempre considerando il caso dell'UCL, il valore che risulta più anomalo è quello legato ai tetti verdi: tale valore è ottenuto da mancati valori di temperatura di ingresso al software, il quale di conseguenza non riesce a calcolare correttamente i valori di temperatura dell'aria corretti.

Per il caso dell'UBL le variazioni non sono significative a prescindere dal tipo di copertura considerata.

#### 4.2. Risultati con trasmittanza $U = 0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$

Di seguito sono riportati grafici riguardanti le medesime simulazioni ma effettuate considerando un valore di trasmittanza pari a  $0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

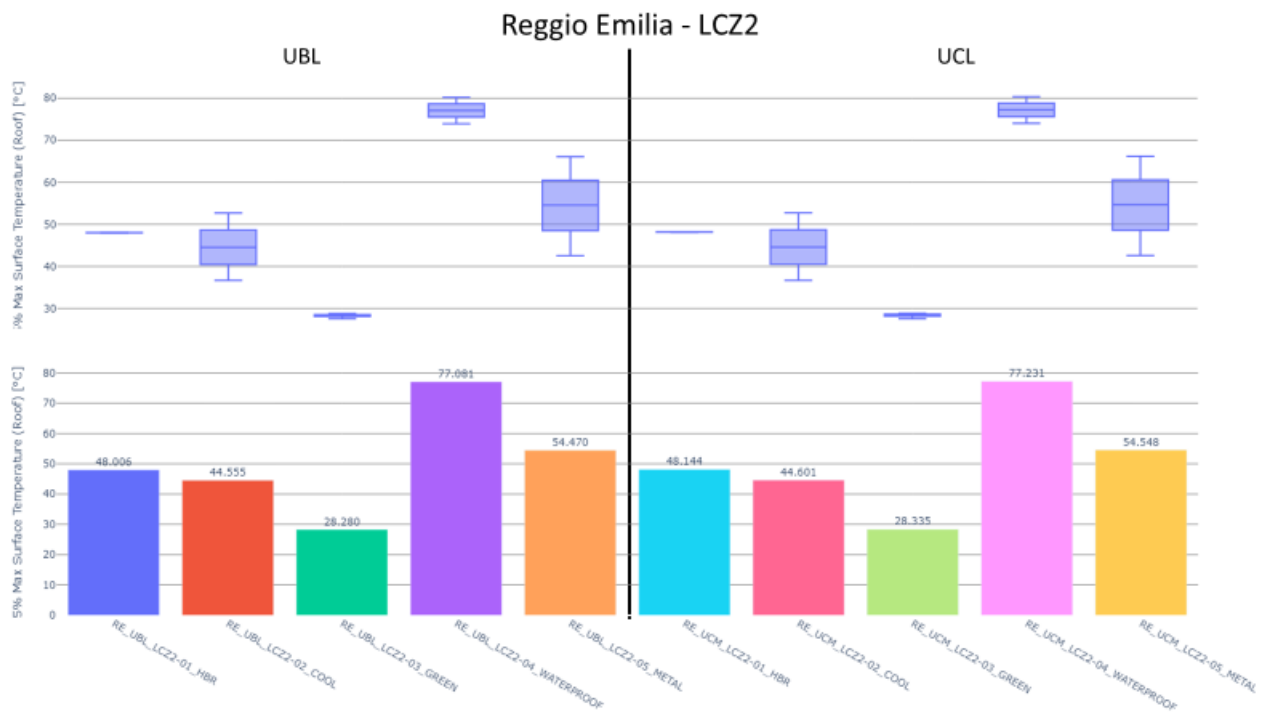


Figura 35. Temperature superficiali del manto: Reggio Emilia - LCZ2

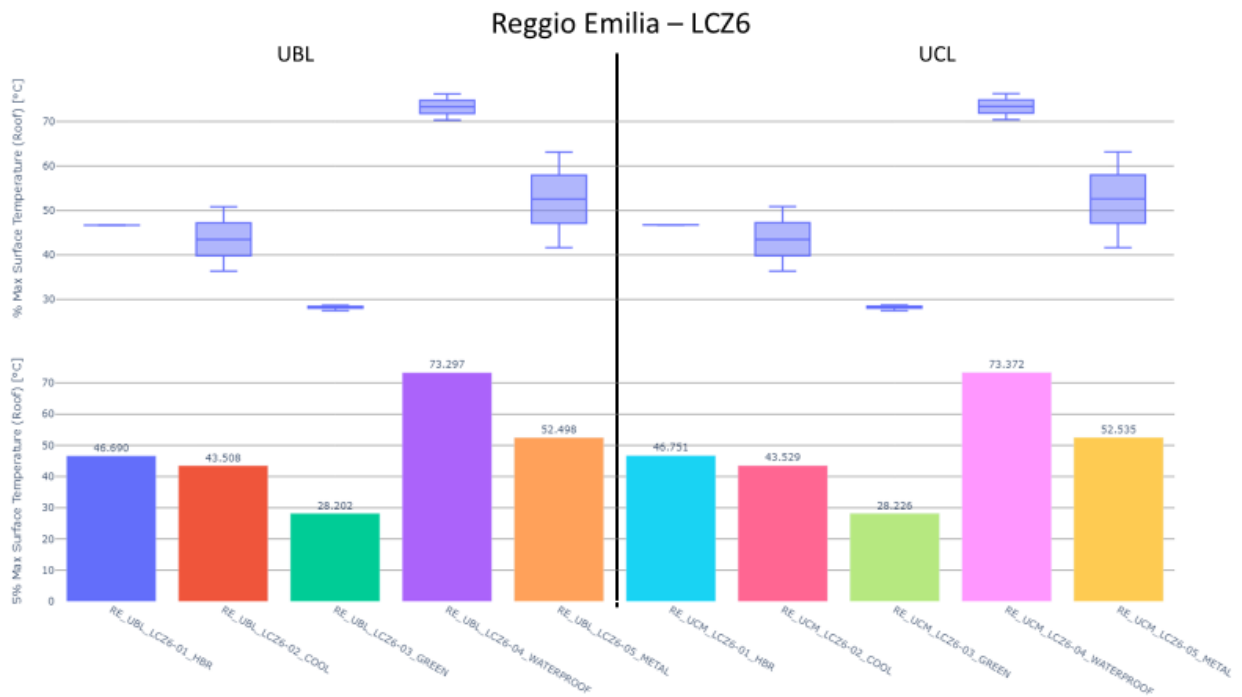


Figura 36. Temperature superficiali del manto: Reggio Emilia - LCZ6

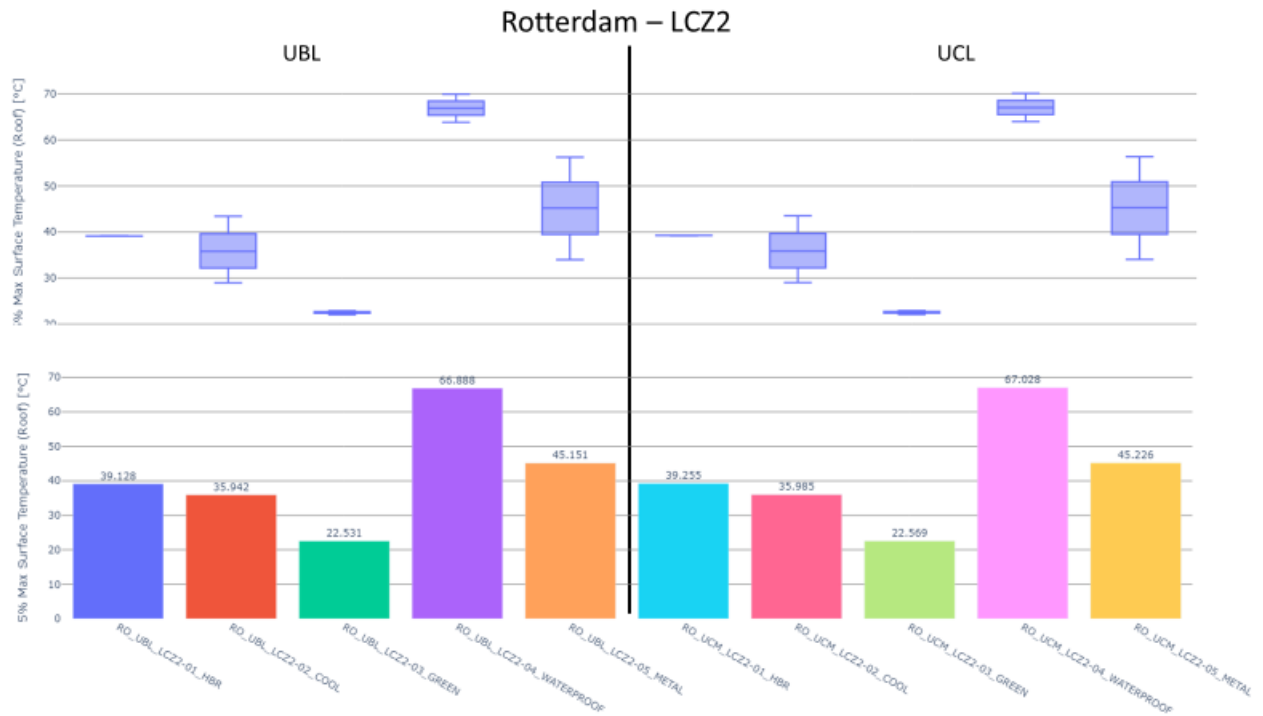


Figura 37. Temperature superficiali del manto: Rotterdam - LCZ2

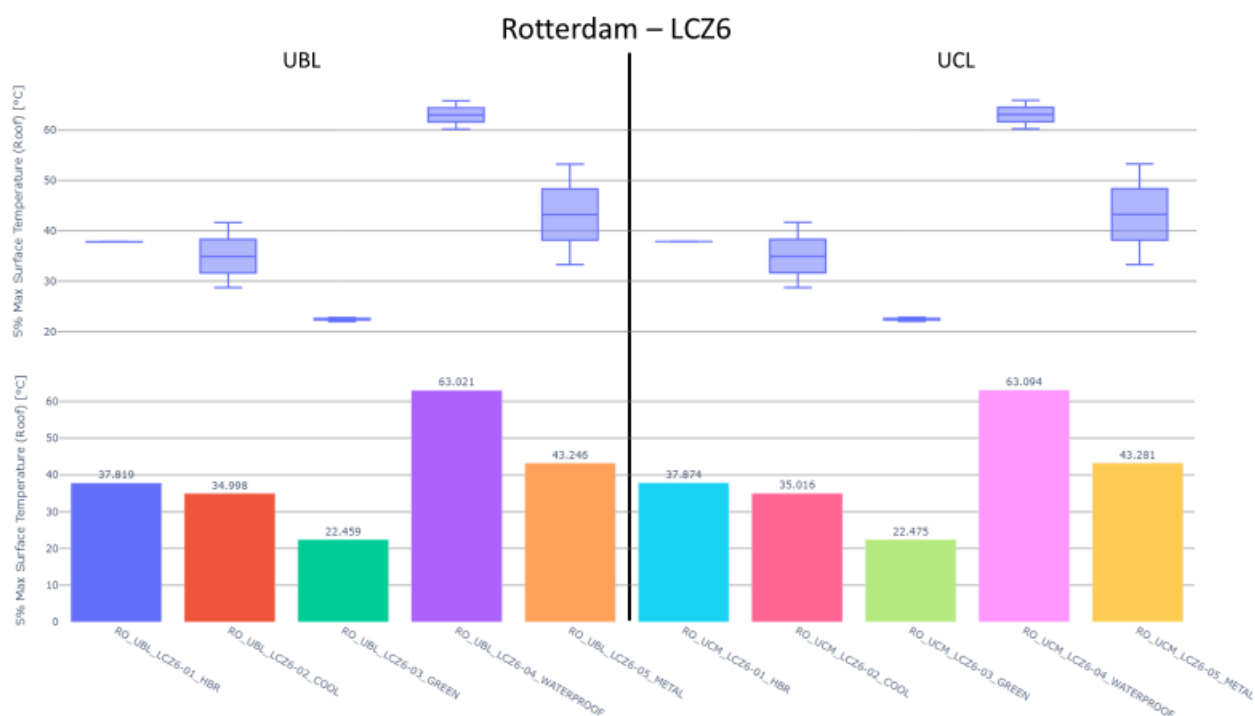


Figura 38. Temperature superficiali del manto: Rotterdam – LCZ6

Nelle precedenti figure (Figura 35, Figura 36, Figura 37, Figura 38), vengono rappresentati i risultati ottenuti relativi alla temperatura superficiale, più precisamente il 5% delle temperature superficiali massime registrate, delle diverse tipologie di tetti: HBR, tetti freddi, tetti verdi, tetti piani con membrane impermeabili, tetti metallici.

Osservando, nel complesso, gli istogrammi in Figura 35, Figura 36, Figura 37, Figura 38, si può notare una ricorrenza di un andamento generale dei valori medi assoluti, sia per lo scenario UBL che per quello UCL, ovvero: i tetti con guaina impermeabilizzante hanno una temperatura superficiale più elevata, superiore rispetto a tutte le altre tipologie di copertura. Tale temperatura ha un valore medio compreso tra 63-77°C. Per quanto riguarda le altre tipologie, sempre valutando entrambi i modelli di scambio termico, la temperatura assume un valore tra 43-54,5°C per i tetti metallici, tra 38-48°C per i tetti HBR, 35-44,5°C per i tetti freddi e in fine tra 22,5-28°C per i tetti verdi, la tipologia con minor temperatura superficiale registrata in assoluto.

Notando che il tetto con membrana impermeabilizzante è la tipologia in cui vengono registrate temperature più elevate, quindi la peggiore sotto un punto di vista prestazionale, si può analizzare l'andamento generale attraverso valori percentuali, mettendo a confronto quest'ultima con le restanti tipologie. In linea generale, risulta che: i tetti metallici presentano una temperatura

superficiale più bassa in media del 30,4%, i tetti HBR del 39%, i tetti freddi del 43,4% e i tetti verdi del 64%.

Per quanto riguarda il confronto dei due scenari di scambio di calore cioè UBL e UCL, per ciascun caso, non si riscontrano sostanziali differenze.

Al contrario considerando le due diverse città, Reggio Emilia e Rotterdam, è possibile notare che per la città di Reggio Emilia sono state registrate temperature superficiali più elevate rispetto a quelle misurate nella città di Rotterdam.

Infatti, prendendo in esame la zona climatica LCZ2, in termini assoluti, nella città di Reggio Emilia (Figura 35) i tetti in guaina hanno una temperatura superficiale superiore di 10,2°C rispetto a quelli di Rotterdam (Figura 37), quelli metallici di 9,3°C, quelli HBR di 9°C, quelli freddi differiscono di 8,6°C, mentre i tetti verdi solo 5,8°C.

