



POLITECNICO DI TORINO  
DIPARTIMENTO DI ARCHITETTURA E DESIGN  
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE  
ARCHITETTURA PER IL PROGETTO SOSTENIBILE

Tesi di Laurea Magistrale

**PROGETTARE LA RESILIENZA: TECNOLOGIE DI COPERTURE PER LA  
MITIGAZIONE**

**Strumento di selezione dei materiali per combattere il Cambiamento Climatico ed il  
fenomeno dell'Isola di Calore Urbano nel contesto di Madrid.**

Relatrice:

Prof.ssa Elena Montacchini - Politecnico di Torino

Correlatrici:

Arch. Silvia Tedesco - Politecnico di Torino

Prof.ssa Francesca Olivieri - Universidad Politécnica de Madrid

Candidata:

Sara L. Chong E.

Settembre, 2018



## INDICE GENERALE

INTRODUZIONE .....	
OBIETTIVI .....	10

## PARTE 1 - LE COPERTURE E I CAMBIAMENTI CLIMATICI

<b>CAPITOLO 1. Il cambiamento climatico e le coperture edilizie .....</b>	<b>13</b>
1.1 Cambiamento climatico .....	14
1.2 Fenomeno dell'Isola di Calore Urbano .....	17
1.3 Il ruolo delle coperture nell'ambiente naturale e urbano .....	21
<b>CAPITOLO 2. Incentivi internazionali e regionali di riferimento .....</b>	<b>25</b>
2.1 Intergovernmental Panel on Climate Change .....	25
2.2 Sustainable Development Goals.....	29
2.2.1 OSS 11 - Città e comunità sostenibili .....	29
2.2.2 OSS 13 – Lotta contro il cambiamento climatico .....	30
2.3 Piano Nazionale per l'Adattamento al cambiamento climatico - Spagna .....	31

## **PARTE 2 – CARATTERISTICHE DEI MATERIALI E RUOLO DELLE COPERTURE**

### **CAPITOLO 3. Caratteristiche delle coperture ..... 35**

3.1	Caratterisitche fisico-tecniche dei materiali .....	35
3.1.1	<i>Albedo</i> .....	36
3.1.2	<i>Emissività</i> .....	40
3.1.3	<i>Coefficiente di convezione</i> .....	42
3.1.4	<i>Capacità termica</i> .....	44
3.1.5	<i>Permeabilità</i> .....	46
3.2	Caratteristiche tecnologiche .....	48

### **CAPITOLO 4. Sistemi di coperture e adattamento ai cambiamenti climatici: Tecnologia vegetale – Tecnologia fredda ..... 53**

4.1	Sistemi di coperture per la mitigazione .....	53
4.1.1	<i>Tecnologia di copertura vegetale</i> .....	54
4.1.2	<i>Tecnologia di copertura fredda</i> .....	72
4.2	Confronto prestazionale: Tecnologia vegetale – Tecnologia fredda .....	84

## PARTE 3 – CASO STUDIO

<b>CAPITOLO 5. Caso studio: Quartiere Gaztambide a Madrid</b> .....	95
5.1 Condizione climatica a Madrid .....	96
5.1.1 <i>Radiazione solare</i> .....	96
5.1.2 <i>Temperatura</i> .....	97
5.1.3 <i>Umidità relativa</i> .....	98
5.1.4 <i>Precipitazioni</i> .....	98
5.1.5 <i>Vento</i> .....	99
5.2 Proiezione dei cambiamenti climatici a Madrid – IPCC .....	100
5.2.1 Valutazione delle proiezioni di cambiamento climatico – PNACC .....	109
5.3 Studio della configurazione urbana .....	123
5.3.1 <i>Configurazione urbana della città di Madrid</i> .....	126
5.4 Il quartiere di Gaztambide a Madrid .....	130
<b>CAPITOLO 6. Strumento di selezione</b> .....	139
6.1 Scheda di analisi e rilevamento .....	146
6.2 Applicazione dello strumento nel quartiere di Gaztambide a Madrid ....	154
<b>CONCLUSIONI</b> .....	
<b>PAROLE CHIAVE</b> .....	
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	162





## OBIETTIVI

I cambiamenti climatici sono la diretta conseguenza delle attività antropogeniche, che ha portato alla necessità di adottare criteri ambientali nei futuri sviluppi. Questo lavoro di ricerca è focalizzato sullo studio di tecnologie di copertura degli edifici, in grado di rispondere agli incrementi degli effetti del cambiamento climatico. A questo scopo viene analizzato il ruolo delle coperture nell'ambiente urbano per stabilire criteri di progettazione e di selezione di tecnologie specifiche.

Per raggiungere l'obiettivo generale di questa ricerca si sono evidenziati una serie di obiettivi specifici, quali:

- Realizzare uno studio dello stato dell'arte delle coperture e la sua importanza nel campo tecnologico, così come la risposta agli effetti del cambiamento climatico.
- Stabilire le linee d'azione delle coperture nell'ambito ambientale e tecnologico proposte dagli incentivi di riferimento a livello internazionale e regionale.
- Realizzare uno studio delle caratteristiche dei materiali per la comprensione dei loro comportamenti dal punto di vista ambientale, e dal punto di vista tecnologico.
- Analizzare le variabili climatiche e morfologiche della città di Madrid che influiscono sulle prestazioni delle coperture.
- Individuare un caso studio nella città di Madrid e determinare delle strategie per futuri interventi di selezione di copertura edilizie.

Il risultato finale del lavoro di ricerca basato sugli aspetti analizzati è l'elaborazione di uno strumento che possa servire di base ai professionisti nella selezione delle tecnologie di copertura, adatte ai cambiamenti climatici e alla mitigazione del fenomeno dell'isola di calore urbana nella città di Madrid.

## **PARTE 1**

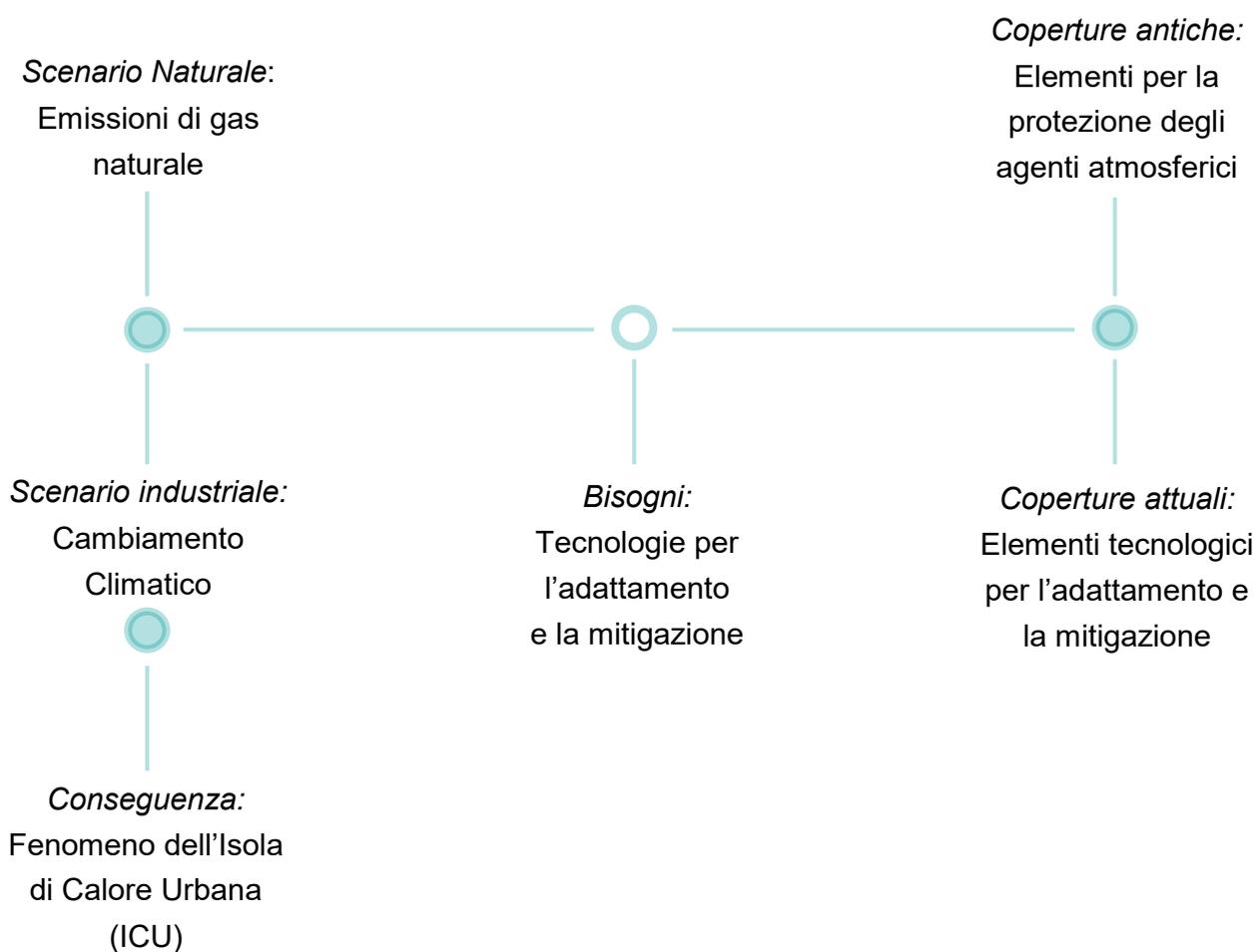
### **LE COPERTURE E I CAMBIAMENTI CLIMATICI**



## CAPITOLO 1

### Il cambiamento climatico e le coperture edilizie

Il presente capitolo ha l'intenzione di spiegare gli argomenti del cambiamento climatico come una conseguenza delle attività antropogeniche da alcuni secoli fino ad oggi, che attualmente si considera come una situazione che può essere controllata a livello locale piuttosto che globale. Al tempo stesso come conseguenza del cambiamento climatico viene spiegato il fenomeno dell'isola di calore urbana e la sua relazione con l'ambiente ed il microclima che genera. Finalmente, si aggiunge l'elemento orizzontale delle coperture degli edifici, il quale ha rivoluzionato il suo proposito principale, concentrandosi non solo nella salvaguardia dell'uomo, ma anche dell'ambiente circostante.

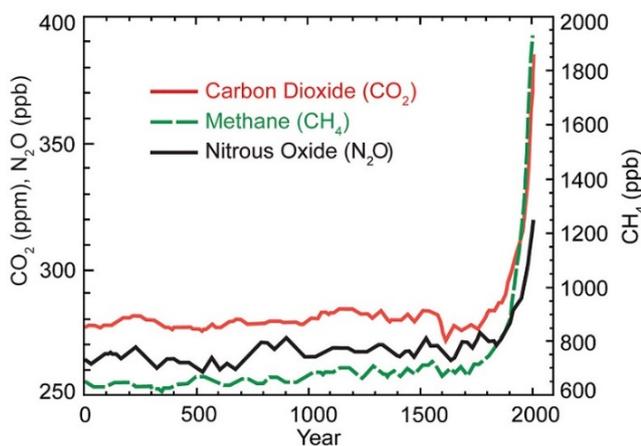


## 1.1 Cambiamento climatico

La Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UNFCCC), definisce il cambiamento climatico come: “il cambiamento del clima è attribuito direttamente o indirettamente all'attività umana che altera la composizione dell'atmosfera globale e che si aggiunge alla variabilità del clima naturale osservata in periodi di tempo comparabili”<sup>1</sup>.

Le alterazioni degli elementi del clima sono dovute alle concentrazioni di gas nell'atmosfera, che in passato furono attribuiti unicamente a dei fenomeni naturali, ed oggi si legano anche a delle attività umane. In tal senso, la Commissione Europea ha affermato che dall'arrivo della rivoluzione industriale nel 1750, lo scenario delle emissioni di gas naturale, cioè quelli provenienti dalle eruzioni vulcaniche e dalle variazioni della concentrazione di gas, si è modificato in gran parte a causa di un aumento crescente delle attività industriali, mobilità motorizzata, consumo elettrico, ecc., che influenzano le emissioni dei *Gas Effetto Serra* (GES), composti principalmente da diossido di carbonio (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), ossido nitroso (N<sub>2</sub>O) e clorofluorocarburi (CFC)<sup>2</sup>.

In questo senso, il Gruppo Intergovernativo sui Cambiamenti Climatici (IPCC), sostiene che circa il 95% dell'aumento delle emissioni di GES provengono dalle attività umane, come si osserva nella **figura 1.1**, i livelli di concentrazione dei gas nell'atmosfera sono aumentati dal 40% rispetto ai livelli pre industriali, approssimativamente da 280ppm a 400ppm negli ultimi 150 anni<sup>1</sup>.



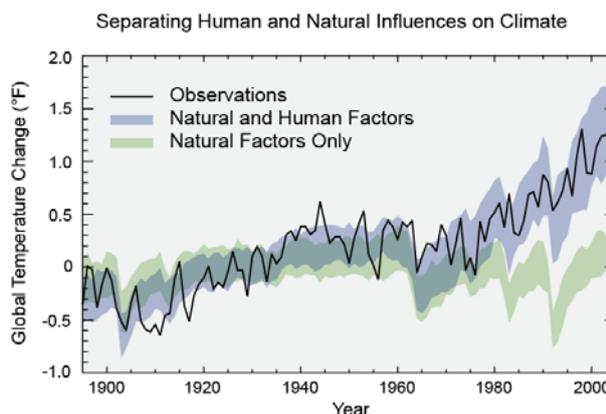
**Fig. 1.1:** Incremento di concentrazione di GHG nell'atmosfera negli ultimi 2000 years. Le unità che indicano la quantità di molecole nell'aria sono *parti per milioni* (ppm), e *parti per billioni* (ppb).

**Fonte:** www.epa.gov

1 IPCC. (2014). *Cambio climático 2014*. <https://doi.org/10.1256/004316502320517344>

2 ec.europa.eu

La concentrazione dei GES influenza il bilancio energetico dell'atmosfera, quali: l'incidenza dell'energia solare, la capacità di riflettività dell'atmosfera e della superficie. Questo equilibrio è il fattore che determina la temperatura nella terra, che in più, è soggetta alla quantità di energia che entra ed esce nell'atmosfera. In tal senso, va notato che i GES concentrati hanno la capacità di assorbire l'energia solare, accumulando calore nell'ambiente urbano, e generando l'effetto di riscaldamento delle superfici <sup>3</sup>.



**Fig. 1.2:** Influenze delle emissioni di GHG naturali e umane nel cambiamento climatico

**Fonte:** [www.epa.gov](http://www.epa.gov)

Le più alte concentrazioni di gas nell'atmosfera da attività umane corrispondono alle emissioni di CO<sub>2</sub>, che ad oggi è aumentata di tre volte il suo livello rispetto all'inizio della rivoluzione industriale, ed è considerata responsabile di circa il 64% del riscaldamento globale.

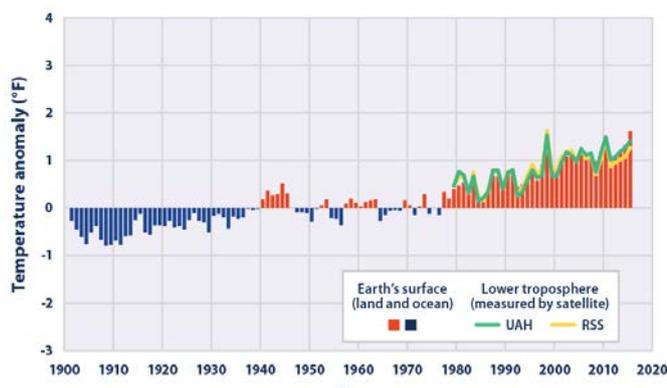
Un altro effetto della CO<sub>2</sub> è la sua capacità di aumentare la forza radiante, per determinarlo, è stato determinato l'indice GES annuale, un valore che indica la forzatura radiante come risultato della concentrazione dei GES nell'atmosfera proveniente esclusivamente dalle attività antropogeniche, il che ha dimostrato l'aumento del 27,5% nel periodo 1990 – 2009, essendo responsabili dell'80% della crescita della forza radiativa <sup>1</sup>.

---

1 IPCC. (2014). *Cambio climático 2014*. <https://doi.org/10.1256/004316502320517344>

3 [www.epa.gov](http://www.epa.gov)

E sulla base dell'aumento delle concentrazioni di GES nell'atmosfera, c'è stato un record di temperature realizzati da diverse stazioni, rappresentato nella **figura 1.3**, utilizzando misure prese diretti da satelliti (UAH e RSS), mostrando che dal 1901 la temperatura media è aumentata solo di 0.216°C (0,15°F), che dal 1970 raggiungono dei livelli più alti <sup>1</sup>.



**Fig. 1.3:** Incremento di temperatura, 1901-2015

**Fonte:** www.epa.gov

In generale, il cambiamento climatico ha gravi conseguenze nei settori alimentare, idrico, sanitario ed abitativo, a causa del cambiamento delle temperature, le precipitazioni, e la frequenza e intensità degli eventi naturali. Sebbene il cambiamento climatico è un problema globale, il suo impatto varia in base alla posizione geografica in cui l'esposizione, la vulnerabilità, e la resilienza dei sistemi, giocano un ruolo fondamentale <sup>5</sup>.

---

1 IPCC. (2014). *Cambio climático 2014*. <https://doi.org/10.1256/004316502320517344>

4 L'indice annuale dei gas effetto serra è definito come il rapporto tra il totale della forza radiativa diretta dovuto ai gas serra a lunga durata per qualsiasi anno. Il 1990 è stato scelto perché è l'anno di riferimento per il Protocollo di Kyoto.

5 [www.climate.nasa.gov](http://www.climate.nasa.gov)

## 1.2 Fenomeno dell'Isola di Calore Urbano

Nell'anno 1818, Luke Howard è stato chi ha scoperto la differenza delle condizioni climatiche nelle aree urbane e le aree rurali, questo mediante uno studio sviluppato a Londra sul clima in generale, nel quale ha evidenziato mediante un confronto di dati termici l'esistenza di una differenza di circa 2,2°C nei periodi notturni e una differenza minore nei periodi diurni <sup>6</sup>.

È opportuno segnalare che le città sono responsabili di circa 60-80% del consumo energetico e delle emissioni di GHG. In questa linea, si deve anche dire che nell'anno 2011 il 73% della popolazione delle città Europee abitava in aree urbane, ed è stato stimato che per l'anno 2050 la percentuale di popolazione che abiterà nelle zone urbane incrementerà del 82%, portando ad un incremento di massa urbana la quale tenderà a generare maggiori impatti ambientali <sup>7</sup>.

In questo senso, si riconosce che il fenomeno dell'Isola di Calore Urbana (ICU) si manifesta come conseguenza all'urbanizzazione delle aree rurali, ed è dovuto a fattori legati a <sup>8</sup>:

- **la configurazione urbana**, la quale comprende le caratteristiche della città quali la densità urbana, l'ampiezza delle strade, caratteristiche dei materiali stradali e presenza di vegetazione;
- **al contesto ambientale**, laddove vengono considerati gli elementi del clima che incidono sulle aree urbane quali l'irraggiamento solare, la temperatura accumulata, le precipitazioni, la velocità e direzione del vento y la nuvolosità;
- **agli edifici**, i quali contribuiscono all'incremento o meno del fenomeno in base alle caratteristiche e i bilanci energetici dei materiali e al consumo energetico;
- **le fonti di inquinamento**, che riguardano le attività delle zone le quali emettono sostanze inquinanti, quali le attività industriali e il flusso del traffico urbano.

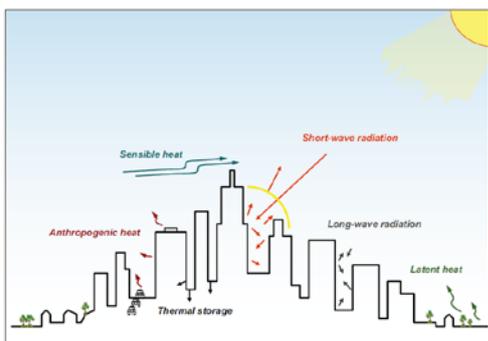
---

6 Mills, G. (2008). Luke Howard and The Climate of London. *Weather*, 63(6), 153–157. <https://doi.org/10.1002/wea.195>

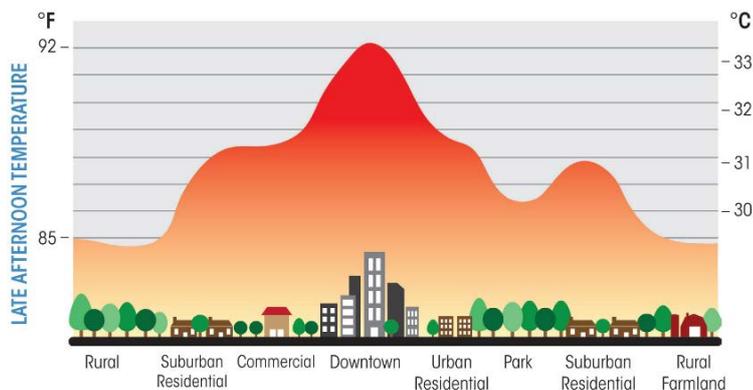
7 Galderisi, A., & Ferrara, F. F. (2012). Enhancing urban resilience in face of climate change: a methodological approach. *Tema. Journal of Land Use, Mobility and Environment*, 5(2), 69–88. <https://doi.org/10.6092/1970-9870/936>

8 Beretta, S. (2012). Gli Effetti Del Verde Sulla Mitigazione dell'isola di calore urbana.

Come rappresentato nella **figura 1.4** esistono quindi diverse sorgenti di calore che configurano il bilancio energetico delle superfici urbane, invece, la **figura 1.5** rappresenta invece tutti gli aspetti menzionati precedentemente tendono ad accumulare calore all'interno del canyon urbano e di conseguenza generano un microclima urbano che differisce da quello rurale per l'intensità della temperatura.

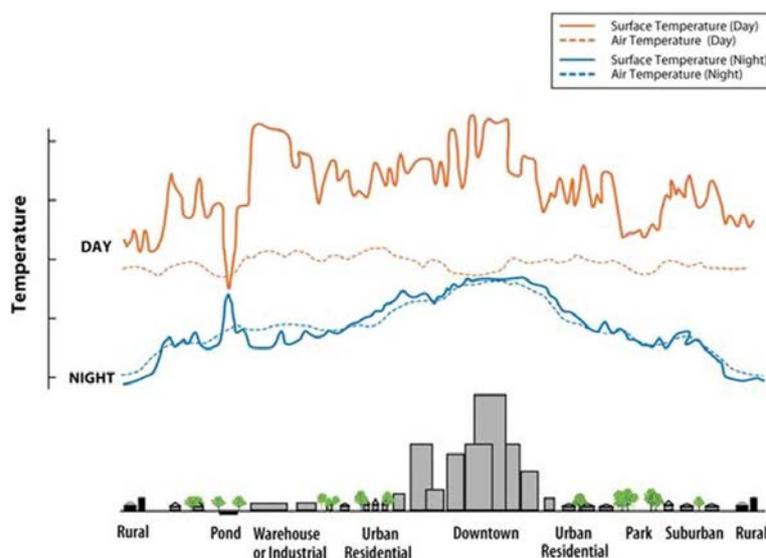


**Fig. 1.4:** Bilancio energetico di superficie urbana



**Fig. 1.5:** Fenomeno dell'isola di calore urbana

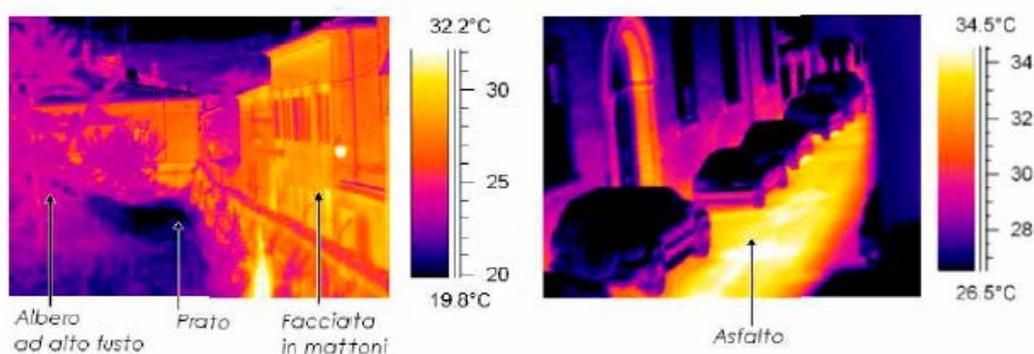
Questo fenomeno termico si differenzia in 2 tipologie maggiori (**figura 1.6**), le quali hanno diverse metodi di misura, di mitigazione, intensità del fenomeno e momenti massimi nel periodo giornaliero. In questo senso, le tipologie sono: *l'isola di calore superficiale*, con valori più elevati e con i momenti massimi nei periodi diurni, e *l'isola di calore atmosferica*, la quale ha maggiore intensità nei periodi notturni.



**Fig. 1.6:** Rappresentazione dei diversi fenomeni d'ICU superficiale e atmosferica (con temperature diurne e notturne in aree con diverso utilizzo del suolo)

A livello più dettagliato, le tipologie si differenziano in <sup>8</sup>:

- **l'isola di calore superficiale**, questa tipologia di fenomeno viene generata principalmente dalla radiazione solare incidente sulle superfici nell'ambiente urbano (maggiormente sulle superfici orizzontali: pavimentazione e coperture) e dall'elevate temperature dell'aria, con i momenti massimi intorno alle ore 15, quando il sole è nella sua fase massima di irraggiamento. Si manifesta con la differenza di temperatura esistente tra le superfici dei materiali rispetto a quella dell'aria (**figura 1.7**), e dipende dell'intensità degli elementi del clima, dell'esposizione e vulnerabilità dei materiali, questa differenza di temperatura nelle stagioni estive può arrivare ai 30°C. Dato che questo fenomeno viene alterato più che altro dalla radiazione solare, la sua manifestazione è nel periodo diurno, e i gradi di differenza tra le temperature vengono determinati dalle caratteristiche fisico-tecniche dei materiali, le quali riguardano la capacità di riflettere, assorbire e poi liberare la quantità di calore incidente sulle superfici.



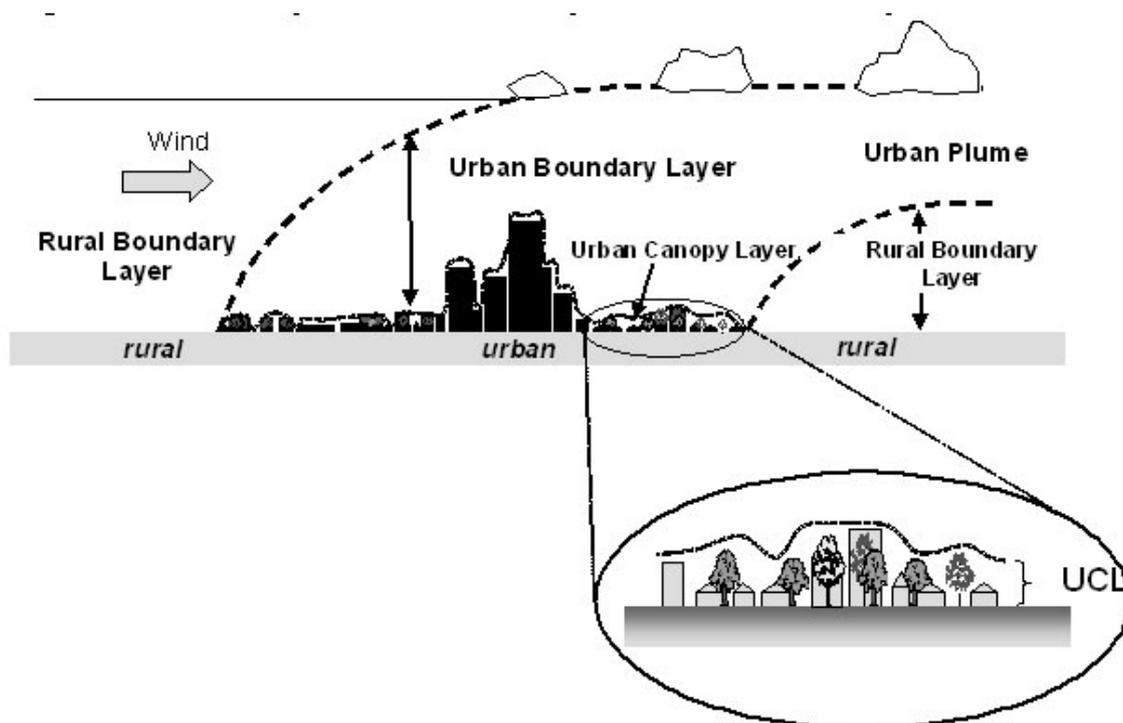
**Fig. 1.7:** Le superfici urbane costituite da mattoni o asfalto sono da caratterizzate temperature maggiori rispetto alle superfici tipiche delle zone rurali. Le fotografie termiche riguardano la città di Ferrara nel luglio 2006 alle ore 22:00.

**Fonte:** Tesi di laurea magistrale, Analisi sperimentale del fenomeno "isola di calore" nella città di padova

---

8 Beretta, S. (2012). Gli Effetti Del Verde Sulla Mitigazione del'isola di calore urbana.

- **l'isola di calore atmosferica**, viene determinata dalla differenza di temperatura dell'aria dell'ambiente urbano (più caldo) e quello rurale chiamato anche rural boundary layer (più fresco). È riconosciuta quando esistono 3°C di differenza tra le zone, pertanto si può dire che la variazione dei valori termici tra le zone è minore rispetto all'isola di calore superficiale, ma nei periodi estivi la differenza massima può raggiungere i 10°C. Questa tipologia è suddivisa a seconda la quota dell'atmosfera analizzata, laddove vengono identificate (**figura 1.8**): *l'isola di calore dello strato della copertura urbana* (urban canopy layer), oppure in prossimità alle superfici, la quale viene alterata dalla temperatura delle superfici dei materiali dallo scambio convettivo, e si concentra al di sotto delle altezze medie degli edifici, considerata fino a 2 m al di sopra delle superfici. Invece, *l'isola di calore dello strato limite urbano* (urban boundary layer) si caratterizza dalla differenza di temperatura dell'aria negli strati più elevati degli edifici. Entrambe le tipologie appaiono fundamentalmente nei periodi notturni, di circa 2-4 ore dopo il tramonto, quando i materiali rilasciano all'atmosfera l'energia assorbita nei periodi diurni (che successivamente viene trasformata in calore).



**Fig. 1.8:** Rappresentazione grafica dei componenti dell'atmosfera urbana (Oke 1976)

**Fonte:** Tesi di laurea magistrale, Analisi sperimentale del fenomeno "isola di calore" nella città di Padova

### 1.3 Il ruolo delle coperture nell'ambiente naturale e urbano

#### *Cenni storici*

Nella storia, il concetto di rifugio ha evoluto in base all'avanzamento delle civiltà, tuttavia, gli obiettivi dei rifugi nelle diverse ere hanno avuto gli stessi principi di - proteggere un'area delimitata dagli agenti atmosferici- cioè nel stabilire un rapporto di clima-comfort all'interno degli spazi generati. A tale proposito, diversi studi confermano che sono stati utilizzati diverse tecniche e materiali naturali per soddisfare le necessità particolari di ogni sito. I fattori chiave dei rifugi sono stati: la protezione di temperatura estreme, vento, pioggia, animali, insetti e piante. All'epoca sono stati pochi i materiali che riuscivano a soddisfare tutti i bisogni, quali, quelli considerati duri (pietra, legno e ossa), quelli flessibili ma degradabili (foglie, corteccia interna degli alberi, pellicce degli animali), e terra o fango che permette la lavorazione e rivestimento.

Nel periodo Neolitico i materiali impiegati nelle coperture variavano in base alle località, dovuto alle condizioni climatiche di ogni sito (considerazioni che ancor oggi si mantengono con lo scopo di rispondere alle esigenze climatiche insieme alle configurazioni morfologiche delle città), dovevano anche essere leggeri data la bassa resistenza delle coperture, pertanto, erano stati impiegati i materiali flessibili e degradabili precedentemente citati, che posteriormente erano stati sostituiti da altre soluzioni. Le tipologie di pietre piatte (quale il carbonato di calcio) erano in grado di offrire maggiori vantaggi rispetto agli altri materiali degradabili, ma generalmente non c'era tanta disponibilità. Finalmente, insieme all'impiego della terra, erano stati proposti dei rivestimenti vegetali, i quali offrivano ottimi risultati riguardo ai suoi bisogni <sup>9</sup>.

---

9 Jim, C. Y. (2017). Urban Forestry & Urban Greening An archaeological and historical exploration of the origins of green roofs. *Urban Forestry & Urban Greening*, 27(June), 32–42. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.06.014>

Si può dire che in base alle condizioni climatiche e le prestazioni del materiale vegetale furono concepite le *Turf House*, le quali avevano la finalità di proteggere l'ambiente interno dalle temperature estremamente basse, con le risorse limitate nelle zone artiche. Questa tipologia abitazionale utilizza l'impiego di materiali naturali sulle coperture, quali la vegetazione, nella ricerca di soddisfare le condizioni adeguate di isolamento termico, il quale si ottiene da uno strato spesso di vegetazione su strutture di legno.



**Fig. 1.9:** Turf House

La necessità di riparazione dalla pioggia e l'umidità (scopo che non poteva più essere soddisfatto dalle piante e le caverne), portarono alla concezione di nuovi metodi e tecniche, partendo dalla ricerca dei materiali naturali disponibili che fossero in grado di supportare e offrire protezione all'intemperie. In questo modo, vennero definite le prime tecniche includendo l'utilizzo di tronchi d'alberi resistenti per conformare la base strutturale di pilastri, travi e la forma inclinata che definisse la pendenza della copertura, la quale fu costituita da fogli spesse per la protezione della radiazione solare e la pioggia. In questo senso, Mandolesi, E. (1991), sostiene che <sup>10</sup>:

*“Le coperture sono elementi distaccati dal terreno, portati dall'ossatura dell'edificio e costituiscono il –cappello- delle chiusure verticali e comunque degli elementi in elevazione, racchiudendo e definendo superiormente rispetto all'orizzonte l'organismo edilizio, perciò vengono definite -chiusure orizzontali di copertura-”*

---

10 Enrico Mandolesi, *Edilizia*, Torino, “UTET Unione Tipografico – Editrice Torinese”, Volume 3, 1991.

### *Coperture nell'attualità*

Dopo che gli elementi di copertura dovevano solo svolgere un ruolo protettivo per le persone, l'invenzione delle attività industriali hanno portato a una nuova definizione per gli elementi che conformavano l'ambiente urbano, la quale comprende la cura del microclima mediante le limitazioni delle emissioni dei GEI e il controllo delle alterazioni degli elementi del clima.

In questo senso, studi hanno rivelato che la percentuale della superficie occupata dalle coperture nell'ambiente urbano è di circa il 20-25%, le quali coprono edifici che emettono circa il 36% di GEI in Europa dovuto il consumo energetico di essi. È opportuno dire che le emissioni dagli edifici all'ambiente si deve all'utilizzo di impianti di climatizzazione date le condizioni non adeguate negli spazi interni (a causa delle condizioni climatiche), generando maggiori livelli di inquinamento, i quali conducono a maggiore incremento di temperature. In questo caso, le coperture edilizie possono contribuire in un modo importante nel miglioramento delle condizioni interne degli edifici e di conseguenza un miglioramento anche dell'ambiente urbano <sup>11</sup>.

Il nuovo scopo delle coperture come gli elementi con la maggiore esposizione ai componenti del clima, è quello di controllare gli scambi termici con gli ambienti esterni e interni degli edifici, con la finalità di migliorare le condizioni microclimatiche dell'ambiente urbano circostante, contribuire nella riduzione del consumo energetico degli edifici con il fine di ridurre sia le emissioni di gas inquinanti che le spese connesse. In quest'ottica, le coperture devono fornire basse temperature superficiali, contribuendo quindi alla mitigazione del fenomeno dell'isola di calore sia superficiale che quella atmosferica, fornendo in questo modo modelli di città più vivibili.

---

11 Guzmán-sánchez, S., Jato-espino, D., Lombillo, I., & Diaz-sarachaga, J. M. (2018). Assessment of the contributions of different flat roof types to achieving sustainable development. *Building and Environment*, 141(May), 182–192. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.063>



## CAPITOLO 2

### Incentivi internazionali e regionali di riferimento

#### 2.1 Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC

Negli ultimi periodi degli anni 80, è stata creata l'organizzazione scientifica del Gruppo Intergovernativo sui Cambiamenti Climatici (IPCC), dall'Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO) ed il Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente (UNEP). Queste organizzazioni hanno la finalità di valutare tutti gli aspetti considerati fondamentali per i cambiamenti climatici originati dalle attività antropogeniche. Dunque, l'obiettivo è quello di lottare contro il cambiamento climatico, cercando quindi di limitare i rilasci nell'ambiente per evitare di raggiungere i peggiori scenari stabiliti dall'organizzazione, ed anche di sensibilizzare la società ed i professionisti nel campo della costruzione e le aziende riguardo alle conseguenze delle azioni, pertanto, l'IPCC promuove la definizione delle misure di adattamento e di mitigazione delle emissioni, con il fine di evitare grandi impatti ambientali a causa delle alterazioni degli elementi del clima <sup>1</sup>.

Il lavoro viene rappresentato mediante i report, i quali indicano le proiezioni degli elementi del clima in base alle concentrazioni di inquinanti nell'atmosfera. Fin'ora, l'organizzazione ha presentato 5 report con differenti approcci dei cambiamenti climatici (negli anni: 1990, 1995, 2001, 2007 e 2014).

I report dell'IPCC consistono quindi nella valutazioni dei cambiamenti climatici nei periodi successivi, attraverso 4 scenari di diverse quantità di emissioni, identificati come i *Representative Concentration Pathway* (RCP). Ogni scenario è caratterizzato da maggiori livelli di inquinamento (concentrazione di CO<sub>2</sub>) rispetto a quelli precedenti, i quali conducono ad alterazioni più forti e frequenti degli elementi ed i fenomeni del clima.

---

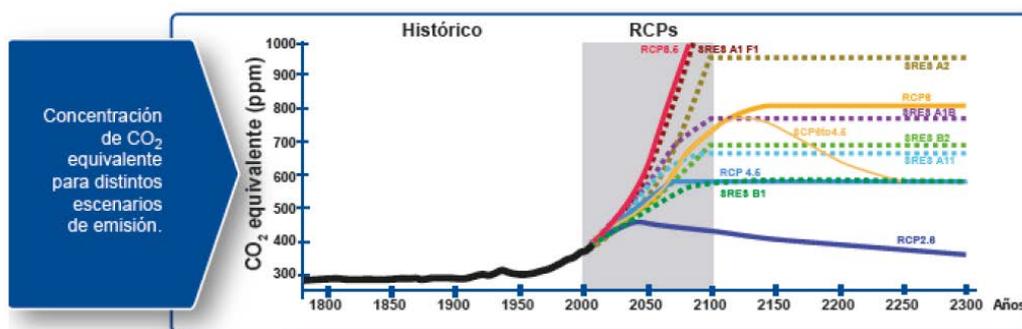
1 [www.mapama.gob.es](http://www.mapama.gob.es)

Insieme a questo scopo, il COP 21 <sup>2</sup> ha definito un limite dell'incremento della temperatura media mondiale, stabilendo un incremento minore ai 2°C rispetto alle temperature del periodo preindustriale, in quest'ottica, sono stati proposti gli approcci di mitigazione e di adattamento come due aspetti che si complementano per un unico obiettivo di ridurre i rischi degli impatti climatici, diventando in questa forma i nuovi modi di progettare.