In termini percentuali, per la LCZ2, possiamo dire che nella città di Rotterdam le temperature superficiali sono più basse rispetto alla città di Reggio Emilia del 13,2% per i tetti con guaina impermeabilizzante, del 17% per i tetti metallici, del 18,5% per gli HBR, del 19,3% per i tetti freddi e del 20,5% per i tetti verdi.

Analoghe considerazioni possono essere fatte nel caso della zona urbana LCZ6 (Figura 36, Figura 38), ma in questo caso le temperature superficiali della città di Reggio Emilia superano quelle di Rotterdam di: 10,3°C per i tetti con membrana, 9,3°C per i tetti metallici, 9°C per i tetti HBR, 8,5°C per quelli freddi e 5,7°C per i tetti verdi.

In termini percentuali, per la LCZ6, possiamo dire che nella città di Rotterdam le temperature superficiali sono più basse rispetto alla città di Reggio Emilia del 14% per i tetti in guaina, del 17,7% per i tetti in metallo, del 19% per i tetti HBR, del 19,5% per i tetti freddi e del 20,2% i tetti verdi.

Mettendo a confronto la LCZ2 con la LCZ6 di ogni città, si può notare che nella prima le temperature superficiali sono, in linea generale, più elevate che nella LCZ6.

Infatti, prendendo come riferimento la città di Reggio Emilia, la temperatura superficiale del caso LCZ2 (Figura 35) supera quella del caso LCZ6 (Figura 36) di 4°C per i tetti in guaina, 2°C per i tetti metallici, 1,4°C per gli HBR, 1°C per i tetti freddi e una minima differenza di 0,1°C per i tetti verdi. Mentre, in termini percentuali, le temperature registrate nella LCZ6 sono più basse del 5%



per i tetti in membrana, del 3,7% per i tetti metallici, 3% per i HBR, 2,5% per i freddi e 0,4% per i verdi. Tali differenze sono uguali per entrambi gli scenari UBL e UCL.

Analogamente, considerando la città di Rotterdam, si registra una variazione tra la LCZ2 (Figura 37) e la LCZ6 (Figura 38) di 4°C per i tetti in guaina, 2°C per i tetti metallici, 1,4°C per i tetti HBR, 1°C per i tetti freddi e alcuna differenza per il caso dei tetti verdi. In termini percentuali la variazione tra LCZ2 e LCZ6 è del 6% per i tetti in guaina, del 4,4% per i tetti metallici, del 3,6% per gli HBR, 2,8% per quelli freddi e alcuna differenza per il caso dei tetti verdi.

Anche in questo caso, le differenze sono uguali per entrambi gli scenari UBL e UCL.

Si può notare che, a prescindere dal luogo, scenario, zona climatica considerata, la soluzione dei tetti verdi non subisce grandi variazioni. Questo dimostra che l'efficacia di tale soluzione non è influenzata da fattori urbani e pertanto risulta essere un metodo valido per il contenimento dell'effetto dell'Isola di Calore Urbano in qualsiasi città e contesto.

Al contrario, la soluzione dei tetti con membrana impermeabilizzante risulta essere poco efficace in qualsiasi contesto e in qualsiasi scenario.

È importante sottolineare l'ampiezza dei range di valori che caratterizzano i vari tetti. I tetti metallici hanno un range ampio perché vengono analizzati tetti con una importante differenza di albedo e/o di conducibilità termica come riportato Figura 18.

Infatti, sono state registrate temperature più elevate per quelli con albedo basso. Lo stesso vale per i tetti freddi ma hanno temperature minori in media e si può notare che un tetto freddo, con un basso albedo, ha la stessa temperatura superficiale di un tetto in metallo che albedo medio.

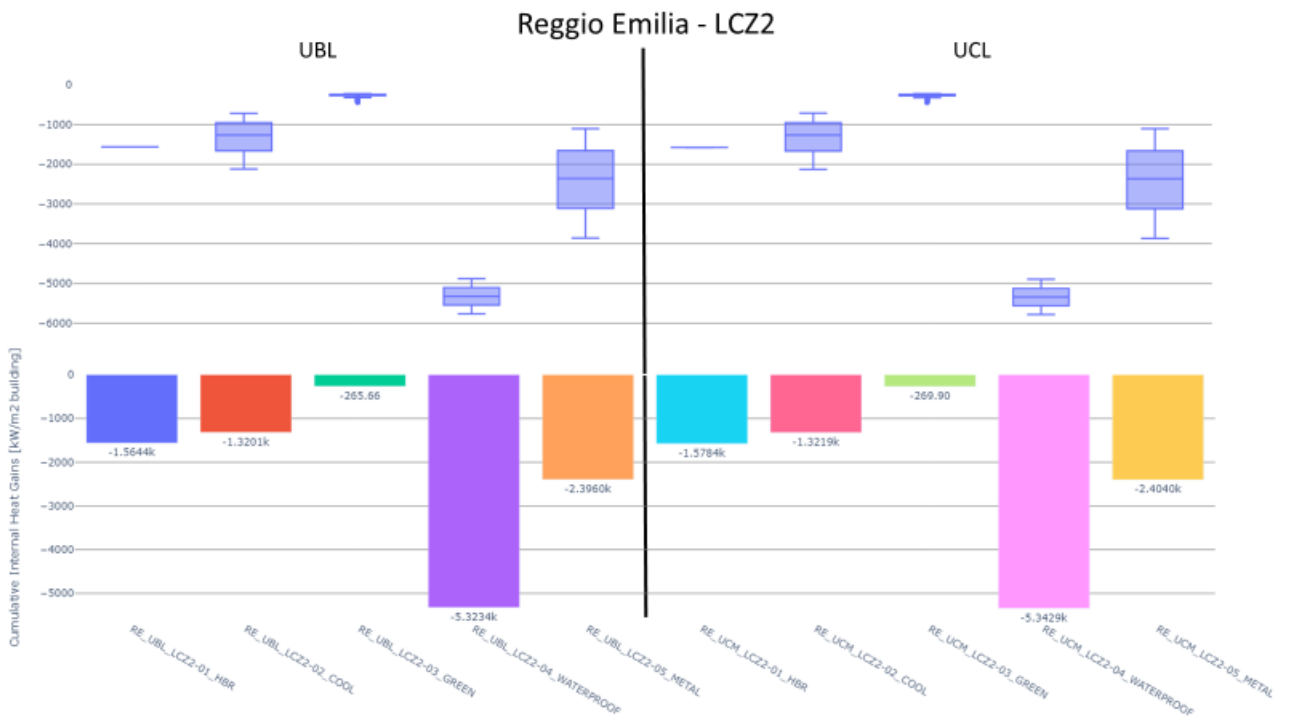


Figura 39. Accumulo di calore entrante: Reggio Emilia - LCZ2

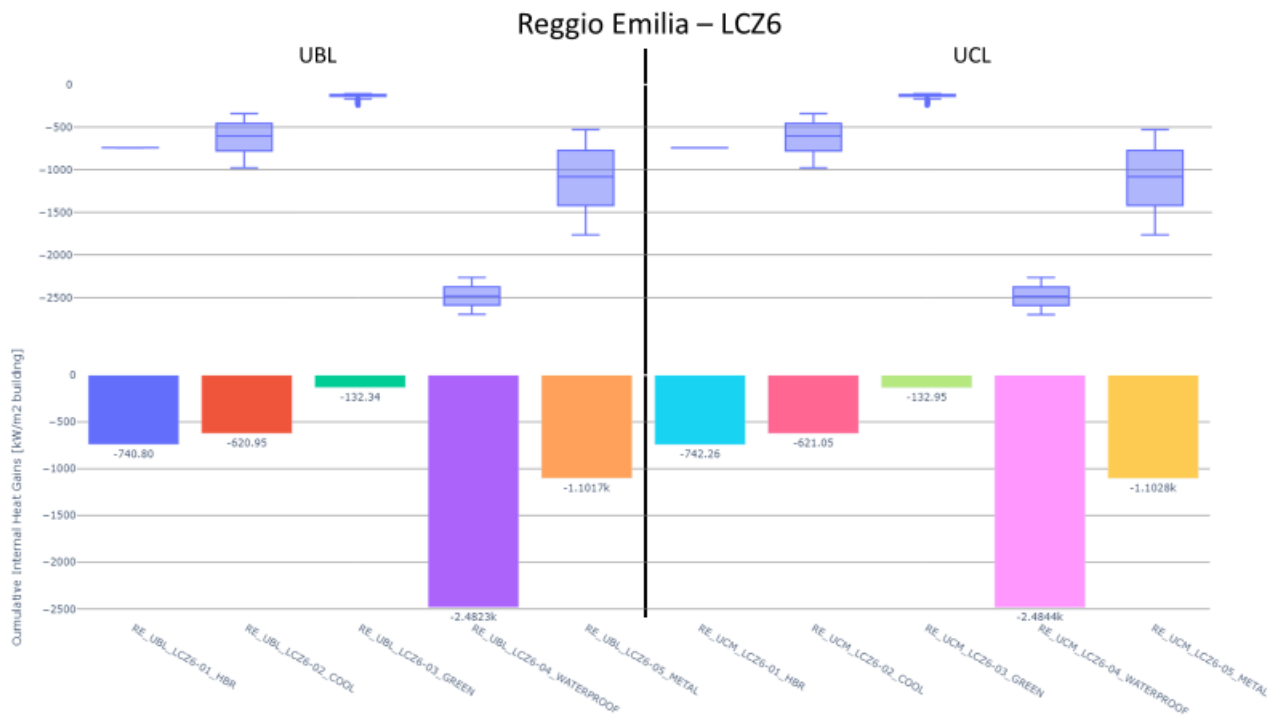


Figura 40. Accumulo di calore entrante: Reggio Emilia - LCZ6

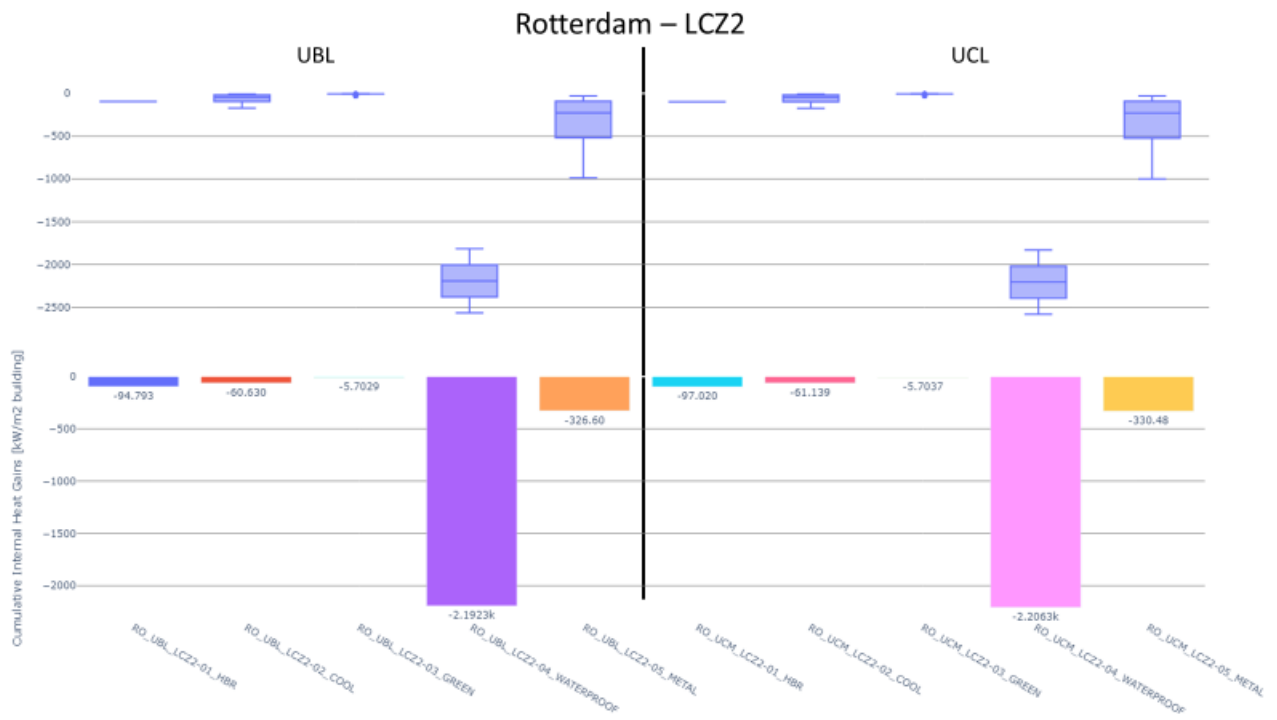


Figura 41. Accumulo di calore entrante: Rotterdam - LCZ2

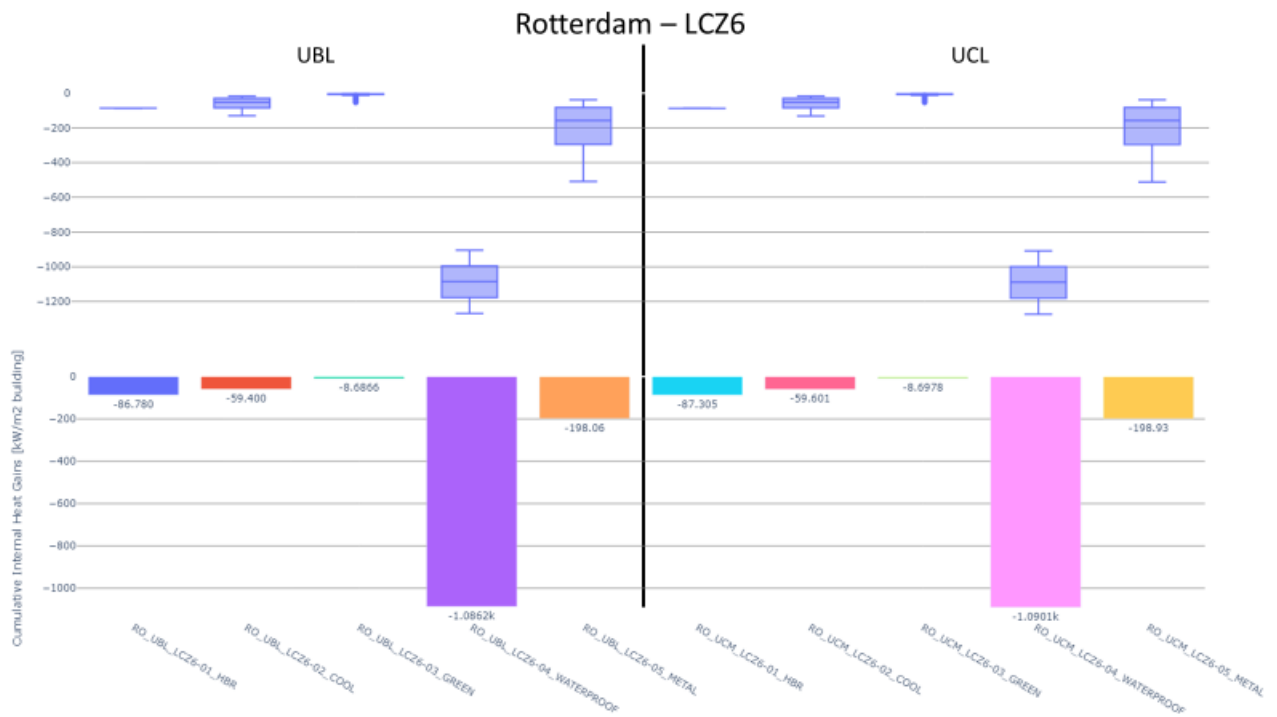


Figura 42. Accumulo di calore entrante: Rotterdam - LCZ6

Le figure Figura 39, Figura 40, Figura 41, Figura 42 rappresentano la somma di calore entrante nell'edificio attraverso il tetto, considerando un arco temporale di tre mesi.

Analizzando tutti i possibili scenari, riportati in Figura 39, Figura 40, Figura 41, Figura 42, si può notare che, in generale, tra le coperture analizzate quella che permette il passaggio di calore in modo più consistente è quella in guaina impermeabilizzante. Seguono i tetti metallici, quelli in HBR, i tetti freddi e i verdi.