Nei peggiori dei casi, questi tipi di scenari hanno previsto un incremento climatico nell'anno 2100 di 4°C superiori ai livelli preindustriali, con rilasci di emissioni superiori ai 1000 ppm CO<sub>2eq</sub>. Contrariamente, nello scenario di emissioni più basse di 450-550 ppm CO<sub>2eq</sub> (il quale corrisponde allo stabilito del COP 21) ha previsto comunque un incremento di temperature medie di 1.5-2°C <sup>3</sup>. La **tabella 2.1** dimostra i 4 scenari di emissioni (RCP), le sue forze radiative (FR), indica anche la tendenza di stabilizzazione nel tempo e gli emissioni di CO<sub>2</sub> considerata fino all'anno 2100. La **figura 2.1**, invece, rappresenta graficamente l'incremento delle emissioni nei diversi scenari stabiliti dall'IPCC.

	FR	Tendencia del FR	[CO <sub>2</sub> ] en 2100
RCP2.6	2,6 W/m <sup>2</sup>	decreciente en 2100	421 ppm
RCP4.5	4,5 W/m <sup>2</sup>	estable en 2100	538 ppm
RCP6.0	6,0 W/m <sup>2</sup>	creciente	670 ppm
RCP8.5	8,5 W/m <sup>2</sup>	creciente	936 ppm

**Tabella 2.1:** Scenari di emissioni delle proiezioni dei cambiamenti climatici



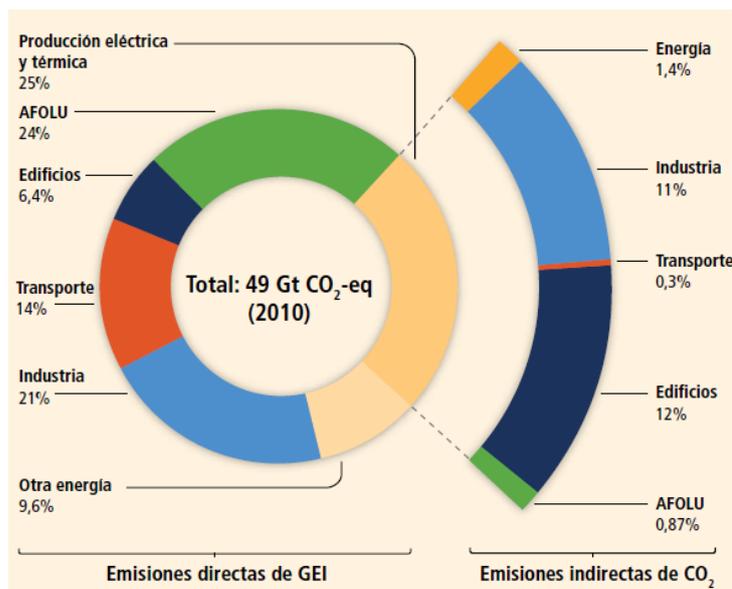
**Fig. 2.1:** Valutazione temporale della concentrazione di CO<sub>2eq</sub> negli scenari RCP e SRES (report precedente)

**Fonte:** IPCC-AR5.

2 Il COP 21 è stata la Conferenza delle Nazioni Unite sul Cambiamento Climatico tenuta a Parigi nell'anno 2015, nella quale hanno stabilito un incremento medio della temperatura mondiale minore ai 2°C rispetto ai livelli preindustriali.



L'impiego delle misure per l'adattamento negli aspetti tecnologici, politici, economici e sociale possono comportare alla concezione di modelli sostenibili; La garanzia dell'impiego delle misure deve essere data dai governi locali, i quali devono assicurare che i settori soddisfino le esigenze richieste, in quest'ottica, la **figura 2.3** rappresenta l'emissioni di ogni settore di gas ad effetto serra, ed evidenzia che il settore edilizio comprende il 6.4% di emissioni dirette ed il 12% di emissioni indirette <sup>3</sup>.



**Fig. 2.3:** Emissioni di gas ad effetto serra dei diversi settori

**Fonte:** IPCC, *Cambio climático 2014*.

Da un'altra parte, le soluzioni più performanti per la mitigazione sono quelle che comprendono la decarbonatazione, dato che quello che si intende è la diminuzione di CO<sub>2</sub> nell'ambiente, sia quella emessa dalle attività antropogeniche, che quella concentrata nell'atmosfera e, come precedentemente citato, esiste la possibilità di limitare i rilasci di emissioni, ma successivamente devono essere considerate anche delle misure per ridurre la CO<sub>2</sub> già concentrata nell'atmosfera.

L'IPCC sostiene che tra le possibili soluzioni di nuovi sviluppi che comprendano delle misure per l'adattamento e per la mitigazione, ci si può trovare l'utilizzo di tecnologie a bassi impatti ambientali, le quali siano in grado di ridurre delle emissioni di gas ad effetto serra, e che incrementino la resilienza ai cambiamenti climatici. Si deve quindi menzionare che lo scopo del lavoro di ricerca segue questa misura stabilita dall'organizzazione, la quale sarà approfondita nei capitoli successivi.

## 2.2 Sustainable Development Goals (SDG)

Nell'anno 2015 è stato proposto un nuovo piano di azioni: L'agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile, che ha stabilito 17 obiettivi di sviluppo sostenibile (SDG), i quali comprendono 3 argomenti principali: la lotta alla povertà, l'eliminazione della fame e il contrasto al cambiamento climatico. Tra gli obiettivi proposti la ricerca ha considerato di lavorare in base a 2 di essi, i quali riguardano la sostenibilità delle città ed il cambiamento climatico <sup>5</sup>.

### 2.2.1 SDG 11 - Città e comunità sostenibili

L'insieme di tutte le città del mondo concentrano di circa 3,5 miliardi di persone, le quali hanno bisogno di servizi comuni che conducono alla produzione di una quantità estrema di emissioni di inquinanti. Gli studi dei SDG sostengono che oggi giorno le città occupano circa il 3% della superficie a livello mondiale, e sono comunque responsabili del 75% delle emissioni di carbonio e del 60 – 80% del consumo energetico. Le proiezioni prevedono un incremento delle città, pertanto devono essere prese delle misure di controllo delle emissioni prima di raggiungere livelli estremi, e che non ci sia più la possibilità di annullare gli impatti delle attività antropogeniche.



Per quanto riguarda il settore edilizio, il SDG 11 ha stabilito entro il 2020 la necessità di garantire l'adozione delle politiche integrate, laddove devono essere presi in considerazione l'efficienza delle risorse, l'inclusione delle misure di adattamento e di mitigazione al cambiamento climatico e alla resistenza ai disastri.

A partire da queste considerazioni, il lavoro di ricerca ha lo scopo di studiare delle soluzioni tecnologiche di coperture che siano in grado di soddisfare l'esigenza della resilienza e la mitigazione (come stabilito dall'IPCC). Saranno considerate quelle che siano in grado di coprire strategie di adattamento al cambiamento climatico basati nelle proiezioni del 5 report dell'IPCC, ed anche alla mitigazione dell'isola di calore urbana mediante le soluzioni tecnologiche più performanti che siano capaci di evitare la concentrazione di calore all'interno del ambiente urbano, contribuendo sia all'ambiente esterno che all'ambiente interno degli edifici.

### 2.2.2 SDG 13 – Lotta contro il cambiamento climatico

Il SDG 13 invece, si concentra nella lotta contro il cambiamento climatico a livello mondiale, dato che è un interesse di tutti, e che l'effettività delle sue azioni risulterà solo se un'importante quantità di paesi seguissero delle misure appropriate. Pertanto, particolare attenzione viene data all'adempimento delle limitazioni dei rilasci di gas a effetto serra dalle attività antropogeniche (i quali sono arrivati ai livelli più elevati nella storia) con il fine di ottenere veri e propri

risultati di mitigazione. Come esempio, è il caso delle allarmanti proiezioni climatiche nell'anno 2100, il quale prevede un incremento di temperature massime medie di circa i 4°C (nel peggiore scenario e senza prevedere misure di adattamento). Dunque, con il fine di non raggiungere livelli estremi, è necessario seguire le azioni proposte dalle normative e protocoli.

È un fatto che maggiore è la concentrazione di gas a effetto serra nell'atmosfera, maggiori sono gli effetti di cambiamento climatico, pertanto, si deve proprio partire dalla limitazione delle emissioni, laddove, oggi giorno le emissioni solo di CO<sub>2</sub> sono aumentate del 50% rispetto all'anno 1990.

In quest'ottica, il SDG 13 propone di introdurre le misure di adattamento nelle politiche come esigenza nei nuovi sviluppi, propone anche di sensibilizzare in quanto agli argomenti di mitigazione delle alterazioni climatiche, l'adattamento e gli impatti.

In modo di raggiungere gli obiettivi proposti, una soluzione è stata quella dell'impiego di tecnologie che siano in grado di soddisfare le esigenze richieste. Vengono identificate le alterazioni climatiche di un caso studio a Madrid, e posteriormete verranno studiati dei sistemi che contribuiscano alla diminuzione degli effetti causati per le alterazioni degli elementi del clima, più specificamente, il fenomeno dell'isola di calore urbana.



## 2.3 Piano Nazionale per l'Adattamento al cambiamento climatico - Spagna

Il Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici specifico per la Spagna, è stato concepito come uno strumento contenente informazioni riguardo la valutazione degli impatti, la vulnerabilità e la definizione delle strategie di adattamento ai cambiamenti climatici. L'obiettivo principale è quello di integrare delle strategie di adattamento nello sviluppo di nuovi progetti per concepire i nuovi modelli di sviluppo sostenibile <sup>6</sup>.

Lo strumento deve prevedere:

- lo studio delle condizioni climatiche;
- le proiezioni di cambiamento climatico dal punto di vista sociale, economico ed ambientale;
- stabilire una metodologia per la valutazione degli impatti, la vulnerabilità e l'adattamento;
- la sensibilizzazione degli effetti del cambiamento climatico e le loro possibili strategie;
- elaborazione di un report dei risultati.

Nel caso particolare delle strategie stabilite dei piani urbanistici e il settore edilizio devono prevedere uno studio degli effetti dei cambiamenti climatici su di loro, in modo di prendere decisioni che possano adattarsi allo stato attuale e riescano a contribuire e prevenire effetti avversi. Pertanto è opportuno menzionare i principali impatti a considerare nel settore: gli effetti delle zone verdi, gli impatti dei cambiamenti climatici nelle condizioni di abitabilità degli edifici e la sensibilità delle proiezioni di cambiamento climatico con l'obiettivo di stabilire delle normative. Linee che sono presi per lo sviluppo della ricerca e saranno più approfondite nei capitoli successivi.

---

6 España, O., Clim, O. L. A. D. E. C., Para, T. S. G., Prevenci, L. A., Contaminaci, D. E. L. A., Clim, D. E. L. C., ... Ambiente, D. E. M. (n.d.). Adaptación al cambio marco para la coordinación entre administraciones públicas para las actividades de evaluación de impactos



## **PARTE 2**

### **CARATTERISTICHE DEI MATERIALI E RUOLO DELLE COPERTURE**



## CAPITOLO 3

### Caratteristiche delle coperture

#### 3.1 Caratteristiche fisico-tecniche dei materiali.

I materiali dell'ambiente urbano interagiscono con gli elementi climatici del contesto in cui si trovano, e insieme al metabolismo urbano (macchine e inquinamento) determinano le condizioni termiche dell'ambiente costruito, generando il microclima urbano. Pertanto, è importante che le proprietà dei materiali e la loro interazione con le condizioni climatiche del contesto.

In termini generali, Santamouris, M. sostiene che le prestazioni termiche dei materiali degli edifici si definiscono dalle caratteristiche ottiche e termiche, che lavorano in base a la radiazione solare incidente, considerando che l'albedo o riflettività di radiazione a onde corte e la remissività di radiazione a onde lunghe sono i fattori più importanti. Le loro funzioni cercano di ridurre la quantità di radiazione solare assorbita dai materiali e di emettere l'energia che si ritrova dentro il materiale. Un aspetto negativo della riflettività è l'assorbimento della radiazione solare dai materiali nel contesto, generando la necessità di proporre delle strategie che impediscano questo fenomeno<sup>1</sup>.

Analogamente, si devono valutare altre caratteristiche fisiche che determinano il bilancio termico, quali: il coefficiente di convezione, che definisce la quantità di calore trasferito per convezione all'aria; la capacità termica che determina la resistenza per elevare i valori di temperatura; la diffusività termica con la quale si libera il calore immagazzinato e la permeabilità che attraverso un processo naturale contribuisce alla riduzione di temperature e ad altri fattori del cambiamento climatico.

Lo studio previo delle proprietà dei materiali evita di avere guadagni termici non desiderati e il soprariscaldamento delle superfici urbane, contribuendo in tal modo alla mitigazione del cambiamento climatico, al comfort termico degli spazi interni ed esterni.

---

1 Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island - A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 224–240. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.047>

### 3.1.1 Albedo

L'albedo o riflettanza solare è considerato dentro le caratteristiche più importanti dei materiali, essendo determinante per valutare il comportamento termico di essi. Inteso come la relazione tra la radiazione solare incidente nelle superfici e la capacità di riflessione che ha il materiale.

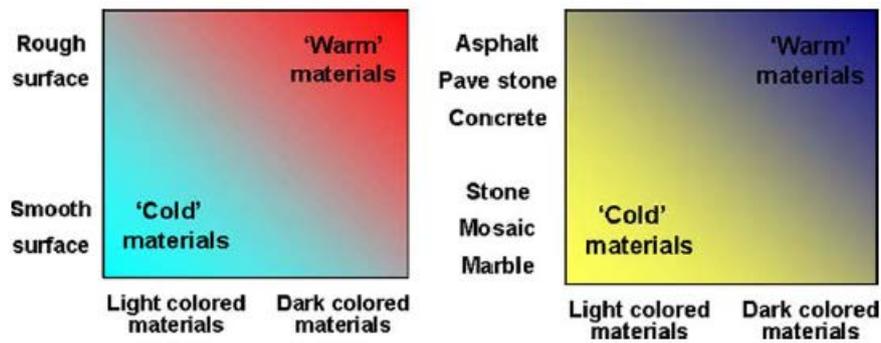
Uno studio realizzato da Doulos, Santamouris y Livada (2014), nel quale si valuta il comportamento di diversi tipi di materiali, indica che l'albedo è determinato principalmente dai toni e rugosità dei materiali. I valori che misurano questo fattore variano dai 0 a 1<sup>3</sup>. Tra i materiali si trovano quelli di colore nero o toni scuri che partono da valori pari a 0, i quali hanno una maggior capacità di assorbimento della radiazione solare, e possono aumentare le temperature delle superfici dei materiali. Inoltre, i materiali di colore bianco o toni chiari hanno dei livelli più alti di albedo, partendo da valori pari a 1, con una elevata capacità di riflettanza della radiazione solare, evitando quindi il sovrariscaldamento della superficie del materiale. In più, confermarono che anche la rugosità fa parte delle variabili che incidono, dove i materiali di superfici piatte e lisce presentano minori temperature in confronto con delle superfici rugose<sup>4</sup>.

---

2 Gavin\_Gui Jooseng, Phelan Patrick E, Kaloush Kamil E, Golden Jay S. Impact of Pavement thermophysical properties on surface temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering* 2007;19:8.

3 Li, H., Harvey, J. T., Holland, T. J., & Kayhanian, M. (2013). The use of reflective and permeable pavements as a potential practice for heat island mitigation and stormwater management. *Environmental Research Letters*, 8(1).

4 Doulos, L., Santamouris, M., & Livada, I. (2004). Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials. *Solar Energy*, 77(2), 231–249.



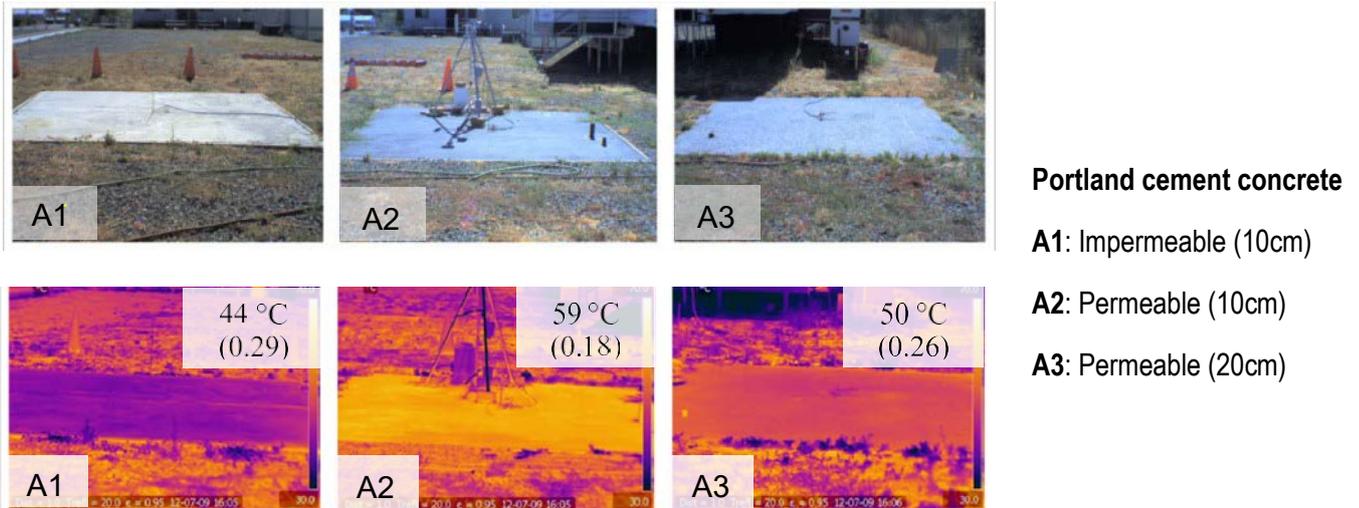
**Fig. 3.1:** Definitions of 'cold' and 'warm' materials

**Fonte:** Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island - A review of the actual developments

La **fig. 3.1** evidenzia le diverse valutazioni realizzate da Doulos, L. et al., (2004), su 93 diversi materiali per capire le loro prestazioni, le quali incidono sul loro comportamento in ambiente esterno modificandolo in base alle condizioni climatiche del contesto. In tal modo, è importante evidenziare che gli elementi del clima influiscono nel comportamento dei materiali, soprattutto in quanto riguarda la radiazione solare, la quale aumenta la temperatura delle superfici generando il fenomeno isola di calore urbano.

Prendendo come riferimento la definizione dell'isola di calore urbano realizzata nei precedenti capitoli, in questo capitolo si approfondisce nella relazione che hanno i materiali su questo fenomeno. Come descritto prima l'effetto isola di calore urbano è conseguenza dalla geometria dei "radiative canyon", il calore antropogenico e le proprietà fisiche dei materiali urbani (Santamouris, 2001; Oke et al., 1991). Ulteriormente, le distorsioni di temperatura, generano a sua volta impatti economici, dovuto all'incremento dell'uso di climatizzatori all'interno degli edifici.

Partendo da questi dati, si sono stabiliti delle strategie e tecnologie per il controllo e bilancio termico dei materiali, Li H. et al., (2013), sostiene che l'impiego di materiali di toni chiari, l'uso di pitture bianche in superfici di materiali scuri, permette di aumentare la riflettività dello spettro, evitando in questo modo l'aumento della temperatura superficiale dei materiali. Questa teoria è stata dimostrata da Santamouris M. (2013), dove si raggruppano diversi studi sulle prestazioni dei materiali, e riesce ad individuare che le distorsioni di temperature corrispondono a dei livelli più bassi di albedo, ove i materiali di albedo 0,1 a 5 presentano temperature tra i 53°C e 71°C, dati che confermano la teoria realizzata in una seconda ricerca dove i materiali di albedo 0,05, 0,15 e 0,35 presentano temperature di 50,5°C, 46,1°C e 32,2°C rispettivamente<sup>1</sup>.



**Fig. 3.2:** Optical and thermal images of experimental test sections on 9 July 2012. (a) Optical images. (b) Infrared thermal images under dry condition (16:00) (lighter is hotter, average surface temperatures are listed with albedo in parentheses).

**Fonte:** Correlation analysis of surface temperature of rooftops, streetscapes and urban heat island effect: Case study of central Sydney.

Sharifi, E., Lehmann, S., (2015), realizzarono degli analisi su materiali con valori prestazionali diversi. Si è valutato l'effetto dell'albedo sulle temperature superficiali del calcestruzzo portland sotto diverse condizioni climatiche.

Il comportamento termico degli analisi dei materiali si è ottenuto attraverso le immagini termiche prese da una fotocamera infrarossa, evidenziando in questo modo che, il materiale A1 impermeabile con albedo di 0,20 raggiungeva temperature pari a 44°C, aumentando a 50°C nella proba A3 con un valore di albedo di 0,26, e finalmente, la proba A2 con delle temperature più elevate di 59°C con 0,18 di albedo, il minor valore raggiunto.

Una volta compreso il concetto di albedo come fattore importante, procediamo alla comprensione del suo valore a livello urbano. Taha, (1997) ha condotto un'indagine per identificare il valore medio dell'albedo nelle città del continente europeo, americano ed africano, dimostrando valori bassi di 0,15 a 0,30 nei primi due continenti, e di 0,45 a 0,6 al nord di Africa <sup>4</sup>.

4 Doulos, L., Santamouris, M., & Livada, I. (2004). Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials. *Solar Energy*, 77(2), 231–249.

Un chiaro esempio è stato fornito da Dessì, V. (2001) nel quale argomenta <sup>5</sup>:

“In una giornata di cielo sereno, alle nostre latitudini (Italia), l'intensità della radiazione solare può essere intorno agli  $200\text{w/m}^2$ ; la radiazione riflessa da una superficie chiara (albedo 0,8), sarà  $640\text{ w/m}^2$  (cioè  $800\text{ w/m}^2 \cdot 0.8$ ). Se la stessa intensità di radiazione avesse raggiunto una strada asfaltata (albedo 0,2), avrebbe riflesso una quantità pari a  $160\text{ w/m}^2$ .

La quantità che non viene riflessa nell'atmosfera viene assorbita dalla superficie in quantità complementare a quella riflessa; questo significa che una superficie asfaltata con albedo 0,2 riflette il 20% della radiazione restituendo all'atmosfera mentre assorbe il restante 80%. Tornando all'esempio precedente se la strada riflette  $160\text{ w/m}^2$ , assorbe  $640\text{ w/m}^2$ .”

---

5 Dessì, V. (2007). *Progettare il comfort urbano. Soluzione per un'integrazione tra società e territorio. Architettura sostenibile. 280 p., ill.*

### 3.1.2 Emissività

È la capacità dei materiali di rilasciare l'energia accumulata dalla radiazione solare che è stata assorbita, ed è espulsa attraverso l'emissione di radiazioni a onde lunghe tra 0 e 10  $\mu\text{m}$ . I valori di emissività variano da 0 a 1, sono indicati da  $\epsilon$  e rappresentano la distanza che un corpo nero ha del materiale valutato. I valori di remissività più elevati rappresentano la maggiore capacità di emissione di energia in un modo più rapido e sotto forma di radiazione infrarossa.

L'emissività di un materiale varia con la temperatura, con la lunghezza d'onda e con la direzione della radiazione emessa, ed è considerata un fattore fondamentale nei materiali per il contributo alla mitigazione dell'effetto dell'isola di calore urbano. Alcune indagini differiscono da questo, come nel caso di Santamouris, M. (2013), nella sua ricerca sulle strategie di mitigazione sottolinea che, il ruolo dell'emissività è di massima importanza, dato che nel momento in cui l'albedo raggiunge dei valori bassi, questo è il fattore responsabile del rilascio dell'energia assorbita dal materiale nel periodo notturno, riportato nello studio di Shi Zhiyang, Zhang Xiong, (2011).

D'altra parte, Oke et al. (1991), hanno eseguito una simulazione dell'effetto delle caratteristiche ottiche e termiche di alcuni materiali e, sulla base dei risultati hanno concluso che il ruolo dell'emissività è inferiore, poiché, sebbene ci fosse un aumento di  $\epsilon$ : 0,85 a 1.0, successivamente, c'è stato un leggero aumento di 0,4°C di temperatura tra l'ambiente urbano e quello rurale.

Sulla base delle ricerche studiate, si può ritenere che la riflettività e l'emissività, operando in direzioni diverse, siano i fattori con il maggior impatto positivo per la temperatura superficiale, cioè, insieme, soddisfano le funzioni per contribuire alla mitigazione dell'effetto isola di calore urbano. Gli sviluppi tecnologici che accomunano entrambe le proprietà sono noti come "materiali freddi", caratterizzati da un fattore di elevata riflettività per radiazione a onde lunghe ed un alto fattore di emissione <sup>4</sup>.

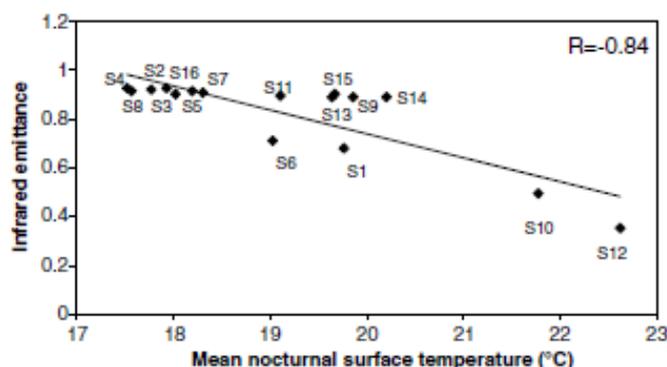
---

4 Doulos, L., Santamouris, M., & Livada, I. (2004). Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials. *Solar Energy*, 77(2), 231–249.

Durante il periodo notturno, l'emissività è il fattore più importante che influenza le prestazioni termiche dei materiali, come dimostrato da Synnefa, A., Santamouris, M. e Livada, I. (2006), in un'analisi effettuata in cui viene confrontata la prestazione termica di diversi materiali ed un confronto tra i materiali con i valori di emissività più alti e più bassi. È il caso del rivestimento acrilico, elastomerico di colore bianco e del rivestimento acrilico pigmentato in alluminio di colore argento. Dove il rivestimento acrilico bianco mostra che la sua temperatura superficiale diminuisce di 5K nel periodo notturno, con un valore  $\epsilon$ : 0,93, in contrasto con il rivestimento di alluminio con  $\epsilon$ : 0,35<sup>6</sup>.

Samples	Infrared emittance (Error = $\pm 0.01$ )	Samples	Infrared emittance (Error = $\pm 0.01$ )
S1	0.68	S9	0.89
S2	0.92	S10	0.49
S3	0.93	S11	0.89
S4	0.93	S12	0.35
S5	0.91	S13	0.90
S6	0.71	S14	0.89
S7	0.91	S15	0.89
S8	0.91	S16	0.91

**Tabella 3.1:** Infrared emittance values of the 16 samples



**Fig. 3.3:** The correlation between mean nocturnal surface temperature and the infrared emittance of the samples.

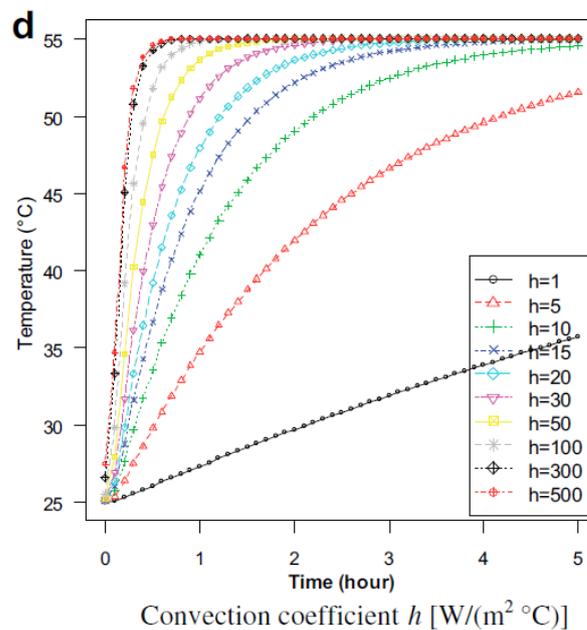
**Fonte:** Synnefa, A., Santamouris, M., & Livada, I. (2006). A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment. *Solar Energy*, 80(8), 968–981.

Nelle tabelle precedenti (**tab 3.1, Fig. 3.3**) i valori di emissività dei materiali valutati da Synnefa, A. et. al. (2006), tra i quali sono stati valutati materiali che variano per tipologia, colore e superficie, tra i quali spicca il rivestimento acrilico bianco rappresentato come S4 e il rivestimento in alluminio argento rappresentato come S12. Collegando le tabelle si può notare che il valore di emissività è inversamente proporzionale ai valori di temperatura, evidenziando i gradi di temperatura più bassi con il valore di emissività più elevato.

6 Synnefa, A., Santamouris, M., & Livada, I. (2006). A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment. *Solar Energy*, 80(8), 968–981.

### 3.1.3 Coefficiente di convezione

Il coefficiente di convezione dei materiali fa riferimento al trasferimento di calore della superficie di un materiale attorno ad esso o viceversa, a seconda della differenza di temperatura esistente tra l'ambiente e la superficie e il coefficiente di convezione che ha il materiale <sup>1</sup>. Il coefficiente è espresso con la lettera  $h$  e la sua unità di misura è  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ . Questo passaggio di temperatura viene effettuato in un determinato momento e può essere modificato dalla velocità del vento.



**Fig.3.4:** Sensitivity of thermal property parameters on the solution, (Convection coefficient parameter)

**Fonte:** Li, H., Harvey, J., & Jones, D. (2013). Multi-dimensional transient temperature simulation and back-calculation for thermal properties of building materials. *Building and Environment*, 59, 501–516.

La **fig. 3.4** mostra un'analisi di sensibilità eseguita per comprendere il parametro di trasferimento di calore, in cui prendono i punti di valutazione al centro del materiale, nel mezzo e su un punto sulla superficie. Nell'analisi è evidente che gli alti valori del coefficiente di convezione portano alla riduzione del tempo necessario per raggiungere l'equilibrio tra le diverse temperature.

---

1 Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island - A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 224–240. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.047>

Allo stesso modo, Li, Harvey e Jones (2013), hanno effettuato alcuni test in cui il bilancio termico dei materiali viene valutato attraverso lo studio dei parametri termici che influenzano le loro prestazioni. Gli studi sono stati condotti su un cilindro piccolo, utilizzando il metodo 1-D della teoria del trasferimento termico in regime stazionario, in cui è stata studiata la convezione di trasferimento di calore tra la temperatura dell'ambiente identificata come  $T_a$ : 55°C, e la temperatura del cilindro  $T_0$ : 25°C, fino a raggiungere un equilibrio con la temperatura dell'ambiente. Il risultato del test mostra un'alterazione della temperatura dell'ambiente grazie all'influenza del cilindro <sup>7</sup>.

---

7 Li, H., Harvey, J., & Jones, D. (2013). Multi-dimensional transient temperature simulation and back-calculation for thermal properties of building materials. *Building and Environment*, 59, 501–516. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.09.019>

### 3.1.4 Capacità termica

È uno dei parametri che compongono il bilancio termico dei materiali ed è inteso come la quantità di calore necessaria per innalzare la temperatura di 1°C per unità di volume del materiale, il che significa che è direttamente correlata alla sua densità. L'unità di misura è ( $\text{J/m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$ ), rappresenta la quantità di calore necessaria per cambiare la temperatura e non la fase.

Quando un materiale è caratterizzato da alti valori di capacità termica, provoca la diminuzione della temperatura massima delle superfici e, allo stesso tempo, fa aumentare la temperatura minima media. Ashie, 2008; Dahl, 2010 e oke 1988, hanno fatto una ricerca nella quale rilevano questo fattore come quello che ha la capacità di ritardare il processo di rilascio dell'energia immagazzinata nell'ambiente costruito (citato da Sharifi, E. e Lehmann, S. 2015).

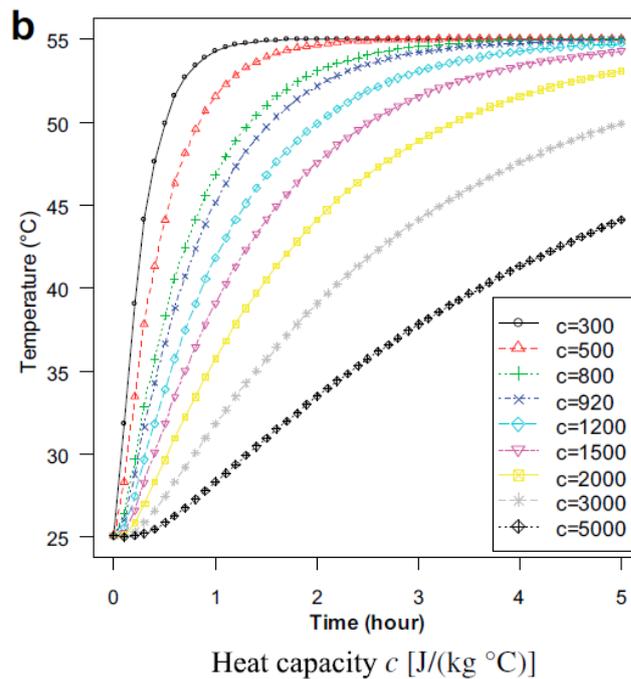
D'altra parte, Gavin, Phelan, Kaloush e Golden (2007) hanno eseguito simulazioni nella ricerca per comprendere l'impatto della capacità termica, dimostrando che quando la capacità aumenta da 1,40 a  $2,80 \times 10^6 \text{ J M}^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$ , la temperatura media massima diminuisce di circa 5K, mentre la corrispondente temperatura minima aumenta <sup>1</sup>.

È necessario prendere precauzioni contro possibili azioni di materiali, dato che situazioni quali le temperature superficiali elevate possono causare deformazioni permanenti, o comunque basse temperature possono portare alla creazione di incrinature. In questo modo, è essenziale effettuare uno studio prima della selezione finale dei materiali da utilizzare, comprendendo che la variazione di temperatura delle superfici dei materiali influisce sulle prestazioni termiche dell'ambiente costruito <sup>7</sup>.

---

1 Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island - A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 224–240. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.047>

7 Li, H., Harvey, J., & Jones, D. (2013). Multi-dimensional transient temperature simulation and back-calculation for thermal properties of building materials. *Building and Environment*, 59, 501–516. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.09.019>



**Fig. 3.5:** Sensitivity of thermal property parameters on the solution, (Heat capacity parameter).

**Fonte:** Li, H., Harvey, J., & Jones, D. (2013). Multi-dimensional transient temperature simulation and back-calculation for thermal properties of building materials. *Building and Environment*, 59, 501–516.

Nello studio menzionato precedentemente hanno inoltre effettuato una valutazione della capacità termica del materiale (**figura 3.5**), in cui è stato dimostrato che la crescita dei valori di capacità termica in un materiale porterà ad un tempo più lungo necessario per bilanciare la temperatura del materiale con la temperatura dell'ambiente.

### 3.1.5 Permeabilità

La particolarità dei materiali permeabili è che la massa del materiale include pori che non sono presenti nei materiali non permeabili, attraverso i quali l'acqua raggiunge gli strati interni. Il ruolo dei materiali permeabili è la riduzione della temperatura della superficie, aiutando ad attenuare il fenomeno dell'isola di calore. Allo stesso modo, si sottolinea che il processo della tipologia di materiale dipende dall'umidità ed è direttamente correlato all'aumento della temperatura superficiale. Gli alti livelli di umidità e la presenza di acqua mantengono bassa la temperatura superficiale dei materiali. Questa caratteristica dei materiali agisce in contesti climatici caldi e umidi, altrimenti le strutture di raccolta delle acque piovane possono portare l'acqua sulle superfici.

I materiali porosi generalmente hanno bassi livelli di albedo e alta capacità di trasferimento del calore convettivo. Questi materiali sono considerati di lunga durata, cioè, non perdono le loro qualità nel corso degli anni. È importante considerare i vantaggi di questi tipi di materiali: il miglioramento delle condizioni termiche dell'ambiente esterno; la riduzione del rischio di allagamento delle acque piovane e il miglioramento della qualità dell'acqua con la riduzione dei contaminanti presenti.

La permeabilità si riscontra soprattutto nella vegetazione, in cui il processo avviene attraverso l'evapotraspirazione, sia nei singoli impianti vegetali, che quelli abbinati con altri materiali quali lastricato vegetale, diversi tipi di cemento reticolare o tappeti erbosi. Altri materiali che possono verificarsi come porosi sono con l'asfalto, il calcestruzzo, la pavimentazione in calcestruzzo ad incastro, griglia di calcestruzzo o plastica pieno di ghiaie <sup>5</sup>.

Yamagata et. Al. 2008, Takebayashi H. e Moriyama M. 2012, attraverso una ricerca hanno concluso che la temperatura superficiale dell'erba come materiale permeabile, è molto più bassa di un gran numero di materiali studiati <sup>1</sup>.

---

1 Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island - A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 224–240. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.047>

5 Dessì, V. (2007). Progettare il comfort urbano. Soluzione per un'integrazione tra società e territorio. *Architettura sostenibile*. 280 p., ill.

Con i diversi studi considerati, si può riassumere che questa tipologia offre vantaggi:

- **Dal punto di vista ambientale**, per il contributo al fenomeno dell'isola di calore, e altri effetti dei cambiamenti climatici come l'incremento delle precipitazioni e la purificazione dell'acqua e dell'aria inquinata;
- **Dal punto di vista tecnologico**, poiché ci sono diverse soluzioni tra cui la vegetazione, essendo considerata il materiale che fornisce le migliori condizioni termiche;
- **Dal punto di vista sociale**, considerando che il materiale vegetale e le sue diverse combinazioni hanno una percezione più naturale per gli utenti e portano a degli effetti positivi per l'integrazione sociale.

### 3.2 Caratteristiche tecnologiche

Lo sviluppo sostenibile nell'ambito della architettura comprende le diverse fasi dell'architettura, partendo dai materiali, all'edificio, città territorio e pianeta.

Nell'anno 1987 è stata realizzata la "Commissione mondiale sull'ambiente e lo sviluppo", presieduta da Gro Harlem Brundtland, in cui venne introdotto il concetto di sviluppo sostenibile, denominato Rapporto Brundtland y definito come: "Lo sviluppo è sostenibile se soddisfa i bisogni delle generazioni presenti senza compromettere la possibilità per le generazioni future di soddisfare i propri".

In linee generali, il modello sostenibile cerca di stabilire un rapporto armonioso tra gli aspetti economici, sociali ed ambientali. La sua origine viene dall'ecologia, inteso come *la capacità di mantenere nel futuro biodiversità e produttività, utilizzando le risorse naturali ad un ritmo tale che esse si possano rigenerare naturalmente*. Da questo punto, sono state stabiliti dei parametri che indirizzino l'approccio tecnologico-ambientale dello sviluppo sostenibile, quali:

- l'origine dei materiali, l'energia consumata per il trasporto e la trasformazione;
- il processo costruttivo degli edifici;
- la qualità delle loro performances termiche, l'energia necessaria al buon funzionamento;
- i processi di manutenzione;
- la complessiva durata degli edifici, la flessibilità funzionale interna, l'adattabilità alle nuove tecnologie;
- l'idoneità alle tecniche di smontaggio e rimontaggio;
- le possibilità di riutilizzo e di riciclaggio.