La somma dell'accumulo di calore che entra negli edifici ha un valore che oscilla tra 1090-5333 kW/m<sup>2</sup> per i tetti con membrana, tra 198-2400 kW/m<sup>2</sup> per i tetti metallici, tra 87-1570 kW/m<sup>2</sup> per i tetti HBR, tra 59,5-1320 kW/m<sup>2</sup> per i tetti freddi e tra 8,7-268 kW/m<sup>2</sup> per i tetti verdi. In termini percentuali, risulta che: i tetti metallici presentano una temperatura superficiale più bassa in media del 69,4%, i tetti HBR del 82%, i tetti freddi del 85,5% e i tetti verdi del 97%.

Anche nel caso del guadagno di calore interno non si registrano variazioni significative tra lo scenario UBL e lo scenario UCL.

Si può notare che, in linea generale, nella città di Reggio Emilia il calore entrante registrato è superiore a quello misurato nella città di Rotterdam.

Infatti, considerando la zona climatica LCZ2 la situazione che si registra in Reggio Emilia (Figura 39) rispetto a Rotterdam (Figura 41) è la seguente: in termini assoluti, la differenza di calore accumulato nel caso di coperture in guaina è di 3136 kW/m<sup>2</sup>, di 2071,5 kW/m<sup>2</sup> nel caso di tetti metallici, 1474 kW/m<sup>2</sup> nel caso di HBR, 1259 kW/m<sup>2</sup> per i freddi mentre di 262,3 kW/m<sup>2</sup> nel caso dei tetti verdi; in termini percentuali, nella città di Rotterdam l'accumulo di calore misurato rispetto alla città di Reggio Emilia è minore del 58,8% per i tetti in guaina impermeabilizzante, del 86,3% per i tetti metallici, del 94% per i tetti HBR, del 95,4% per i freddi e del 98% per i tetti verdi.

Le situazioni sono analoghe in entrambi i casi di UBL e UCL.

Considerando invece la LCZ6 di Reggio Emilia (Figura 40) e Rotterdam (Figura 42), in termini assoluti, si ha una differenza di 1393 kW/m<sup>2</sup> per i tetti con membrana, 904 kW/m<sup>2</sup> per i metallici, 654,5 kW/m<sup>2</sup> per gli HBR, 561,5 kW/m<sup>2</sup> per i tetti freddi e 123,8 kW/m<sup>2</sup> per i verdi. Mentre, in termini percentuali, si ha una differenza del 56% per i tetti in guaina, del 82% per quelli metallici, del 88,3% per gli HBR, del 90,4% per i freddi e del 93,4% per i tetti verdi.

Per quanto riguarda la città di Reggio Emilia, confrontando gli scenari che si verificano nel caso LCZ2 (Figura 39) rispetto a LCZ6 (Figura 40), si ottiene che le coperture con guaina presentano un calore cumulato superiore di 2850 kW/m<sup>2</sup>, di 1298 kW/m<sup>2</sup> per i tetti metallici, di 828,5 kW/m<sup>2</sup> per i tetti HBR, di 699 kW/m<sup>2</sup> per i freddi e di 135,5 kW/m<sup>2</sup> per i tetti verdi. In termini percentuali,

nella LCZ2 si è misurato un calore accumulato superiore rispetto alla LCZ6 del 53,4% per i tetti in guaina, del 54% per i tetti metallici, del 52,8% per gli HBR, 53% per i freddi e del 50,6% per i tetti verdi.

Per la città di Rotterdam, confrontando gli scenari che si verificano nel caso LCZ2 (Figura 41) rispetto a LCZ6(Figura 42), si nota che la differenza nel caso dei tetti con guaina è di 1107 kW/m<sup>2</sup>, di 130,5 kW/m<sup>2</sup> nel caso dei tetti metallici, di 9 kW/m<sup>2</sup> nel caso dei tetti HBR, di 1,5 kW/m<sup>2</sup> nel caso dei tetti freddi. Unica differenza per il caso dei tetti verdi in cui la condizione LCZ6 permette l'accumulo di calore superiore dei 3 kW/m<sup>2</sup> rispetto al caso LCZ2. In termini percentuali, i valori del calore accumulato nella LCZ2 sono superiori rispetto a quelli della LCZ6 del 50,4% per i tetti in membrana, del 39,7% per i metallici, dell'9,4% per gli HBR, del 2,5% per i freddi ma per i tetti verdi, come detto in precedenza, c'è un'anomalia perché nella LCZ6 il valore calcolato è maggiore del 34,5% del valore nella LCZ2.

Infine, paragonando i due modelli di scambio termico UBL e UCL delle figure Figura 39, Figura 40 ,Figura 41, Figura 42 non esistono differenze sostanziali.

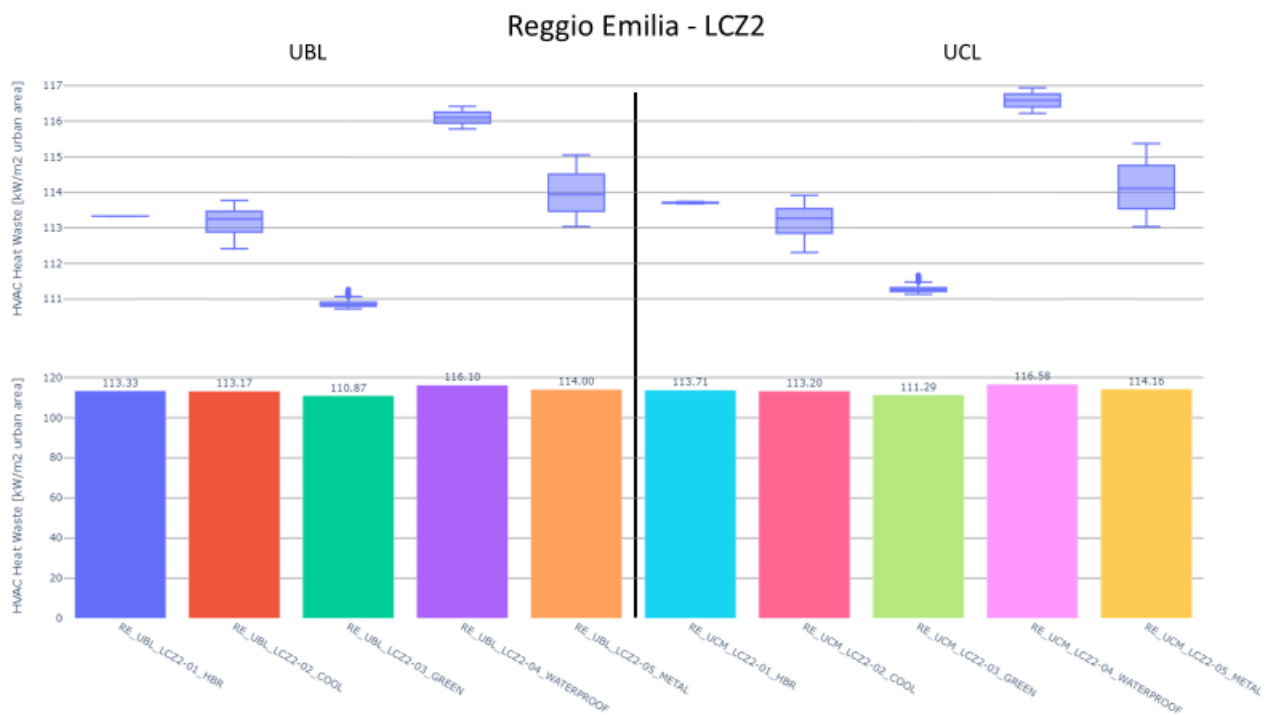


Figura 43. Calore uscente HVAC: Reggio Emilia - LCZ2

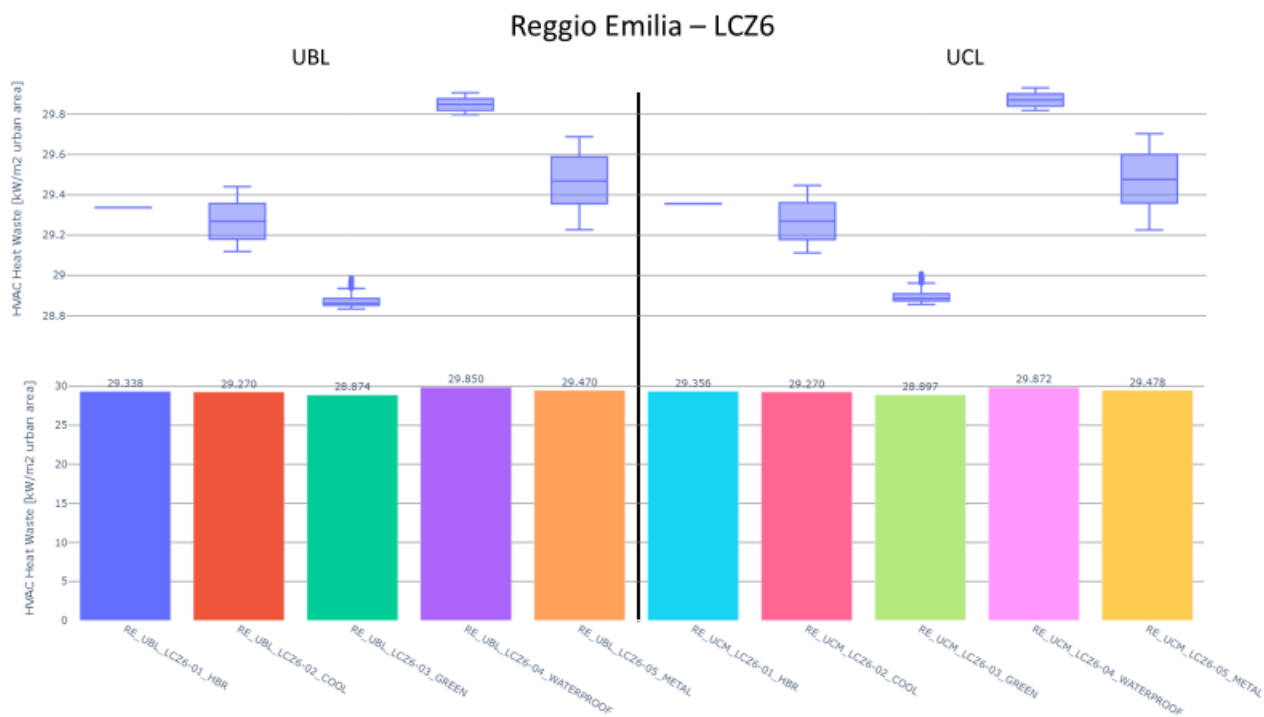


Figura 44. Calore uscente HVAC: Reggio Emilia - LCZ6

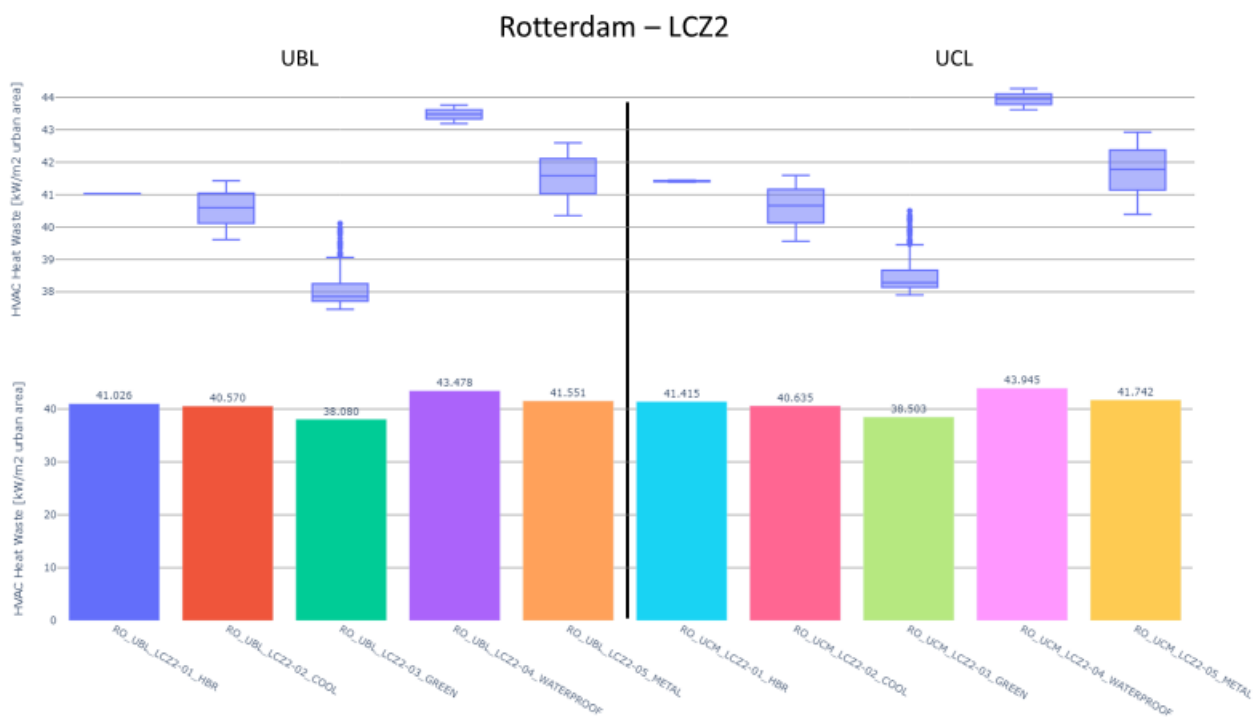


Figura 45. Calore uscente HVAC: Rotterdam – LCZ2

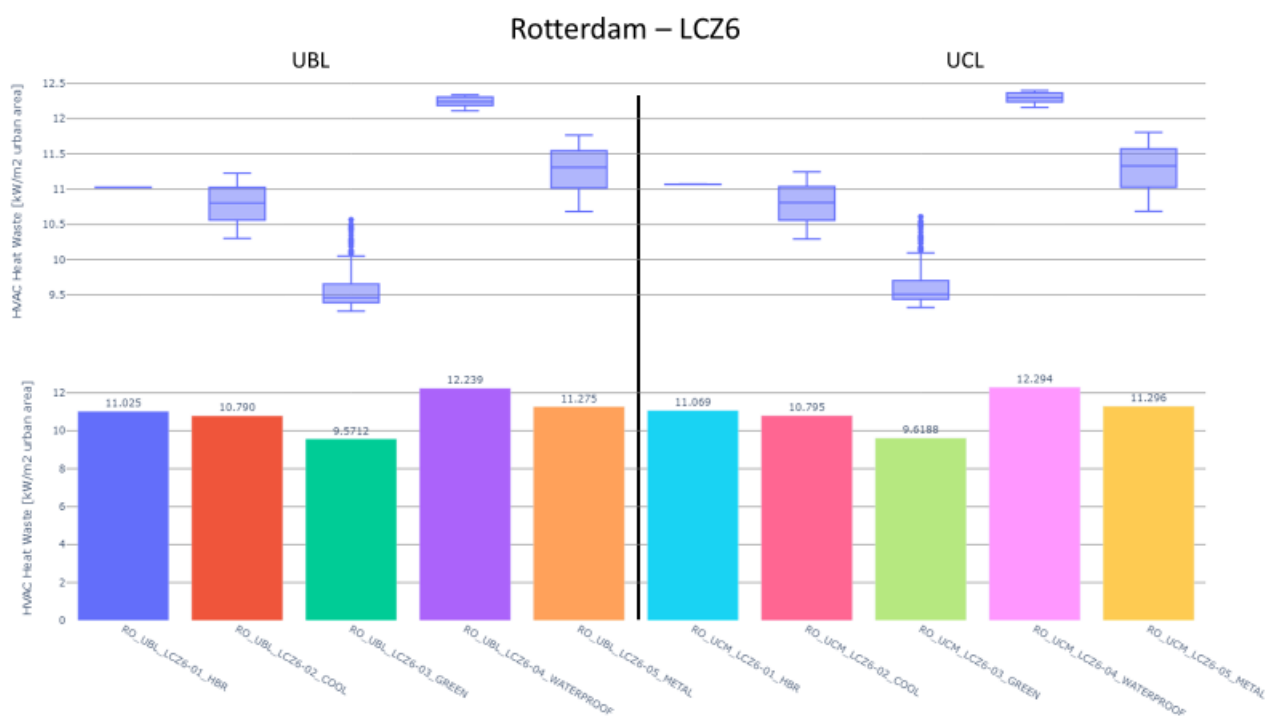


Figura 46. Calore uscente HVAC: Rotterdam - LCZ6

Gli ultimi grafici, Figura 43, Figura 44, Figura 45, Figura 46, rappresentano i valori di calore uscente dall'edificio attraverso i tetti, prodotto dagli HVAC.

In realtà dai risultati ottenuti dalla simulazione si può notare che a prescindere dal tipo di copertura, modello di scambio termico, i valori ottenuti sono piuttosto simili. Questo dipende dal fatto che il contributo di dispersione, dovuto ai tetti, è limitato rispetto ai contributi dovuti ad altri fattori che influiscono nella dispersione del calore all'esterno, come le pareti, le finestre, il calore antropico prodotto all'interno, ecc...

I risultati differiscono considerando le due città e le diverse zone climatiche.

Infatti, per la città di Reggio Emilia, si ha una maggiore dispersione termica nella LCZ2 (Figura 43) rispetto alla LCZ6 (Figura 44) con una differenza di circa 84 kW/m2 per ciascuna superficie; per la città di Rotterdam, invece, la differenza tra LCZ2 (Figura 45) e LCZ6 (Figura 46) è di circa 30 kW/m2 per ciascuna copertura.

In termini percentuali, per la città di Reggio Emilia, nella LCZ2 c'è una maggior dispersione del 74% rispetto a quella registrata nella LCZ6; mentre nella città di Rotterdam, c'è una maggiore dispersione nella LCZ2 rispetto alla LCZ6 del 73,3%.

Confrontando invece la città di Reggio Emilia e di Rotterdam, nel caso LCZ2 (Figura 43, Figura 45), la differenza di calore disperso è maggiore in Reggio Emilia ed è di circa 72,4 kW/m<sup>2</sup> per ciascuna tipologia di tetto, mentre nel caso LCZ6 (Figura 44, Figura 46) la differenza tra le due città è di circa 18,4 kW/m<sup>2</sup> per ciascuna tipologia di tetto. In percentuale, per la LCZ2, nella città di Reggio Emilia c'è una dispersione del 63,8% in più rispetto a Rotterdam, mentre, per la LCZ6, è presente una dispersione di calore del 62,7% in più a Reggio Emilia rispetto a Rotterdam.

L'andamento generale, anche con piccole differenze, è sempre lo stesso: i tetti in guaina sono quelli che fanno uscire più calore all'esterno; quindi, sono quelli meno performanti e i tetti verdi invece sono quelli più efficaci.

Nel UBL e nel UCL il calore uscente registrato è pressoché lo stesso per ogni tipologia di manto.