La responsabilità che hanno le industrie in quanto alla regolarizzazione dei rilasci di emissioni è determinante per il controllo dei fenomeni di cambiamento climatico, anche quella del governo locale, il quale ha l'obbligo di stabilire i limiti massimi e le azioni che devono rispettare le località per uno sviluppo sostenibile <sup>8</sup>. Tuttavia, la rilevanza che potrebbe avere l'attuazione delle aziende non sminuisce l'importanza della società nella concezione di modelli di sviluppo sostenibile <sup>9</sup>.

---

8 Carta di Aalborg, è frutto della I Conferenza Europea sulle Città sostenibili, organizzata dal Consiglio internazionale per le iniziative ambientali locali nel 1994. Con la Carta si dà inizio alla "Campagna Europea delle Città Sostenibili" e si formalizzano i concetti di partecipazione e di "buona governance del territorio", le città europee iniziano ad elaborare l'Agenda 21 per ogni località con criteri di sviluppo durevole e sostenibile.

Nel campo dell'architettura, l'atto di costruire è equivalente al consumo di grandi quantità di risorse naturali ed elevati livelli di rilasci di emissioni all'ambiente. Nel quale vengono utilizzate circa 1/6 del prelievo delle acque meteoriche; 1/4 del raccolto globale di legname; 2/5 del flusso totale di materiali ed energia. L'impatto degli edifici nell'ambiente è sintetizzato nella riduzione della disponibilità di risorsa naturale, consumo energetico, inquinamento dell'aria ed acqua, manutenzione o sostituzione degli elementi e la generazione di rifiuti. Tale situazione conduce alla necessità di promuovere la formazione professionale che siano in grado di progettare e di compiere scelte consapevoli nell'attività edilizia riguardante al campo ambientale.

Il piano sviluppato del settore edilizio stabilisce l'adozione di uno strumento che valuta l'impatto ambientale dei processi e prodotti costruttivi, consiste nella metodologia del *Life Cycle Assessment* (LCA) che ha il compito di valutare le prestazioni ambientali dei materiali o processi in tutta la loro vita, ed anche di provvedere gli indicatori dell'Embodied Energy e l'Embodied Carbon, e, in questo modo fornire la possibilità di prendere decisioni con il minor impatto ambientale possibile. È considerato, quindi, come l'aspetto principale del LCA quello di *concepire il prodotto come un sistema concatenato di processi, costituito da input e output con cui si stima l'impatto che ha sull'ambiente.*

Gli obiettivi dell'analisi LCA si basano in:

- riduzione del consumo di risorse mediante l'impiego di materiali provenienti da processi di riciclo, con lo sviluppo di prodotti a lungo ciclo di vita oppure con lo sviluppo di prodotti a breve durata ma con alto contenuto di riciclabilità;
- riduzione delle emissioni inquinanti comprese tutte le sue fasi (produzione, riciclo, smaltimento);
- riduzione del carico ambientale degli scarti con accorgenze nelle tecnologie utilizzate (tecnologia a secco) e il miglioramento della qualità dello smaltimento.

---

9 Giordano, R., Scudo, G., Grosso, M. (2010). I prodotti per l'edilizia sostenibile. La compatibilità ambientale dei materiali nel processo edilizio. *Architettura sostenibile AS20*. 434 p.

Il nuovo profilo ambientale delle attività di costruzione richiede l'approfondimento dei concetti eco-compatibili delle fasi di un edificio, considerando il minore impatto ambientale sull'ecosistema e la maggiore efficienza energetica.

In quest'ottica, le fasi che comprendono i processi costruttivi degli edifici sono <sup>9</sup>:

- **pre produzione**, fase di estrazione delle materie prime;
- **produzione e la distribuzione**, fase di produzione fuori opera;
- **costruzione**, fase di produzione in opera, scelta del sito e cantierizzazione;
- **l'utilizzo e la manutenzione**: gestione degli impianti, pulitura o sostituzione delle parti obsolete;
- **dismissione finale**, fase di demolizione, posa in discarica, recupero, trattamento e riciclaggio.

Ogni fase del processo costruttivo è composta da inputs, concepiti come gli elementi necessari per le operazioni costruttive, quali: materiali, combustibili ed energia, e posteriormente si ottengono gli outputs, identificati come tutti i derivanti dei processi realizzati, quali: prodotto finito, calore disperso, rifiuti solidi ed emissioni liquide o gassose. Dagli input si prendono le misure della quantità di risorse impiegate nei processi, quantificando in questo modo il risparmio di un processo. Dagli output invece, si quantifica l'inquinamento ambientale, de esta manera, se puede realizar una definición de las acciones de cada fase del proceso edificatorio. Por otro lado, con la base de este tipo de evaluaciones se pueden establecer unas líneas guías como estrategia de proyección eco-compatibles en busca de minimizar los aspectos energéticos y ambientales en cada fase proyectual.

---

9 Giordano, R., Scudo, G., Grosso, M. (2010). I prodotti per l'edilizia sostenibile. La compatibilità ambientale dei materiali nel processo edilizio. *Architettura sostenibile AS20*. 434 p.

È stata sviluppata un'organizzazione europea per complementare il quadro delle norme internazionali di riferimento, la CEN (European Committee for Standardization), con l'obiettivo di elaborare dei prodotti con gli standard di alta qualità, in conformità ai requisiti di protezione ambientale, sicurezza, accessibilità ed interoperabilità, costituite da:

- **Norme ISO 14040, (1997) - Goal definition**, nella quale vengono definite le finalità dell'analisi e della valutazione, l'unità funzionale ed i confini del sistema che si intende studiare.
- **Norme ISO 14041, (1998) - Life Cycle Inventory**, con questo analisi si definisce un modello analogico al sistema reale sul quale si compie l'analisi. Si ricostruiscono i processi sequenziali che caratterizzano un sistema produttivo, individuandone gli input (energia e di materie prime) necessari.
- **Norme ISO 14042, (2000) - Life Cycle Impact Assessment**, si procede all'elaborazione dei dati relativi ai rilasci nell'ambiente e ai consumi di risorse. Devono essere classificate e normalizzate le informazioni in relazione ai potenziali effetti ambientali.
- **Norme ISO 14043, (2000) - Life Cycle Interpretation**, individuazione degli elementi critici del processo produttivo e gli eventuali cambiamenti necessari per ridurre l'impatto energetico - ambientale. Si procede alla verifica degli obiettivi stipulati.

Gli standard internazionali encargados de evaluar le prestazioni ambientali ed energetiche dei prodotti da costruzione della normativa ISO (International Standard Organization) hanno l'obiettivo di armonizzare gli strumenti di valutazione ambientale e di introdurre la metodologia LCA, integrando anche la certificazione ambientale dei prodotti quale l'EPD (Environmental Product Declaration) sono costituiti da:

- **Norme ISO 21929-1:2006 Sustainability in building construction - Sustainability indicators - Framework for the development of indicators for Buildings;**
- **Norme ISO 21930:2007 Sustainability in building construction - Environmental declaration of building products;**
- **Norme ISO 21931-1:2008 Sustainability in building construction - Framework for methods of assessment for environmental performance of construction works - part I: Buildings**



## CAPITOLO 4

### Sistemi di coperture e adattamento ai cambiamenti climatici: Tecnologia vegetale – Tecnologia fredda

#### 4.1 Sistemi di coperture per la mitigazione

Nel precedente capitolo, sono stati identificati i sistemi di coperture che hanno le migliori prestazioni ambientali e tecnologiche, i quali coincidono in grandi quantità di studi delle coperture per il trattamento del fenomeno dell'isola di calore urbana.

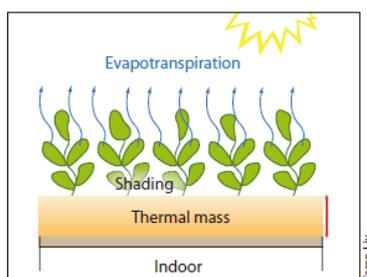
In tal senso, H. Li *et. al.* (2013), considerano che gli effetti dell'ICU ed il deflusso delle acque piovane in aree di clima caldo possono essere affrontati con l'impiego di sistemi più riflettenti e più permeabili, approfittando il fatto che la capacità riflettiva di un materiale determina la quantità di radiazione solare assorbita, evitando quindi l'innalzamento delle temperature superficiali e posteriormente il rilascio dell'energia accumulata nei momenti critici della giornata. E dall'altra parte, i sistemi vegetali hanno la capacità diminuire la temperatura superficiale e quella in prossimità delle superfici mediante il processo di evapotraspirazione, la loro permeabilità permette anche di catturare l'acqua piovana in eccesso, consentendo il controllo di drenaggio. È opportuno menzionare che nonostante il fatto le proiezioni climatiche della città di Madrid mirano ad una riduzione delle precipitazioni nel periodo estivo (le quali limitano il funzionamento del sistema) è comunque conveniente questa strategia con un apposito sistema di irrigazione, e anche per il controllo di acque piovane nei periodi invernali.

Dunque, H. Li *et. al.* 2013, sostiene che le strategie combinate di materiali riflettenti e permeabili potrebbero essere una pratica potenziale per abbassare le alte temperature e quindi mitigare gli effetti dell'isola di calore riducendo al contempo il deflusso delle acque piovane e migliorando la qualità dell'acqua, aria e biodiversità.

#### 4.1.1 Tecnologia di copertura vegetale

La tecnologia vegetale come sistema naturale ha dei benefici specifici che riguardano gli aspetti ambientale, economici e sociali. In linee generali, consiste in un sistema vegetale sulle coperture degli edifici, il quale ha un contributo rilevante nella riduzione del fenomeno dell'isola di calore urbana, ottenuto mediante il processo naturale delle piante, l'evapotraspirazione.

L'agenzia della protezione ambientale degli Stati Uniti (EPA), definisce l'evapotraspirazione (**figura 4.1**) come un insieme di due processi, quello che consiste nell'assorbimento dell'acqua (presente nello strato di coltura) dalle radici e successivamente emesso dalle loro foglie –la traspirazione- e, quello come risultato dal flusso di calore latente, il quale consiste nella conversione dell'acqua dallo stato liquido allo stato gaseoso, -l'evaporazione-. È l'insieme di questi due processi ciò che contribuisce alla riduzione della temperatura superficiale e quella dell'aria, catturando il calore presente nell'aria <sup>1</sup>.



**Fig 4.1:** Evaporazione e ombreggiamento di un tetto verde

**Fonte:** Reducing Urban Heat Islands: Green Roofs. *Heat Island Reduction Activities*

In questo modo, Dessì, V. (2007) sostiene che un processo che sottende al raffrescamento dell'aria nelle città di clima secco può essere quello evaporativo, il quale è conosciuto anche come umidificazione adiabatica;

“consiste nel far evaporare acqua nell'aria. Il raffrescamento è determinato dall'assorbimento di calore dall'aria nel cambiamento di fase dell'acqua da liquido a vapore. L'aria risulta più fresca ma anche più umida” <sup>2</sup>.

1 EPA. (2008). Reducing Urban Heat Islands: Green Roofs. *Heat Island Reduction Activities*, 1–23. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2002\)041<0792:THFIUA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2002)041<0792:THFIUA>2.0.CO;2)

2 Dessì, V. (2007). Progettare il comfort urbano. Soluzione per un'integrazione tra società e territorio. *Architettura sostenibile*. 280 p., ill.

In sintesi, il sistema vegetale riunisce un insieme di contributi, che nel caso ambientale non solo comprende il raffrescamento dell'aria, ma anche il controllo del deflusso delle acque piovane, la cattura del biossido di carbonio (CO<sub>2</sub>) congiuntamente ad altri gas ad effetto serra, ed altri inquinanti, che successivamente conducono alla miglioira del microclima urbano, e contribuiscono nell'incremento della biodiversità. Altri benefici riguardano l'isolamento acustico e termico, portando alla riduzione del consumo energetico, alla diminuzione dell'emissioni ed infine alla riduzione dei costi, e riguardo agli aspetti sociali, l'insieme dei diversi apporti favoriscono l'incremento del comfort umano e miglioira della qualità di vita.

I benefici precedentemente citati possono essere evidenziati nei diversi studi che riguardano l'influenza del sistema vegetale, è il caso di uno studio realizzato nella città statunitense di Chicago, nel quale hanno realizzato un confronto tra due superfici di coperture: sistema vegetale e sistema convenzionale, e la **figura 4.2** evidenzia le diverse temperature di ogni superficie prese in un giorno del mese di agosto intorno ai 30°C, dimostrando che la superficie vegetale oscilava dai 33-48°C e quella convenzionale nera aveva una temperatura di 76°C <sup>1</sup>.



**Fig 4.2:** Differenze di temperature tra coperture vegetale e convenzionale

**Fonte:** Reducing Urban Heat Islands: Green Roofs. *Heat Island Reduction Activities*

Un'altra capacità delle coperture vegetali è quella di controllare il deflusso delle acque piovane e diminuire la quantità d'acqua che va in discarica, dato l'assorbimento delle acque dello strato vegetale e colturale del sistema, dipende anche della profondità del substrato, della vegetazione e gli eventi di precipitazioni.

---

1 EPA. (2008). Reducing Urban Heat Islands: Green Roofs. *Heat Island Reduction Activities*, 1–23. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2002\)041<0792:THFIUA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2002)041<0792:THFIUA>2.0.CO;2)

In questo modo, particolare attenzione viene data alla capacità della cattura del CO<sub>2</sub>, altri gas ad effetto serra ed altri inquinanti, essendo una caratteristica specifica del sistema vegetale, laddove le piante possibilitano la rimozione di certi inquinanti, tra i quali il particolato atmosferico (PM), come descritto da Montacchini, E., & Tedesco, S., (2017), esistono due vie per abolire le polveri: in modo diretto laddove vengono fissate nelle foglie umide, ed in modo indiretto con le basse temperature (rispetto alle superfici convenzionali), causando moti convettivi <sup>3</sup>. Possono anche rimuovere i gas di ossido nitroso (NO<sub>x</sub>), diossido di zolfo (SO<sub>2</sub>), ossido di carbonio (CO) e l'ozono troposferico (O<sub>3</sub>) il che viene prodotto più facilmente con elevate temperature atmosferiche. L'effettività delle coperture vegetali, in quanto alla capacità che possono avere altri speci vegetali, è relativamente minore, dati i limitati spessori degli strati colturali e vegetali <sup>1</sup>. Per ultimo come aspetto ambientale, le aree verdi all'interno della massa urbana, promuovono la presenza di diverse speci vegetali ed animali in zone ricoperte di materiali impermeabili. Pertanto, i nuovi spazi verdi nei livelli superiori permette il recupero delle aree utilizzate dagli edifici, portando un habitat naturale all'interno della città.

Ricercatori rivelano che il sistema vegetale ha la capacità di modificare sensibilmente la percezione del suono dato che utilizza i suoi propri suoni quali il passaggio del vento tra le foglie e gli uccelli, con questo si intende che la vegetazione non ripara gli spazi dei suoni dal tutto, ma invece vengono dissipati funzionando da barriera dei suoni <sup>3</sup>. Nello stesso modo, il sistema vegetale viene utilizzato come isolante termico, laddove uno dei fatti più importante è che il sistema non permette che la radiazione solare incida direttamente sulla superficie della copertura, un altro fatto è anche la capacità di evapotraspirazione del materiale riduce le temperature superficiali evitando quindi il surriscaldamento della copertura.

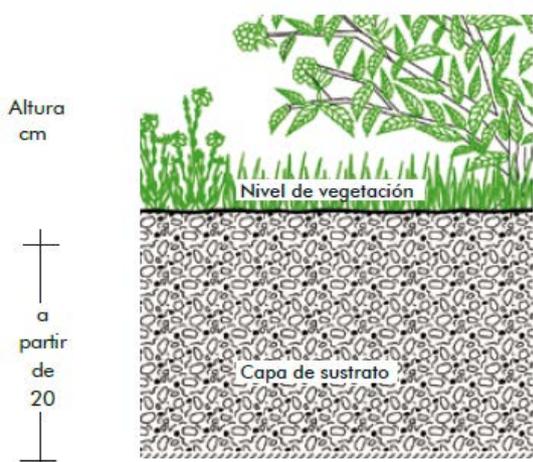
Quei tipi di benefici conducono alla riduzione del consumo energetico, dato che le proprietà termoisolanti delle coperture richiede un minore utilizzo dei climatizzatori, contribuendo anche alla riduzione dei rilasci di emissioni per la minore domanda energetica (associata alla produzione), evitando in questo senso gli elevati costi dell'energia nelle stagioni estive. In questo senso, le coperture a verde migliorano anche le condizioni termiche negli spazi sottostanti (all'interno degli edifici).

---

3 Montacchini, E., & Tedesco, S., (2017). Tetti verdi. *CittàStudi* (160 p., ill.)

Esistono due tipi di sistemi di copertura vegetale, quello intensivo e quello estensivo. La differenza tra quei due è che il sistema intensivo (**figura 4.3**) può assomigliarsi ad un giardino, data la possibilità d'uso di diverse specie vegetali (arbusti di diverse altezze), le quali però richiedono uno strato di coltura di maggiore spessore (tra i 20 e 150cm) che sia in grado di soddisfare le esigenze delle piante. Il caso del sistema intensivo richiede quindi maggiore capacità di supportare un carico dell'edificio, dato che il peso può variare da 250 – 2000 kg/m<sup>2</sup>. Questa tipologia sollecita maggiore manutenzione ed anche un sistema di irrigazione, e soprattutto, possono essere calpestabili.

La tipologia estensiva invece (**figura 4.4**), si caratterizza per la sua leggerezza, con uno strato di coltura minore rispetto a quello intensivo, il quale non eccede i 15 cm. Le specie vegetali impiegate in questo sistema richiedono la resistenza alle diverse condizioni climatiche, dato che la condizione del sistema è proprio quella di concepire un tetto verde che non richieda di manutenzione costante, ma 1-2 volte l'anno, pertanto che sia calpestabile solo per la manutenzione. Le tipologie vegetali più utilizzate è quella rustica (adatta ai bassi livelli di manutenzione), con eventuali sistema di irrigazione in base alle condizioni climatiche della stagione estiva e per la fase di attecchimento, e nel caso specifico di Madrid, la specie *sedum* è appropriata per le sue caratteristiche resistenti alla siccità. Da un'altra parte, la sua leggerezza permette il suo impiego in edifici esistenti (varia tra 70-250 kg/m<sup>2</sup>), quindi non comporta un carico adizionale al sistema strutturale, e possono essere impiegate su coperture orizzontali oppure inclinate.



**Fig 4.3:** Sistema vegetale intensivo

**Fonte:** Sistemas para cubiertas verdes intensivas Oasis verdes en espacios urbanos



**Fig 4.4:** Sistema vegetale estensivo

**Fonte:** Sistemas para cubiertas verdes extensivas Oasis verdes en espacios urbanos

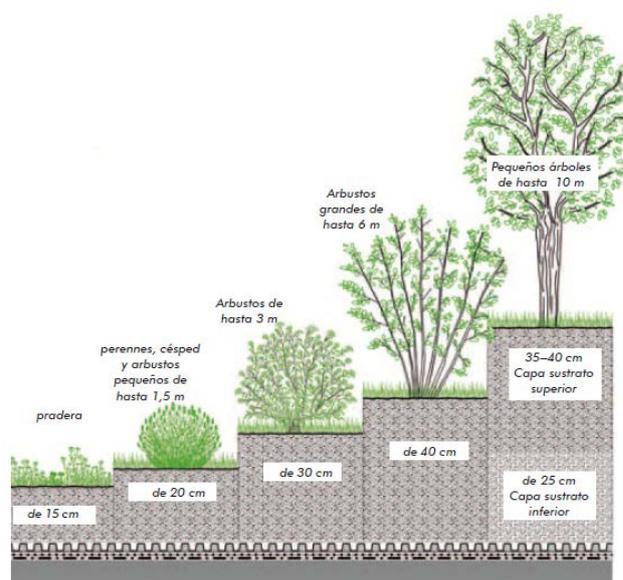
Le prestazioni della tecnologia vegetale è in base alla composizione del sistema in sè, dipende quindi dell'idratazione dello strato di coltura, il quale rende possibile il processo dell'evapotraspirazione, dipende anche della localizzazione dato che ogni località ha le sue condizioni climatiche che possono alterare alcune scelte se non vengono presi in considerazione, quale la specie vegetale, che nel particolare caso della città di Madrid devono rispondere a tipologia di clima caldo e secco, quindi la specie vegetale deve essere resistente alla siccità.

Il sistema vegetale è composto da un insieme di strati con funzioni specifiche per il suo ottimo funzionamento, tra il quali possono essere menzionati come gli elementi primari, i seguenti <sup>3</sup>;

- **l'elemento portante**, nella fase di progettazione delle coperture vegetale, è molto importante considerare il carico del sistema, tenendo presente il peso degli insieme di tutti gli strati in condizione di saturazione di acqua, ed anche i carichi di neve e vento.
- **l'elemento di tenuta**, è considerato come uno dei più importanti e delicati tra gli elementi della stratigrafia del sistema vegetale, dato che deve garantire la protezione del solaio di copertura dalla penetrazione dell'acqua, dal contatto con le radici, dalle possibili lesioni nelle fasi di manutenzione e la possa in opera degli altri strati, e delle sostanze chimiche presente nello strato colturale e vegetale.
- **l'elemento di protezione dall'azione delle radici**, ha l'obiettivo di proteggere l'elemento di tenuta dalle possibili perforazione delle radici e dei possibili agenti che siano capaci di causare dei danni. È uno strato che può presentarsi in manti di PVC, in fogli di polietilene ad alta densità, mediante la sovrapposizione di lamine metalliche o tappeti drenanti in materiali plastici.
- **l'elemento di protezione meccanica**, generalmente è presentato come geotessili, poliestirene o calcestruzzo, il cui scopo è quello di sopportare le azioni applicate, distribuendo le forze con il fine di proteggere l'elemento di tenuta.
- **l'elemento drenante**, questo elemento ha l'obiettivo di controllare le acque presenti negli strati, contribuendo nel flusso delle acque in eccesso verso lo scarico, e contemporaneamente serve per trattenere le acque per il suo posteriore utilizzo vegetazione per l'evapotraspirazione (elemento di accumulo idrico). Possono presentarsi come: materiali geosintetici, elementi preformati (generalmente plastici), oppure materiali sciolti.
- **l'elemento filtrante**, viene utilizzato per consentire il flusso delle acque presente nel substrato ed anche per evitare che lo strato colturale impedisca il flusso delle acque nel apparato di drenaggio, rappresentata con aggregati

granulari oppure geosintetici che garantiscano una permeabilità 10 volte maggiore rispetto allo strato colturale.

- **lo strato colturale**, variano in base alla tipologia di copertura, laddove l'estensiva arriva ad un massimo di 15 cm, invece quella intensiva ha uno spessore minimo di 20 cm. Vengono studiati per fornire il maggiore supporto per le piante, con la maggiore ritenzione di acqua ed anche la maggiore leggerezza in diversi scenari riguardanti alla saturazione di acqua (in base alla norma). Lo spessore varia d'accordo alle specie vegetali impiegate, le quali vanno dai 10 cm per le erbacee a piccolo sviluppo, fino a 1 m per gli alberi. La sua tipologia viene scelta anche in base alla vegetazione, il contesto climatico ed il sistema di irrigazione. Generalmente vengono utilizzate miscele di componenti organici e minerali, che siano in grado di soddisfare le esigenze delle coperture, dato che i terreni naturali non riescono a compierle.
- **lo strato vegetale**, dipende anche della tipologia di copertura, delle condizioni climatiche, del sistema di irrigazione e della struttura dell'edificio. La migliore scelta sarà in base alla corrispondenza della specie vegetale con le condizioni climatiche, dato che esse garantiscono il buon funzionamento delle piante, e innanzitutto la sopravvivenza. Gli elementi climatici sono di vitale importanza per lo sviluppo delle piante, quali la temperatura, l'umidità, le precipitazioni, il vento e la radiazione solare. Ci sono invece alcuni fattori che possono influenzare in modo negativo per alcune specie, quali le soluzioni saline e l'esposizione a inquinanti. Pertanto, devono essere studiati tutte le condizioni che conformano l'ambiente nel quale si vuole impiegare il sistema di copertura vegetale. Le specie della tipologia estensiva devono consentire il suo buon funzionamento con pochi interventi di manutenzione e di basse altezze, nell'intensivo invece, permette l'incorporazione di diverse specie vegetali che vanno regolarmente trattate ed integrano un sistema di irrigazione.



**Fig 4.5:** Rapporto spessore di substrato e specie vegetali

**Fonte:** Sistemas para cubiertas verdes intensivas Oasis verdes en espacios urbanos

Come precedentemente citato, devono essere studiati tutti i fattori e gli aspetti che in qualche modo possano alterare i sistemi di coperture sostenibili, comprendendo sia l'insieme degli strati (precedentemente menzionati), che in modo più riguroso, gli aspetti che possano condizionare lo strato colturale e quello vegetale.

Di seguito, verranno citati alcuni casi studio che hanno portato a scegliere la tecnologia di copertura vegetale, i quali sono localizzati in contesti climatici simili a quelli della città di Madrid, che comprendono valutazioni dei contributi ambientali, tecnologici ed all'edificio.

Un'analisi realizzata sulle prestazioni di diversi materiali di coperture nel contesto spagnolo è stato basato sui principi degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG), dai quali sono stati identificati gli indicatori di sostenibilità riguardanti all'ambiente (l'albedo, cattura di carbonio), l'energia (energia solare, isolamento termico e sonoro), l'acqua (capacità di deflusso, depurazione dell'acqua) ed efficienza delle risorse (materiali riciclati, life cycle cost, embodied carbón, embodied energy). Una volta definiti, si è processo alla selezione della tipologie di coperture che raccolgano gli indicatori precedentemente menzionati <sup>4</sup>.

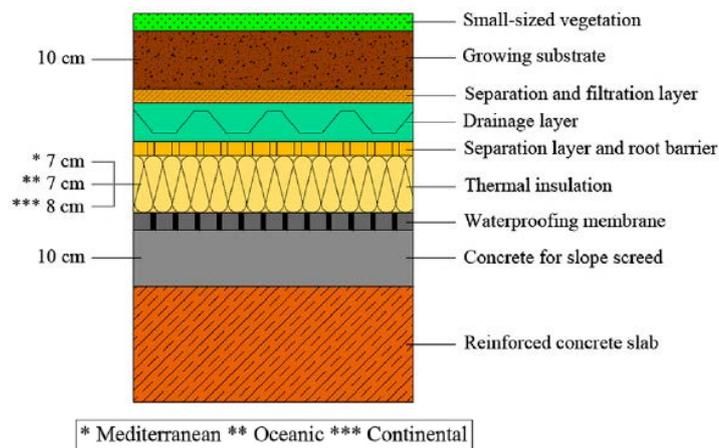
La finalità della ricerca è stata realizzare uno studio prestazionale delle coperture tramite una metodologia ad-hoc per la qualificazione delle variabili le quali caratterizzano i sistemi. La città di Madrid è stata considerata per la rappresentazione dei climi continentali nella Spagna.

Tra i sistemi che riuniscono gli indicatori proposti dai SDG c'è la tecnologia vegetale, quindi è stata valutata una copertura in grado di adattarsi al clima continentale ed anche agli altri due tipici spagnoli (Mediterraneo e Oceanico).

Il sistema selezionato (**fig. 4.6**) è composto da uno strato vegetale con la pianta *Sedum* (la quale si adatta ai diversi scenari climatici) per le sue capacità di resistenza alla scarsità d'acqua, la radiazione solare e alle alte temperatura. Inoltre, il substrato integra aggregati riciclati e materiali inerti con uno spessore definito di 10cm, per consentire la crescita delle radici. Di seguito si posiziona uno strato di separazione con la finalità anche di filtrare di geotessile di 300g/m<sup>2</sup>, successivamente uno strato drenante di Polietilene ad alta densità (HDPE) il quale pesa 1.75 kg/m<sup>2</sup>. Per ultimo, una membrana resistente all'intemperie in polietilene con uno spessore di 0,5mm e peso di 0,475 kg/m<sup>2</sup> che impedisce le perforazioni dalle radici. (Guzmán-Sánchez, Jato-Espino, Lombillo, & Diaz-Sarachaga, 2018)

---

4 Guzmán-Sánchez, S., Jato-Espino, D., Lombillo, I., & Diaz-Sarachaga, J. M. (2018). Assessment of the contributions of different flat roof types to achieving sustainable development. *Building and Environment*, 141(April), 182–192. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.063>



**Fig. 4.6:** Sezione di sistema copertura vegetale

Le prestazioni ambientali della copertura sono ottenute dai valori della cattura di carbonio con un valore di 375 g C/m<sup>2</sup> (in base alla tipologia vegetale), questo indicatore è considerato esclusivo del sistema vegetale dato che forma parte del processo naturale della vegetazione.

Un altro punto è stata l'energia, la quale considera la capacità di produzione di energia solare (pannelli fotovoltaici), prendendo il primo posto dovuto al miglioramento della capacità delle cellule fotovoltaiche, le quali allo stesso tempo sono influenzate dal clima che oscilla tra 0,08 a 8,3%. L'isolamento termico segue la normativa dei parametri, e particolarmente il manto erboso ha la capacità di contribuire a isolare termicamente gli spazi interni. Da un altro lato, l'isolamento acustico è determinato dalla densità di 1 m<sup>2</sup>, presentando la maggiore capacità rispetto agli altri sistemi (membrana impermeabilizzante in PVC, finitura in ghiaia e copertura di piastrelle galleggianti).

La gestione efficiente dell'acqua, specificamente la capacità di deflusso, è un parametro che si trova esclusivamente sulle coperture verdi, dovuto al suo potenziale d'accumulo e assorbimento che permette una riduzione significativa di scorrimento delle acque piovane. La capacità di deflusso stabilita per il clima continentale è del 45%, ed è soggetta agli elementi del clima, quali l'umidità, intensità e durata delle precipitazioni. La depurazione dell'acqua, invece, consente che il valore più alto dimostra la più alta qualità dell'acqua, punteggio che è stato attribuito alle coperture con finitura di ghiaia con 0,681. Contrariamente alle coperture verdi, con il punteggio più basso di 0,294.

L'efficienza delle risorse si deve a diversi fattori, tra i quali risalta il contenuto dei materiali riciclati, in cui il substrato è composto da materiali 100% riciclati, derivati da aggregati riciclati e terreno inerte. Ci sono anche due fattori di emissioni legati alla tipologia di materiali utilizzati, come l'embodied energy e l'embodied carbon, i quali sono stati calcolati in base al volume totale della copertura mediante i dati stabiliti dall'Inventory of Carbon & Energy (ICE). I risultati ottenuti figurano al terzo posto con l'embodied energy di 3,26 kg CO<sub>2</sub> eq./m<sup>2</sup> e l'embodied carbon di 441,25 MJ/m<sup>2</sup>, rispetto agli altri sistemi di copertura (membrana impermeabilizzante in PVC 34,64 kg CO<sub>2</sub> eq./m<sup>2</sup> – 393,91 MJ/m<sup>2</sup> e finitura in ghiaia 35,75 kg CO<sub>2</sub> eq./m<sup>2</sup> – 426.99 MJ/m<sup>2</sup>). Inoltre, l'analisi del life cycle cost prevede i costi di costruzione, manutenzione e demolizione, nel quale la vegetazione si colloca al primo posto con un valore di 5,487 €/m<sup>2</sup>, con durata di vita di 50 anni.

Ratings of the roof types across the refined indicators.

		Units	Green
<i>I</i> <sub>1</sub>	Albedo coefficient	Dimensionless	0.275
	Solar power	%	4
<i>I</i> <sub>3</sub>	Carbon sequestration	g C/m <sup>2</sup>	375
<i>I</i> <sub>4</sub>	Embodied carbon	kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup>	39.86
<i>I</i> <sub>5</sub>	Embodied energy	MJ/m <sup>2</sup>	441.25
<i>I</i> <sub>6</sub>	Runoff attenuation	%	45
<i>I</i> <sub>7</sub>	Water purification	Score	0.294
<i>I</i> <sub>8</sub>	Relative humidity control	mm/day	2.5
<i>I</i> <sub>9</sub>	Biodiversity and agricultural productivity	Yes/No	1
<i>I</i> <sub>10</sub>	Recycled materials	%	87.76
<i>I</i> <sub>11</sub>	Thermal insulation	cm	6.77
<i>I</i> <sub>12</sub>	Noise control	t/m <sup>3</sup>	1.423
<i>I</i> <sub>13</sub>	Life cycle cost	€/m <sup>2</sup>	5.487

**Tabella 4.1:** Valori di sistema di copertura vegetale

**Fonte:** Rielaborazione di Assessment of the contribution of different flat roof types to achieving sustainable development

Nella tabella precedente (**tab. 4.1**) vengono riassunti tutti gli indici valutati per la comprensione della prestazione del sistema vegetale, il quale si colloca al primo posto tra gli altri sistemi valutati dovuto ai migliori risultati in ambito ambientale, energetico ed economico.

Las alteraciones de los elementos del clima en las últimas décadas han tenido repercusiones en el comportamiento de los materiales de construcción, donde la intensificación de olas de calor incrementa el fenómeno de isla de calor urbana. Dicho efecto atribuye a la disminución de la velocidad del viento y de l'umidità de las superficies. Se ha desarrollado entonces, un estudio para comprender el efecto de diferentes escenarios de irrigación en las cubiertas vegetales de tipo extensivo para la mitigación del exceso de calor.

En líneas generales, la irrigación, al mantener humectada la cubierta vegetal contribuye al aumento de evapotranspiración, por lo que contribuye en gran medida a la reducción de la temperatura atmosférica, y a su vez, contribuye alla riduzione del potenziale di ritenzione delle acque piovane <sup>5</sup>. El estudio de los sistemas de cubierta reveló que aquellas que carecen de irrigación y se ubiquen en regiones bajo condiciones climáticas secas, presentan altos flujos de calore sensibile e latente. Tal es el caso de la ciudad de Madrid, caracterizada por periodos de verano de elevada radiación solar y bajos niveles de precipitación, y cuenta con una proyección para el periodo de verano del 2050 con una reducción en las precipitaciones entre un 20,5 – 21.5 %.

La comprensión del rendimiento de las cubiertas bajo los diferentes escenarios de irrigación requiere de los balances energéticos e hidrográficos, sono stati misurati dalla stazione di eddy covariance. Fueron definidos los conceptos hidrológicos utilizados en el modelo de evaluación, los cuales se dividen en dos capas principales: lo strato superiore e lo strato delle radici. È stato definito che,

“l'evaporazione dalla superficie del suolo dipende dal contenuto d'acqua volumetrica ( $\theta$ ) dello strato superiore ( $\theta_{top}$ ) e la traspirazione dipende da  $\theta$  dello strato delle radici ( $\theta_{root}$ ). L'umidità del suolo può variare tra il contenuto d'acqua residua ( $\theta_r$ ) e la capacità massima di ritenzione idrica ( $\theta_{max}$ ). Quando  $\theta$  supera  $\theta_{max}$  in un determinato tempo, la differenza tra  $\theta$  e  $\theta_{max}$  si definisce deflusso.” (Heusinger, Sailor, & Weber, 2018)

---

5 Heusinger, J., Sailor, D. J., & Weber, S. (2018). Modeling the reduction of urban excess heat by green roofs with respect to different irrigation scenarios. *Building and Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.01.003>

L'edificio sopra il quale si sviluppa la valutazione è localizzato all'aeroporto Brandenburg di Berlino (BER), specificamente sulla copertura di un parcheggio di 8600 m<sup>2</sup>, dove sono stati presi i dati di una copertura vegetale estensiva senza irrigazione.

Nella fase di valutazione, sono stati modellati i sistemi di copertura vegetale originale e quello modificato nel software EnergyPlus <sup>6</sup>, con il fine di ottenere i valori che successivamente saranno paragonati con quelli degli altri sistemi. La evaluación del software fue programada para el periodo de verano (Julio-Agosto 2015), en vista de que tiene mayor importancia reducir este efecto de calentamiento en los periodos considerados como los más calientes. El objetivo es evitar que se sobre pase el límite de calentamiento definido como la temperatura dell'aria percentile 95°, a partir de la media de un año meteorológico basado en IWEC/TMY3. Cuando la temperatura del aire excedió este umbral, el día completo se definió como un día caluroso en nuestro análisis. Los datos de precipitación fueron calculados por el ERA-Interim y posteriormente, para tener mayor precisión fueron comparados con el valor medio de 30 años basados en las mediciones gauge.

I risultati dei modelli hanno confermato che il sistema modificato ha presentato un valore di albedo medio giornaliero di 0,18, quello dei fogli è stato 0,24, e 0,14 quello del substrato. La capacità massima di ritenzione idrica è stata misurata dopo un evento di pioggia intensa, stimando un valore di 0,3. Le altre modellazioni da paragonare con il sistema vegetale sono state fatte sullo stesso edificio, si è stimato un valore di albedo di 0,65 per la copertura bianca di nuova costruzione, 0,35 nella copertura bianca di due anni, ed il valore più basso è stato quello della copertura nera con albedo di 0,1.

È stato possibile fare un confronto nel quale il sistema vegetale modificato presenta migliori risposte rispetto all'originale, riguardo al calore sensibile, calore latente, ritenzione d'acqua e valori di temperatura superficiale (valori medi di temperatura superficiale dell'erba e del substrato). Da questo punto, si procede alle valutazioni degli scenari di irrigazione sul sistema di copertura modificato.

---

6 EnergyPlus is frequently used to model and simulate building energy consumption. It has the capability to accurately model the energy flow between a building and its environment.

Negli scenari d'irrigazione a valutare sono stati confrontati il sistema d'irrigazione sostenibile (SUI) con le superfici senza restrizioni (URI) e quelle non irrigate. Il sistema sostenibile è concepito come la raccolta di deflusso e di stoccaggio in un serbatoio, con il fine di proporzionare una soluzione che non dipenda dai servizi della città. La quantità di irrigazione in ogni scenario è in base alla quantità di acqua depositata nel serbatoio d'accumulo. Ciò significa che nei casi di SUI, dipende unicamente delle precipitazioni, contrariamente a URI, dove l'acqua del serbatoio è sempre messa al massimo livello.

In entrambi gli scenari l'irrigazione inizia quando  $\theta < 0,05 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ , e, la quantità di irrigazione viene ridimensionata dall'acqua disponibile nel serbatoio, al contrario del caso estivo nel quale viene incrementato il livello di irrigazione per permettere lo svolgimento del processo di evapotraspirazione durante tutto il periodo. La medida del serbatoio es obtenida en base al nivel máximo de agua recolectada en el segundo año de prueba.

En el estudio se establece que la diferencia entre la cantidad de irrigación de cada escenario (sistema sostenible y senza restrizioni) varia en base a las condiciones climáticas de las ciudades, entre ellas, la Ciudad de Madrid se presenta en el estudio como uno de los casos de climas secos en el periodo de verano, en la cual se ven afectados los sistemas vegetales en el periodo de verano, en vista de que sus índices nulos de precipitación llevan a la reducción de los procesos de evaporación y por ende, la sequía de las plantas. Debido a esto, los escenarios de no irrigación o irrigación sostenible no son adaptables para el clima continental de Madrid, estableciendo que, cuando no hay agua, no hay flujo de calor latente, lo que conlleva al aumento de calor sensible.

Por otro lado, una opción que podría ser viable es el escenario URI (el cual reduce el flujo de calor sensible de 48 al 75% comparado con la cubierta negra), similari alle coperture bianche di albedo di 0,65. Sin embargo, Van Mechelen, Dutoit, & Hermy (2015) sostengono che "l'irrigazione dei tetti verdi è spesso considerata una pratica insostenibile, principalmente a causa dell'installazione e del costo dell'acqua, ma anche a causa della competizione con altri fabbisogni idrici, ad es. per l'agricoltura o il consumo".

La reducción del flujo de calor sensible en los lugares de verano seco se reduce únicamente del 3 al 38%. En ciudades como New York, con mayores cantidades de precipitaciones, l'impiego dello scenerio SUI dimostrerebbe l'effettività del sistema, il quale verrà irrigato dall'acqua raccolta dal deflusso y podría contribuir en gran medida a la mitigación de la isla de calor.

La proporción de bowen ( $\beta$ ) establece la relación del flujo de calor latente y de calor sensible, es decir, controla la partición de la energía durante los períodos calientes por la que demuestra el rendimiento de los escenarios de irrigación. La media de la relación es  $> 1$  en los escenarios de irrigación. En la siguiente tabla aparecen los valores establecidos de la relación Bowen, evidenciando el caso de Madrid con una proporción de 51,3 en el escenario sin irrigación, 7,2 con irrigación sostenible y 0,4 con irrigación ilimitada.

Esto demuestra la importancia de la disponibilidad de agua en las cubiertas vegetales, donde el escenario sin irrigación presenta una relación de 5,2 de altos flujos de calor latente y calor sensible en el periodo de verano, el valor de 7,2 del escenario sostenible corresponde a las bajas precipitaciones, evitando así la acumulación de agua en el serbatoio. Contrariamente, el caso de irrigación ilimitada presenta una proporción de 0,4, la diferencia se debe a la dependencia de los servicios de agua de la ciudad los cuales no se consideran como una medida sostenible por la necesidad de abastecimiento de agua.

Mean daytime (10–16 local time) Bowen ratio (1) for the unirrigated, SUI and URI scenarios.

	Unirrigated	SUI	URI
Beijing, China	1.8	0.7	0.5
Berlin, Germany	3.7	1.3	0.6
Cairo, Egypt	371.1	371.1	0.4
London, UK	2.2	0.8	0.8
Madrid, Spain	51.3	7.2	0.4
MexicoCity, Mexico	2.0	1.0	0.5
New York City, USA	3.5	0.6	0.5

**Tabella 4.2:** Rapporto medio di Bowen diurna nei differenti scenari di irrigazione

**Fonte:** Modeling the reduction of urban excess heat by green roofs with respect to different irrigation scenarios.

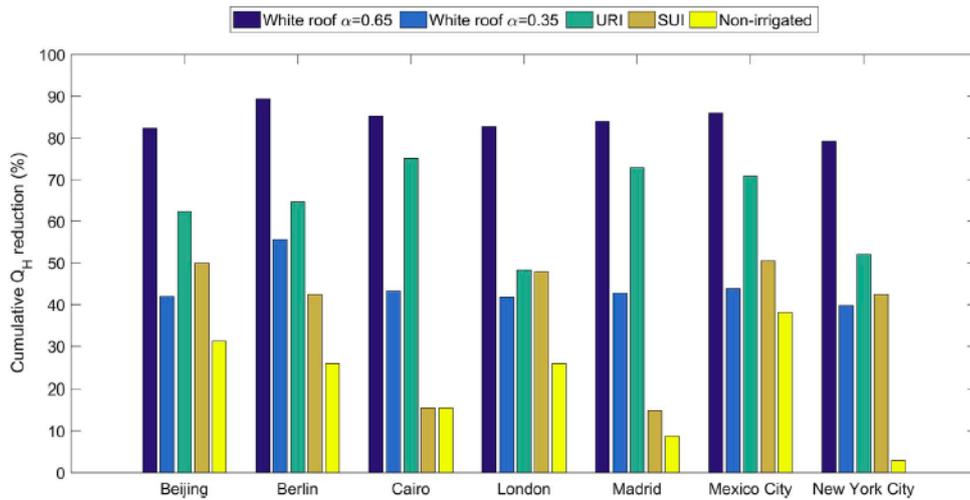
Es necesario notar los índices de los escenarios en diferentes ciudades (**tab. 4.2**) para comprender su relación, en el caso de Beijing por ejemplo, con altos niveles de precipitación en los periodos de verano presenta una relación de flujos de calor de 1.8, demostrando así, una considerable reducción del calor urbana. En el lado opuesto, la ciudad del Cairo con alarmantes niveles de radiación y sequía, obtiene un valor de 371.1 en el escenario sin irrigación. En el estudio fue reportado un análisis por Coutts et al., en el que hizo una medición en periodos secos en los que cubiertas antes de ser irrigadas presentaban  $\beta > 4$ , pero una vez que fueron irrigadas la relación bajo a  $\beta < 1$ .

Se puede deducir que, las cubiertas vegetales con los escenarios de irrigación apropiados según su condición climática, contribuyen en gran manera a la reducción del calor urbana. Para la aplicación indicada de cada sistema es necesario contar con los datos específicos, sea de precipitaciones, para tener mayor precisión de los resultados esperados y las dimensiones de los componentes del sistema (serbatoio), como de las propiedades de las hojas y del substrato, con el fin de obtener un buen funcionamiento.

En el caso de la cubierta vegetal modificada, utilizando la especie vegetativa de *Sedum*, se obtuvieron los valores de emisividad de la hoja de 0,96, y del substrato de  $0,96 \pm 0,02$ . Obteniendo un valor del sistema total de  $\epsilon = 0,99$ . Este tipo de cubierta se considera como un caso di buona pratica di coperture vegetale estensive da applicare su tetti piani con una pendenza del 2% (stabilita per il verde estensivo). Van Mechelen et. al. (2015) riporta che il tetto verde richiede un regime di irrigazione giornaliero massimo di 1,4 mm per *Sedum* e muschi e 3,5 mm per l'erbe.

Entre las consideraciones planteadas para el empleo de los escenarios de irrigación, se propuso que se tomara en cuenta los datos horarios de la lluvia, y que se implementaran sensores para tener pronósticos meteorológicos y el sistema se pueda activar en periodos calientes y secos.

Nelle città caratterizzate da estate caldi e secchi quale Madrid, lo studio considera l'uso di coperture con i sistemi di cool roof come la scelta piu opportuna, il fatto della scarsità d'acqua, fa sì che lo scenario di irrigazione disponibile sia quello senza restrizioni, il quale è considerato come non sostenibile. Tuttavia, Coutts, M., Tapper, J., Beringer, J., Loughnan, M., & Demuzere, M. (2012), ritengono che ci deve essere una selezione appropriata della vegetazione con un mix eterogeneo di forme di vita tra cui succulente, geofiti, muschi, specie annuali e erbe resistenti alla siccità, la quale potrebbe considerarsi come una via in base alle condizioni climatiche e delle piante scelte.



**Fig. 4.7:** Retención de calor sensible de los escenarios de irrigación y cobertura blanca normalizado por la retención de calor sensible del escenario del techo negro para cada localidad durante los períodos cálidos.

**Fonte:** Modeling the reduction of urban excess heat by green roofs with respect to different irrigation scenarios

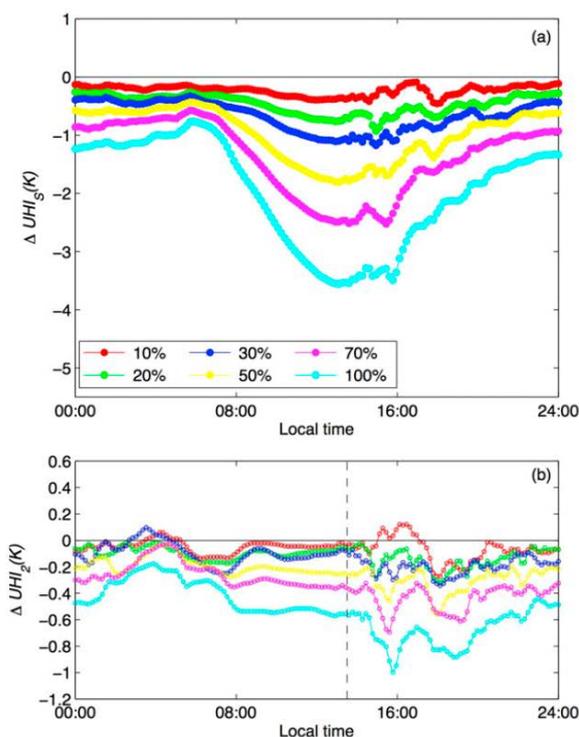
En la figura precedente (**figura 4.7**) se muestran la capacidad de retención de calor sensible que tiene cada tecnología de cubierta evaluada en las diferentes ciudades, donde las condiciones del período de verano van desde altas precipitaciones como Beijing, hasta calurosas y secas como el Cairo.

Las cubiertas vegetales no solo ofrecen menores balances energéticos, también proporciona mejor calidad de aire, biodiversidad, retención del defluso e mejora el microclima. Con la evaluación realizada de los sistemas de cubiertas mediante el software EnergyPlus se pudieron comparar los resultados de la cubierta original y la modificada, y a su vez, los diferentes escenarios de irrigación con la finalidad de mitigar el efecto de isla de calor. Es un hecho que el comportamiento de los sistemas está condicionado al clima del lugar, el escenario de irrigación y la disponibilidad de agua, llevando así a diferentes respuestas de los escenarios de irrigación en cada localidad evaluada, resumiendo que, el escenario de irrigación sin restricción puede disminuir la capacidad retentiva de calor sensible entre 48-75% comparada con la cubierta negra. Por otro lado, el escenario de irrigación sostenible está condicionado a los lugares de ciertos niveles de precipitación para su buen funcionamiento, y es capaz de reducir la capacidad de calor sensible entre 42-51%. Por último, las zonas de clima seco al no poder utilizar el escenario sostenible por los escasos niveles de precipitación, es recomendable aplicar cubiertas blancas que tienen altos niveles de reflectividad de radiación solar.

Si è sviluppata un'analisi nella città di Baltimore, Stati Uniti per valutare l'efficienza dei sistemi negli eventi di ondata di caldo, specificamente un evento avvenuto i giorni 7-10 giugno 2008 <sup>7</sup>.

Nella **figura 4.8** è stata confrontata l'efficienza del sistema considerando diversi scenari di intervento, quali il 10-30,50,70,100% delle coperture con sistemi vegetali. Mediante la valutazione è stato evidenziato in tutti gli scenari che il periodo diurno ha minore temperatura superficiale ed in prossimità della superficie. È anche dimostrato che a maggiore intervento di coperture, maggiore sarà la riduzione delle temperature, laddove lo scenario del 100% diminuisce le temperature superficiale di circa 4°C nei periodi diurni, invece, in quelli notturni di circa 1°C. La differenza fa riferimento ai momenti in cui è realizzata l'evapotraspirazione (periodo diurno), nonostante non ci sia più la sorgente energetica, il sistema contribuisce alla riduzione delle temperature nel periodo notturno.

Questa base permette di avere un riferimento della capacità di riduzione delle temperature del sistema vegetale, il quale presenta variazioni in base alle condizioni climatiche della zona, la configurazione urbana, e al contenuto di acqua nello strato di coltura.



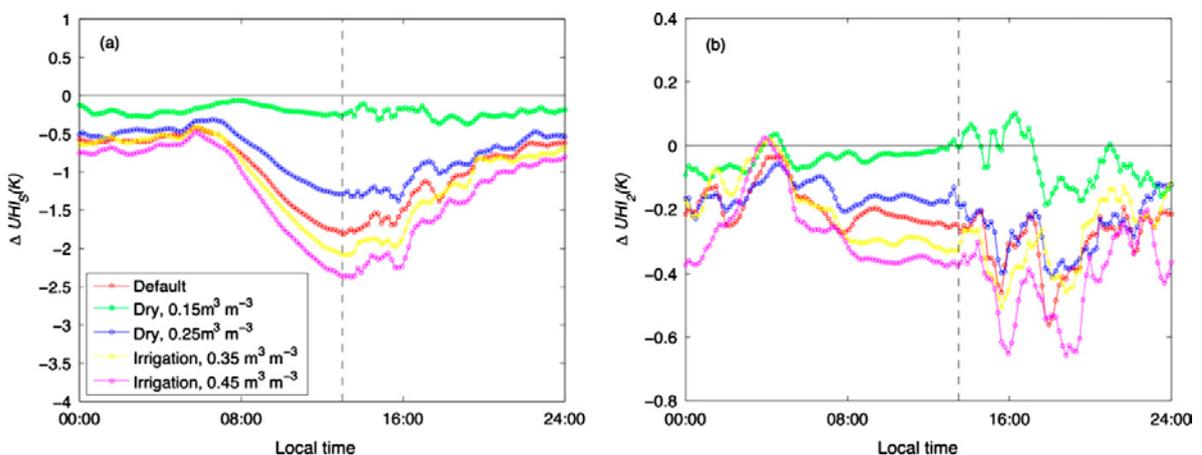
**Fig 4.8:** Contribuzioni delle coperture vegetali nell'ICU superficiale (a), e l'ICU in prossimità della superficie (b), nelle diverse frazioni di intervento.

**Fonte:** Rielaborazione The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies.

7 Li, D., Bou-Zeid, E., & Oppenheimer, M. (2014). The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies. *Environmental Research Letters*, 9(5). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/5/055002>

La seguente analisi ha valutato le prestazioni della copertura sotto diversi scenari di idratazione, con una frazione di intervento del 50% delle coperture nella città. Gli scenari che sono stati proposti hanno delle differenze di contenuto d'acqua nel substrato, da  $0.15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (come contenuto minimo per mantenere le piante vive sotto condizioni di clima secco e caldo),  $0.25$ ,  $0.35$  e  $0.45 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . La valutazione è stata realizzata mediante le riduzioni nella temperatura superficiale e la temperatura in prossimità della superficie, laddove è stato evidenziato che negli scenari minori ( $0.15 - 0.25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) la temperatura superficiale incrementa di  $1.56$  e  $0.53^\circ\text{C}$ , e quella in prossimità alla superficie di  $0.26$  e  $0.08^\circ\text{C}$ . Dall'altra parte, negli scenari di  $0.35$  e  $0.45 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  la massima riduzione della temperatura superficiale è di  $0.27$  e  $0.55^\circ\text{C}$ , e quella in prossimità della superficie è di  $0.03$  e  $0.10^\circ\text{C}$ . Vale a dire che le riduzioni possono incrementare a misura che sia maggiore l'intervento di coperture vegetale nella città <sup>7</sup>.

Per tanto, si osserva che il contenuto di acqua nello strato di coltura ha un ruolo rilevante per lo svolgimento del processo di evapotraspirazione, specificamente nei climi secchi.



**Fig 4.9:** Valutazione dei scenari di idratazione con una frazione di 50% delle coperture vegetali.

Riduzione temperature superficial (a), ed in prossimità della superficie (b).

**Fonte:** Rielaborazione The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies

		Changes in the surface urban heat island	Changes in the near-surface urban heat island
Green roof soil moisture ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ )	0.15	1.56	0.26
	0.25	0.53	0.08
	0.35	-0.27	-0.03
	0.45	-0.55	-0.10

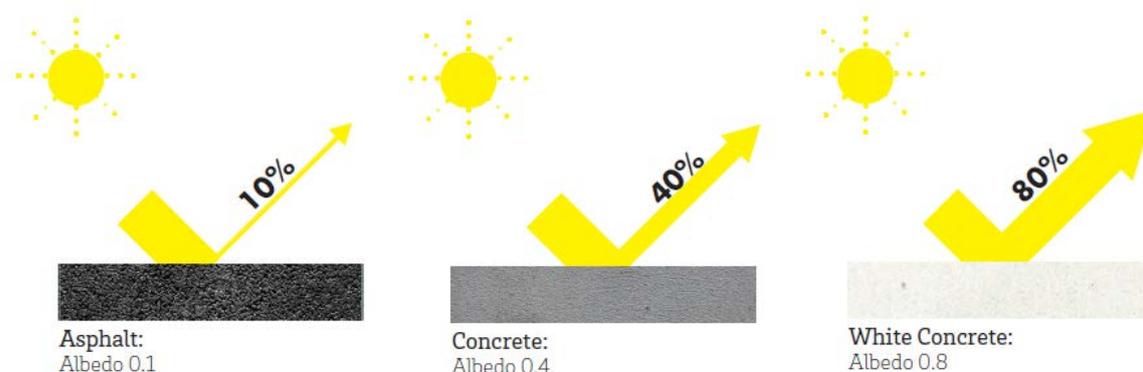
**Tabella 4.3:** Benefici e penalizzazioni dei scenari di idratazione del sistema vegetale.

7 Li, D., Bou-Zeid, E., & Oppenheimer, M. (2014). The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies. *Environmental Research Letters*, 9(5). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/5/055002>

#### 4.1.2 Tecnologia di copertura fredda

La tecnologia di copertura fredda consiste nell'utilizzo di materiali altamente riflettenti ed emissivi (caratterizzati di superfici bianca o colorata con elevate proprietà radiative), i quali limitano l'assorbimento dell'energia solare nelle coperture, migliorando il microclima in aree urbane. I materiali possono presentarsi in due modi <sup>8</sup>; i materiali liquidi (vernice bianca, elastomero, poliuretano e rivestimenti acrilici), oppure prodotti (cloruro di polivinile, polietilene clorurato, polietilene clorosolfonato e poliolefina termoplastica).

La sua efficienza alla riduzione del fenomeno dell'ICU è molto significativa, dato che le sue proprietà radiative (albedo ed emissività) riflettono la radiazione solare incidente sulla superficie e di conseguenza riducono le temperature superficiali durante il periodo diurno ed il periodo notturno, che portano alla diminuzione del flusso di calore sensibile. Pertanto le prestazioni della tecnologia è direttamente correlata al livello di riflettività o albedo dei materiali, nella **figura 4.10** si rappresenta graficamente che i valori di albedo più alti corrispondono ai materiali con tonalità di superficie più chiara, riflettendo quindi la stessa quantità del valore di albedo che presenta rispetto all'energia solare incidente<sup>9</sup>.



**Fig. 4.10:** Valori tipici dei materiali

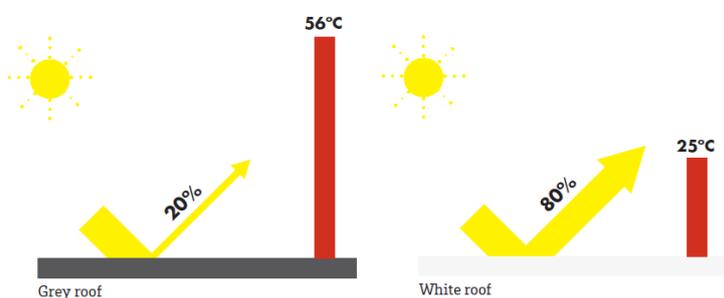
**Fonte:** Whiter than White

- 
- 8 Roman, K. K., O'Brien, T., Alvey, J. B., & Woo, O. J. (2016). Simulating the effects of cool roof and PCM (phase change materials) based roof to mitigate UHI (urban heat island) in prominent US cities. *Energy*, 96, 103–117. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.11.082>
- 9 Wright, J. (1989). Whiter than White. *Physiotherapy (United Kingdom)*, 75(6), 324. [https://doi.org/10.1016/S0031-9406\(10\)62549-7](https://doi.org/10.1016/S0031-9406(10)62549-7)

Diversi studi hanno dimostrato i contributi della tecnologia, per esempio, Susca, T., (2011), ha citato diverse dichiarazioni: riduzione della temperatura, riduzione del consumo energetico che portano alla miglora della qualità dell'aria con la diminuzione dei rilasci di emissioni, e di conseguenza il risparmio economico (Oleson *et al.*, 2010, Taha, 2008, Akbari *et al.*, 2006, Gaffin *et. al.*, 2010) <sup>10</sup>, riducendo anche i cambiamenti climatici e migliorando il comfort interno degli edifici per le sue proprietà che non permettono l'aumento di temperature delle superfici <sup>11</sup>.

Pertanto, riguardo alla riduzione della temperatura si può visualizzare con un altro studio ha comprobato che le coperture fredde di albedo 0,85 risultano con minori flussi di calore sensibile rispetto alle coperture di sistemi convenzionali e vegetali, presentando ridotte temperature superficiali ed in prossimità della superficie, anche nei momenti di temperature massime, con tendenza però a temperature un pò elevate in prossimità delle superfici.

Per esempio, Wright, J. (1989) <sup>9</sup> ha identificato che in una giornata tipica del periodo estivo (con valori di temperatura dell' ASTM Standard E1980-11), i materiali con albedo di 0,8 tendono ad avere 31°C in meno rispetto ai materiali con valori di albedo 0,2 (figura 4.11).



**Fig. 4.11:** Azione del valore di albedo

**Fonte:** Whiter than White

9 Wright, J. (1989). Whiter than White. *Physiotherapy (United Kingdom)*, 75(6), 324. [https://doi.org/10.1016/S0031-9406\(10\)62549-7](https://doi.org/10.1016/S0031-9406(10)62549-7)

10 Susca, T. (2012). Enhancement of life cycle assessment (LCA) methodology to include the effect of surface albedo on climate change: Comparing black and white roofs. *Environmental Pollution*, 163, 48–54. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.12.019>

11 [www.heatisland.lbl.gov](http://www.heatisland.lbl.gov)

La differenza quindi tra le temperature dei materiali freddi possono essere da 28-33°C in meno rispetto a quelli convenzionali, come rappresentato nella **figura 4.12** a Arizona, Stati Uniti, che dimostra che il materiale della copertura convenzionale di bitumen puo arrivare agli 80°C <sup>12</sup>.



**Fig. 4.12** Temperatura di coperture convenzionali

**Fonte:** Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies.

Da un'altra parte, i materiali neri si caratterizzano per bassi valori di riflettività ma alti valori di emissività, i quali possono raggiungere ai 74-85°C, invece i materiali freddi possono avere temperature massime di 43-46°C in periodo estivo (la quale può variare in base alle condizioni climatiche), limitandosi ai 6-11°C di temperatura superficiale più elevata rispetto a quell'atmosfera.

I benefici quindi dei materiali riflettivi, come detto prima, contribuiscono alla riduzione di consumo energetico dato che diminuisce il trasferimento di calore all'edificio sottostante, portando a limitare l'utilizzo dei climatizzatori anche nei periodi più critici della giornata di temperature massime, fornendo una serie di miglioramenti come l'accorciamento del rilascio delle emissioni gassose e di inquinanti (NOx, GHG) che abbassano la generazione di smog (formato da una reazione chimica complessa tra VOC e NOx), le quali avvengono nei periodi più caldi di alta radiazione solare e temperature <sup>13</sup>. Un altro beneficio relazionato al basso consumo energetico è il consentimento di recupero veloce degli investimenti, ed anche il benessere e la salute umana per la riduzione delle temperature all'interno dell'edificio.

---

12 Epa, U. S. (2008). Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. *Heat Island Reduction Activities*, 1–23. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2002\)041<0792:THFIUA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2002)041<0792:THFIUA>2.0.CO;2).

13 [www.nationalcoatings.com](http://www.nationalcoatings.com)

Tra i tipi di tecnologia fredda, i prodotti del sistema freddo vengono applicati quando le coperture richiedono interventi di manutenzione, i quali devono essere incollati, saldati a caldo, oppure fissati meccanicamente con le giunture sigillate con nastratura. Da un'altra parte, i materiali liquidi anche chiamati *cool coating*, sono trattamenti superficiali con ottime condizioni per l'impiego su tetti piani applicabili sulle superfici che necessitano livelli moderati di manutenzione e, come spesso dall'agenzia di protezione ambientale statunitense, i rivestimenti freddi possono essere elastomerici e cementizi, con una consistenza spessa la quale contiene additivi per la migliore della loro adesione, durata, resistenza alla sporcizia con la capacità di autolavaggio negli eventi di precipitazioni, ed anche contribuiscono all'abolizione delle alghe e crescita di funghi. La differenza dei livelli prestazionali tra i rivestimenti liquidi è che uno contiene particelle cementizie rendendolo permeabile, i più diffusi materiali elastomerici invece, hanno dei polimeri i quali riducono la debolezza ed incrementano l'adesione risultando impermeabili <sup>12</sup>.

Entrambe le tipologie (prodotto e liquido) possono essere applicate direttamente sulla superficie delle coperture, prendendo cura della messa in opera dato che la sua accuratezza determinerà la durabilità della tecnologia, è il caso dei rivestimenti liquidi i quali possono essere sfaldati se non è previsto un'impiego accurato, altrimenti, la sua durata può superare i 20 anni. Nella fase d'uso, la manutenzione può essere realizzata con il lavaggio delle coperture in modo di evitare che la sporcizia riduca i valori di riflettività, con una diminuzione soltanto del 20% nel corso del primo anno.

La tipologia liquida elastomerica, con elevati benefici prestazionali, è quindi un rivestimento molto simile alla gomma per la sua capacità elastica, il quale tollera molte sollecitazioni esterne, il contatto con l'acqua e viene anche allungato consentendo al polimero di resistere allo sforzo di espansione e contrazione, evitando la permeabilità all'acqua durante l'espansione termica. È un materiale a base acquosa, con la stessa viscosità della vernice che lo rende brushable o spruzzabile (senza entrare nell'area delle vernici), quindi, il suo spessore per soddisfare tutte le esigenze è molto più elevato rispetto alle vernici di casa, oscillando tra 15-30 mm (possono arrivare anche ai 60 d'accordo alla base quali EPDM,PVC), e quando asciutto diventa una membrana resistente. Come citato precedentemente la manutenzione può essere consentita con l'acqua e, si consiglia di fare un vero intervento di restauro o rinnovazione ogni 10 anni, cercando di evitare una completa sostituzione. Per ultimo, è opportuno menzionare che la tipologia elastomerica hanno una tossicità minima, non portando a nessun vincolo di composti organici volatili <sup>11</sup>.

---

12 Epa, U. S. (2008). Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. *Heat Island Reduction Activities*, 1–23. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2002\)041<0792:THFIUA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2002)041<0792:THFIUA>2.0.CO;2).

Se ha realizado un estudio en Melbourne, Australia, que compara la eficiencia de las tecnologías de cubierta vegetal y las cubiertas frías como estrategias de mitigación del fenómeno de isla de calor urbana durante el evento más extremo de olas de calor mediante el estudio de los procesos físicos de los sistemas de cubierta <sup>14</sup>.

Se ha realizado una evaluación de los impactos de los sistemas de cubierta se ha realizado mediante la aplicación del modelo de Weather Research and Forecasting (WRF) junto al Single Layer Urban Canopy Model (SLUCM), (los cuales no permiten la parametrización de los sistemas) y la investigación de parámetros específicos de cada sistema. El límite de temperatura de la investigación fue establecido mediante el 95° percentil, el cual varía en base a los sectores, en Melbourne ha sido identificado en enero del 2009 y 2014 los cuales alcanzaron las temperaturas de 45.1°C y 43.9°C, y han sido estas las bases que llevaron a la necesidad de aplicación de estrategias resilientes para la mitigación de los fenómenos climatológicos.

Los estudios realizados concluyeron que balance energético de las superficies es un factor fundamental entre las estrategias de mitigación, ya que dicho factor modifica la humedad y los balances de calor entre la superficie y la atmosfera. Esto puede ser logrado mediante intervenciones de retrofit en las cubiertas con tecnologías vegetales y frías, comportando a una gran contribución a la mitigación de la isla de calor urbano debido al área que ocupan las cubiertas en el contexto urbano.

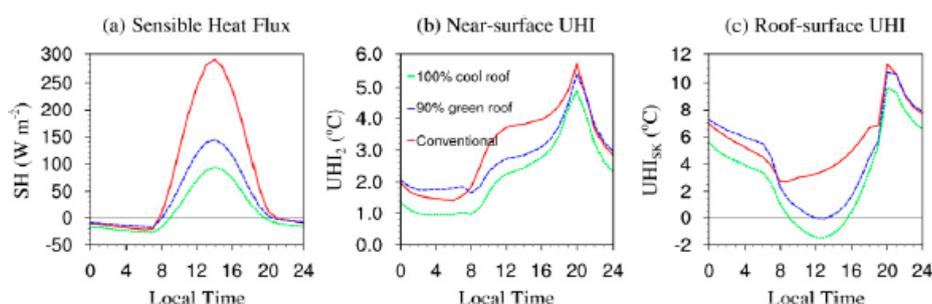
L'analisi proseguito si basa sul evento piu forte di ondata di caldo in Gennaio 2009, che è successo dopo un lungo periodo di siccità, nel quale sono stati valutati l'ICU in prossimità della superficie e sulla superficie di copertura per la comprensione dei flussi di calore sensibile. I sistemi valutati con i modelli WRF e SLUCM sono stati: quello della copertura convenzionale, il sistema proposto di cool roof con un valore di albedo 0,85, e quello delle vegetale con una stima del 90% delle coperture della zona. La finalità è stata quella di comprendere i flussi di calore sensibile al momento dell'evento dell'ondata di caldo nel 2009, e comprendere i possibili flussi di calore nei prossimi eventi di caldo.

---

14 Imran, H. M., Kala, J., Ng, A. W. M., & Muthukumar, S. (2018). Effectiveness of green and cool roofs in mitigating urban heat island effects during a heatwave event in the city of Melbourne in southeast Australia. *Journal of Cleaner Production*, 197, 393–405. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.179>

La aplicación de los modelos de representación ha permitido la evaluación de los flujos de calor sensible diarios; l'ICU in prossimità della superficie e sulla superficie di copertura de los diferentes tipos de cubierta, entre los cuales fueron analizados la cubierta convencional, la propuesta de cubierta fría (0,85 albedo) y la propuesta de cubierta vegetale con un 90% de presencia en la zona a evaluar. Los resultados obtenidos del comportamiento de la cubierta convencional durante el evento de calor del 2009, manifestaron la presencia del fenómeno de ICU por alteraciones de temperatura de 3,0 a 11,0°C sulla superficie, e di 1,5 a 5,7°C in prossimità della superficie di copertura. En la evaluación fue demostrado que la mayor manifestación de ICU ocurre en los periodos nocturnos, donde las variaciones de ICU in prossimità della superficie e sulla superficie di copertura, alcanzan su pico al mismo tiempo a las 20:00, mientras que el flujo de calor sensible alcanza su punto máximo a las 14:30 hora local.

Sebbene entrambi i sistemi (vegetale e freddo) abbiano le maggiori riduzioni dei bilanci energetici durante il periodo diurno, la tecnologia dei cool roof dimostra le più elevate prestazioni riguardo alla mitigazione del fenomeno dell'ICU, in altre parole, è più efficace della copertura vegetale, poiché le sue proprietà di riflettività della radiazione solare forniscono i minori flussi di calore sensibile, le minori manifestazioni dell'ICU in prossimità della superficie e sulla superficie di copertura durante el periodo diurno e notturno. Tuttavia, nel periodo diurno della tecnologia dei cool roof, l'ICU in prossimità della superficie di copertura tende ad essere maggiore, contrariamente all'ICU sulla superficie di copertura che presenta le temperature più elevate durante la notte.

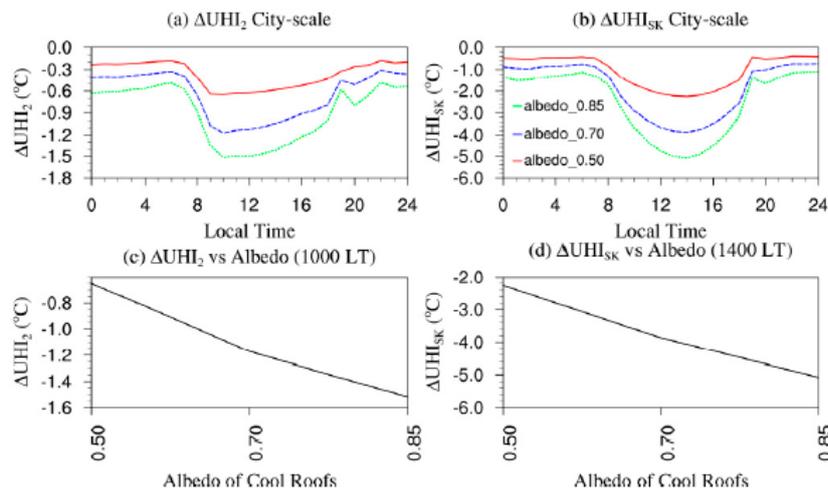


**Fig 4.13:** Variazione giornaliera dei (a) flussi di calore sensibile (W m<sup>-2</sup>), (b) ICU in prossimità delle superfici (°C) e (c) ICU superficiale della copertura (°C).

En la figura precedente (**fig. 4.13**) se demuestran los flujos de calor sensible y el fenómeno de ICU in prossimità della superficie di copertura e all'ICU sulla superficie di copertura de los sistemas en evaluación. I risultati dei flussi di calore sensibili sono i risultati di punti specifici nella città, e l'ICU è la differenza tra le temperature in prossimità delle superfici e della superfici con le aree rurali.

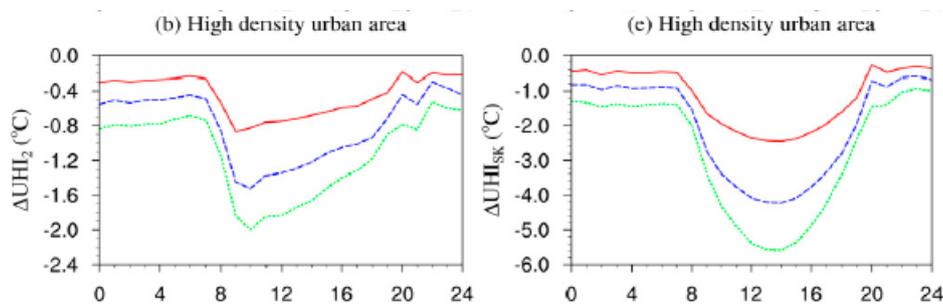
La tecnología de los cool roof tiene muchas ventajas en relación a los balances energéticos comparado con la tecnología de cubierta verde, así como los sistemas vegetales tienen beneficios hidrológicos, de la biodiversidad, entre otras, que las cubiertas frías no pueden ofrecer. Sin embargo, es importante mencionar que ambas cubiertas contribuyen a la reducción de almacenaje de calor, a diferencia de las horas de la mañana (7:00 – 11:00) por la cubierta vegetal. Por otro lado, la reducción de la radiación neta de parte de las cubiertas frías son aproximadamente  $120 \text{ W m}^{-2}$  más altas que las cubiertas vegetales, esto hace posible la gran contribución a la mitigación del calor de parte de ésta estrategia.

En el estudio de las cubiertas frías se han llevado a cabo pruebas con diferentes valores de albedo para comprender el balance energético en base a las propiedades del material. Los valores de albedo establecidos fueron 0,5, 0,7 y 0,85, los cuales son capaces de reducir un promedio diario de los flujos de calor sensible de 100, 170 y  $220 \text{ W m}^{-2}$ , de la misma manera que son capaces de reducir un aproximado de radiación neta de 100, 160 y  $180 \text{ W m}^{-2}$ , estos valores son en comparación con la cubierta convencional. En la **figura 4.14** se aprecia la reducción de la manifestación dell'ICU in prossimità della superficie e sulla superficie di copertura. De la misma manera que se aprecia la relación entre los valores de albedo y la manifestación de la ICU, la cual revela que no hay una relación linear de los valores de albedo, evidenciando que los efectos de reducción de la ICU disminuyen de 2/3 cuando el valor de albedo baja de 0,85 a 0,5.



**Fig. 4.14:** Variazioni della riduzione giornaliera dell'ICU (a) in prossimità della superficie di copertura ( $\Delta\text{ICU}_2$ ), (b) l'UCI sulla superficie di copertura ( $\Delta\text{ICU}_{sk}$ ), dei cool roof per l'uso dei valori di albedo: 0,5, 0,7 e 0,85. (c) e (d) riduzioni massima dell'ICU in prossimità delle superficie e sulle superficie delle coperture.

Por otro lado, en la **figura 4.15** se evidencia la efectividad de reducción de ICU superficial e in prossimità della superficie con los diferentes valores de albedo a escala de la ciudad, específicamente en la categoría urbana densa. En esta evaluación los resultados evidencian que el potencial de reducción de la ICU in prossimità della superficie varía entre 0,8, 1,5 e 2,2°C, sulla superficie invece 2,4, 4,2 e 5,8°C con los valores de albedo evaluados anteriormente. La reducción de la ICU en la categoría de ciudad alta densità e la categoria bassa densità se diferencia por la cantidad de cubiertas en los contextos urbanos densos, diferenciados por un 90-95%. Cuando los valores de albedo se reducen, lo hace también la capacidad de reducción de la ICU en medidas notables, esto conlleva a niveles de mantenimiento altos, buscando evitar que se reduzcan los valores de albedo.



**Fig. 4.15:** Variazione della riduzione giornaliera dell'ICU (b) in prossimità della superficie ( $\Delta ICU_2$ ) e (c) sulla superficie delle coperture ( $\Delta ICU_{sk}$ ) in contesti di alta densità urbana, con l'uso dei valori di albedo: 0,5, 0,7 e 0,85 dei cool roof.

Los resultados revelaron que considerables impactos térmicos de la tecnología de cool roof y la vegetal, sobre la superficie de las cubiertas tiene lugar en las horas 12:00 e 16:00, periodo en el que a su vez toma lugar las temperaturas pico diarias de las superficies de las cubiertas, más precisamente a las 15:00. Por otra parte, los impactos térmicos máximos nella prossimità della superficie dei suddetti sistema valutati, si manifesta alle 9:00 e 13:00, caso contrario con el peak giornaliero, che si forma alle 17:00.

El efecto de las dos tecnologías evaluadas abarcan diferentes limites; el caso de la cubierta fría de albedo 0,85 en el 100% de las cubiertas de la ciudad, reduce la temperature maxima 0,6°C y se extiende en 1,8 km dentro del Planetary Boundary Layer (PBL).

Por otro lado, considerando el elemento del viento que forme parte de una de las estrategias para la mitigación, se encuentra el mecanismo de los *convective rolls*, el cual es capaz de transportar los flujos energéticos desde la superficie a niveles más altos. Está relacionado al factor de los vientos verticales y la turbulencia (Turbulent Kinetic Energy - TKE), los cuales expresan la fuerza de la mezcla vertical del viento y son los indicadores del transporte vertical de los flujos energéticos (desde la superficie a los niveles más altos). A su vez, estos factores se ven afectados por las altas temperaturas de las superficies del contexto urbano, especialmente durante los eventos de olas de calor.