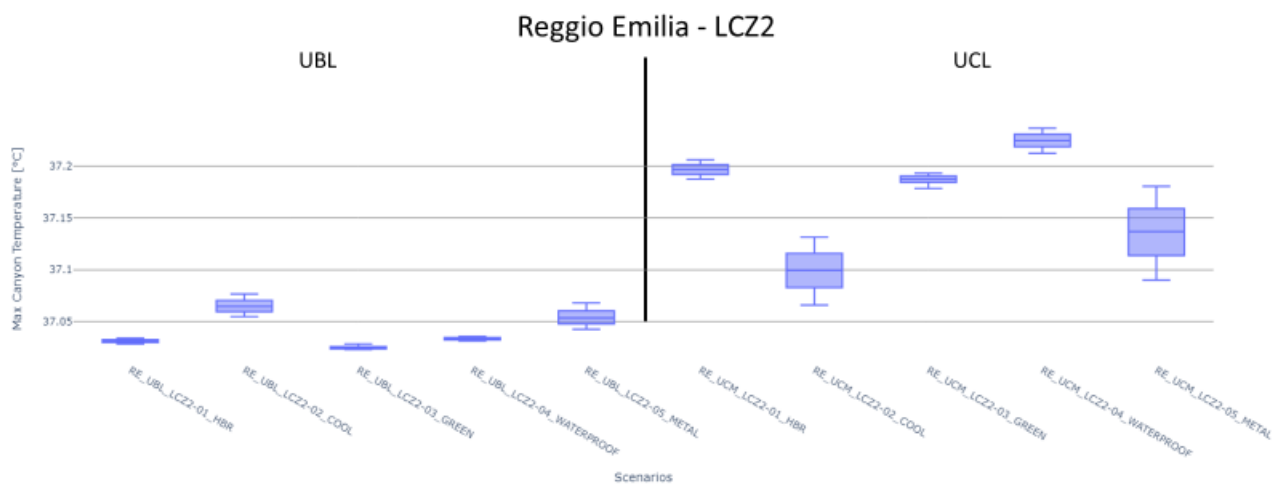


Figura 47. Temperatura dell'aria: Reggio Emilia - LCZ2



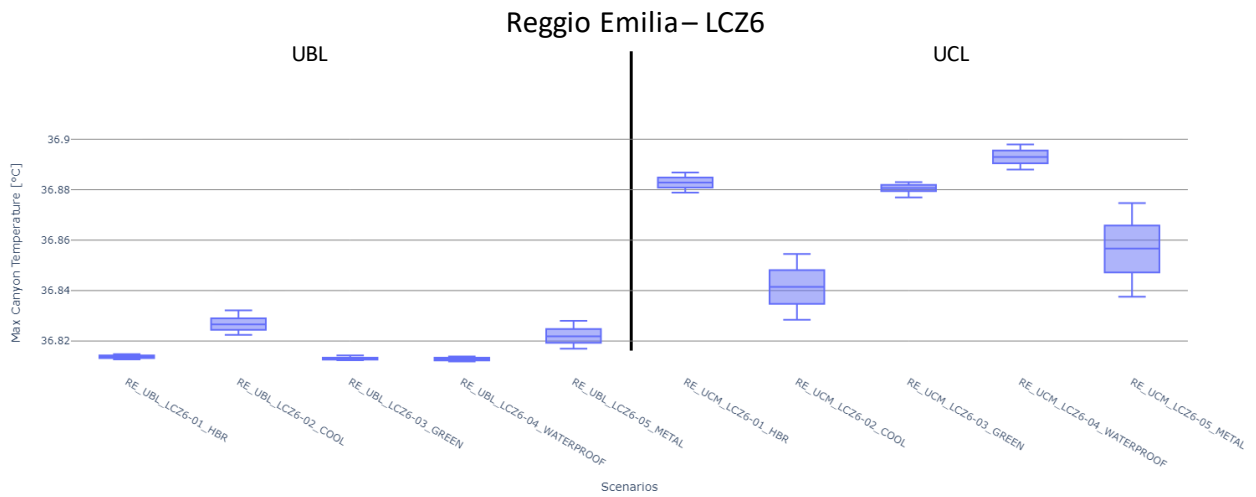


Figura 48. Temperatura dell'aria: Reggio Emilia - LCZ6

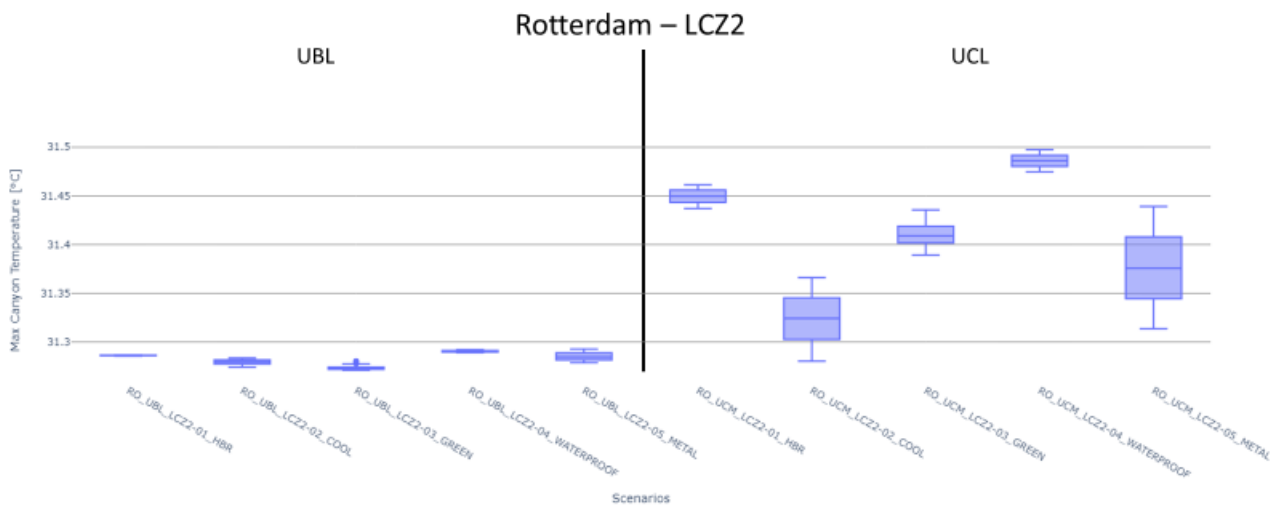


Figura 49. Temperatura dell'aria: Rotterdam - LCZ2

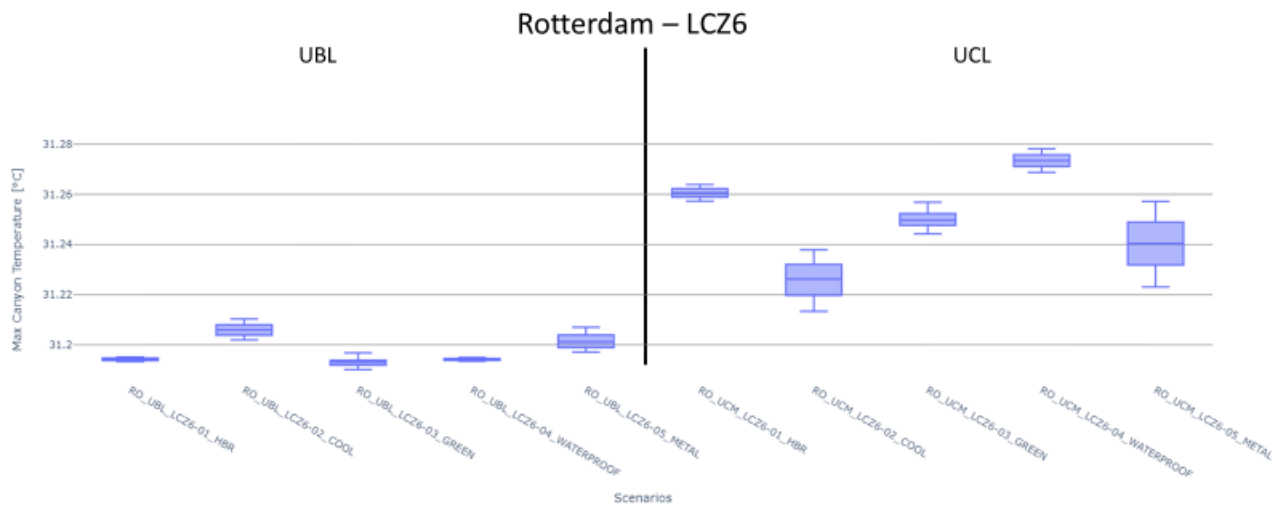


Figura 50. Temperatura dell'aria: Rotterdam - LCZ6

Nelle precedenti, vengono riportati i risultati inerenti alla temperatura dell'aria del canyon urbano. Nonostante le piccolissime differenze che ci sono tra le diverse tipologie di coperture, si può notare un'influenza data dal modello di scambio termico.

Infatti, nel UCL, per il caso del tetto in guaina, sono state registrate temperature dell'aria superiori rispetto a tutti gli altri.

Sempre considerando il caso dell'UCL il valore che risulta più anomalo è quello legato ai tetti verdi: tale valore è ottenuto da mancati valori di temperatura di ingresso al software, il quale di conseguenza non riesce a calcolare correttamente i valori di temperatura dell'aria corretti.

Per il caso dell'UBL le variazioni non sono significative a prescindere dal tipo di copertura considerata.

#### 4.3. Confronto tra i risultati con diversa trasmittanza

Di seguito vengono illustrate le principali differenze tra i risultati delle simulazioni condotte considerando la trasmittanza pari a  $U=0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$  e quelli con  $U=0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Mettendo a confronto i due differenti scenari, valutando ogni tipo di copertura, si possono riscontrare differenze poco rilevanti nel caso delle temperature superficiali dei manti e del calore uscente prodotto dai HVAC; al contrario le differenze diventano più sostanziali considerando i grafici riguardanti l'accumulo di calore entrante.

Valutando le temperature superficiali di entrambi i casi (Figura 19, Figura 20, Figura 21, Figura 22, Figura 35, Figura 36, Figura 37, Figura 38), in linea generale si nota che, impostando  $U=0,6$   $W/m^2K$ , la simulazione restituisce valori inferiori di temperatura superficiale dei tetti rispetto al caso con  $U= 0,24$   $W/m^2K$ . Le differenze risultano comunque essere di piccola entità: per i tetti in guaina e in metallo si ha una riduzione all'incirca del 2%, per gli HBR e i tetti freddi la riduzione è di circa 1,5%, e per i verdi la riduzione è quasi nulla.

Questo risultato non ci stupisce, al contrario conferma quanto riscontrato in fase di analisi della letteratura.

Nelle Figura 39 e Figura 40, riguardanti i tetti con  $U=0,6$   $W/m^2K$ , si può notare che nella città Reggio Emilia si ha un accumulo di calore maggiore per tutte le tipologie di copertura rispetto ai rispettivi casi con  $U= 0,24$   $W/m^2K$  (Figura 23, Figura 24), eccetto che per i tetti verdi in cui nel caso con  $U=0,24$   $W/m^2K$  si ha un accumulo maggiore di 194  $kW/m^2$  (42%) in LCZ2 e di 121  $kW/m^2$  (47,7%) in LCZ6 rispetto al caso con  $U=0,6$   $W/m^2K$ .

Infatti, confrontando le LCZ2 di Reggio Emilia, in termini assoluti, per i tetti in guaina si ha un aumento del calore di 3013  $kW/m^2$  (56,5%), per i tetti metallici di 1160  $kW/m^2$  (48,3%), per gli HBR di 570  $kW/m^2$  (36,3%), e per i freddi di 409  $kW/m^2$  (31%). Confrontando le LCZ6 di Reggio Emilia, per i tetti in guaina si ha un aumento del calore di 1337  $kW/m^2$  (53,8%), per i tetti metallici di 439,5  $kW/m^2$  (40%), per gli HBR di 194,5  $kW/m^2$  (26,2%), e per i freddi di 409  $kW/m^2$  (31%).

Nella città di Rotterdam, allo stesso modo, nel caso con  $U=0,6$   $W/m^2K$  (Figura 41, Figura 42) si ha un accumulo di calore maggiore per edifici con tetti in guaina e metallici, mentre il calore entrante è minore per gli HBR, freddi e verdi rispetto al caso con  $U=0,24$   $W/m^2K$  (Figura 25, Figura 26).