La evaluación de la tipología de cubierta fría y verde demuestra vientos verticales positivos con pequeñas reducciones, y reducción en el TKE de 0,2 a 1,5 m<sup>2</sup>-2 durante el día. Por otro lado, la tipología de cubierta convencional ha presentado mayor velocidad de viento vertical y del TKE (con los valores de 0,2 a 1,9 m<sup>2</sup> s<sup>-2</sup>) lo que indica que la cubierta convencional tiene la mezcla vertical del viento más fuerte durante el día, desarrollando así mayores *convective rolls* orizontali, generando efectos negativos en la atmosfera urbana. A su vez, la tecnología fría y verde, debido a la reducción de la mezcla de vientos verticales, disminuye la temperatura del aire en la capa superior a la del área urbana.

In conclusione quindi, tenuto conto di quanto sopra evidenziato, los grandes impactos ambientales y sociales de la manifestación de olas de calor en el sureste de Australia ha llevado a la necesidad de desarrollo de estudios de las posibles estrategias basadas en las medidas del evento más fuerte en el año 2009, con el fin de reducir la posibilidad de su manifestación o impactos.

Los sistemas estudiados para comparar con la cubierta convencional fueron las cubiertas frías y las cubiertas vegetales. I sistemi in esame hanno evidenziato que el aumento de albedo de 0,5 a 0,85 en las cubiertas frías conlleva a un potencial de reducción de la isla de calor es de 2,4°C – 5,8°C en la categoría de ciudades de alta densidad urbana, calificada como la mayor mitigación de calor debido a la cantidad de cubiertas en el área. Es importante tener en consideración que el clima seco y caliente tiene gran influencia sobre los procesos naturales de las cubiertas vegetales.

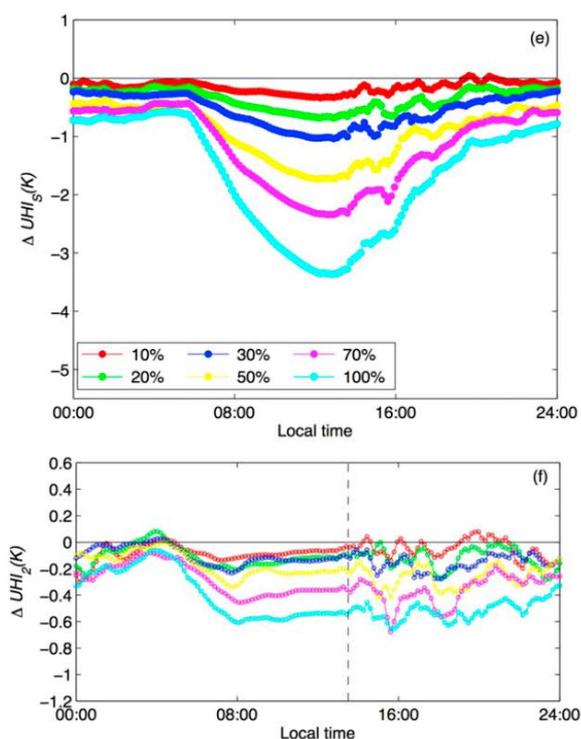
La evaluación pudo demostrar que la tecnología de los cool roof tiene mejor rendimiento ante los flujos energéticos (flujos de calor sensible y de calor latente) tanto diurno como nocturno en comparación con las cubiertas vegetales que, aunque también presentan buen rendimiento, tiene niveles inferiores respecto a las cubiertas frías. La reducción del flujo de calor sensible conlleva a la reducción de la mezcla de vientos verticales y de las temperaturas sobre las áreas urbanas en la parte baja de la atmosfera, lo que reduce los efectos dell'ICU.

De este modo se define que en todos los ámbitos evaluados en la investigación, la tecnología de cubiertas frías resulta de mayor eficacia en la reducción de la isla de calor, por una diferencia media de 1.3°C con respecto a las cubiertas vegetales, generando mejores respuestas en categorías de ciudades densas, en los flujos energéticos, y como recientemente mencionado, en la reducción dell'ICU in prossimità della superficie e sulla superficie della copertura.

È stato realizzato un'analisi delle tecnologie fredde in quanto alla valutazione dell'efficienza dei sistemi negli eventi di ondata di caldo a Baltimore. Il quale dimostra nella **figura 4.16** il confronto delle diverse frazioni di intervento, evidenziando che quando la frazione è al 100%, la capacità di riduzione massima di temperatura superficiale è circa  $4^{\circ}\text{C}$ , e quella in prossimità alle superfici è di  $0.6^{\circ}\text{C}$ . Il momento di riduzione massima della temperatura superficiale fa riferimento delle ore più intense di radiazione, il quale viene diminuito dopo il tramonto ma fornisce ancora un apporto di circa  $1^{\circ}\text{C}$  per la frazione del 100% <sup>7</sup>.

In quanto alla temperatura in prossimità alla superficie di entrambe le tecnologie (fredda e vegetale), esiste una differenza nella riduzione minima della copertura fredda la quale è di circa  $0.1^{\circ}\text{C}$ , e quella della copertura vegetale è di  $0.2^{\circ}\text{C}$ . Gli studi manifestano che si deve all'assenza della radiazione solare.

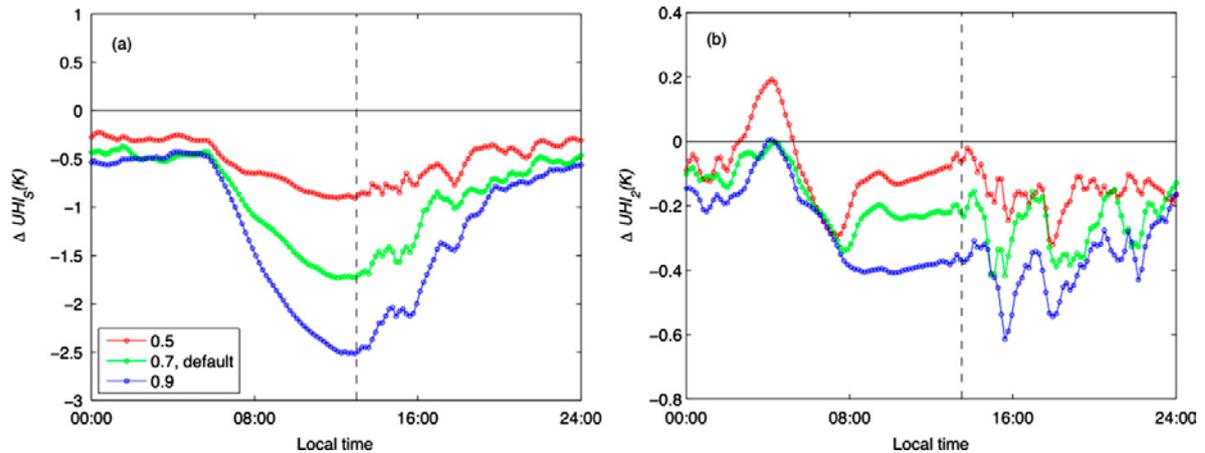
In sintesi, entrambi i sistemi hanno prestazioni simili all'ICU, con una piccola inclinazione del sistema vegetale, il quale fornisce maggiori apporti.



**Fig 4.16:** Contribuzioni delle coperture fredde nell'ICU superficiale (a), e l'ICU in prossimità della superficie (b), nelle diverse frazioni di intervento.

**Fonte:** Rielaborazione The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies.

7 Li, D., Bou-Zeid, E., & Oppenheimer, M. (2014). The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies. *Environmental Research Letters*, 9(5). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/5/055002>



**Fig 4.17:** Contribuzioni delle coperture fredde nell'ICU superficiale (a), e l'ICU in prossimità della superficie (b), con diversi valori di albedo.

		Changes in the surface urban heat island	Changes in the near-surface urban heat island
Cool roof albedo	0.5	0.82	0.18
	0.9	-0.79	-0.14

**Fonte:** The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies

**Tabella 4.4:** Benefici e penalizzazioni dei scenari di albedo delle coperture fredde.

La **figura 4.17** rappresenta la valutazione di diversi valori di albedo sulle superfici del 50% delle coperture nella città di Baltimore. Nello studio sono stati valutati 3 scenari di albedo, quello base è di 0.7, corrisponde ad una copertura di cemento (albedo 0.3) recentemente trattata oppure con alti livelli di manutenzione, diminuendo l'ICU superficiale massima di 1.7°C, invece quella in prossimità

Il confronto è stato realizzato con il valore di riferimento, nel quale si è previsto che l'accumulo di sporcizie può diminuire il valore da 0.7 a 0.5, comportando ad una riduzione di temperatura superficiale (rispetto alle riduzioni di albedo 0.7) di 0.82°C e 0.18°C della temperatura in prossimità della superficie. Dall'altra parte, il valore 0.9 non corrisponde a nessuna tecnologia fredda oggi giorno, ma la valutazione intende di capire il potenziale di questo valore, risultando una riduzione massima della temperatura superficiale di 2.49°C e 0.6°C per quella in prossimità della superficie, vuol dire una riduzione di temperatura superficiale di 0.79°C e 0.14°C in prossimità della superfici rispetto alle coperture di albedo 0.7.

Il risultato dell'analisi fa capire le esigenze della tecnologia, laddove con una rispettiva manutenzione il livello delle prestazioni della copertura non diminuirà velocemente. Uno studio ha approfondito il degrado del materiale, manifestando che nel primo anno il valore può diminuire di 0.15 to 0.25 se non è adeguatamente trattato, hanno proposto anche che lavare la copertura è una misura efficiente e preventiva del degrado.

## 4.2 Confronto prestazionale: Tecnologia vegetale – Tecnologia fredda

Riprendendo le linee guida dei protocolli ed i piani di attuazione stabiliti, l'analisi sviluppata ha le sue basi sulle politiche per garantire lo stabilito dagli *obiettivi di sviluppo sostenibile* (specificamente gli SDG 11,13)<sup>15</sup> e dal PNACC (quadro di riferimento per lo sviluppo di azioni di cambiamento climatico in Spagna)<sup>16</sup>, i quali integrano le misure di adattamento (l'adeguamento delle conseguenze del cambiamento climatico senza comportare alterazioni), insieme alle strategie di mitigazione quali la riduzione degli impatti del cambiamento climatico, tramite l'impiego di nuove tecnologie ed un controllo di rilasci di emissioni di GHG.

L'H2020 nella sua linea di ricerca di materiali, suggerisce che il miglioramento delle loro proprietà fornirebbe nuove funzionalità sotto un approccio sostenibile, garantendo la resilienza e l'integrazione ambientale<sup>17</sup>.

Il lavoro di ricerca ha definito delle strategie di selezione di coperture per l'adattamento ai cambiamenti climatici e per la mitigazione del fenomeno dell'isola di calore urbana.

La definizione delle suddette strategie si basa su letteratura che comprendono realizzazione di esperimenti, confronto dei casi studi, informazione teorica e verifiche con dei software.

In questo modo, sono state identificate le diverse variabili ad analizzare con il fine di proporre le soluzioni più adatte alla città di Madrid, quali:

- le condizioni climatiche, con riferimento allo studio delle proiezioni di cambiamento climatico stabilito per l'IPCC;
- le variabili urbanistiche, che configurano lo spazio ed incidono sulle coperture;
- lo studio delle soluzioni di coperture, le quali comprendono la valutazione delle caratteristiche fisico-tecniche dei materiali che incidono nei flussi energetici, e gli aspetti eco-compatibili delle soluzioni nell'ottica qualitativa.

---

15 [www.un.org](http://www.un.org)

16 [www.mapama.gob.es](http://www.mapama.gob.es)

17 [ec.europa.eu](http://ec.europa.eu)

È stato considerato che all'interno delle città, come spazio antropizzato, esistono diversi fonti di calore e rilasci di emissioni che conducono alle alterazioni delle variabili climatiche, generando un microclima urbano più che altro caratterizzato dalle elevate temperature, il quale è conosciuto come fenomeno d'isola di calore urbana.

È importante ricordare che esistono diversi tipi di isola di calore nell'ambiente urbano, si tratta dell'ICU superficiale, quella in prossimità della superficie e quella atmosferica<sup>18</sup>. L'ICU superficiale è caratterizzata dalle differenze dei valori termici delle superfici dei materiali (coperture, prospetti y pavimentazione) in confronto con la temperatura dell'aria. È generata dall'incidenza della radiazione solare sulle superfici, dall'elevate temperatura dell'aria ed anche dagli inquinanti che alterano i comportamenti dei materiali. Tutto questo conduce successivamente alla sua manifestazione più intensa nel periodo diurno, e conforme alle proprietà dei materiali può essere prolungata fino alla notte. L'ICU in prossimità della superficie, invece, è la temperatura misurata a 2 metri di altezza rispetto ai materiali<sup>19</sup>, e la sua manifestazione diurna è in base alla temperatura superficiale del materiale e le sue proprietà, quella notturna è condizionata ai valori di emissività e capacità termica dei materiali. Per ultimo, l'ICU atmosferica è la differenza di temperatura delle aree rurali e le aree urbane, ed è originata basicamente dall'inquinamento delle attività antropogeniche e la massa urbana (materiali) la quale appare fundamentalmente nei periodi notturni quando i materiali rilasciano all'atmosfera il calore accumulato nel periodo diurno.

In quest'ottica, i materiali hanno grande rilevanza nella generazione dell'ICU, particolarmente quelli sulle coperture, per la sua esposizione agli elementi del clima, per le sue proprietà termiche che permettono l'accumulo di calore (periodo diurno) che successivamente viene ri-emesso all'ambiente dopo un certo lasso di tempo, e per la sua presenza nel ambiente costruito (specificamente nelle città dense). Nel caso specifico del quartiere Gaztambide, può essere evidenziato con un isolato, il quale ha circa 11.335 mq, e l'impronta delle coperture occupa 8.215 mq.

Si procede quindi allo studio di tecnologie che favoriscano alla riduzione della temperatura superficiale dei materiali, dato che successivamente queste interventi contribuiscono alla riduzione di temperatura dell'aria all'interno dell'ambiente urbano.

---

18 Tumini, I. (2010). Estrategias para reducción del efecto isla de calor en los espacios urbanos. Estudio aplicado al caso de Madrid. *Congreso Internacional Sobre Edificación Sostenible SB10mad*, 1–15. Retrieved from [www.sb10mad.com/ponencias/archivos/a/A033.pdf](http://www.sb10mad.com/ponencias/archivos/a/A033.pdf)

19 Li, D., Bou-Zeid, E., & Oppenheimer, M. (2014). The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies. *Environmental Research Letters*, 9(5).  
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/5/055002>

## Confronto prestazionale Tecnologia di copertura vegetale

	Contributo energetico					Contributo ambientale				Contributo all'edificio		
	Flusso di calore latente	Flusso di calore sensibile	Riflettività	Emissività	Capacità termica	Isola di calore urbana	Controllo di deflusso	Qualità dell'aria	Biodiversità	Isolamento termico	Isolamento acustico	Risparmio energetico
<b>Tecnologia vegetale</b>	◆	◆			◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
<b>Tecnologia fredda</b>		◆	◆	◆	◆	◆				◆		◆

### Bilancio energetico – Tecnologia vegetale

- *Flusso di calore latente*: È considerato come il maggiore beneficio della tecnologia vegetale, laddove una parte della radiazione totale viene convertita in calore latente, utilizzata nel processo di evapotraspirazione, il quale permette la riduzione della temperatura superficiale e di conseguenza quella atmosferica <sup>20</sup>. Quanto maggiore è il l'idratazione dello strato di coltura, tanto maggiore sarà l'efficienza del sistema.
- *Flusso di calore sensibile*: Il sistema riduce il flusso di calore sensibile dato che l'assorbimento di energia viene utilizzata per il processo di evapotraspirazione, pertanto non incrementa la temperatura dell'aria. In questo caso, la quantità di radiazione incidente sulla superficie è minore a quella che posteriormente viene liberata <sup>5</sup>. Uno studio sviluppato nella città di Madrid ha dimostrato che lo scenario di irrigazione andrebbe a ridurre il flusso di calore sensibile del 75% (in confronto con una copertura nera, di albedo 0,1).
- *Capacità termica*: La capacità di assorbimento dei sistemi verdi è dell'80%, dei quali circa il 70% viene utilizzata nei processi di evapotraspirazione, facendo sì che la temperatura superficiale diminuisca.

20 Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island - A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 224–240. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.047>

## Bilancio energetico – Tecnologia fredda

- *Flusso di calore sensibile*: Dato che la riflettività dei sistemi di coperture fredde evitano l'assorbimento di energia, di conseguenza evitano anche l'innalzamento delle temperature, che si traduce come bassi flussi di calore sensibile.
- *Riflettività*: L'essenza della tecnologia delle coperture fredde è quella di incrementare la riflettività della radiazione solare con il fine di ridurre l'incremento delle temperature superficiali, della radiazione infrarossa, ed anche ridurre la capacità termica. Questa proprietà è molto effettiva sia nei periodi diurni che i notturni, e una soluzione molto diffusa date le sue tecniche di impiego, le elevate prestazioni ed i bassi costi, è quella rivestimento liquido di base elastomerica o cementizia <sup>21</sup>.
- *Emissività*: La tecnologia di coperture fredde è caratterizzata dalle elevate proprietà radiative di albedo ed emissività, essendo quest'ultima il fattore più importante in quanto alla liberazione di calore, dato che determina la quantità che sarà liberato per unità di area. In questo modo i materiali freddi forniscono l'equilibrio termico più facilmente rispetto a quelli convenzionali.
- *Capacità termica*: In questo contesto, la proprietà d'accumulo di calore è strettamente legata alla riflettività, di circa il 20%, la quale evita che i materiali assorbano l'energia incidente per la sua capacità di riflettere la radiazione ad onde corte.

---

21 Li, H., Harvey, J., & Jones, D. (2013). Multi-dimensional transient temperature simulation and back-calculation for thermal properties of building materials. *Building and Environment*, 59, 501–516. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.09.019>

## Contributi ambientali – Tecnologia vegetale

- *Isola di calore urbana*: Il processo naturale di traspirazione + evaporazione della vegetazione ha rilevanti apporti nella riduzione della temperatura sulle coperture, di conseguenza diminuisce il trasferimento di calore all'aria in prossimità delle superfici contribuendo in questo alla riduzione dell'ICU atmosferica.

Gli studi hanno dimostrato che il buon funzionamento del sistema è legato alla specie vegetale, la tipologia e quantità del substrato e al sistema di irrigazione. Le temperature superficiali possono essere minori a quelle dell'aria, è stato evidenziato a Chicago (Stati Uniti), laddove hanno fatto uno studio in una giorno di temperatura atmosferica di circa 30°C, dove la temperatura dell'aria in prossimità alla superficie era maggiore di 4°C rispetto alla temperatura superficiale della vegetazione che oscillava tra i 33 – 48°C, in confronto con una superficie nera di 76°C <sup>22</sup>.

Quando il sistema è appositamente irrigato, la sua capacità di riduzione di temperature incrementa di 2°C, e questa riduzione può estendersi sul contesto di 0,5 - 1°C. È stato comprovato che dopo il tramonto, la temperatura superficiale del substrato diminuisce ad un ritmo veloce e diventa inferiore a quella dell'atmosfera, pertanto la superficie inizia a raffreddare l'atmosfera <sup>23</sup>.

Nel caso particolare della città di Madrid devono essere impiegate delle specie vegetali resistenti alla siccità, quale *sedum*. Gli studi hanno consigliato di impiegare uno strato di coltura non minore ai 10 cm nelle città di clima caldo e secco, ed anche di utilizzare un sistema di irrigazione (a goccia) con un contenuto d'acqua nel substrato di 0.35 – 0.45 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, (per il mantenere la specie *sedum* gli studi consigliano minimo di 1,4 mm).

- *Controllo di deflusso*: La tecnologia di copertura vegetale permette di regolare il deflusso delle acque piovane mediante la ritenzione delle acque nello strato di coltura che successivamente viene utilizzata nei processi di evapotraspirazione, e allo stesso modo permette la riduzione del carico sulla rete di smaltimento <sup>24</sup>. Il potenziale di ritenzione di deflusso per le città di clima continentale è stato stimato di 45%.

---

22 US EPA, C. P. P. D. (2012). Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies - Urban Heat Island Basics.

23 Asaadaa, T., & Ca, V. T. (2000). Characteristics of Permeable Pavement during Hot Summer Weather and Impact on the Thermal Environment. *Building And Environment*, 35, 363±375.

24 Montacchini, E., & Tedesco, S., (2017). Tetti verdi. *CittàStudi* (160 p., ill.)

- *Qualità dell'aria:* Le coperture vegetali sono caratterizzate da alcune funzioni specifiche, quale la capacità di produrre ossigeno, la capacità di catturare il carbonio (funzione legata alla specie utilizzata), ed nel caso particolare della specie *sedum* può catturare  $375 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}$  <sup>25</sup>. Possono inoltre rimuovere altri inquinanti gassosi quali ossido nitroso, diossido di zolfo, ed anche il particolato atmosferico. Contribuendo in questo modo alla diminuzione della formazione di smog, con una stima di incremento del 6% per ogni grado massimo giornaliero incrementato dopo i 22°C <sup>26</sup>.
- *Biodiversità:* All' interno della massa urbana, l'integrazione della vegetazione fornisce un habitat naturale per le diverse speci animali e vegetali, la quale offre benefici a scala urbana e di edificio al restituire l'area utilizzata per la costruzione dell'edificio.

### Contributi ambientali – Tecnologia fredda

- *Isola di calore urbana:* Gli alti livelli prestazionali della tecnologia di copertura fredde consentono di ridurre la manifestazione d'ICU di tutti i tre tipi. Il sistema, quindi, risponde alle richieste di riduzione d'ICU superficiale nei periodi diurni mediante la riflessione della radiazione ad onde corte, ed anche alla manifestazione d'ICU notturna dato che la minore capacità d'accumulo conduce a minore energia infrarossa emessa, evitando in questo modo i flussi di calore sensibile.

Questa strategia è molto efficiente per la riduzione delle temperature, tuttavia, siccome le prestazioni sono date dalla tonalità chiara del rivestimento -che determina il valore di albedo-, i livelli di manutenzione sono maggiori, visto che deve essere garantita la pulizia della copertura per il suo buon funzionamento.

Alcune ricerche hanno evidenziato che in una giornata estiva la tecnologia di copertura fredda può arrivare a temperature massime di 43-46°C, con una differenza di 6-11°C rispetto alla temperatura atmosferica, anziché le coperture nere, le quali possono avere 31-47°C di temperatura più elevati rispetto a quelli dell'aria.

---

25 Guzmán-Sánchez, S., Jato-Espino, D., Lombillo, I., & Diaz-Sarachaga, J. M. (2018). Assessment of the contributions of different flat roof types to achieving sustainable development. *Building and Environment*, 141(April), 182–192. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.063>

26 Rosenfeld, A. H., Akbari, H., Bretz, S., Fishman, B. L., Kurn, D. M., Sailor, D., & Taha, H. (1995). Mitigation of urban heat islands: materials, utility programs, updates. *Energy and Buildings*, 22(3), 255–265. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(95\)00927-P](https://doi.org/10.1016/0378-7788(95)00927-P).

Il sistema consiste nella correlazione delle proprietà radiative (albedo ed emissività) e la proprietà termica (capacità di assorbimento), laddove la somma di tutte e tre è l'equivalente all'incidenza energetica sulla superficie, che successivamente vengono liberate all'ambiente sotto diverse forme <sup>22</sup>.

- *Qualità dell'aria*: La tecnologia di coperture fredde favorisce alla riduzione del rilascio di emissioni tra i quali CO<sub>2</sub> e Nox, che contribuiscono a diminuire la formazione di smog, migliorando in questo senso la qualità d'aria.

### Contributi all'edificio – Tecnologia vegetale

- *Isolamento termico*: La capacità d'isolamento fornita dalle coperture è correlata al raffrescamento ottenuto dalle piante per il processo di evapotraspirazione, ed anche al fatto che lo strato vegetale protegge il solaio di copertura dall'incidenza diretta dell'energia solare. Quando il sistema presenta alto contenuto di acqua nello stato di coltura, viene assorbita un'elevata quantità di calore che riduce le fluttuazioni di temperatura.

- *Isolamento acustico*: Le prestazioni d'isolamento acustico è fornita dall'insieme degli strati naturali, laddove quanto più spessa è la massa del pacchetto, più performante sarà il sistema. Le funzioni degli strati naturali hanno direzioni contrari, il substrato tende a bloccare le frequenze sonore inferiori, le piante, invece, bloccano le frequenze superiori. Questa attribuzione incrementa l'interesse dei sistemi vegetali dato che protegge gli spazi interni degli edifici dai rumori urbani <sup>27</sup>.

- *Risparmio energetico*: Nelle stagione estiva, le prestazioni termoisolanti ottenute dal raffrescamento delle piante conducono alla diminuzione della necessità di consumo energetico per raffrescare gli spazi interni degli edifici. In uno studio di hanno concluso che il consumo di 1kWh porta alla produzione di 250 g di CO<sub>2</sub> <sup>26</sup>, in questo modo, le superfici vegetali riducono il consumo energetico, che conduce alla riduzione di rilasci di emissioni ed anche dei costi.

---

22 US EPA, C. P. P. D. (2012). Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies - Urban Heat Island Basics.

26 Rosenfeld, A. H., Akbari, H., Bretz, S., Fishman, B. L., Kurn, D. M., Sailor, D., & Taha, H. (1995). Mitigation of urban heat islands: materials, utility programs, updates. *Energy and Buildings*, 22(3), 255–265. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(95\)00927-P](https://doi.org/10.1016/0378-7788(95)00927-P).

27 Oquendo, V., (2017). Sistemi innovativi di living wall system: Prestazioni ambientali e tecnologiche. (376 p., ill.)

## Contributi all'edificio – Tecnologia fredda

- *Isolamento termico*: La riflettività della radiazione solare contribuisce ad evitare l'innalzamento delle temperature negli ambienti interni dell'edificio. Un dibattito comune dell'impiego di coperture fredde riguarda la capacità riflettiva nella stagione invernale, dato che diminuisce il contributo naturale. Tuttavia, è importante considerare che il risparmio nella stagione estiva è molto più elevato in quanto a quello invernale, visto che quest'ultimo è caratterizzato da minori angoli di radiazione (la quale viene dispersa in un'area maggiore), e da maggiore nuvolosità che diminuisce l'intensità di energia incidente <sup>22</sup>.
- *Risparmio energetico*: La capacità di mitigazione della tecnologia di coperture fredde diminuisce la necessità di utilizzo di climatizzatori nelle ore di massima radiazione, che si traduce in un alto contributo alla riduzione del fabbisogno energetico degli edifici nei periodi estivi.

---

22 US EPA, C. P. P. D. (2012). Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies - Urban Heat Island Basics.



**PARTE 3**  
**CASO STUDIO**



## **CAPITOLO 5**

### **Caso studio: Quartiere Gaztambide a Madrid**

Questo capitolo intende studiare le variabili che caratterizzano la città di Madrid, sia quelle climatiche che quelle morfologiche, dato che l'approccio ambientale richiede di comprendere gli aspetti specifici di ogni località, in modo di progettare nel modo più corretto e specifico.

In questo modo, è opportuno menzionare che le condizioni climatiche giocano un ruolo chiave nella progettazione oggi giorno, questo si deve perché esse sono state alterate come conseguenza del nostro stile di vita e possono avere ripercussioni significative sugli elementi architettonici. Questo fatto ha portato a stabilire delle linee nella fase di progettazione le quali includono lo studio delle condizioni del clima con l'obiettivo di adattarsi ai futuri scenari climatici, evitando in questo modo gli impatti sia sull'edificio (per vulnerabilità di quei elementi che non sono in grado di restare immutabili), che sull'ambiente esterno (come conseguenza dei sistemi che non sono in grado di adattarsi). Per tanto, particolare attenzione deve essere rivolta agli elementi del clima che in qualche modo possono alterare le diverse scale dei progetti, il quale parte dalla scala dei sistemi tecnologici, l'opera architettonica in sé, e finisce a scala urbana.

È opportuno ricordare che le condizioni climatiche variano in ogni località, pertanto lo studio degli elementi deve essere realizzato il più preciso possibile (a scala locale), in modo da definire le variabilità degli elementi climatici nel sito dove si è definito progettare. Pertanto, In questa sezione verrà spiegata l'importanza di ogni elemento del clima sui sistemi tecnologici, sarà anche evidenziato lo stato attuale di essi nella città di Madrid e le proiezioni degli scenari climatici stabiliti dall'IPCC, in modo di stabilire le basi per l'approccio resiliente del lavoro di ricerca.

In quest'ottica, devono essere anche studiate le caratteristiche morfologiche della città, dato che le diverse configurazioni dei contesti urbani richiedono misure specifiche che siano in grado di rispondere allo stato attuale, per tanto, è stato considerato lo studio degli aspetti che influiscono in questa tipologia di interventi, cercando di stabilire delle linee generali della città di Madrid per futuri interventi di riqualificazione o nuove costruzione.

## 5.1 Condizione climatica a Madrid

Il clima, corrisponde all'insieme di condizioni metereologiche specifiche in ogni località, in questo caso la città Madrid si caratterizza per un clima mediterraneo – continentale, con stagioni invernali che scarsamente scendono sotto 0°C, e stagioni estive che possono essere maggiori ai 35°C. Secondo la classificazione di Koppen, la città di Madrid corrisponde alla classificazione Csa, temperato di stagioni estive calde e secche.

È importante considerare la intensità degli elementi climatici di questa tipologia di clima nei periodi estivi, dato che la loro potenza o scarsità può interferire sia all'interno degli edifici che all'ambiente esterno. È il caso del periodo molto caldo e secco che può aumentare le temperature atmosferiche, superficiali ed in prossimità della superficie, intensificando in questo modo l'isola di calore urbana <sup>1</sup>.

### 5.1.1 Radiazione solare

La radiazione solare è l'energia emessa dal sole come l'unica sorgente, e la sua unità è w/m<sup>2</sup>. È importante comprendere, come sostiene Dessì (2007), che essa dipende dalla latitudine ed altitudine dei siti, ed anche dall'inclinazione del sole, il quale varia in corrispondenza ai diversi mesi dell'anno. Esistono diverse tipologie di radiazione solare, tra le quali: radiazione diretta, quella proveniente direttamente dal sole, radiazione diffusa, la quale viene filtrata dalle nuvole, ed anche la radiazione riflessa riemessa dagli articoli nel suo intorno. Gli analisi della radiazione incidente sulle coperture, permette di definire le possibile strategie di ottimizzazione dei sistemi.

Nella fase di selezione dei sistemi tecnologici, è importante tener conto che la radiazione solare che incide su una superficie è proporzionale a quella che viene liberata, questo caso può essere sotto diverse forme (radiazione riflessa e radiazione re-imessa). Quello più importante da considerare è il modo più conveniente di restituire l'energia all'atmosfera, laddove i sistemi più appropriati per la restituzione di energie è sono quelli che non permettono l'assorbimento dell'energia (dato che nella sua re-immissione viene trasformata in calore), quale i sistemi di materiali altamente riflettivi, oppure sistemi che utilizzano l'energia nei suoi processi e posteriormente viene trasformata in calore latente, quale i sistemi vegetali <sup>2</sup>.

---

1 Ambiente, D. E. M. (n.d.). *Atlas Climático Ibérico Iberian Climate Atlas*.

### 5.1.2 Temperatura

La temperatura è la variabile che dimostra la quantità di calore in un materiale, viene intensificata in base alla radiazione solare incidente sulle superfici e (in base alle proprietà termiche) accumulata all'interno dei materiali. La sua unità in base al Sistema Internazionale di Unità sono i gradi Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ), laddove  $0^{\circ}\text{C}$  è il punto di congelamento, e  $100^{\circ}\text{C}$  è il punto di ebollizione.

È molto rilevante la relazione che esiste tra i materiali urbani e la temperatura atmosferica, dato che maggiore è la temperatura superficiale, maggiore sarà la temperatura dell'aria a conseguenza di processi di scambi termici, portando alla generazione del fenomeno dell'isola di calore urbana.

Deve anche essere considerato che gli alti livelli di temperatura tendono a causare degli effetti avversi all'ambiente esterno (l'isola di calore e maggiore rilasci dai consumi energetici), all'ambiente interno (minore comfort termico) e ai propri materiali (deformazioni), detto ciò, devono essere applicate delle misure per evitare gli impatti menzionati, le quali possono essere ottenute con l'impiego dei materiali più performanti, l'incremento di vegetazione ed anche mediante la progettazione degli spazi.

La temperatura media annuale di Madrid dell'anno 2017 è stata di  $16.2^{\circ}\text{C}$  (valore che supera di  $1.1^{\circ}\text{C}$  il valore di periodo di riferimento 1981-2010) invece quella media massima nei periodi estivi può arrivare ai  $33.5^{\circ}\text{C}$ , pertanto, particolare attenzione deve essere data ai materiali impiegati negli edifici, dato che quello che deve essere cercato è di contribuire all'ambiente esterno a diminuire le temperature nei periodi estivi (dato che sono le maggiori temperature all'anno) con i materiali più performanti.

---

2 Dessì, V. (2007). Progettare il comfort urbano. Soluzione per un'integrazione tra società e territorio. *Architettura sostenibile*. 280 p., ill.

### 5.1.3 *Umidità relativa*

Con l'umidità relativa si intende alla quantità di vapore d'acqua presente nell'aria, il quale viene originato gran parte dall'evaporazione delle acque oceaniche, ma viene anche originato (in molto più piccole quantità) dalla traspirazione delle piante. L'umidità relativa proviene dal rapporto tra la pressione del vapore e della temperatura dell'aria.

Questa variabile è molto importante soprattutto nei periodi estivi, dato che influisce molto nel comfort termico delle persone, particolarmente nelle zone calde e secche (quale il caso di Madrid), essa contribuisce nella migliore delle condizioni termiche nell'ambiente. Un altro beneficio è che l'umidità relativa attenua la radiazione assorbita ed anche quella riflessa.

Studi confermano che l'umidità relativa è inversamente proporzionale alla evaporazione, laddove maggiore è l'umidità relativa, minore sarà la velocità di evaporazione <sup>2</sup>. Il modo quindi appropriato per favorire l'incremento dell'umidità è mediante l'impiego di vegetazione, la quale mediante i flussi di calore latente dei processi naturali di evapotraspirazione, contribuisce all'incremento di umidità nell'ambiente.

La lontananza geografica dalle coste e la città di Madrid, fa sì che la città presenti bassi livelli di umidità relativa nei periodi estivi (i più secchi dell'anno), con un valore che varia da 35-38% nel mese di luglio, contrariamente ai mesi invernali i cui possono arrivare ai 74-77%.

### 5.1.4 *Precipitazioni*

La precipitazione comprende tutti i fenomeni relativi all'acqua i quali arrivano alla superficie terrestre dall'atmosfera, possono essere presentati sotto diverse forme: pioggia, neve o grandine. La sua unità sono i millimetri (mm), e viene determinata in base ad ogni località.

In architettura, le precipitazioni possono incidere in diversi modi, nei casi positivi influenzano nella riduzione delle temperature, le quali vengono diminuite per il coefficiente di convezione mediante l'incidenza della pioggia sui materiali, laddove la sua più importante contribuzione è nel processo dell'evapotraspirazione delle piante, le quali hanno la capacità non solo di diminuire le temperature dell'aria, ma di incrementare l'umidità, sempre se c'è un'apposita idratazione del sistema. Nel caso

contrario, la frequenza degli eventi di pioggia possono generare allagamenti nei sistemi che non siano adatti e causare effetti avversi sulle condizioni dei materiali.

Il caso critico di Madrid è nei periodi estivi, dato che le condizioni di elevate temperature e siccità possono generare degli effetti avversi sulle edificazioni e l'ambiente esterno, facendo sì che i materiali non reagiscano nel modo adeguato e contribuiscano a generare l'effetto dell'isola di calore urbana. I valori medi registrati di precipitazioni nei mesi più caldi (luglio e agosto) variano dai 11.7 – 9.6 mm (con periodo di riferimento dell'anno 1981-2010).

### 5.1.5 Vento

È una componente molto importante, il quale è capace di contribuire alla diminuzione delle temperature. È la differenza di pressione nell'atmosfera lo che comporta ai movimenti di aria (vento), i quali possono essere variati in quanto alla velocità, direzione e frequenza. Essi variano in base al periodo dell'anno ed anche alle diverse tappe delle giornate, laddove presenta maggiore intensità nei pomeriggi, e minore intensità le mattine.

Dessi, V., sostiene che la differenza di temperatura portano ai fenomeni di turbolenza, il quale incrementa la capacità raffrescante del vento, laddove a maggiore turbolenza, maggiore capacità di asportare il calore dal corpo. In quest'ottica, argomenta anche che maggiore è la rugosità di una superficie, e maggiore sarà la velocità dell'aria.

Un fatto da considerare, è che le elevate temperature delle superfici di alcuni materiali possono essere dissipate con l'aumento di velocità del vento, sono considerati anche le proprietà di convezione dei materiali e la differenza esistente tra la temperatura dei materiali e quella dell'atmosfera, dato che il processo consiste in arrivare ad un equilibrio tra entrambe le temperature, nel mentre cerca di diminuire quella che è più intensa (in questo caso sarebbe quella dei materiali). Il caso specifico della città di Madrid, è stato stimato mediante l'unità meteorologica del parco del Buen Retiro, una maggiore velocità il mese di aprile con 9.1 km/h, invece, i mesi di giugno e luglio varia dai 8.6 – 8.0 km/h.

## 5.2 Proiezione dei cambiamenti climatici a Madrid– IPCC

In questa sezione vengono rappresentati gli scenari di proiezioni del cambiamento climatico stabiliti dall'IPCC. Come menzionati precedentemente, sono delle proiezioni che stabiliscono una correlazione tra il tenore di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera e le conseguenze nell'ambiente.

Gli analisi dell'IPCC sostengono che le continue emissioni di gas ad effetto serra comporteranno ad un maggiore incremento di cambiamento negli elementi del clima, con eventi più frequenti e più durevole, che possono anche diventare impatti irreversibili nell'ecosistema. Da questo punto, è stato considerato che devono essere prese delle misure sia per l'adattamento che per la mitigazione delle alterazione degli elementi del clima ed i suoi successivi eventi, e nonostante gli incentivi di riferimento abbiano stabilito dei limiti per evitare il raggiungimento di livelli allarmanti, l'IPCC ha cercato di prevedere i possibili scenari sotto diversi livelli di emissioni, con lo scopo di generare sensibilizzazione sull'argomento.

In quest'ottica, l'IPCC ha stabilito diversi scenari in base alla concentrazione di gas ad effetto serra gas chimicamente attivi, definiti come *Representative Concentration Pathway (RCP)*, i quali rappresentano uno dei possibili scenari futuri fino all'anno 2100, con riferimento al periodo 1750. Gli scenari analizzati devono essere considerati come valori indicativi (dato che c'è un grado di incertezza) laddove quello di basse emissioni (RCP 2,6) arriva ad un punto massimo e poi diminuisce, considerato come quello più appropriato, il quale segue tutte i limiti proposti di non passare i 2°C rispetto ai livelli preindustriali. Successivamente, lo scenario di emissioni medie (RCP 4,5) va oltre i limiti stabiliti e si stabilizza nel 2100, lo scenario di emissioni elevate (RCP 6,0), e quelle allarmanti (RCP 8,5) i quali raggiunge il loro livello massimo nel 2100. Tuttavia, l'IPCC sostiene che in tutti gli scenari prevedono l'incremento delle temperature massime, la riduzione delle temperature minime ed un incremento della frequenza ed intensità dei fenomeni. Le proiezioni sono state eseguite mediante diversi approcci di Integrated Assessment Models (IAM), i quali hanno approssimato la quantità di inquinamento riguardo all'economia, la crescita demografica, lo stile di vita, l'utilizzo di energia, tecnologie, ecc <sup>3</sup>.

---

3 Cambio, R. D. E. (n.d.). IPCC-AR5.

Gli studi sostengono che non basta approfondire un unico scenario (tra quegli sviluppati), ed hanno attribuito maggiore probabilità allo scenario RCP 4.5 (in base allo stile di vita attuale) e in modo più allarmante allo scenario RCP 8.5 (senza prevedere nessuna misura di adattamento), si deve comunque menzionare che tutte le proiezioni hanno un certo grado di incertezza <sup>4</sup>.

L'identificazione delle proiezioni più specifiche nella città di Madrid in base al modello globale è stata eseguita mediante l'utilizzo del metodo di regionalizzazione dinamica, il quale consiste nella valutazione di vincoli fisici e dinamici tra il clima a scala più ampia ed i processi che succedono a scala più bassa. Questa metodologia si caratterizza per la sua precisione a causa dei diversi approcci utilizzati per la sua valutazione, tuttavia non è stato comprobato che il metodo della regionalizzazione dinamica è migliore a quello stadistico.

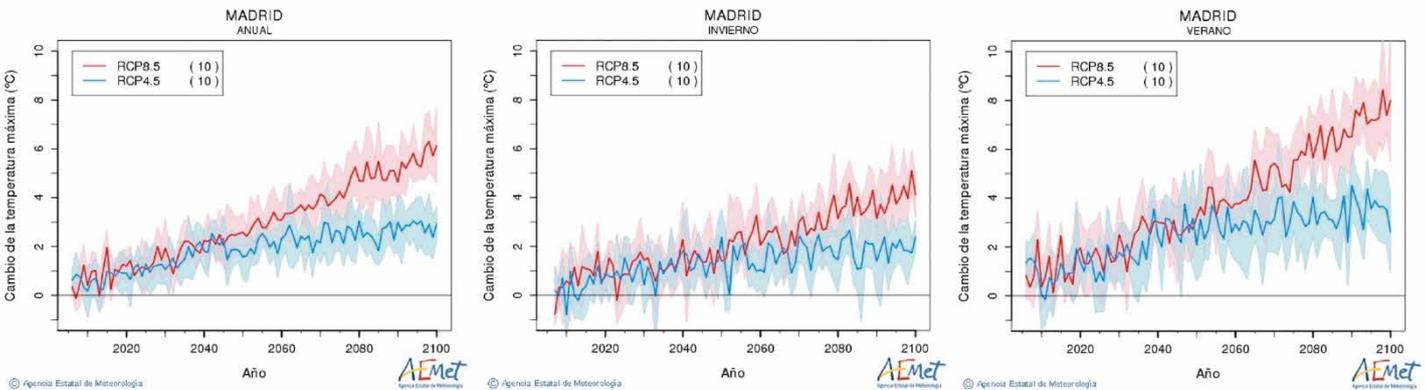
---

4 [www.adaptecca.es](http://www.adaptecca.es)

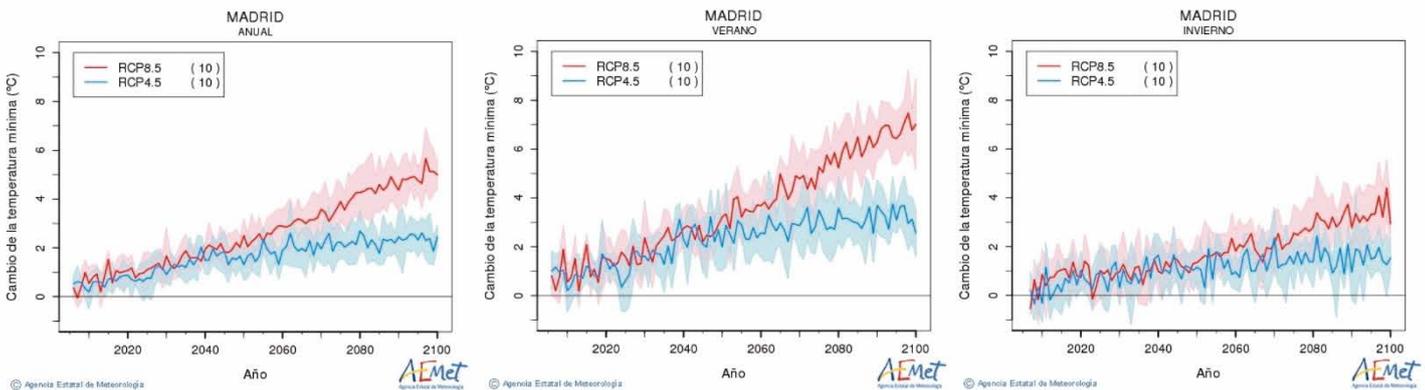
Di seguito, vengono riportati i grafici delle proiezioni di cambiamento climatico fino all'anno 2100, nella stagione estiva, invernale ed il periodo annuale, con uno studio degli scenari RCP 4.5 e quello RCP 8.5. I grafici sono stati forniti dall'*Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)*, realizzati con il metodo della regionalizzazione dinamica, degli elementi:

- temperatura massima;
- temperatura minima;
- eventi di ondata di caldo e freddo;
- precipitazioni;
- velocità del vento;
- nuvolosità.

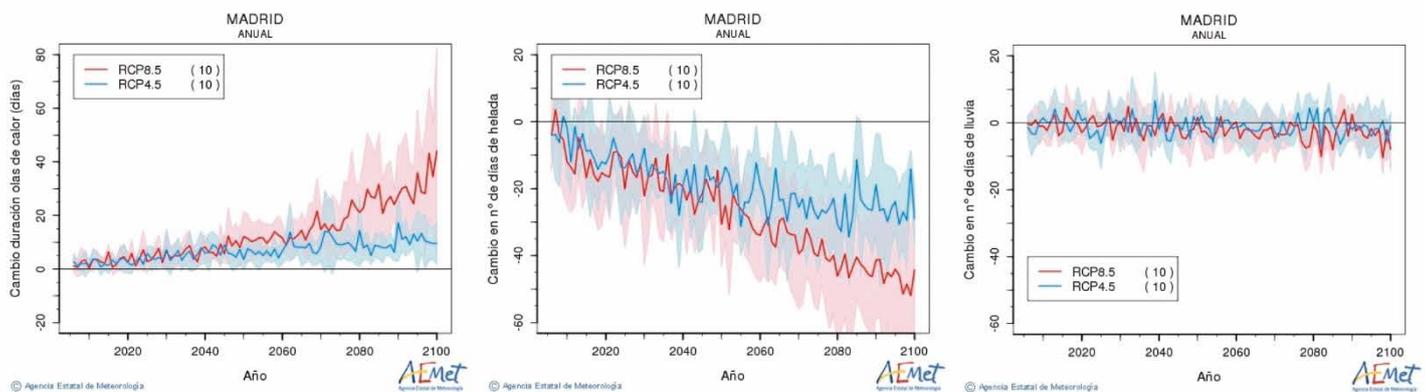
**GRAFICI DELLE PROIEZIONI DEL CAMBIAMENTO CLIMATICO - AR5-IPCC**  
**Metodo di Regionalizzazione Dinamica - Madrid**  
**Temperatura massima (°C)**



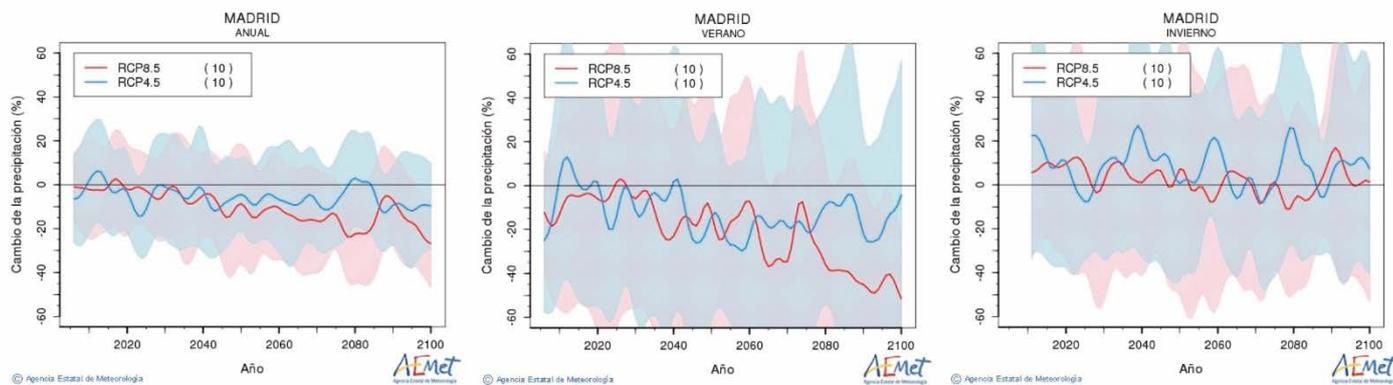
**GRAFICI DELLE PROIEZIONI DEL CAMBIAMENTO CLIMATICO - AR5-IPCC**  
**Metodo di Regionalizzazione Dinamica - Madrid**  
**Temperatura minima (°C)**



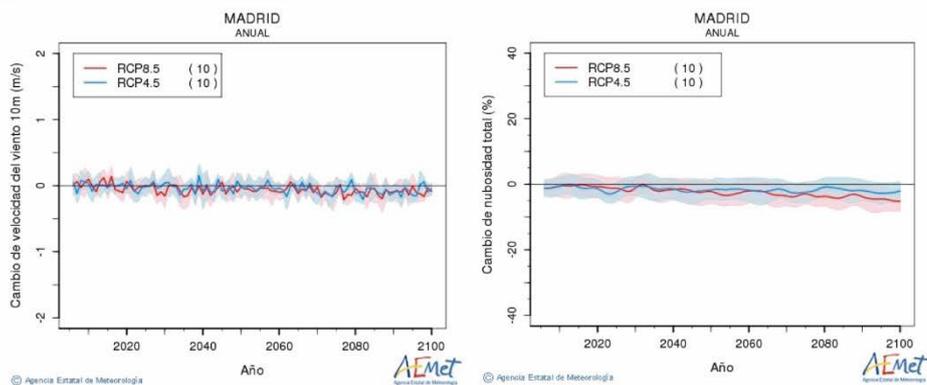
**GRAFICI DELLE PROIEZIONI DEL CAMBIAMENTO CLIMATICO - AR5-IPCC**  
**Metodo di Regionalizzazione Dinamica - Madrid**  
**Durata dei fenomeni (giorni)**



**GRAFICI DELLE PROIEZIONI DEL CAMBIAMENTO CLIMATICO - AR5-IPCC**  
**Metodo di Regionalizzazione Dinamica - Madrid**  
**Precipitazioni (%)**



**GRAFICI DELLE PROIEZIONI DEL CAMBIAMENTO CLIMATICO - AR5-IPCC**  
**Metodo di Regionalizzazione Dinamica - Madrid**  
**Velocità vento (m/s) , Nuvolosità (%)**



**Fig. 5.1:** Grafici delle proiezioni dei cambiamenti climatici della città di Madrid.

Metodo di regionalizzazione dinamica.

**Fonte:** [www.aemet.es](http://www.aemet.es)

Sulla base dei grafici delle proiezioni del cambiamento climatico, è stata elaborata una tabella riassuntiva di tutti i dati, nella quale vengono considerati i due scenari di concentrazione di inquinanti, rappresentando anche la forza radiativa totale approssimata con un periodo di riferimento considerato nell'anno 1750:

- RCP 4.5, rappresenta uno scenario di stabilizzazione nell'anno 2100, di emissioni 538 GtCO<sub>2</sub>, e forza radiativa di 4.5 w/m<sup>2</sup>.
- RCP 8.5, rappresenta uno scenario di elevate emissioni di gas serra, di emissioni 936 GtCO<sub>2</sub>, e forza radiativa di 8.5 w/m<sup>2</sup>.

La tabella rappresenta l'alterazioni degli elementi del clima in base a 3 periodi:

- breve termine, 2011-2040;
- medio termine, 2041-2070;
- lungo termine, 2071-2100.

PROIEZIONE DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI					
Cambiamenti climatici	Periodo di riferimento	Scenario	Proiezione a breve termine (2011-2040)	Proiezione a medio termine (2041-2070)	Proiezione a lungo termine (2071-2100)
CO2 nell'aria (GtCO2)	1750	RCP 4.5	-	-	Incremento di <b>538 GtCO2</b>
		RCP 8.5	-	-	Incremento di <b>936 GtCO2</b>
Temperatura massima annuale (°C)	1961-1990	RCP 4.5	Incremento medio di <b>1 °C</b>	Incremento medio di <b>1.4 °C</b>	Incremento medio di <b>1.475 °C</b>
		RCP 8.5	Incremento medio di <b>1.13 °C</b>	Incremento medio di <b>2.15 °C</b>	Incremento medio di <b>3.2 °C</b>
Temperatura massima d'estate (°C)	1961-1990	RCP 4.5	Incremento medio di <b>1.9 °C</b>	Incremento medio di <b>2 °C</b>	Incremento medio di <b>2.35 °C</b>
		RCP 8.5	Incremento medio di <b>1.575 °C</b>	Incremento medio di <b>2.8 °C</b>	Incremento medio di <b>4.15 °C</b>
Temperatura massima d'inverno (°C)	1961-1990	RCP 4.5	Incremento medio di <b>1.325 °C</b>	Incremento medio di <b>1.6 °C</b>	Incremento medio di <b>1.75 °C</b>
		RCP 8.5	Incremento medio di <b>1.55 °C</b>	Incremento medio di <b>2.05 °C</b>	Incremento medio di <b>2.95 °C</b>
Durata delle ondate di caldo (giorni)	1961-1990	RCP 4.5	Incremento medio di <b>3 giorni</b>	Incremento medio di <b>6.5 giorni</b>	Incremento medio di <b>9 giorni</b>
		RCP 8.5	Incremento medio di <b>4 giorni</b>	Incremento medio di <b>11 giorni</b>	Incremento medio di <b>22 giorni</b>
Temperatura minima annuale (°C)	1961-1990	RCP 4.5	Incremento medio di <b>0.95 °C</b>	Incremento medio di <b>1.2 °C</b>	Incremento medio di <b>1.25 °C</b>
		RCP 8.5	Incremento medio di <b>1 °C</b>	Incremento medio di <b>1.8 °C</b>	Incremento medio di <b>2.75 °C</b>
Temperatura minima d'estate (°C)	1961-1990	RCP 4.5	Incremento medio di <b>1.45 °C</b>	Incremento medio di <b>1.55 °C</b>	Incremento medio di <b>1.8 °C</b>
		RCP 8.5	Incremento medio di <b>1.05 °C</b>	Incremento medio di <b>2.4 °C</b>	Incremento medio di <b>3.65 °C</b>
Temperatura minima d'inverno (°C)	1961-1990	RCP 4.5	Incremento medio di <b>0.675 °C</b>	Incremento medio di <b>0.95 °C</b>	Incremento medio di <b>1.075 °C</b>
		RCP 8.5	Incremento medio di <b>0.95 °C</b>	Incremento medio di <b>1.5 °C</b>	Incremento medio di <b>2.35 °C</b>
Durata delle ondate di freddo (giorni)	1961-1990	RCP 4.5	Riduzione media di <b>15 giorni</b>	Riduzione media di <b>16.5 giorni</b>	Riduzione media di <b>19 giorni</b>
		RCP 8.5	Riduzione media di <b>13 giorni</b>	Riduzione media di <b>19.5 giorni</b>	Riduzione media di <b>28 giorni</b>

Cambiamenti climatici		Periodo di riferimento	Scenario	Proiezione a breve termine (2011-2040)	Proiezione a medio termine (2041-2070)	Proiezione a lungo termine (2071-2100)
Precipitazioni annuale (%)	1961-1990	RCP 8.5	Riduzione media di <b>5.75 %</b>	Riduzione media di <b>8.75 %</b>	Riduzione media di <b>14.75 %</b>	
Precipitazioni d'estate (%)	1961-1990	RCP 4.5	Riduzione media di <b>18.75 %</b>	Riduzione media di <b>21.25 %</b>	Riduzione media di <b>19.25 %</b>	
		RCP 8.5	Riduzione media di <b>14.5 %</b>	Riduzione media di <b>20.5 %</b>	Riduzione media di <b>27.5 %</b>	
Precipitazioni d'inverno (%)	1961-1990	RCP 4.5	Incremento medio di <b>16.5 %</b>	Incremento medio di <b>14 %</b>	Incremento medio di <b>16.5 %</b>	
		RCP 8.5	Incremento medio di <b>8.5 %</b>	Incremento medio di <b>5 %</b>	Incremento medio di <b>10 %</b>	
Durata della pioggia (giorni)	1961-1990	RCP 4.5	Riduzione media di <b>6 giorni</b>	Riduzione media di <b>4.25 giorni</b>	Riduzione media di <b>5.25 giorni</b>	
		RCP 8.5	Riduzione media di <b>5 giorni</b>	Riduzione media di <b>3.75 giorni</b>	Riduzione media di <b>4.5 giorni</b>	
Velocità del vento (m/s)	1961-1990	RCP 4.5	Riduzione media di <b>0.175 m/s</b>	Riduzione media di <b>0.2 m/s</b>	Riduzione media di <b>0.175 m/s</b>	
		RCP 8.5	Riduzione media di <b>0.25 m/s</b>	Riduzione media di <b>0.15 m/s</b>	Riduzione media di <b>0.25 m/s</b>	
Nuvolosità (%)	1961-1990	RCP 4.5	Riduzione media di <b>1.5 %</b>	Riduzione media di <b>1 %</b>	Riduzione media di <b>1.5 %</b>	
		RCP 8.5	Riduzione media di <b>1.25 %</b>	Riduzione media di <b>2 %</b>	Riduzione media di <b>2.5 %</b>	

**Tabella 5.1:** Quadro di Proiezioni del cambiamento climatico della città di Madrid

**Fonte:** Modello di riferimento: Green Building and Climate Resilience: Understanding impacts and preparing for changing conditions.

**Dati:** <http://www.aemet.es> (Agenzia Meteorologica Statale)

Le tabelle realizzate rappresentano più concretamente i rispettivi dati delle alterazioni degli elementi, laddove si evidenziano dell'alterazioni sempre più forti ed intense rispetto ai periodi precedenti.

La maggiore differenza tra gli scenari viene dimostrata mediante la concentrazione degli inquinanti di ogni RCP, laddove il RCP 8.5 (936 GtCO<sub>2</sub>) è di circa il doppio rispetto a quello 4.5 (538 GtCO<sub>2</sub>), da questo punto si riconosce che ci sarà una differenza considerata tra gli impatti che possono essere generati. Un esempio della stagione estiva (considerata come la stagione più importante in questa ricerca), in quanto all'incremento delle temperature massime, è che i primi due periodi (breve termine e medio termine) presentano differenze minori al 1°C, invece, nell'ultimo periodo lo scenario maggiore è circa il doppio rispetto a quello minore. In quest'ottica, si deve evidenziare anche che sono stati previsti degli incrementi di giorni di ondate di caldo, le quali partono dai 3 giorni fino ai 9 giorni nello scenario minore, da un'altra parte, quello maggiore parte dai 4 giorni fino ai 22 giorni nei diversi periodi temporali.

In questo modo si deve anche menzionare che, nella linea di città di clima caldo e secco, viene ancora intensificata la siccità nella stagione estiva, laddove si evidenzia una tendenza di riduzione della precipitazione che incrementa in ogni periodo, partendo dal 18.75%, si innalza nel secondo periodo del 21.25% e finalmente viene stabilizzata al 19.25% nello scenario 4.5. Le più intense previsioni sono dimostrate nello scenario di 8.5, laddove parte con un 14.5% e viene ancora incrementata la riduzione delle precipitazioni fino ad arrivare ai 27.5%.

Nello steso modo è stato previsto una riduzione della percentuale di nuvolosità, la quale consentirà ad una maggiore incidenza diretta della radiazione solare (la quale è più intensa rispetto a quella diffusa che viene filtrata dalle nuvole), incrementando la riduzione dal 1.5% nello scenario minore, e fino al 2.5% nello scenario maggiore.

Dunque, le analisi scientifiche realizzate dall'IPCC contribuiscono alla comprensione degli effetti generati dal nostro stile di vita, ed ha l'obiettivo di sensibilizzare la società del fatto che le nostre azioni possono comportare impatti progressivi i quali possibilmente arrivino ad un punto nel quale non sarà possibile controllarli. Con questa base si evidenzia che devono essere rispettate tutte le misure proposte dai riferimenti di incentivi per evitare di raggiungere gli allarmanti livelli delle proiezioni.

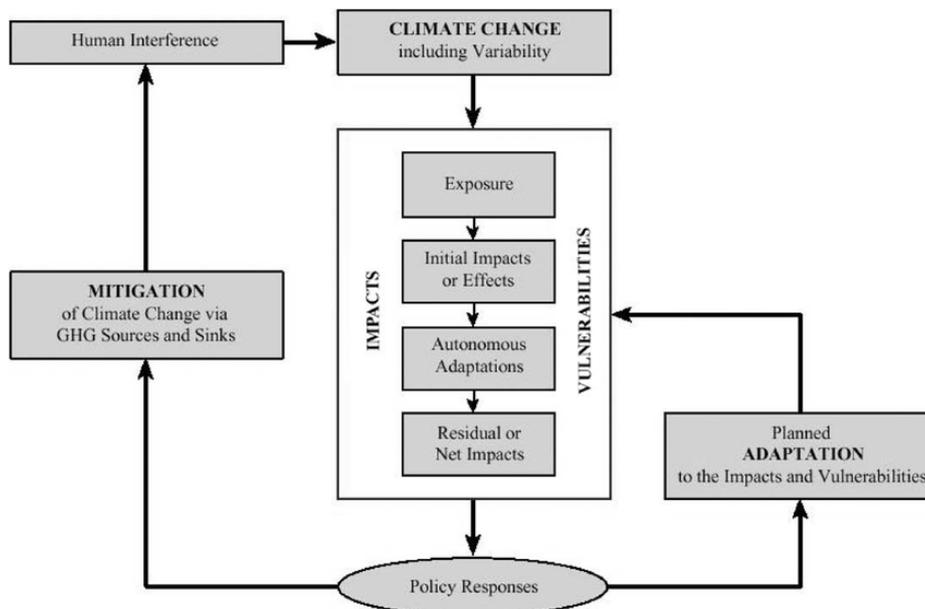
### 5.2.1 Valutazione delle proiezioni di cambiamento climatico – Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (PNACC)

I cambiamenti climatici degli ultimi decenni hanno portato alla necessità di prendere misure per rimediare le alterazioni generate maggiormente dalle attività antropogeniche. La nuova sfida di progettare in modo responsabile ha le sue basi sulle proiezioni dei cambiamenti climatici. L'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) è la principale istituzione scientifica che prevede il futuro delle condizioni climatiche, mediante valutazioni periodiche che portano alle proiezioni di diversi scenari climatici sulla base delle attività che saranno sviluppate nei prossimi anni (di maggiori o minori emissioni di GHG all'atmosfera).

In questo modo, il lavoro dell'IPCC genera le basi sulle quali devono progettare i professionisti nelle diverse aree di sviluppo, lavorando in quest'ottica con i processi e le tecnologie inclinate alla mitigazione e all'adattamento nella ricerca di stabilizzare le alterazioni causate. Il terzo report di valutazione dell'IPCC (2001), stabilisce che *l'adattamento è una strategia necessaria in tutte le scale per complementare gli sforzi della mitigazione del cambiamento climatico. Si ambos elementos se utilizan de forma conjunta, pueden ayudar a alcanzar los objetivos del desarrollo sostenible*<sup>5</sup>.

---

5 Prentice IC, Farquhar GD, Fasham MJR, Goulden ML, Heimann M, Jaramillo VJ, Keshgi HS, Le Quéré C, Scholes RJ, W. D. (2001). The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 881. <https://doi.org/10.1256/004316502320517344>



**Fig. 5.2:** Mitigation and adaptation strategies

**Fonte:** The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*

Lo schema precedente (**figura 5.2**), stabilito dal terzo report IPCC 2001, dimostra la vulnerabilità sotto i cambiamenti climatici in assenza dei piani che rimediassero i suoi effetti, evidenziando in questo modo la necessità di proporre delle misure di adattamento e di mitigazione, laddove le politiche di adattamento siano indirizzate alla minimizzazione degli impatti causati, e le politiche di mitigazione alla riduzione della possibilità di generazione di futuri impatti.

Ci sono numerosi trattati e conferenze internazionali, regionali e local che hanno l'obiettivo di incentivare ed indirizzare le vie di sviluppo sostenibile conveniente secondo ogni area. Una di quelle è la Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UNFCCC), la quale ha la funzione di sviluppare piani per la stabilizzazione delle concentrazioni di GHG nell'atmosfera, mediante la prevenzione di sviluppo di attività antropogeniche pericolose per il sistema climatico.

Successivamente, è stato sviluppato il *Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici – Spagna* (PNACC), il quale ha preso come riferimento il CMNUCC, ed ha l'obiettivo di indirizzare e promuovere le azioni davanti ai cambiamenti climatici e i possibili rischi che vengano fuori da loro nel contesto spagnolo. In questo modo, definisce le linee di azioni di ogni settore per l'adattamento e sviluppi sostenibili rispetto al cambiamento climatico, mediante la realizzazione di un'analisi del grado di

vulnerabilità, gli impatti e l'adattamento che incidono in ogni settore, in base alle proiezioni di cambiamento climatico. La stima determinata dell'orizzonte temporale nel settore di costruzione stabilita dal PNACC, è di 5-50 anni.

Tuttavia, l'indirizzo di sviluppo sostenibile di tutti i settori è soggetto alle politiche di mitigazione, le quali stabiliscono che devono essere rispettati i limiti del riscaldamento globale di evitare superare i 2°C rispetto ai livelli preindustriali.

Gli obiettivi specifici del PNACC considerati nel lavoro di ricerca sono <sup>6</sup>:

- definire i futuri scenari di cambiamento climatico regionali per la geografia spagnola;
- identificare il grado di vulnerabilità e definire gli impatti (rischi) del cambiamento climatico;
- definire le misure di adattamento al cambiamento climatico del sistema in Spagna.

Il primo obiettivo ha la finalità di interpretare i potenziali scenari regionali futuri di cambiamento climatico mediante lo studio dei report di proiezioni dell'IPCC, con il fine di raggiungere una integrazione efficace dell'adattamento al cambiamento climatico. Posteriormente si deve identificare il grado della vulnerabilità attuale, successivamente si realizza la valutazione dei potenziali impatti (rischi) di cui sarebbe opportuno adattarsi, e concludere con la formulazione di strategie di adattamento del settore corrispondente.

---

6 OECC. (2006). Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático, 59.

Lo strumento del PNACC definisce le misure per le valutazioni degli impatti, vulnerabilità e adattamento relativi al settore di costruzione mediante:

“En la edificación, el conocimiento de los datos climáticos relacionados con el viento, la lluvia la nieve, la temperatura y humedad del aire, la radiación solar, las descargas eléctricas, etc., resulta necesario tanto para la elaboración de la normativa técnica sobre edificación como para una adecuada realización de los proyectos que considere la situación climática de la localidad donde se ubican los edificios.

En la edificación, la repercusión de los cambios climáticos conlleva nuevas necesidades para atender los aspectos de habitabilidad de los edificios, que requieren instalaciones de climatización y ventilación que, a su vez, repercuten sobre el microclima de la localidad.” (OECC, 2006)

Le linee del lavoro del settore di costruzione contemplate dal PNACC sono <sup>6</sup>:

Sviluppo si studi che permettano l'elaborazione di norme che conducano ad approfittare le condizioni climatiche proiettate nei settori di urbanística e costruzione;

- Sviluppo e promozione della biocostruzione, specialmente negli edifici pubblici;
- Valutazione dei bisogni delle specie e varietà vegetali di parchi e giardini sotto distinti scenari di cambiamento climatico.

Per una comprensione più approfondita della metodologia, saranno dettagliati ogni obiettivo per l'interpretazione delle proiezioni di cambiamento climatico, secondo la struttura stabilita dal PNACC precedentemente citata.

L'analisi di proiezione del cambiamento climatico stimato per la città di Madrid viene utilizzata come uno strumento base per distinguere delle alterazioni degli elementi climatici e sulle quali vengono realizzate le valutazioni di impatti, vulnerabilità e le misure di adattamento come specificato dalle politiche di progettazione.

### Vulnerabilità

---

Il PNACC definisce la vulnerabilità come il grado nel quale un sistema è capace di affrontare gli effetti avversi del cambiamento climatico, la variabilità e gli eventi estremi. Vuol dire che la vulnerabilità dei sistemi si determina in base allo stato attuale, laddove quelli che non siano preparati per la variabilità climática, saranno quelli che soffriranno maggiori alterazioni.

Vulnerabilità = Impatti climatici avversi – Adattamento <sup>6</sup>.

Da un'altra parte, il IPCC commenta che la vulnerabilità di alcuni sistemi parte anche dal limitato accesso alla tecnologia.

Nel presente studio delle proiezioni di cambiamento climatico, la vulnerabilità è determinata in base alla variabilità di ogni elemento del clima ed il grado nel quale possa alterare i sistemi che non siano adeguati per future variazioni climatiche.

## Impatti

---

Definiti per il PNACC come gli effetti o conseguenze del cambiamento climatico sul sistema. Detto di un'altra forma, sono le interazioni complesse tra il clima che cambia e le vulnerabilità del sistema esposto.

L'intensità degli impatti climatici è soggetta alla quantità di rilasci di emissioni di gas ad effetto serra. Maggiori sono le emissioni di gas ad effetto serra, più severi e durevoli saranno gli impatti di cambiamento climatico.

Gli impatti generati dalla variabilità dei componenti del clima, ed hanno la possibilità di ripercussione nei sistemi di coperture, saranno valutati in base al grado di alterazione e posteriormente saranno definite le possibili conseguenze.

## Misure di adattamento

---

Gli scenari di proiezione di cambiamento climatico stabiliti per l'IPCC conducono alla necessità di proporre delle strategie per rimediare i possibili effetti avversi sull'ambiente urbano. Tra le quali, l'adattamento è direttamente correlata al luogo.

Una prima misura di adattamento alle future condizioni del clima consiste in ridurre la vulnerabilità e l'esposizione alla variabilità climatica attuale. Elevate emissioni di gas ad effetto serra possono comportare ad effetti avversi irreversibili, per quanto le misure di adattamento devono comprendere tutte le variabili dei componenti del clima e la loro intensità.

Per proporre le strategie per i futuri interventi sui sistemi di copertura, che siano in grado di supportare le alterazioni del clima e che parallelamente contribuiscano alla stabilizzazione e riduzione degli effetti microclimaici avversi, di seguito sono presentate le misure di adattamento basate sulle letterature:

#### *Innalzamento della temperatura massima e della temperatura minima*

Si considera che per abbassare le temperature dell'aria devono essere trattati grandi quantità di volume d'aria (Dessi, V. 2007), un modo per arrivare a questo obiettivo è quello di promuovere la realizzazione degli interventi con il fine di controllare i comportamenti della più vasta area possibile per ottenere questa meta.

Il contributo che possono fornire i materiali alla riduzione delle temperature è definito dai bilanci energetici. A questo punto, si inserisce il concetto di *temperatura dell'aria in prossimità delle superfici*, anche chiamato come *near-surface air temperature*, e si riferisce alle temperature vicine alle superfici le quali vengono alterate per l'innalzamento della temperatura superficiale dei materiali dovuto al contatto, e di conseguenza viene anche alterata la temperatura atmosferica (livelli più alti rispetto alle precedenti).

Il raffrescamento diretto dell'aria quindi, si ottiene riducendo la temperatura superficiale dei materiali, che si ottiene mediante il controllo della radiazione infrarossa con l'impiego di materiali altamente riflettenti, evitando in questo modo l'incremento delle temperature superficiale dei materiali, ed anche un futuro rilascio dell'energia assorbita.

Un'altra misura di adattamento è quella mediante il processo di evapotraspirazione ottenuto dai sistemi vegetali, i flussi di calore latente si fa dall'assorbimento di calore dall'aria e successivamente si realizza il cambiamento di fase dell'acqua da liquido a vapore, ottenendo come risultato sia aria più fresca che più umida.

### *Diminuzione delle precipitazioni*

La diminuzione delle precipitazioni nella stagione più la condizione di clima caldo comporta la considerazione dei materiali che non dipendano dalla presenza d'acqua per contribuire al microclima urbano, in questo caso sarebbe opportuno l'impiego dei materiali di bassi flussi di calore sensibile, cercando di evitare il trasferimento di calore delle superfici con l'ambiente date le condizioni di clima secco e caldo. Le stagioni invernali invece, prevedono l'incremento massimo del 16,5% delle precipitazioni, lo che comporta ad una prevenzione di deflusso delle acque che può essere assunta con l'utilizzo di coperture vegetali con appositi sistemi di raccolta e di coinvolgere le acque in un serbatoio per il suo posteriore utilizzo.

### *Riduzione della velocità del vento*

Uno studio di Imran, H. M., Kala, J., Ng, A. W. M., & Muthukumar, S. (2018), ha valutato le prestazioni della tipologia di copertura vegetale e verde sotto l'elemento del vento come parte di una delle strategie per la mitigazione, e hanno dimostrato che presentano venti verticali positivi, comportando ad una riduzione delle temperature d'aria nello strato superiore allo strato urbano, tramite il meccanismo dei *convective rolls*, il quale è capace di portare i flussi energetici dalla superficie ai livelli più alti. In questo caso, è stato confermato che il sistema di copertura fredda incrementa la velocità del vento da 0,50 -1,0 m s<sup>-1</sup>.

I flussi d'aria contribuiscono alla riduzione delle temperature superficiali dei materiali mediante la stimolazione di trasferimento di calore, con il fine di arrivare ad un equilibrio tra la temperatura superficiale e la temperatura atmosferica (influisce anche il coefficiente di convezione dei materiali). De esta manera, para evitar que este elemento contribuya sea en las zonas que coinciden con la dirección del viento que aquellas opuestas, se debe considerar la dirección del viento en la ciudad de Madrid, con el objetivo de fomentar la presencia de flujos de aire en las zonas menos privilegiadas (calles perpendiculares a la dirección del viento y edificios de bajos niveles con respecto a la media de un isolato) para proponer soluciones que estimulen el flujo de aire.

Anche se il sistema di coperture considerati hanno delle limitazioni di intervento che promuovono i flussi d'aria, è valido dire che i frangiventi sono gli elementi più efficienti per l'incremento della velocità del vento, sulle quali devono essere considerate le caratteristiche di dimensione, collocazione nello spazio, l'orientamento, la porosità e la vicinanza. Quello più efficiente in questo caso è la vegetazione, che non solo promuove i flussi d'aria, ma anche ha la possibilità di controllare la direzione e l'intensità.

### *Diminuzione della nuvolosità*

Le coperture, intese come gli elementi orizzontali degli edifici, sono quelle superfici che hanno la maggiore esposizione alla radiazione solare diretta e diffusa. La radiazione che proviene direttamente dal sole, quella diretta caratterizzata da maggiore intensità, può essere trasformata in radiazione riflessa quando è intercettata dalle nuvole.

C'è da considerare l'importanza dell'esposizione dei materiali ai raggi solari, Dessì, V. descrive,

*“I materiali esposti alla radiazione convertono la radiazione in calore che in parte si accumula e in parte viene riemessa (particolarmente di notte) in funzione delle caratteristiche fisiche dei materiali (conducibilità e capacità termica). Il calore riemesso aumenta la temperatura dell'ambiente sia di giorno che di notte e questo fenomeno (assieme al calore prodotto da metabolismo urbano) è definito isola di calore urbana.”*

Il fatto che le proiezioni prevedano una diminuzione della percentuale di nuvolosità, conduce alla maggiore incidenza della radiazione diretta sulle superfici, la quale può essere trattata con materiali altamente riflettivi, con la finalità di riflettere l'energia incidente sulle superficie, evitando in questo modo l'assorbimento e di conseguenza l'incremento di temperatura delle superfici.

Un'altra misura di adattamento è quella dell'impiego di coperture vegetali le quali ha un basso coefficiente di riflessione ma utilizzano l'energia incidente nei suoi processi naturali, e contribuisce anche alla stabilizzazione delle temperature superficiali con quelle in prossimità delle superfici.

## Temperatura massima

Cambiamenti climatici	Periodo di riferimento	Scenario	Proiezione a breve termine (2011-2040)	Proiezione a medio termine (2041-2070)	Proiezione a lungo termine (2071-2100)
Temperatura massima d'estate (°C)	1961-1990	RCP 4.5	Incremento medio di <b>1.9 °C</b>	Incremento medio di <b>2 °C</b>	Incremento medio di <b>2.35 °C</b>
		RCP 8.5	Incremento medio di <b>1.575 °C</b>	Incremento medio di <b>2.8 °C</b>	Incremento medio di <b>4.15 °C</b>
Durata delle ondate di caldo (giorni)	1961-1990	RCP 4.5	Incremento medio di <b>3 giorni</b>	Incremento medio di <b>6.5 giorni</b>	Incremento medio di <b>9 giorni</b>
		RCP 8.5	Incremento medio di <b>4 giorni</b>	Incremento medio di <b>11 giorni</b>	Incremento medio di <b>22 giorni</b>

### Vulnerabilità

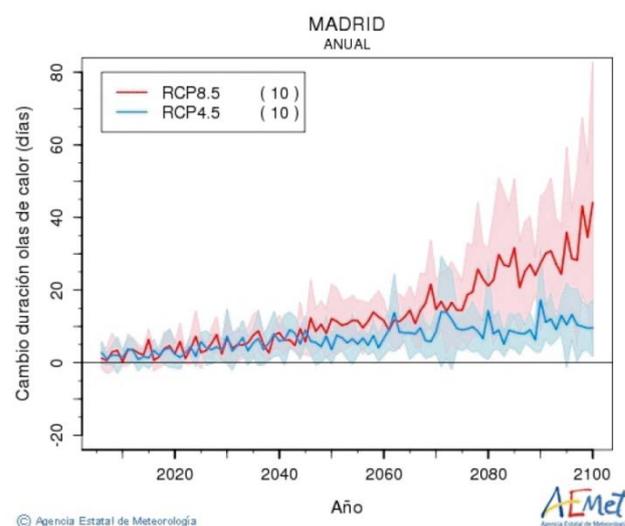
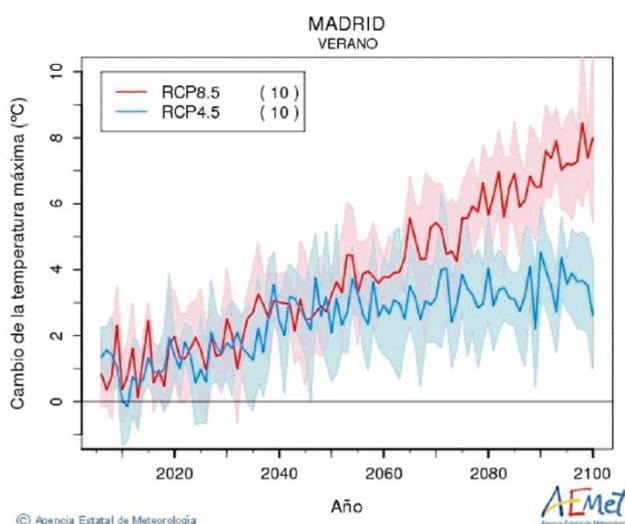
Il 73% dei materiali di rivestimento sulle coperture delle zone presentano bassi livelli di albedo (circa 50% coperture di tegole e circa 22% coperture di cemento o ghiaia). I materiali di bassa capacità termica rischiano ad elevare le sue temperature date l'allarmante proiezioni di alterazione termiche.