Analizzando il caso LCZ2 della città di Rotterdam, si hanno differenze tra risultati con trasmittanza a 0,6  $W/m^2K$  rispetto a 0,24  $W/m^2K$  di 1247  $kW/m^2$  (56,8%) per i tetti in guaina e di 69,5  $kW/m^2$  (21,2%) per i tetti metallici. Mentre nella LCZ6 di Rotterdam, si ha una differenza di 576,5  $kW/m^2$  (53%) per i tetti in guaina e di 7  $kW/m^2$  (3,5%) per i tetti metallici. Al contrario nei casi di tetti HBR, tetti freddi e tetti verdi con trasmittanza pari a 0,24  $W/m^2K$  hanno un accumulo di calore maggiore rispetto ai casi con trasmittanza a 0,6  $W/m^2K$ , rispettivamente di 68,5  $kW/m^2$  (41,6%), 73  $kW/m^2$  (54,5%), 33,3  $kW/m^2$  (85,4%) nella LCZ2 e di 58  $kW/m^2$  (40%), 68  $kW/m^2$  (53,3%), 54,6  $kW/m^2$  (86,3%) nella LCZ6.

Nonostante le differenze siano piccole, confrontando i risultati del calore uscente prodotto dagli HVAC, si può notare che nel caso di Reggio Emilia, sia nella LCZ2 che nella LCZ6, si ha maggiore calore uscente per edifici con  $U=0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$  rispetto a quelli con  $U=0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$  eccetto che per i tetti verdi. Nella LCZ2, per tutte le tipologie di copertura si registra una variazione di almeno  $0,6 \text{ kW/m}^2$  (con massimo di  $2,2 \text{ kW/m}^2$  nel caso di tetti in guaina) mentre per i tetti verdi il caso con  $U=0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$  risulta avere un valore di calore uscente superiore di  $0,5 \text{ kW/m}^2$  (0,4%) rispetto al caso con  $U=0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ . In termini percentuali, le differenze tra  $U=0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$  e  $U=0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$  risultano essere di 2% per il caso dei tetti in guaina, 1% per il caso dei tetti metallici, 0.7% per gli HBR e 0.5% per il caso dei tetti freddi.

Nella LCZ6, per tutte le tipologie di copertura si registra una variazione di almeno  $0,1 \text{ kW/m}^2$  (con massimo di  $0,7 \text{ kW/m}^2$  nel caso di tetti in guaina) mentre per i tetti verdi, il caso con  $U=0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$  risulta avere un valore di calore uscente superiore di  $0,1 \text{ kW/m}^2$  (0,3%) rispetto al caso con  $U=0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ . In termini percentuali, le differenze tra  $U=0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$  e  $U=0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$  risultano essere di 2,3% per il caso dei tetti in guaina, 1% per il caso dei tetti metallici, 0.3% per gli HBR e per i tetti freddi.

Nonostante le differenze siano piccole, quasi nulle, analizzando i risultati della città di Rotterdam (sia in LCZ2 che in LCZ6), si ha un maggiore calore uscente per edifici con  $U=0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$  rispetto a  $U=0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$  solo per tetti in guaina di  $1 \text{ kW/m}^2$  (2,3%) in LCZ2 e di  $0,5 \text{ kW/m}^2$  (4,1 %) in LCZ6. Per le altre tipologie si ha un maggiore calore uscente per edifici con  $U=0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$  rispetto a  $U=0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ , infatti, mentre per i tetti metallici la differenza è nulla, per gli HBR si ha una variazione di  $0,4 \text{ kW/m}^2$  (1%) in LCZ2 e  $0,2 \text{ kW/m}^2$  (1,8%) in LCZ6, per i freddi di  $0,8 \text{ kW/m}^2$  (2%) in LCZ2 e di  $0,3 \text{ kW/m}^2$  (2,7 %) in LCZ6 e per i tetti verdi di  $2,1 \text{ kW/m}^2$  (5,2%) in LCZ2 e di  $1,1 \text{ kW/m}^2$  (10,3%) in LCZ6.

Per quanto riguarda la temperatura dell'aria, non ci sono risultati differenti tra le simulazioni di tetti con  $U=0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$  e quelli con  $U=0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

## 5. CONCLUSIONI

Questo lavoro di tesi ha lo scopo di valutare l'impatto di diverse tipologie di manto di copertura nel mitigare il fenomeno di Isola di Calore Urbano attraverso un'analisi di letteratura e simulazioni parametriche.

Le isole di calore urbane si verificano quando le aree urbane sono significativamente più calde rispetto alle aree circostanti a causa dell'assorbimento di calore da parte dei materiali urbani, dell'attività umana e dell'assenza di vegetazione. Questo fenomeno è spesso accentuato in città densamente popolate e con molte superfici pavimentate e/o edifici.

Le isole di calore urbane hanno un impatto significativo sul clima locale e globale: determinando il riscaldamento urbano che può portare ad un aumento delle temperature medie nelle città rispetto alle zone circostanti. Questo può contribuire al cambiamento climatico e può influire sulla qualità dell'aria, sulle condizioni meteo locali e sulla salute dei cittadini.

Ridurre l'ICU contribuisce alla sostenibilità ambientale e sociale in quanto può comportare una minore necessità di raffreddamento degli edifici, riduzione dei consumi energetici, miglioramento della qualità dell'aria e promozione dell'uso di trasporti sostenibili.

Per contenere l'ICU e promuovere la sostenibilità in contesti urbani si possono attuare diverse strategie tra cui l'aumento della copertura vegetale e gli spazi verdi nelle città, promuovere la pianificazione urbana sostenibile a basso impatto energetico e design urbani che riducono l'accumulo di calore, utilizzare materiali da costruzione a basso impatto termico, alto albedo e bassa conducibilità termica.

Tra le molteplici soluzioni all'ICU riscontrate in letteratura, le più significative sono state quelle relative alla tipologia di copertura e in particolare i tetti verdi e i tetti freddi, sui quali è stata condotta un'analisi della letteratura specifica.

Per queste due tipologie di tetti sono stati individuati articoli contenenti casi studio relativi alla loro applicazione. Da questi documenti è stato possibile estrarre valori numerici che hanno dimostrato l'efficacia delle due soluzioni nella riduzione del fenomeno dell'ICU.

In particolare, sono stati valutati gli aspetti di riduzione della temperatura massima dell'aria in relazione alle aree climatiche e la riduzione della temperatura media dell'aria in funzione dell'albedo.

Successivamente sono state condotte diverse simulazioni tramite il software UWG. Con questo software è stato possibile ottenere i valori delle temperature superficiale dei manti, accumulo del calore entrante e valore del calore uscente prodotto dagli HVC.

I dati presi in input per effettuare tali simulazioni sono stati: modelli di scambio termico (UBL e UCL), zone climatiche locali (LCZ2 e LCZ6), due differenti città studio (Reggio Emilia e Rotterdam), cinque tipologie di manti di copertura (tetti verdi tetti freddi, tetti metallici tetti in guaina, HBR) con le relative proprietà e due diversi valori di trasmittanza ( $U = 0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$  e  $U = 0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ ).

Passando in input tutte le diverse combinazioni di parametri è stato possibile ottenere 80 simulazioni.

Dalle simulazioni si evince che in generale i tetti verdi rappresentano un ottimo compromesso per diminuire le temperature superficiali, limitare l'ingresso di calore dall'esterno e ridurre il calore uscente prodotto dagli HVC.

Anche le soluzioni di tetti freddi e HBR rappresentano comunque una alternativa, anche se meno valida ai tetti verdi per la limitazione del fenomeno dell'ICU.

I tetti in guaina risultano essere in questo caso peggiori, in quanto il miglioramento apportato a seguito della loro installazione risulta essere poco rilevante.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] “LIFE SUPERHERO project \_ Sostenibilità e prestazioni per tetti efficienti”, Accessed: Oct. 05, 2023. [Online]. Available: <https://www.lifesuperhero.eu/it/>
- [2] “Cambiamenti climatici: il contributo dell’UE e Accordo di Parigi sui cambiamenti climatici - Consilium.” Accessed: Sep. 30, 2023. [Online]. Available: <https://www.consilium.europa.eu/it/policies/climate-change/>
- [3] A. per la coesione territoriale, “Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile - Agenzia per la coesione territoriale.” 2015. [Online]. Available: <https://www.agenziacoesione.gov.it/comunicazione/agenda-2030-per-lo-sviluppo-sostenibile/>
- [4] T. R. Oke, G. T. Johnson, D. G. Steyn, and I. D. Watson, “Simulation of surface urban heat islands under ‘ideal’ conditions at night part 2: Diagnosis of causation,” *Boundary Layer Meteorol.*, vol. 56, no. 4, pp. 339–358, 1991, doi: 10.1007/BF00119211.
- [5] Y. Wang, U. Berardi, and H. Akbari, “Comparing the effects of urban heat island mitigation strategies for Toronto, Canada,” *Energy Build.*, vol. 114, pp. 2–19, Feb. 2016, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2015.06.046.
- [6] A. Sharma, P. Conry, H. J. S. Fernando, A. F. Hamlet, J. J. Hellmann, and F. Chen, “Green and cool roofs to mitigate urban heat island effects in the Chicago metropolitan area: Evaluation with a regional climate model,” *Environmental Research Letters*, vol. 11, no. 6, 2016, doi: 10.1088/1748-9326/11/6/064004.
- [7] G. Evola *et al.*, “ICU effects and strategies to improve outdoor thermal comfort in dense and old neighbourhoods,” *Energy Procedia*, vol. 134, pp. 692–701, Oct. 2017, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2017.09.589.
- [8] C. De, R. Maciel, and M. Kolokotroni, “Cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands: potential consequences for building ventilation,” 2017. [Online]. Available: <http://www.wunderground.com>
- [9] C. Huynh and R. Eckert, “Reducing Heat and Improving Thermal Comfort through Urban Design – A Case Study in Ho Chi Minh City,” *International Journal of Environmental Science and Development*, pp. 480–485, 2012, doi: 10.7763/ijesd.2012.v3.271.