### Impatti

L'allarmante incremento delle temperaturas e la della frequenza delle ondate di caldo e con maggiore durata comportano all'incremento delle temperatura superficiali dei materiali, limitano il potenziale delle misure di adattamento e reduce il confort ambiental ed utilizzo degli spazi esterni. Incremento di consumo energetico per l'utilizzo dei climatizzatori negli spazi interni.

### Misure di adattamento

Nei sistemi vegetali, le piante hanno la capacità di assorbire il calore (circa l'80%), il quale viene utilizzato una parte per l'evapotraspirazione. Il raffrescamento diretto dell'aria si ottiene anche con la riduzione della temperatura superficiale dei materiali mediante l'uso di coperture fredde.



## Temperatura minima

Cambiamenti climatici	Periodo di riferimento	Scenario	Proiezione a breve termine (2011-2040)	Proiezione a medio termine (2041-2070)	Proiezione a lungo termine (2071-2100)
Temperatura minima d'estate (°C)	1961-1990	RCP 4.5	Incremento medio di <b>1.45 °C</b>	Incremento medio di <b>1.55 °C</b>	Incremento medio di <b>1.8 °C</b>
		RCP 8.5	Incremento medio di <b>1.05 °C</b>	Incremento medio di <b>2.4 °C</b>	Incremento medio di <b>3.65 °C</b>
Durata delle ondate di freddo (giorni)	1961-1990	RCP 4.5	Riduzione media di <b>15 giorni</b>	Riduzione media di <b>16.5 giorni</b>	Riduzione media di <b>19 giorni</b>
		RCP 8.5	Riduzione media di <b>13 giorni</b>	Riduzione media di <b>19.5 giorni</b>	Riduzione media di <b>28 giorni</b>

### Vulnerabilità

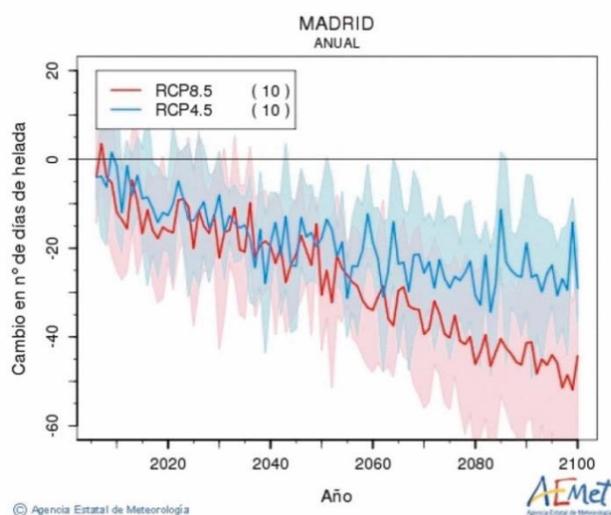
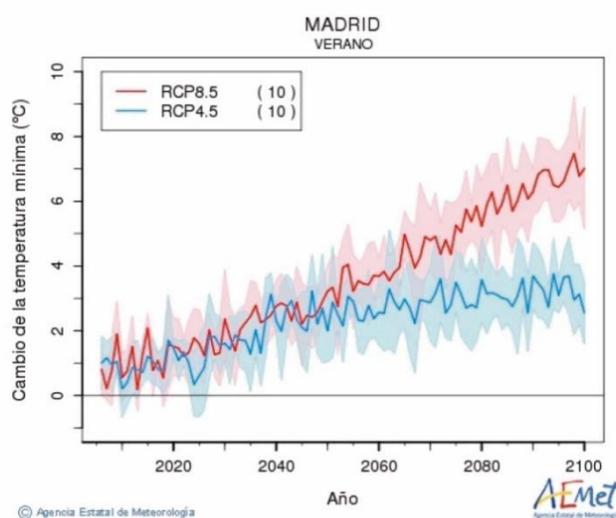
L'equilibrio tra la temperatura superficiale e la temperatura ambientale causata dal coefficiente di convezione non contribuirà all'aumento della temperatura del materiale, prolungando in questo modo le elevate temperature superficiali dovute all'elevazione delle temperature massime e minime.

### Impatti

L'aumento delle temperature minime in estate porta a temperature più elevate nelle prime ore del mattino e di notte, concepiti come periodi di temperature giornaliere più basse. Gli effetti maggiori si rifletteranno nelle ore notturne per la somma dell'aumento della temperatura minima e del calore emesso dai materiali senza misure di adattamento.

### Misure di adattamento

L'impiego di materiali con alti livelli di emissività e riflettività (albedo) impedirà l'emissione di calore nel periodo notturno, in modo tale che non sia unificato con l'incremento di temperature minime. L'utilizzo dei sistema vegetali contribuisce anche alla riduzione delle temperature.



## Precipitazioni

Cambiamenti climatici	Periodo di riferimento	Scenario	Proiezione a breve termine (2011-2040)	Proiezione a medio termine (2041-2070)	Proiezione a lungo termine (2071-2100)
Precipitazioni d'estate (%)	1961-1990	RCP 4.5	Riduzione media di <b>18.75 %</b>	Riduzione media di <b>21.25 %</b>	Riduzione media di <b>19.25 %</b>
		RCP 8.5	Riduzione media di <b>14.5 %</b>	Riduzione media di <b>20.5 %</b>	Riduzione media di <b>27.5 %</b>
Durata della pioggia (giorni)	1961-1990	RCP 4.5	Riduzione media di <b>6 giorni</b>	Riduzione media di <b>4.25 giorni</b>	Riduzione media di <b>5.25 giorni</b>
		RCP 8.5	Riduzione media di <b>5 giorni</b>	Riduzione media di <b>3.75 giorni</b>	Riduzione media di <b>4.5 giorni</b>

### Vulnerabilità

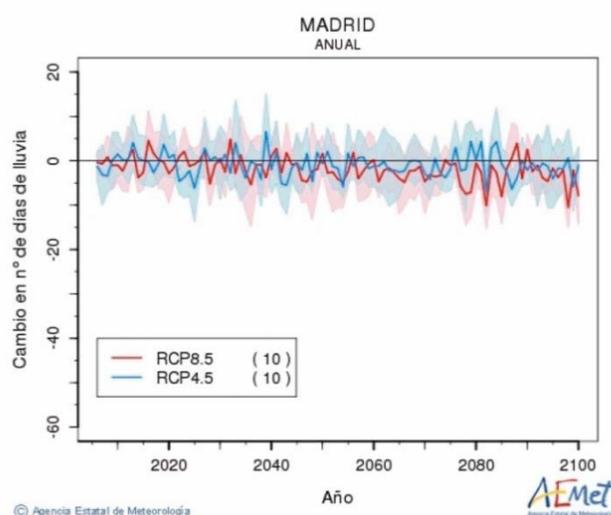
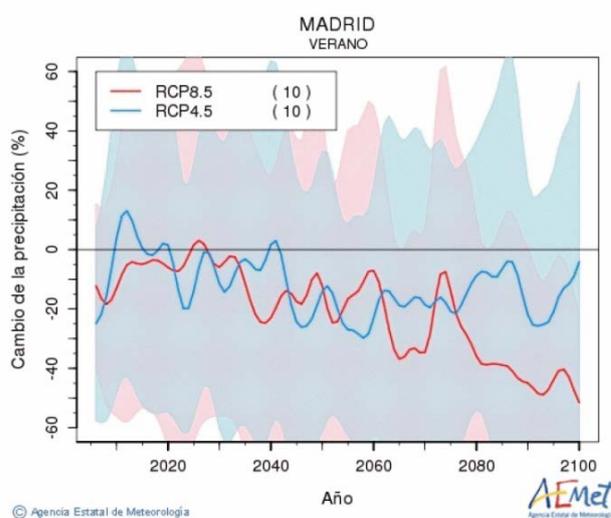
L'ambiente urbano dell'area di studio ha la superficie del tetto non permeabile più del 90%, sulla quale la presenza di acqua contribuisce alla diminuzione della sua temperatura.

### Impatti

La riduzione delle precipitazioni nel periodo estivo limita la capacità di riduzione della temperatura dei materiali attraverso il processo di evaporazione.

### Misure di adattamento

La diminuzione delle precipitazioni comporta alla considerazione dei materiali che non siano alterati per la scarsità d'acqua nel ambiente. Nei periodi invernali invece, i materiali permeabili sono appropriati per evitare il deflusso delle acque.



## Velocità del vento

Cambiamenti climatici	Periodo di riferimento	Scenario	Proiezione a breve termine (2011-2040)	Proiezione a medio termine (2041-2070)	Proiezione a lungo termine (2071-2100)
Velocità del vento (m/s)	1961-1990	RCP 4.5	Riduzione media di <b>0.175 m/s</b>	Riduzione media di <b>0.2 m/s</b>	Riduzione media di <b>0.175 m/s</b>
		RCP 8.5	Riduzione media di <b>0.25 m/s</b>	Riduzione media di <b>0.15 m/s</b>	Riduzione media di <b>0.25 m/s</b>

### Vulnerabilità

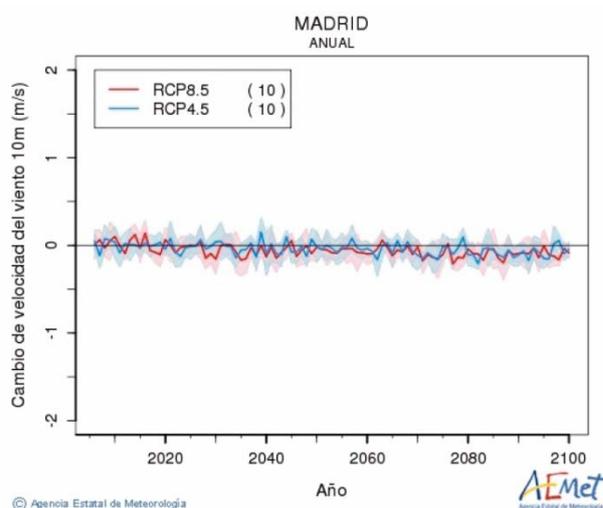
L'assenza di elementi che influenzino l'interazione del vento e dei sistemi di copertura eviterà la presenza di questo elemento del clima sulle superfici degli edifici, che promuove la riduzione della temperatura attraverso la convezione.

### Impatti

La riduzione della velocità del vento non consente la rimozione dell'aria calda verso la mancanza di flussi d'aria. Eviterà inoltre l'azione della convezione sui materiali permeabili (generata dalla velocità del vento), che contribuisce alla riduzione della temperatura nei materiali porosi.

### Misure di adattamento

L'incentivo di flussi d'aria diminuisce la temperatura atmosferica, le coperture fredde incrementano la velocità del vento da 0,50 - 1.0 m s<sup>-1</sup>. Le piante modificano sia la velocità che la direzione del vento, devono essere considerati però le variabili urbane. Promuovere i flussi d'aria nelle zone meno privilegiate (strade perpendicolari alla direzione del vento e coperture di altezza minima)



## Nuvolosità

Cambiamenti climatici	Periodo di riferimento	Scenario	Proiezione a breve termine (2011-2040)	Proiezione a medio termine (2041-2070)	Proiezione a lungo termine (2071-2100)
Nuvolosità (%)	1961-1990	RCP 4.5	Riduzione media di <b>1.5 %</b>	Riduzione media di <b>1 %</b>	Riduzione media di <b>1.5 %</b>
		RCP 8.5	Riduzione media di <b>1.25 %</b>	Riduzione media di <b>2 %</b>	Riduzione media di <b>2.5 %</b>

## Vulnerabilità

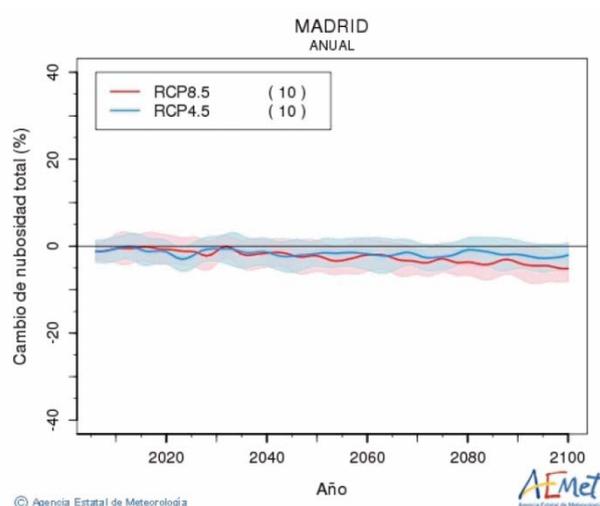
I materiali valutati nell'area mancano di parametri che contribuiscano alla riflettività della radiazione solare, la quale sarà intensa a causa della riduzione della percentuale di nuvolosità.

## Impatti

I sistemi di copertura saranno più inclini all'incidenza diretta della radiazione solare, che porta all'elevazione delle temperature superficiali.

## Misure di adattamento

I materiali con elevati livelli di riflettività evitano l'assorbimento dell'energia solare che incidono con maggiore intensità con la diminuzione della nuvolosità.

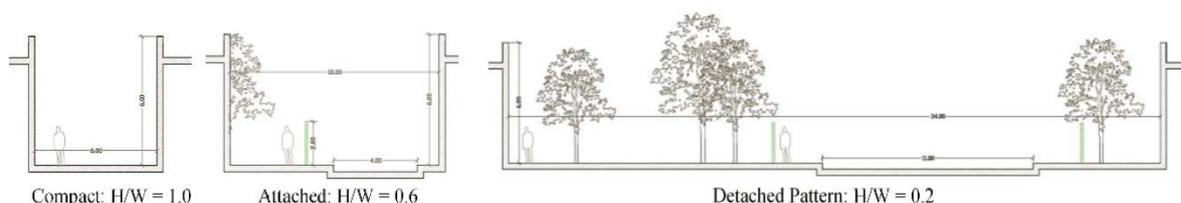


### 5.3 Studio di configurazione urbana

Il ruolo del sistema morfologico nella valutazione del fenomeno dell'isola di calore urbana è di rilevante importanza, dato che le variabili della configurazione urbana (densità urbana), i materiali delle superfici che conformano la città, i rapporti tra lo spazio costruito e lo spazio aperto (strade, piazze e pachi) e le sorgenti di inquinamento a causa delle attività (flussi di traffico, destinazione d'uso) influiscono nel microclima all'interno delle città.

Uno studio dell'impatto della configurazione urbana sull'isola di calore ha rivelato che le città dense possono generare impatti significativi nell'isola di calore urbana data l'esposizione di maggiori superfici che possono essere alterate in base all'incidenza degli elementi del clima, tra i quali la più importante è la radiazione solare. La geometria delle città invece, può influenzare nella velocità dei flussi d'aria dato che la posizione ed orientamento degli edifici possono bloccare la loro circolazione, evitando in questo modo il raffrescamento dell'aria. In questo modo, la rappresentazione della geometria si ottiene mediante il rapporto dell'altezza degli edifici (H), e la larghezza delle strade (W), pertanto, il risultato si ottiene dal rapporto  $H/W$  <sup>7</sup>.

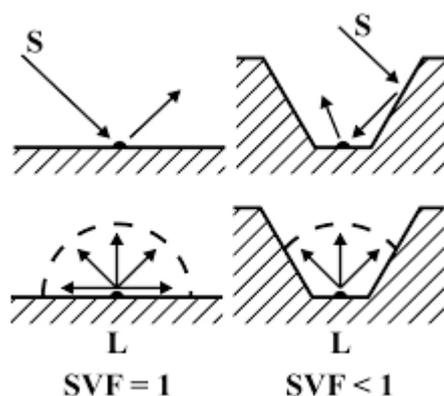
Un altro apporto dello studio precedentemente citato in quanto al rapporto di  $H/W$  (**figura 5.3**), è stato la dimostrazione che le zone con dei minori valori (di strade più larghe ed edifici più bassi) sono più esposte e di conseguenza hanno maggiore incidenza solare, comportando a maggiori temperature superficiale della strada. Invece, le strade di maggiori valori del rapporto  $H/W$  (strade più strette e edifici più alti) presentano minori temperature, data la limitazione dell'incidenza solare sulle strade grazie alle altezze degli edifici.



**Fig. 5.3:** Proporzione  $H/W$  delle sezioni stradali

7 Alobaydi, D., Bakarman, M. A., & Obeidat, B. (2016). The Impact of Urban Form Configuration on the Urban Heat Island: The Case Study of Baghdad, Iraq. *Procedia Engineering*, 145, 820–827. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.107>

Un altro aspetto molto importante nella generazione dell'isola di calore urbana è lo Sky View Factor (SVF) (**figura 5.4**), il quale consiste nella misurazione della vista al cielo dall'interno di uno spazio urbano (Dessì, V., 2015), oppure, la proporzione della visibilità del cielo da un punto nello spazio urbano (Hu, Y., White, M., & Ding, W., 2016), il che di conseguenza relaziona la forma urbana con l'isola di calore. I valori variano da 0-1, laddove quelli più bassi corrispondono a minore apertura al cielo da una strada o una piazza, i quali comportano a maggiore concentrazione di calore nell'aria, aumentando il fenomeno dell'isola di calore. Contrariamente, quelli con valori maggiori implicano migliore visibilità al cielo e temperature più basse <sup>8</sup>.



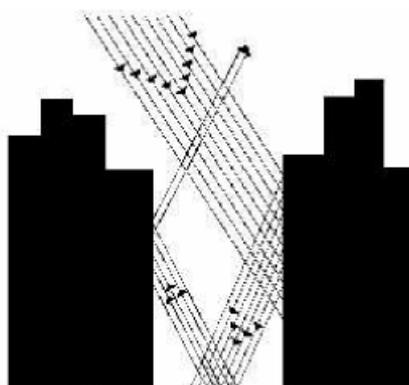
**Fig. 5.4:** Rappresentazione grafica del Sky View Factor con i riferimenti dei valori.

Si comprende quindi che la relazione tra la configurazione urbana ed il cielo è un aspetto molto importante nella manifestazione del fenomeno, intendendo il cielo come un pozzo termico caratterizzato di temperature più basse rispetto a quelle della massa urbana <sup>9</sup>. In quest'ottica, sono diversi gli studi i quali hanno dimostrato che all'interno della massa urbana densa il fenomeno è più intenso, sia per la geometria che per il fatto della presenza di materiali di proprietà non performanti, i quali sono considerati come un altro aspetto chiave nella generazione del fenomeno, dato che essi hanno la capacità di controllare l'effetto nell'ambiente urbano mediante le loro proprietà energetiche.

8 Hu, Y., White, M., & Ding, W. (2016). An Urban Form Experiment on Urban Heat Island Effect in High Density Area. *Procedia Engineering*, 169, 166–174. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.10.020>

9 Dessì, V. (2007). Progettare il comfort urbano. Soluzione per un'integrazione tra società e territorio. *Architettura sostenibile*. 280 p., ill.

L'effetto della configurazione urbana densa o del canyon urbano è che la geometria ha la capacità di limitare o nel caso contrario intensificare gli effetti degli elementi climatici in diversi modi, in questo senso, Sottana, M., (2012) argomenta che le quantità di superfici esposte aumentano, le diverse superfici interagiscono tra di loro mediante gli scambi energetici che in base alle proprietà dei materiali possono rimanere all'interno del canyon urbano, ed anche può alterare l'influenza degli elementi climatici incidenti, tale è il caso della radiazione solare, la quale tende ad essere assorbita dai materiali urbani (con elevati valori di capacità termica), oppure limitando la contribuzione del vento di raffreddamento dell'aria (data la limitazione dalle geometrie) <sup>10</sup>.



**Fig. 5.5:** Il ruolo delle proprietà radiative all'interno del canyon urbano

Di conseguenza a tutto ciò studiato, si evidenzia che sono di rilevante importanza i materiali che configurano lo spazio urbano nella generazione del fenomeno dell'isola di calore, dato che, come recentemente menzionato, le loro proprietà determina la capacità di assorbire o riflettere la radiazione solare, che, nel caso in cui venga assorbita, viene successivamente convertita in calore e riemessa all'atmosfera nei periodi notturni, che di conseguenza incrementano le temperature atmosferiche, generando in questo modo il fenomeno d'isola di calore urbana. Questo argomento trattato dei materiali verrà più dettagliato nei capitoli successivi nel quale vengono esplicate ogni proprietà.

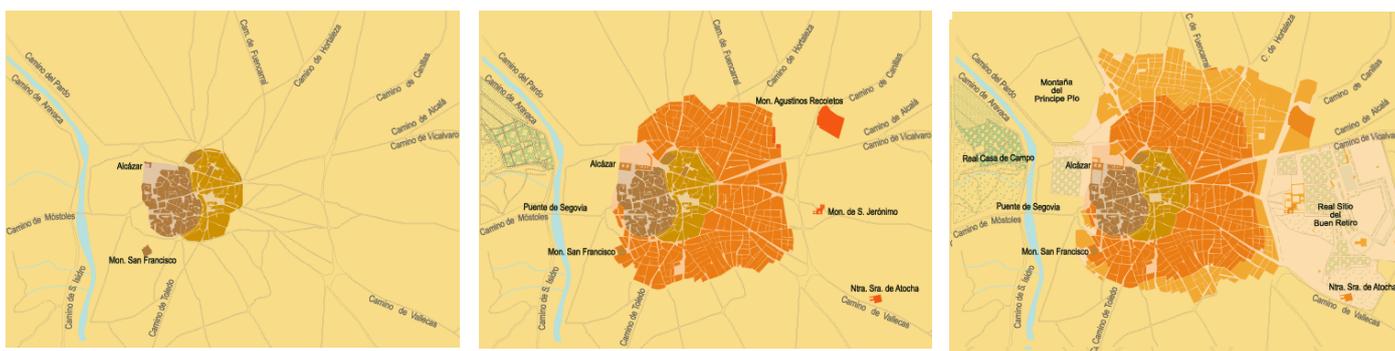
---

10 Sperimentale, A., & Fenomeno, D. E. L. (2012). Università degli Studi di Padova Dipartimento di Tecnica e Gestione dei sistemi industriali Tesi di laurea magistrale in ingegneria gestionale, 1–60.

### 5.3.1 Configurazione urbana della città di Madrid

In questa sezione si intende comprendere la configurazione morfologica della città di Madrid, con l'obiettivo di stabilire una base per indirizzare le linee generali per le future ottimizzazioni delle prestazioni termiche all'interno di una città.

La città di Madrid, capitale della Spagna, è localizzata al centro della penisola iberica, occupando un'area di circa 604,3 km<sup>2</sup>, con un totale di 3.293.601 abitanti e una densità demografica di 5.334,77 ab/km<sup>2</sup>. Madrid è classificata con un'elevata densità urbana, conformata da 3 tessuti di città i quali corrispondono a diversi periodi di urbanizzazione, tra i quali quello principale è il centro storico di Madrid, concepito come città medievale nel IX secolo. Posteriormente è stata pianificata l'estensione della città, conosciuta come l'*Ensanche de Madrid* nei secoli XIX - XX. E, per ultimo, è stata progettata e costruita la periferia di Madrid.



**Fig. 5.6:** Piano di sviluppo della città di Madrid (negli anni 1500, 1600,1700).

**Fonte:** [www.madridhistorico.com](http://www.madridhistorico.com)

La zona della città medievale è caratterizzata da un tessuto organico di strade strette e tortuose, con la presenza di diverse categorie di spazi aperti. Gli isolati sono compatti, con un cortile al suo interno utilizzato per la ventilazione naturale ed anche per il raffrescamento, con altezze di edifici che non vanno oltre ai 6 piani. Il centro storico di Madrid è fornito di una serie di piazze e parchi quali di varietà in quanto alla presenza della vegetazione:

- Il centro si limita nella zona est dal parco del Buen Retiro, il Paseo del Prado, Paseo La Castellana, Calle de la Princesa ed altre piazze secche. Questa tipologia di spazi hanno diversi livelli di vegetazione
- La zona sud e ovest del tessuto urbano sono circondate dal fiume *Río Manzanares*, il quale ha diversi parchi nel suo percorso, quali *Parque Manzanares*, *Parque Madrid Río*, *Parque del Oeste*, *Paseo de la Virgen del Puerto* ed i giardini Sabatini.



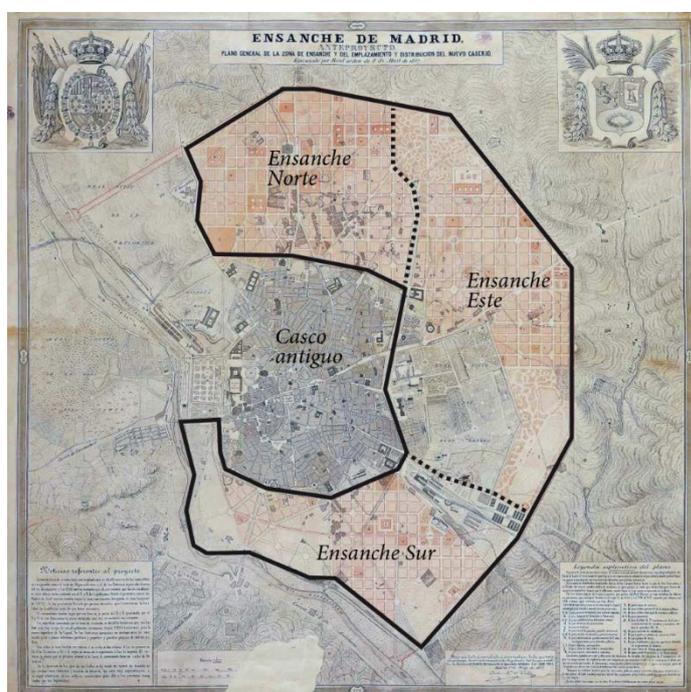
**Fig. 5.7:** Immagine Madrid capitale (zona medievale), 1808.

In quest'ottica, la configurazione densa dello spazio nel centro storico conduce alla concentrazione di calore, sia per la tipologia di città compatta, che per la presenza di materiali non performanti sulle coperture, prospetti e pavimenti (quest'ultimo è molto importante per le sue proprietà termiche), i quali consentono la concentrazione di calore. Contrariamente, gli spazi aperti contribuiscono alla mitigazione del calore con elevata presenza di vegetazione nei parchi, ed in minore proporzione sulle piazze secche, ed i bassi flussi traffici all'interno della zona centrale dato che prevalgono le vie pedonali.

Da un'altra parte, l'estensione della città (*Ensanche de Madrid*), è stata progettata nell'anno 1860 separato in tre zone: Ensanche Nort, Ensanche Est ed Ensanche Sud, laddove è stato concepito con una configurazione morfologica a reticola scacchiera, con isolati quadrati di elevata densità urbana, ed edifici che variano tra 3-18 piani di altezza con sezione stradale più ampie rispetto a quelle del centro storico. Tuttavia, il progetto prevedeva un'estensione che occupasse al massimo il 50% degli isolati, con edifici non superiori ai 3 piani di altezza, ma le esigenze di crescita della città hanno comportato ad interrompere quello che è stato proposto.

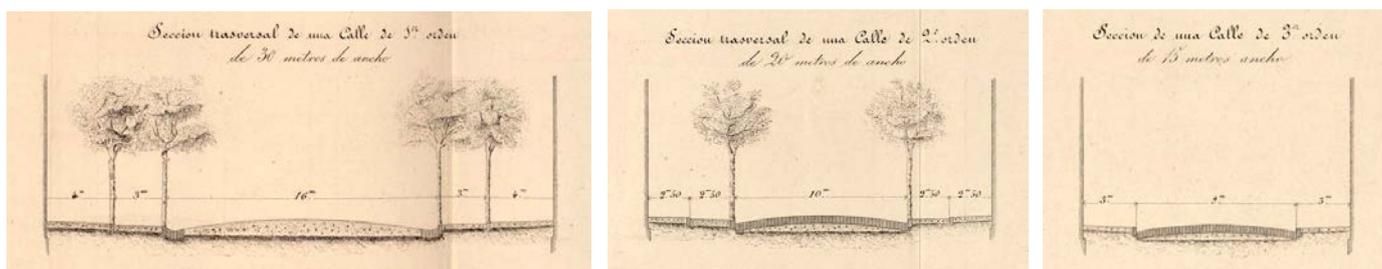
Nella sua destinazione d'uso prevale il residenziale e commerciale, ma sono anche state progettate importanti campus universitari, ospedali, centri culturali, ecc. Presenta minori quantità di spazi aperti in quanto alla zona medievale. La particolarità del progetto dell'*Ensanche de Madrid* è l'elevata presenza del settore residenziale di alta densità e la scarsità di parchi e viali stradali all'interno delle zone. Molta importanza è data alle zone nord e sud, laddove sono state progettate zone industriali in entrambe le parti, le quali conducono ai rilasci di emissioni, insieme agli elevati flussi traffici di tutta l'estensione.

Un'altra particolarità, è che i quartieri residenziali quali Canillejas, Moncloa-Arguelles ecc., si caratterizzano per la sua continuità nei prospetti con riferimento alla città lineale.



**Fig. 5.8:** Ante-progetto dell'Ensanche de Madrid. Piano generale della zona dell'Ensanche e del inquadramento e distribuzione della nuova area, 1857.

**Fonte:** [www.madrid.es](http://www.madrid.es)



(a)

(b)

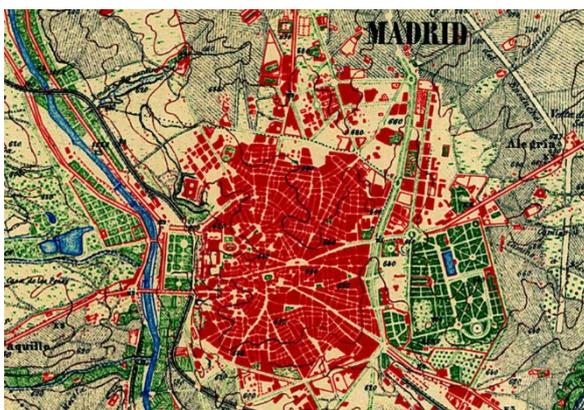
(c)

**Fig. 5.9:** Sezioni stradali della proposta dell'estensione: a) Sezione trasversale di una via principale, b) Sezione di una via secondaria, c) Sezione di una via terziaria

**Fonte:** [www.madrid.es](http://www.madrid.es)

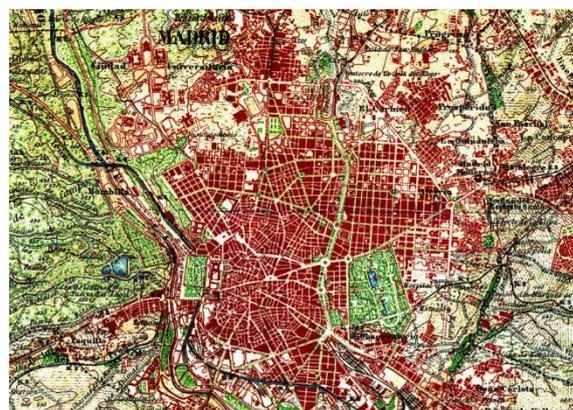
Siccome il tessuto dell'estensione è reticolare, è stato possibile prevedere l'orientamento delle strade, quindi hanno previsto la riparazione del vento N.E – S.O, e quello N.O - S.E, quindi le strade prevedono un orientamento circa N - S e E - O, in alcune zone levemente inclinato N.O - S.E.

L'ultimo progetto di ampliamento è stato quello della *periferia*, configurato come tessuto urbano disperso, il quale non presenta un alta densità come quelli precedenti, e le costruzioni prevalenti dell'area sono del settore residenziale, sia in complessi di edifici multifamiliari alti che case basse, laddove si presentano anche grandi edifici di centri commerciali, enti educativi ed enti ospedalieri. Gli isolati, in confronto con quelli delle zone centrali e dell'estensione, si caratterizzano per essere più aperti. Nelle **figure 5.10 – 5.11** viene dimostrata la crescita della città dalla concezione dell'estensione fino a quella della periferia.



**Fig. 5.10:** Mapa nazionale 1877-1881.

**Fonte:** [www.madrid.org](http://www.madrid.org)



**Fig. 5.11:** Mapa nazionale 1916-1944.

**Fonte:** [www.madrid.org](http://www.madrid.org)

## 5.4 Il quartiere Gaztambide a Madrid

Nella valutazione delle prestazioni ambientali di uno spazio urbano non ci si può limitare all'analisi delle condizioni microclimatiche in un punto, ma devono essere prese in considerazione le variabili della zona d'intervento, ha dichiarato Dessì, V. Pertanto, il sistema urbano si concepisce come un insieme di elementi chiavi per la caratterizzazione del microclima, i quali sono stati presi per consentire di creare una correlazione con la qualità dell'ambiente.

Considerando il ruolo della struttura urbana, è opportuno citare che la configurazione dello spazio urbano (tessuto morfologico) ed i rapporti delle singole costruzioni (localizzazione ed altezze), sono condizioni che determinano i comportamenti energetici dei materiali, visto che in questo modo si determina il grado di esposizione alla radiazione solare e al vento, ed i possibili effetti avversi che possano generare determinate tipologie di interventi.

Gli studi dimostrano che in una città di clima secco le superfici caratterizzate da bassi valori di albedo ed esposte alla radiazione solare tendono ad aumentare le sue temperature, e di conseguenza, anche quella dell'aria.

In questa ottica, è stato realizzato un'analisi nel quale sono stati confrontati il sistema di copertura fredda ed il sistema convenzionale della città di Melbourne, Australia, caratterizzata da clima secco ed elevata densità urbana. Nel confronto è stato evidenziato che l'incremento di albedo di 0,5 e 0,85 dei sistemi di coperture fredde hanno portato alla riduzione di temperature di 2,4°C – 5,8°C, quindi è stato considerato che l'impiego dei sistemi freddi sono una misura ottima per la mitigazione del fenomeno di ICU. (Imran, H. M., *et. al.* 2018)

In uno studio sono state valutate le alterazioni climatiche della città degli Stati Uniti di Los Angeles, le quali hanno dimostrato un innalzamento di 2-3°C rispetto alle aree rurali. È stato, evidenziando che le temperature sono aumentate di 3°C rispetto all'1940, ed è stata prevista un incremento maggiore di 1°C per decennio, di conseguenza, viene aumentato il consumo energetico per l'incremento d'uso dei climatizzatori, il quale comporta un incremento dell'30% per ogni grado di temperatura incrementata <sup>11</sup>.

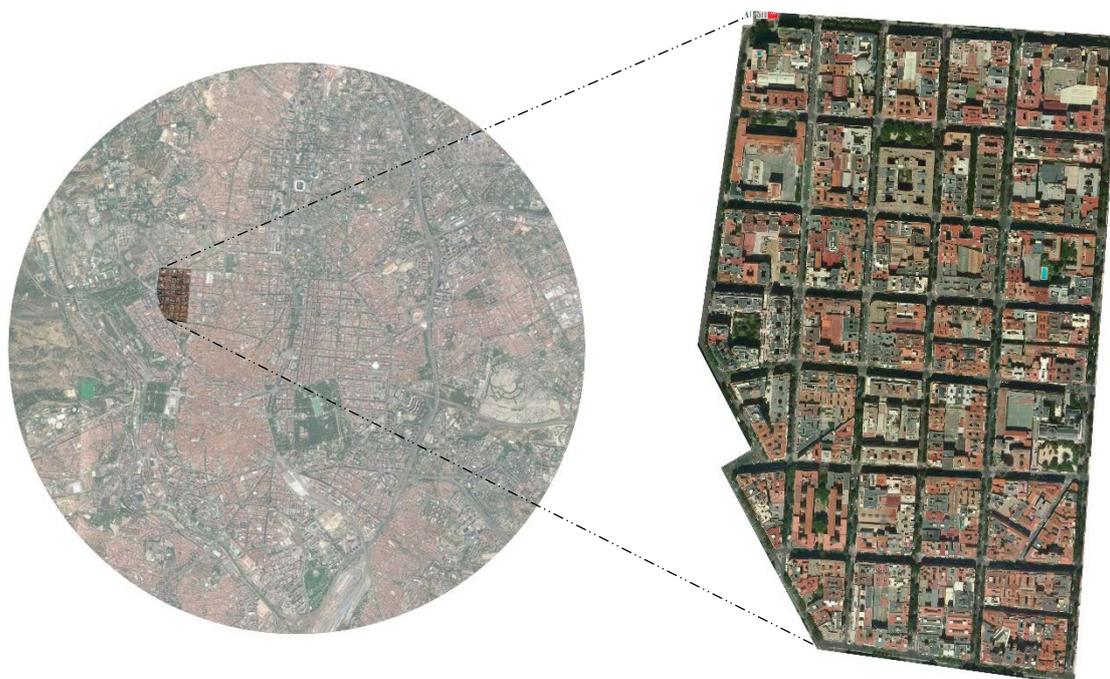
---

11 Rosenfeld, A. H., Akbari, H., Bretz, S., Fishman, B. L., Kurn, D. M., Sailor, D., & Taha, H. (1995). Mitigation of urban heat islands: materials, utility programs, updates. *Energy and Buildings*, 22(3), 255–265. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(95\)00927-P](https://doi.org/10.1016/0378-7788(95)00927-P)

Per tanto, la presente sezione comprende un'analisi urbanistico focalizzato in una zona della città di Madrid, con il fine di identificare le variabili urbane precedentemente citate e le possibili misure di attuazione, con la consapevolezza che i materiali che conformano il contesto urbano sono considerati tra i primi contributori del fenomeno dell'ICU, e la selezione di essi necessita la valutazione dell'ambiente costruito dovuto al fatto che ogni sistema reagisce in modo diverso alle esposizione degli elementi del clima.

È stata selezionata un'area di studio la quale comprende le condizioni urbane comuni della città di Madrid: il quartiere di *Gaztambide*, localizzato al nord-ovest della città di Madrid. Comprende un'area di circa 0.5 km<sup>2</sup> con 39 isolati delimitati all'nord per la *calle De Cea Bermúdez*, al sud *calle de Alberto Aguilera*, est *Calle de Blasco de Garai* ed *calle Isaac Peral* ad ovest.

La zona è caratterizzata di un mix funzionale (commerciale e residenziale), nel quale predomina la destinazione d'uso residenziale ed i commerci prevalentemente al piano terra. La zona corrisponde ad un'alta densità urbana, di struttura rettangolare ed scarsi aree verdi considerando il quartiere di Gaztambide in generale (**figura 5.12**), che all'interno dei suoi isolati. La rete stradale quindi è disposta ortogonalmente (**figura 5.13 – 5.14**), orientate in senso nord-sud ed est-ovest. Le strade principali sono caratterizzate per una larghezza di 7,5 m (non comprese di aree di parcheggio) in senso est-ovest, e quelle secondari di 5,5 m (non comprese di aree di parcheggio) le quali presentano scarsità di vegetazione.