- [10] R. Kotharkar, A. Bagade, and P. R. Singh, “A systematic approach for urban heat island mitigation strategies in critical local climate zones of an Indian city,” *Urban Clim*, vol. 34, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.uclim.2020.100701.
- [11] D. Ambrosini, G. Galli, B. Mancini, I. Nardi, and S. Sfarra, “Evaluating mitigation effects of urban heat islands in a historical small center with the ENVI-Met® climate model,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 6, no. 10, pp. 7013–7029, 2014, doi: 10.3390/SU6107013.
- [12] H. Farhadi, M. Faizi, and H. Sanaieian, “Mitigating the urban heat island in a residential area in Tehran: Investigating the role of vegetation, materials, and orientation of buildings,” *Sustain Cities Soc*, vol. 46, p. 101448, Apr. 2019, doi: 10.1016/J.SCS.2019.101448.
- [13] M. Taleghani, D. Sailor, and G. A. Ban-Weiss, “Micrometeorological simulations to predict the impacts of heat mitigation strategies on pedestrian thermal comfort in a Los Angeles neighborhood,” *Environmental Research Letters*, vol. 11, no. 2, p. 024003, Feb. 2016, doi: 10.1088/1748-9326/11/2/024003.
- [14] A. G. Touchaei and Y. Wang, “Characterizing urban heat island in Montreal (Canada) - Effect of urban morphology,” *Sustain Cities Soc*, vol. 19, pp. 395–402, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.scs.2015.03.005.
- [15] A. L. Pisello, “State of the art on the development of cool coatings for buildings and cities,” *Solar Energy*, vol. 144, pp. 660–680, 2017, doi: 10.1016/j.solener.2017.01.068.
- [16] E. Di Giuseppe, M. Pergolini, and F. Stazi, “Numerical assessment of the impact of roof reflectivity and building envelope thermal transmittance on the ICU effect,” *Energy Procedia*, vol. 134, no. 2016, pp. 404–413, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.590.
- [17] M. H. Elnabawi, N. Hamza, and R. Raveendran, “‘Super cool roofs’: Mitigating the ICU effect and enhancing urban thermal comfort with high albedo-coated roofs,” *Results in Engineering*, vol. 19, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.rineng.2023.101269.
- [18] B. Bueno, L. Norford, J. Hidalgo, and G. Pigeon, “The urban weather generator,” *J Build Perform Simul*, vol. 6, pp. 1–13, Aug. 2012, doi: 10.1080/19401493.2012.718797.



- [19] A. Boccalatte, M. Fossa, L. Gaillard, and C. Menezo, “Microclimate and urban morphology effects on building energy demand in different European cities,” *Energy Build*, vol. 224, p. 110129, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110129>.
- [20] T. Oke, G. Mills, A. Christen, and J. Voogt, *Urban Climates*. 2017. doi: [10.1017/9781139016476](https://doi.org/10.1017/9781139016476).

# APPENDICE

Tabella 2. Risultati dall'analisi della letteratura - case study

<p>Note</p>	<p>Green roof case</p>	<p>Cool roof case</p>	<p>Base case</p>	<p>Max Ts reduction</p>
				<p>Average Ta reduction</p>
				<p>Max Ta reduction</p>
				<p>Max Ta (°C)</p>
				<p>Albedo difference</p>
				<p>Thickness (cm)</p>
				<p>Albedo roof</p>
				<p>Typology</p>
				<p>Max Ts reduction</p>
				<p>Average Ta reduction</p>
				<p>Max Ta reduction</p>
				<p>Albedo difference</p>
				<p>Albedo roof</p>
<p>Ta (°C)</p>				
<p>Albedo roof</p>				
<p>Height of receptor (m)</p>				
<p>Starting time Simulation period</p>				
<p>Simulation software</p>				
<p>Urban area</p>				
<p>Koppen classification</p>				
<p>City</p>				
<p>Reference</p>				

Ambrosini et al., 2014	Teramo, Italy	Cfa	The chosen area shows good presence of vegetation around the main square, while the old town center has a typical urban canyon layout: narrow roads and tall buildings. The height of buildings is between 3 and 15 m, 10 m being the mean value.	ENVI-met	6:00 a.m., 22nd July 2013 72 h	1,2 (pedestrian's level)	0,3	39,3	0,9	0,6	0,9	0,5 (area)	-		0,26	50	0,04	31,8	1,2	0,60 (area)	Thermal gradient
Wang et al., 2016	Toronto, Canada	Dfb	In this case of study, three urban areas are chosen. The low-rise, detached housing area, with two-floor houses and wide back gardens. The middle-rise area is an area with a mix of condominium and office buildings, and with variable building heights, from two to twenty floors. The high-rise area includes buildings as high as 70 floors.	ENVI-met	9:00 p.m., 15th July 2013 24 h	1,5	0,3	28	0,7	0,4	0,5 (In detached house area)	0,17 (area) (In detached house area)	-								The effect of changing roof albedo in detached house area is bigger than that in the other two areas. The median roof surface temperature decreased by 9.6 °C in the high-rise area and of 11.3 °C in the detached area.

Taleghani et al., 2016	Los Angeles, USA	Csb	Chosen area is a generally representative of a residential area in El Monte. Most buildings have back yard and front yard gardens largely covered with grass and some trees.	ENVI-met	4:00 a.m., 30th July 2014 24 h	1	0,1	19,35	0,4	0,3	0,5	0,3 (area)	-									0,2	0,1		
Evola et al., 2017	Avola, Italy	Csa	The considered area is located in a neighborhood of Evola, called Priolo. It is characterized by a typical urban canyon layout with narrow roads and tall buildings, and an undeveloped area without buildings has been included. The majority of the buildings have a very low architectural quality.	ENVI-met	6:00 a.m., 24th August 2014 24 h	1,5	0,3	18,85	0,8 3	0,5 3	1,5	1 (area)	-										1,5	-	

Di Giuseppe et al., 2017	Roma, Italy	C <sub>sa</sub>	<p>The selected town portion is located in Rome, close to Piazza Navona, and is characterized by a high density urban pattern. It includes a range of urban canyon geometries, namely different ratios between the height of the buildings (h) and the distance (d) between them (width of streets).</p>	ENVI-met	-	1,8	0,0 5	22	0,8 9	0,8 4	1,4	-	-																					
Fahadi et al., 2019	Tehran, Iran	C <sub>sa</sub>	<p>The selected location (35° 43' 39" N 51° 15' 02" E) is a developing residential area in 22nd district, Tehran. The 1,6% of the area is represented by vegetation.</p>	ENVI-met	4:00 a.m., 30th June 2017 17 h	1,7	0,0 5	30,42	0,6	0,5 5	-	0,36 (area)	-																					

Kohli et al., 2020	Nagpur, India	AW	<p>Mahal is an old, unplanned and a very densely built settlement. The roads are very narrow and as a result, they remain shaded for most time of the day. The buildings in the area are mostly very old, made with thick walls acting as thermal mass. There is not presence vegetation.</p>	ENVI-met	6:00 a.m., 6th May 2016 24 h	2	0,2	24,44	0,8	0,6	-	0,4	-									
			<p>Deendayal Nagar on the other hand is a planned growth. Building material includes brick, concrete, plaster, and paints. Few trees are planted along the streets and open spaces. An open playground is located in the centre which covers 12.5% of the total area.</p>				0,3	23,33	0,8	0,5	-	0,4										
			<p>Dabha is a sparsely built low-rise settlement found in the outer region of the city. It features few trees, vacant plots and segregated individual buildings. Dabha is in expansion.</p>				0,3	24,65	0,8	0,5	-	Negligible										

Wang and Akbari, 2015	Montreal, Canada	Dtb	The selected area is a high-density residential area, next to the city's main commercial area and a university. There are many high-rise residential buildings of more than 15 floors. Most of the ground surface is asphalt road.	ENVI-met	5:00 a.m., 22th July 2014 24 h	1,8	0,1	-	0,7	0,6	0,5	0,2 (diurnal)	-								
Huyh and Eckert, 2015	Ho Chi Minh, Vietnam	Aw	The considered area is a typical urban pattern, the so-called Baseline Scenario.	ENVI-met	10:00 a.m., 1st February 2013 36 h	at the roof levels	0,1	28	0,7	0,6	0,1	0,1 (area)	-	50			0,2	0,1 (area)			black and water-proof concrete roofs are also often used in HCMC. the Light Roof Scenario uses light coloured concrete with up to 75% of reflection. The results show that, with a lighter roof colour, the air temperature at the roof levels is reduced only by 0.07°C
Kolokotroni, 2017	Cuiabá, Brazil	Aw	The Eastern portion of the campus was chosen, since it includes most of the campus buildings as well as large areas of paved surfaces.	ENVI-met	8:00 p.m., 26th March 2012, 48 h	1,1	0,15	average annual maximum temperature ranges from 28 °C to 38 °C	0,85	0,7	3,1	0,46	-								
Maleki and Mahdavi, 2015	Vienna, Austria	Cfb	The chosen area is 55% occupied by buildings. Most of the buildings are considered as old buildings with light colored walls and dark roofs. While vegetation covers the 18% of the area and these green areas are mostly inside the courtyards. The existing narrow streets are not supposed to suffer a heavy traffic load.	ENVI-met	5:00 a.m., 13th July 2011 24 h	-	0,3	average annual maximum temperature ranges from 21.5°C to 33.5°C.	0,8	0,5	0,5	0,3 (area)	-	0,2	18	0,1		0,4	0,2 (diurnal)		
Jin et al., 2018	Chongqing, China	Cfa	Regional thermal environment in hot-humid climate	ENVI-met	-	50 cm above the roof	-	-									0,6			Intensive roof	

Hein and Yu,	Singapore, AF	Regional thermal environment in hot-humid climate	-	-	3 m above rooftop	-	-														4, 2	31	
Alexandri and	Riyadh, Saudi Bwh	dry climate	-	-	1 m above rooftop																3, 6	8,5	
Alexandri and	Athens, Greece Csa	Temperate climate	-	-	1 m above rooftop																4, 4	9,2	
Krnuas and Hasec,	Berlin, Germany Cfb	Temperate climate	ENVI-met	-	pedestrian level																0, 2	26	
Moghbel and	Tehran, Iran BSk	dry climate	-	-	1 m above rooftop																3, 7		
M. D'Orazio et al.,	Ancona, Italy Cfa	-	-	8-13 August 2010		42															0,1 3	37	2,5
A.Gagliano et al.,	Catania, Italy Csa	-	DesignBuilder	27th July 2015, 29day		39,1																60	29,6 1
Sharma et al.,	Chicago, USA Dfa	Low intensity residential	uWRF	15th August 2013 96 h	At 1 m height above roof level	0,2	30	0,8 5	0,6 5	4	-	1,6	-	50								4, 5	2,24
Medium-intensity residential	7,01	6,68																					
High-intensity/commercial	10,0 9	8,34																					