**Fig. 5.12:** Quartiere Gaztambide nella città di Madrid, Spagna.



**Fig. 5.13:** Strada Fernandez de los Ríos  
(senzo est-ovest, 7,5 m + parcheggio)



**Fig. 5.14:** Strada Hilarión Eslava  
(senzo nord-sud, 5,5 m + 2 parcheggio)

Seguendo l'obiettivo di individuare le variabili che influiscono nelle strategie di intervento delle coperture, sono state identificate le altezze degli edifici del barrio Gaztambide, le quali variano dai 3 ai 12 piani. La **tabella 5.2** evidenzia che le altezze degli edifici che predominanti sono:

- altezza minima, di 1-5 piani con il 20%;
- altezza media, di 6-8 piani con il 67,2%;
- altezza massima, di 9-12,18 piani con il 12,8%.

ALTEZZE PREDOMINANTI	
# piani	%
1	0,8
2	0,8
3	4
4	5,6
5	8,8
6	21,6
7	29,6
8	16
9	7,2
10	3,2
12	1,6
18	0,8

**Tabella 5.2:** Percentuale delle altezze predominanti degli edifici del quartiere di Gaztambide nella città di Madrid.

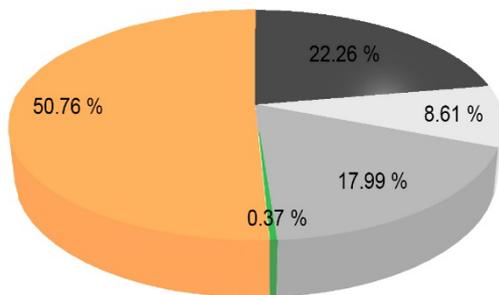
**Fonte:** Elaborazione propria

Posteriormente, si è realizzato un'analisi delle coperture presenti nella zona, classificando le tipologie esistenti ed il suo rispettivo utilizzo nell'area valutata. L'obiettivo di questa analisi è stato quello di comprendere i potenziali bilanci energetici in base alle coperture impiegate, e nel capitolo successivo realizzare una proposta di intervento su un determinato edificio in base a tutte le considerazioni determinate.

L'area generale delle coperture nella zona è di circa 278.765 mq, dei cui sono state individuate 5 tipi di coperture in base al colore e posteriormente sono stati identificati i rispettivi materiali, quali:

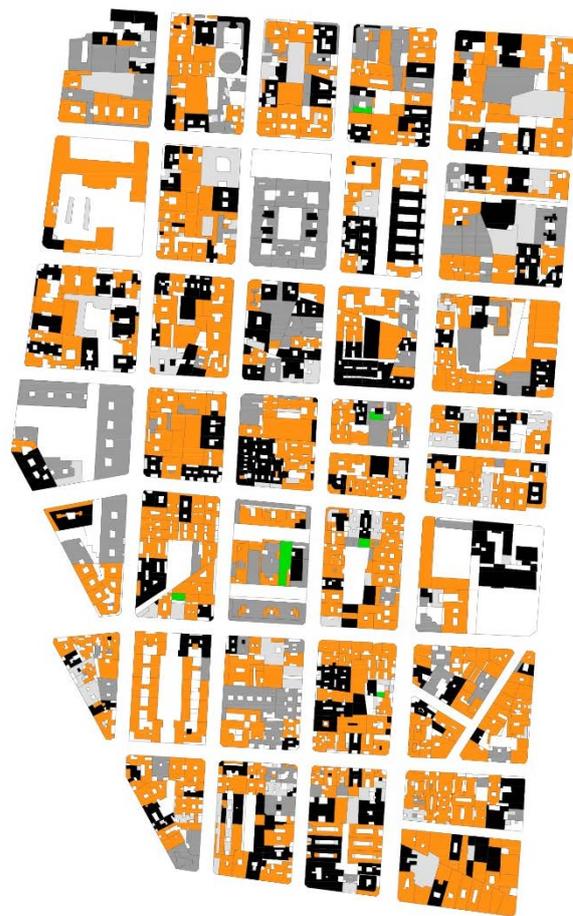
- **copertura arancia**, è una copertura di tegole rosse, la quale predomina nell'area d'analisi con presenza di 50,76 %, è caratterizzata di valori di albedo che variano tra 0,1 – 0,35;
- **copertura nera**, caratterizzata da impermeabilizzazione con bitume, ha una presenza del 22,26%, ed è quella che genera i maggiori effetti avversi, con valori di albedo 0,08 – 0,18, capacità termica di circa 8,6 J/m<sup>3</sup> °C ed emissività del 0,92;
- **copertura grigia**, intesa come copertura di calcestruzzo e ghiaia, comprende il 17,99 % delle coperture della zona. La sua tonalità fa sì che i rapporti con gli elementi del clima causino minori impatti. Il valore di albedo è circa 0,5, simile alla capacità termica di 0,5 J/m<sup>3</sup> °C, e 0,9 di emissività;
- **copertura bianca**, considerata come rivestimenti di vernici bianche, costituisce il 8,61% delle coperture totali, ed ha le migliori prestazioni. I suoi valori sono, l'albedo varia del 0,5 – 0,9 (quello minore corrisponde agli anni e la sporcizia), capacità termica di circa 0,2 J/m<sup>3</sup> °C e l'emissività di 0,9;
- **copertura verde**, intesa come copertura vegetale che solo costituisce il 0,37 % delle coperture della zona, apporta benefici non solo dei flussi energetici, ha ottima capacità di deflusso d'acqua, anche incrementa il comfort termico invernale, estivo e quello acustico e promuove la biodiversità. Con un valore di albedo di 0,25 – 0,30.

Tipologie di coperture: Gaztambide



- Coperture nere
- Coperture grigi
- Coperture arancie
- Coperture bianche
- Coperture verdi

**Fig. 5.15:** Utilizzo di tipologie di coperture del barrio Gaztambide.



**Fig. 5.16:** Classificazione di coperture del barrio Gaztambide nella città di Madrid.

**Fonte:** Elaborazione propria

Questo studio (**figura 5.15 – 5.16**) evidenzia che le coperture con minori prestazioni (copertura di tegole rossa e copertura di impermeabilizzazione con bitume) hanno rilevanza superiore a quelle di migliori prestazioni (copertura di calcestruzzo e ghiaia, di rivestimento di vernice bianca e copertura vegetale).

In quest'ottica, è opportuno citare nuovamente che la proprietà più importante dei materiali (albedo) è quella che determina in gran parte il bilancio energetico dei materiali, ed i suoi rispettivi valori nelle coperture di tegole rosse (valore medio 0,225) e d' impermeabilizzazione con bitume (valore medio 0,13) sono i quali stabiliscono la quantità di radiazione solare riflessata.

Nel caso della stagione estiva della città di Madrid, l'intensità della radiazione solare globale può essere intorno ai  $900 \text{ W/m}^2$ . La radiazione riflessa dei rispettivi materiali sarà quella di  $202,5 \text{ W/m}^2$  e  $117 \text{ W/m}^2$  (cioè  $900 \text{ W/m}^2 * 0,225$  e  $900 \text{ W/m}^2 * 0,13$ ), il resto della radiazione incidente sulle superfici è assorbita, di conseguenza aumenta la temperatura delle superfici dei materiali, e viene riemessa nell'ambiente sotto forma di

calore nei periodi notturni. Prendendo in considerazione questo fatto, è necessario che siano prese delle misure per controllare i flussi termici.

Tornando all'analisi della struttura urbana e le considerazioni che devono essere prese, in un ambito più approfondito, saranno valutati le localizzazioni degli edifici rispetto ad altri, le altezze di essi e le attività nelle sue vicinanze come possibili fonti d'inquinamento. I rapporti tra di essi, saranno le linee di indirizzo per le azioni di intervento sulle coperture nella zona valutata.

L'importanza della localizzazione degli edifici si basa nelle possibili interazioni generate tra coperture scelte (le reazioni sotto l'incidenza degli elementi del clima) con gli edifici circostanti, questo per evitare di generare effetti avversi sulle costruzioni all'intorno.

Uno studio ha confermato che l'angolo di radiazione solare il giorno 21 giugno nella città di Madrid è di  $73^\circ$ , e considerando che l'angolo d'incidenza e l'angolo di riflessione sono uguali, le strategie di interventi devono prevedere di non avere grandi superfici (altre costruzioni) vicine le quali siano vulnerabili ad assorbire i raggi riflessi dei nuovi sistemi. In questo modo, si deve evitare l'incremento della temperatura superficiale delle costruzioni vicine, ed anche evitare che il calore rimanga all'interno del canyon urbano.

Un'altra misura, specificamente per quei sistemi che hanno bisogno di minore incidenza solare per i supi processi di raffrescamento (sistema vegetale) è quella di impiegarli nelle coperture sulle quali è proiettata l'ombra di altre costruzioni vicine. Si deve mettere anche in evidenza che le superfici verticali degli edifici nell'intorno hanno la possibilità di accumulare il calore in base alle sue proprietà, quindi di considerare dei sistemi che forniscano la riduzione del calore accumulato tra gli edifici.

In questo modo sono stati classificati 3 tipi di localizzazione degli edifici:

- **l'edificio isolato**, sono gli edifici localizzati in una zona distante da altre costruzioni, in questo modo hanno minori rischi di causare effetti negativi sulle altre superfici circostanti per la riflettività della radiazione incidente, ed anche sono più esposti agli elementi del clima;
- **l'edificio ad angolo**, sono posizionati in una zona esposta alla radiazione solare ed anche sono vicini ad altre costruzioni. Devono essere quindi considerate delle misure per affrontare sia gli incidenza degli elementi climatici, che evitare di causare effetti avversi sulle superfici vicine;
- **l'edificio addossato**, sono edifici circoscritti da altre costruzioni. È necessario valutare un modo riguardo i possibili effetti avversi sugli edifici circostanti.

L'influenza dell'altezze degli edifici negli interventi di copertura segue considerazioni simili a quelle di localizzazione. Sono state identificate 3 tipologie di altezze, le quali servono per stabilire le strategie, come descritto precedentemente, devono essere regolati i rapporti per evitare l'innalzamento delle superfici vicine prendendo in considerazione che gli edifici più bassi hanno il maggior grado di generare effetti negativi sulle altre edificazioni. C'è anche da considerare l'utilizzo dei sistemi in base al controllo che forniscano degli effetti del clima, come quello di favorire all'incremento di comfort a livello pedonale, dato che la radiazione o anche le temperature possono essere ammortizzate dai sistemi scelti, e di conseguenza diminuiscono l'intensità degli effetti sui livelli più bassi.

Per citare un esempio rispetto al contributo coperture sullo strato pedonale, i sistemi vegetali hanno la capacità di prendere le alte temperature accumulate dai materiali, cercando di raffrescare sia i livelli di copertura che quello sottostante.

Sono state quindi classificate 3 altezze sull'barrio Gaztambide e le rispettive considerazioni per l'impiego:

- **altezza minima, 3-5 piani.** Devono garantire i minori effetti negativi sulle superfici verticali vicine, e favorire all'incremento di comfort a livello pedonale;
- **altezza media, 6-8 piani.** Devono essere previsti degli interventi convenienti per generare i minori effetti negativi sulle superfici verticali vicine;
- **altezza massima, 9-12 piani.** Il suo maggior grado di esposizione comporta alla selezione del sistema più adatto all'incidenza diretta di tutti gli elementi del clima alterati, sotto condizioni di clima caldo e secco.

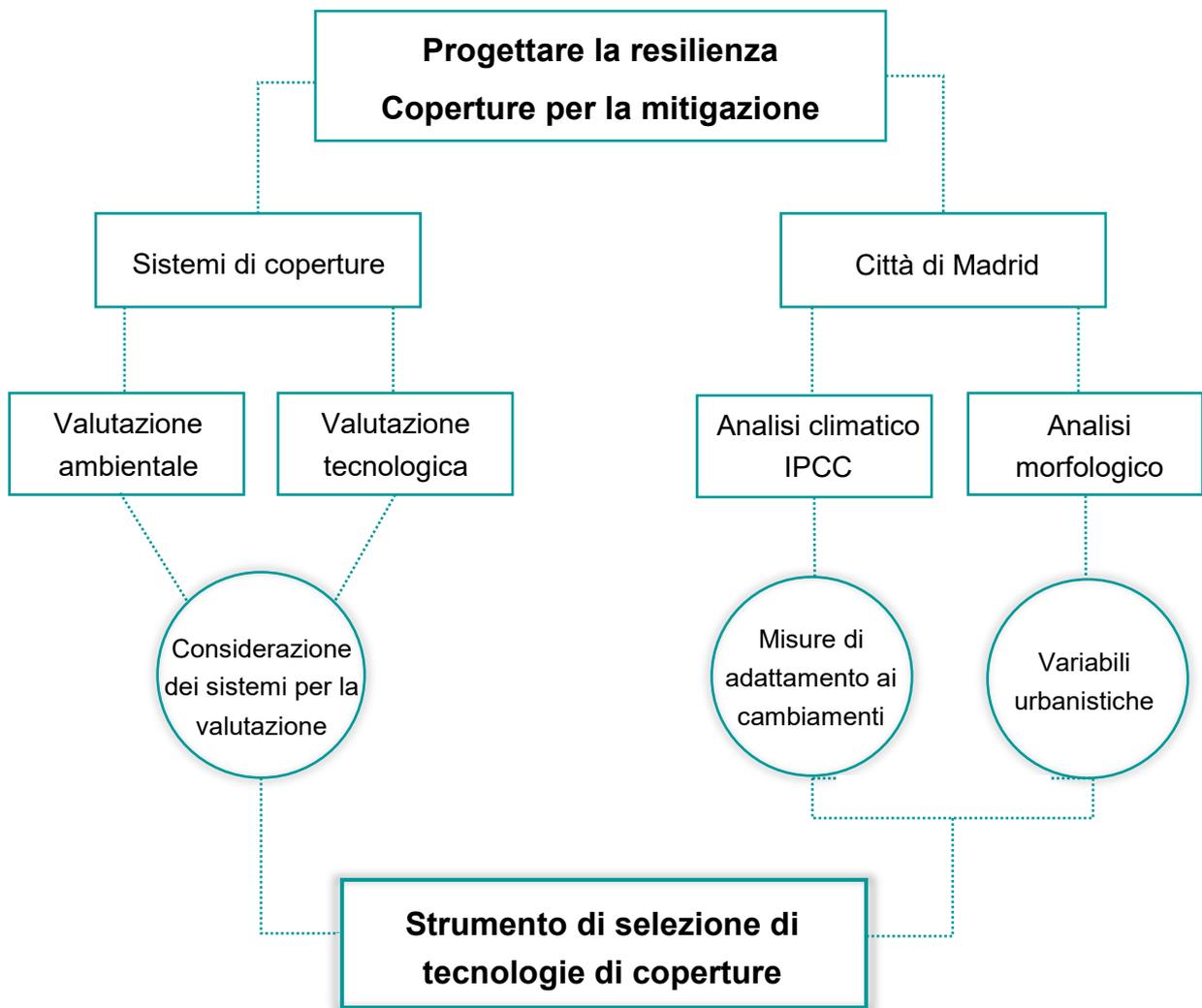
La valutazione delle attività consiste nell'identificazione delle sorgenti che hanno maggior o minor grado d'inquinamento, e selezionare il sistema che non solo gestisca gli elementi del cambio climatico e l'interazione con gli edifici circostanti, ma che possa diminuire, per quanto possibile, i livelli d'inquinamento prodotti per le attività i quali influiscono sulla temperatura atmosferica e di conseguenza incrementano il grado dell'ICU.

- **basso livello d'inquinamento**, è caratterizzato da strade di basso flusso di traffico e presenza di vegetazione che cattura il CO<sub>2</sub> emesso dai veicoli;
- **alto livello d'inquinamento**, caratterizzato dalle strade principali di maggiore flusso di traffico e scarsità di vegetazione.

## CAPITOLO 6: Strumento di selezione

L'obiettivo di questo capitolo è di fornire uno strumento di selezione di tecnologie di coperture per la città di Madrid.

Di seguito si riporta uno schema della metodologia utilizzata per la valutazione degli aspetti che riguardano la selezione dei sistemi:



**Fig 6.1:** Schema della metodologia di valutazione degli aspetti ambientali, tecnologici ed urbani.

L'analisi è partita dalla comprensione del cambiamento climatico ed il fenomeno d'isola di calore all'interno del canyon urbano. Seguendo questa linea si è studiato il ruolo dei sistemi di copertura riguardo al fenomeno di isola di calore, valutando i possibili effetti negativi ed anche i possibili contributi all'ambiente urbano.

In quest'ambito, in un primo momento è stato realizzato un'analisi delle caratteristiche generali delle coperture con il fine di comprendere il suo funzionamento, laddove gli studi hanno dimostrato che il loro contributo nel microclima richiede un'approfondita valutazione ambientale, la quale consiste nello studio delle caratteristiche fisico-tecniche dei sistemi, che determinano le loro capacità termiche ed ottiche, intendendo come la loro abilità di evitare oppure utilizzare la radiazione solare incidente su di esse. Dato ciò, questa analisi ha rilevante importanza nella mitigazione del fenomeno dell'isola di calore urbana dovuto alla determinazione dell'interazione delle coperture con l'ambiente urbano.

Parallelamente, sono stati definite le caratteristiche tecnologiche delle coperture, con il fine di avere una base qualitativa dell'eco-compatibilità dei materiali nell'ambiente, senza entrare nella metodologia.

Dai punti precedentemente citati, sono state definite le tecnologie di coperture, considerando i sistemi di coperture vegetale e fredda come essi con le più elevate prestazioni a livello ambientale e tecnologico.

In un secondo momento, la selezione dei sistemi richiede anche della valutazione delle condizioni della città di Madrid, da dove si parte principalmente dallo studio climatico attuale e gli scenari di proiezioni di cambiamento climatico a futuro, evidenziando in quest'ultima, quei elementi climatici che incidono sulle prestazioni delle coperture.

Da quest'ultimo analisi si è dimostrato che le temperature minime e le temperature massime saranno incrementate, invece, gli elementi come le precipitazioni, il vento e la nuvolosità diminuiranno la loro intensità e la loro frequenza. Queste proiezioni manifestano scenari allarmanti in quanto al fenomeno dell'isola di calore urbana. In fine, sulla base delle proiezioni climatiche sono state definite delle misure di adattamento, fornendo sistemi che possano mantenersi immutati sotto eventi climatici intensi.

Un'altra valutazione di Madrid riguarda l'analisi della configurazione urbana della città, la quale è caratterizzata per una tipologia densa che tende ad accumulare maggiore quantità di calore (data l'elevata presenza dei materiali), il quale viene successivamente rimesso nell'ambiente urbano innalzando le temperature atmosferiche. La particolarità di quest'analisi è stata comprendere le misure e considerazioni adatte per l'impiego dei sistemi di copertura, dato che essi hanno lo stesso obiettivo di ridurre la capacità di innalzamento delle temperature, ma con metodi diversi. Pertanto, particolare attenzione viene data alle variabili urbane, laddove, è stata realizzata un'analisi più specifico di un

quartiere della città (il quale comprende le caratteristiche generali della città), rilevando le sue variabili e proponendo delle strategie di selezione dei sistemi di coperture in base alle variabili urbane.

Nel presente capitolo, verranno considerate tutte le variabili studiate e, più specificamente quelle urbane, con il fine di proporzionare le soluzioni più adeguate alla mitigazione del calore all'interno del quartiere di Gatambide nella città di Madrid.

## *Strategie resilienti di coperture per la mitigazione*

Il lavoro è stato indirizzato nella selezione dei sistemi che fornissero elevate prestazioni ambientali e tecnologiche all'interno della città di Madrid, sulla base delle proiezioni del cambiamento climatico. La fase di studio ha dimostrato che la formazione del fenomeno dell'isola di calore è condizionata dall'interazione dei materiali con l'ambiente, i quali affermano che l'isola di calore superficiale è quando la temperatura del materiale è maggiore a quella dell'aria. Pertanto, particolare attenzione è stata data nello studio di tecnologie per coperture piane che ritenessero minori temperature rispetto a quelle dell'ambiente, con il fine di fornire delle scelte che fossero in grado di evitare la formazione del fenomeno dell'ICU. Inoltre, Contreras et. al. (2008) allega che il fenomeno dell'isola di calore atmosferica è quando la temperatura del ambiente urbano supera quella dell'ambiente rurale o semi-rurale di 3°C.

Lo studio è fondamento su diversi analisi realizzati in diverse località, particolare attenzione è stata data a quelli sviluppati nelle zone di classificazione climatologica di Köppen, Csa, per le città di stagioni estive calde e secche, in modo di comprendere l'effettività dei sistemi nelle città con clima simile a quello di Madrid.

Come precedentemente citato, gli studi riguardanti alla mitigazione hanno coinciso nella valutazione delle tecnologie di coperture: vegetale e fredda, le quali soddisfano le esigenze richieste per tale obiettivo, le quali hanno diverse implicazioni, prestazioni e motivi per la selezioni. La combinazione delle tecnologie garantisce potenziali apporti per la riduzione delle temperature, controllo di deflusso, migliora di qualità dell'aria, aumento di biodiversità, isolamento termico e acustico, e risparmio energetico <sup>13</sup>, si procede quindi a comprendere il modo in cui devono interagire tra di loro nel contesto.

La corrispondenza dei sistemi nel contesto della città di Madrid, specificamente in un quartiere della città, è data da una serie di criteri stabiliti per un corretto inserimento, con il fine di evitare la generazione di effetti avversi sugli edifici attorni, ed anche di approfittare i benefici che possa fornire ogni sito. Il prodotto finale, quindi, sarà uno strumento sulla base dei criteri considerati per indirizzare la scelta delle coperture per mitigare il fenomeno dell'isola di calore urbana nel contesto di Madrid.

In questo modo, si fa riferimento ad alcuni casi contemplati (insieme agli altri studi nei capitoli precedenti) per la definizione delle tecnologie a valutare e per la determinazione dei criteri progettuali.

### *Elementi climatici - Tecnologia di copertura vegetale*

- Il sistema vegetale ha un contributo unico per l'ambiente quando si parla di *temperatura*, dato che il suo processo naturale di evapotraspirazione tanto cattura il calore che fa parte del processo, come rilascia umidità con l'evaporazione dell'acqua presente nello strato di coltura.

### *Elementi climatici - Tecnologia di copertura fredda*

- I materiali freddi contribuiscono alla riduzione della temperatura superficiale che di conseguenza ne beneficia alla riduzione di scambi termici con l'ambiente <sup>1</sup>. La sua caratteristica principale –riflettività– fornisce all'elevate prestazioni termiche nei periodi diurni e notturni (anche se non ha maggiore influenza nei periodi notturni come nei diurni), dato che a maggiore valore di albedo, minore sarà la capacità di assorbimento e di conseguenza sarà anche minore la radiazione infrarossa.
- L'incentivo dei *flussi d'aria* contribuisce alla diminuzione della temperatura atmosferica. Gli studi hanno denifito che le coperture fredde incrementano la velocità del vento da 0,50 - 1.0 m s<sup>-1</sup> e presentano venti verticali positivi i quali portano i flussi energetici ai livelli superiori, in quest'otica l'impiego delle coperture fredde contribuisce alla riduzione di temperatura.
- Gli effetti che può generare la riduzione della *nuvolosità* quale maggiore incidenza di radiazione diretta possono essere controllati con alti valori di riflettività delle coperture, deve essere quindi previsto un adeguato mantenimento con il fine di prevedere il degrado della tecnologia.

---

1 Synnefa, A., Santamouris, M., & Livada, I. (2006). A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment. *Solar Energy*, 80(8), 968–981. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.08.005>

### *Considerazioni urbane - Tecnologia di copertura vegetale*

- La *localizzazione* delle coperture negli edifici ad angolo ed addossati fornisce alcuni benefici rispetto a diversi aspetti, è il caso della capacità di assorbire il calore emesso per le edificazioni circostanti, dissipando l'accumulo di calore con maggiore intensità nei periodi diurni, il quale continua la sua attuazione in quello notturno ma con prestazioni quasi 3 volte di meno rispetto alle diurne. In questo senso può realizzare un lavoro equilibrato con le coperture fredde, dato che la riflettività dell'energia solare può essere assorbita da altre edifici nelle sue vicinanze.
- Gli apporti del sistema possono essere anche condizionati dalle *altezze* degli edifici nei cui si realizza l'intervento. Questo dato che l'interventi sulle altezze minime e medie favorisce alla protezione dell'incremento della radiazione solare quando gli edifici vicini proiettano l'ombra sulle coperture trattate, evitando in questo modo la siccità del manto vegetale nella stagione estiva (nel caso in cui non venga impiegato il sistema di irrigazione). Il contatto più vicino con la strada favorisce al Human Thermal Comfort (HTC), cioè al comfort termico a livello pedonale (anche se poco)<sup>2</sup>, l'assorbimento di calore e l'evaporazione dell'acqua presente nel substrato migliora le condizioni sia a livello della copertura che su quelli inferiori in minor grado, in questo senso, contribuisce anche alla cattura di CO<sub>2</sub> emessa dalle macchine. In concordanza con quello che è stato recentemente citato, garantiscono di evitare gli effetti delle coperture fredde, rispetto alla radiazione solare riflessa su altre edificazioni.
- È stato anche stabilito che i sistemi vegetali migliorano la qualità dell'aria mediante la *cattura del CO<sub>2</sub>*, dato che essa è fondamentale nei processi vitali delle piante. Come precedentemente accennato, le piante sono capaci di catturare di circa 375 g C·m<sup>-2</sup>, inoltre alla rimozione di altri inquinanti gassosi e del PM.

In questo contesto, il sistema vegetale diventa una ottima soluzione da impiegare in zone o nelle vicinanze di aree con alti livelli di inquinamento, sia nel caso delle zone industriali, oppure edifici che si affacciano su vie di alto flusso di traffico, ed anche su quelle vie non alberate.

Alcuni ricercatori hanno stimato che un intervento di 93 m<sup>2</sup> ha la capacità di rimuovere 40 sterline di PM dall'aria nel corso di un anno (quella quantità sarebbe l'equivalente di solo 15 macchine nel trascorso di un anno), parallelamente si aggiunge la capacità di produzione di ossigeno e la cattura di CO<sub>2</sub><sup>15</sup>.

---

2 Imran, H. M., Kala, J., Ng, A. W. M., & Muthukumar, S. (2018). Effectiveness of green and cool roofs in mitigating urban heat island effects during a heatwave event in the city of Melbourne in southeast Australia. *Journal of Cleaner Production*, 197, 393–405. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.179>

### *Considerazioni urbane - Tecnologia di copertura fredda*

- I principi della tecnologia fredda pur fornendo elevati contributi ambientali, devono essere previsti alcuni aspetti per la sua integrazione adeguata nell'ambiente costruito. La *localizzazione* delle coperture a trattare, come accennato precedentemente, influiscono dato che gli edifici attorno sono vulnerabili alla riflettanza dei materiali freddi, in altre parole, l'impiego della tecnologia fredda è consigliato di realizzarlo sulle coperture di edifici che si localizzano distanti ad altri edifici oppure ad angolo, sempre che gli edifici attorni non riescano di assorbire la radiazione emessa dalle coperture trattate.
- Le *altezze* sono correlate agli effetti citati nel paragrafo precedente, visto che più basso l'edificio è, più radiazione riflessa può incidere sulle altre costruzioni. Quindi si consiglia di impiegare questa tecnologia negli edifici più alti oppure quelli di mediana altezza sempre che non ci siano edifici più alti vicini. In quanto all'influenza a livello pedonale, l'apportosi questa tecnologia evidentemente è quello di non permettere l'accumulo di calore sulle superfici, anche se non ha degli apporti come la tecnologia vegetale (umidificare).
- Si consiglia di impiegare questa tecnologia nelle aree di *attività* di basso livello d'inquinamento per il fatto che le coperture vegetali contribuiscono alla cattura del CO<sub>2</sub>, produzione di ossigeno, ecc., quindi contribuiranno sia raffrescare le coperture che alla cattura delle emissioni rilasciate dall'attività.

### *Effetti del sistema per alterazioni fisiche - Tecnologia di copertura vegetale*

- La riduzione delle temperature mediante l'impiego dei sistemi vegetali è condizionata alla presenza di acqua nel sistema, per il fatto che il processo di evapotraspirazione richiede di un fabbisogno idrico, essendo un fattore critico nel clima caldo e secco delle stagioni estive di Madrid.

### *Effetti del sistema per alterazioni fisiche - Tecnologia di copertura fredda*

- Le limitazioni della tecnologia fredda hanno che vedere con il deterioro ovvero riduzione dell'albedo sulle superfici a causa dell'accumulo di sporcizia o del degrado del materiale.

## 6.1 Scheda di analisi e rilevamento

In questa sezione vengono presentate le variabili urbane considerate per la conformazione dello strumento. Lo scopo del prodotto finale per la selezione delle tecnologie è stato quello di orientare la scelta più conveniente all'interno del contesto urbano di Madrid, caratterizzato da una configurazione di città densa, con vie strette ed edifici prevalentemente di altezza media (6-8 piani).

Le analisi svolte nel lavoro di ricerca hanno portato allo studio delle tecnologie più efficienti nel confronto delle proiezioni di cambiamento climatico, le quali inglobano le caratteristiche fisico-tecniche e gli aspetti eco-compatibili più adatte alle esigenze climatiche.

Le tecnologie quindi, essendo di natura diversa, rispondono alle alterazioni degli elementi del clima di diverse forme, laddove si è data particolare attenzione per comprendere la più accettata inserzione delle tecnologie nel contesto urbano di Madrid, individuando le variabili di localizzazione, di altezze e attività del sito.

Lo strumento è composto da:

- informazione generale, in cui vengono spiegati i processi di raffrescamento e le considerazioni per l'impiego.
- il contributo ambientale, fornendo le caratteristiche fisico-tecniche ed il suo grado di efficacia in confronto con le coperture convenzionali.
- le variabili urbane, sulle quali si definisce la tecnologia di copertura da impiegare.
- quadri di selezione del sistema di copertura il quale corrisponde alle variabili urbane.

### *Priorità*

È opportuno menzionare che dati i limiti del sistema di copertura fredda a causa della possibile generazione di effetti avversi sugli edifici circostanti, nel particolare caso in cui le variabili urbane non corrispondono ad un'unica tecnologia di copertura, la priorità viene data al sistema di copertura fredda, laddove prevale la scelta di questa in base alla localizzazione e all'altezza, con l'obiettivo di rispettare i limiti dell'impiego di questa tecnologia.

## Misure di adattamento ai cambiamenti climatici

L'obiettivo dello studio delle proiezioni di cambiamento climatico, più che comprenderé i possibili scenari degli elementi del clima, è stato quello di considerare la necessità di stabilire misure preventive per evitare di raggiungere le suddette alterazioni. Per raggiungere questo scopo devono essere stabiliti i limiti in ogni settore, ed in questo caso, l'obiettivo è quello di approfittare le attuazioni degli elementi che possano favorire alle condizione termiche delle coperture, e contemporaneamente, proporre alcune misure per limitare agli altri elementi di generare effetti avversi sulle coperture.

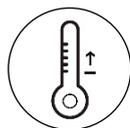
In quest'ottica, prevedendo gli elementi del clima che influiscono sulle prestazioni delle coperture, si propone:

### Elementi climatici

### Misure di adattamento



#### Temperatura massima



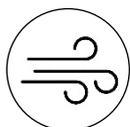
#### Temperatura minima

L'incremento delle temperatura minime e massime possono essere ridotte con l'impiego della tecnologia di copertura vegetale, la quale utilizza il calore dell'aria per evaporare l'acqua, e conseguentemente viene raffrescata l'aria. Da un'altra parte, l'impiego dei materiali altamente riflettivi evita l'assorbimento della radiazione incidente che successivamente viene ri-emessa all'atmosfera, di conseguenza si evita un'altra fonte di calore.



#### Precipitazioni

Il maggiore contributo delle precipitazioni è quello di possibilitare il proceso dell'evapotraspirazione delle piante sulle coperture vegetali, ed una misura per prevedere la disponibilità d'acqua nelle piante è quella di implementare un sistema di irrigazione a basso costo.



#### Velocità del vento

È necessario prendere misure per incentivare i flussi d'aria per contribuire alla riduzione delle temperature atmosferiche e superficiali. Uno studio ha dimostrato che le tecnologie vegetali e fredde presentano venti verticali positivi, comportando ad una riduzione delle temperature d'aria nello strato superiore allo strato urbano, tramite il meccanismo dei *convective rolls*, il quale è capace di portare i flussi energetici dalla superficie ai livelli più alti.



#### Nuvolosità

La misure per rimediare la riduzione della nuvolosità è mediante l'impiego di materiali altamente riflettivi. Dato che le nuvole filtrano la radiazione solare diretta, e la sua riduzione comporta alla diminuzione della radiazione diffusa, e di conseguenza saranno più elevate le temperature.

## Considerazione delle variabili urbanistiche

Il comportamento energetico dei materiali dipende non solo dal tipo di materiale impiegato, ma anche dall'interazione con lo spazio urbano, dato che essa influisce sull'incidenza degli elementi climatici sulle coperture da intervenire, inoltre, i materiali degli edifici attorno possono alterare le prestazioni dei materiali delle coperture trattate, così come possono essere alterate dall'inquinamento proveniente dalle attività della zona.

Dunque tra le variabili urbane sono state considerate la *localizzazione* degli edifici, valutando il rapporto con le costruzioni attorno per evitare i possibili effetti avversi su di loro, quale la riflessione della radiazione solare dai nuovi interventi di copertura, legato anche alle *altezze*, che determinano l'esposizione delle coperture agli elementi del clima evidenziando che la differenza delle altezze determina la proiezione delle ombre degli altri edifici e la presenza dei flussi d'aria. E le *attività* della zona che influiscono nel livello di inquinamento e sono in grado di elevare le temperature.

### Localizzazione dell'edificio

**E1**

**Edificio isolato**

Sono gli edifici localizzati in una zona distante da altre costruzioni, in questo modo hanno minori rischi di causare effetti negativi sulle altre superfici circostanti per la riflettività della radiazione incidente, ed anche sono più esposti agli elementi del clima.

**E2**

**Edificio ad angolo**

Sono posizionati in una zona esposta alla radiazione solare ed anche sono vicini ad altre costruzioni. Devono essere quindi considerate delle misure per affrontare sia l'incidenza degli elementi climatici, che evitare di causare effetti avversi sulle superfici vicine.

**E3**

**Edificio addossato**

Sono edifici circoscritti da altre costruzioni. È necessario valutare un modo riguardo i possibili effetti avversi sugli edifici circostanti.

### Altezza dell'edificio

**A1**

**Altezza minima**

**3-5 piani.** Devono garantire i minori effetti negativi sulle superfici verticali vicine, e che siano in grado di favorire all'incremento di comfort a livello pedonale.

**A2**

**Altezza media**

**6-8 piani.** Devono essere previsti degli interventi convenienti per generare i minori effetti negativi sulle superfici verticali vicine.

**A3**

**Altezza massima**

**9-12,18 piani.** Il suo maggior grado di esposizione comporta alla selezione del sistema più adatto all'incidenza diretta di tutti gli elementi del clima alterati, sotto condizioni di clima caldo e secco.

### Attività

**I1**

**Basso inquinamento**

Strade a basso flusso di traffico e presenza di vegetazione che cattura il CO<sub>2</sub> emesso dai veicoli.

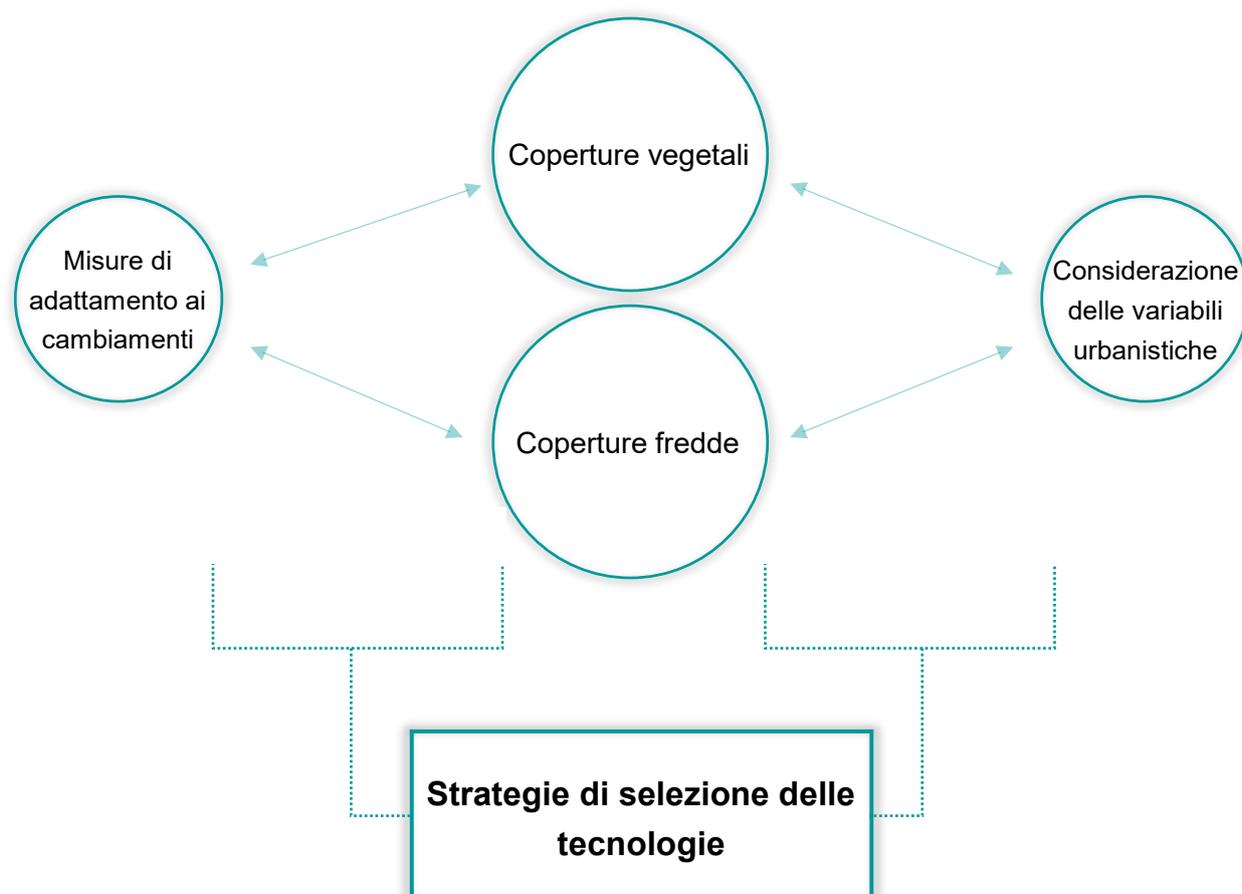
**I2**

**Alto inquinamento**

Strade principali di maggiore flusso di traffico e scarsità di vegetazione

Nel capitolo precedente sono stati dettagliati le variabili che influiscono nella prestazione delle coperture, basati su studi realizzati di ogni argomento. Pertanto, sono stati identificati i rapporti tra le 2 tecnologie, 5 elementi del clima e 7 variabili urbane.

Di seguito si presenta lo schema delle interazioni degli aspetti valutati, i quali hanno portato alla definizione delle strategie e delle considerazioni:



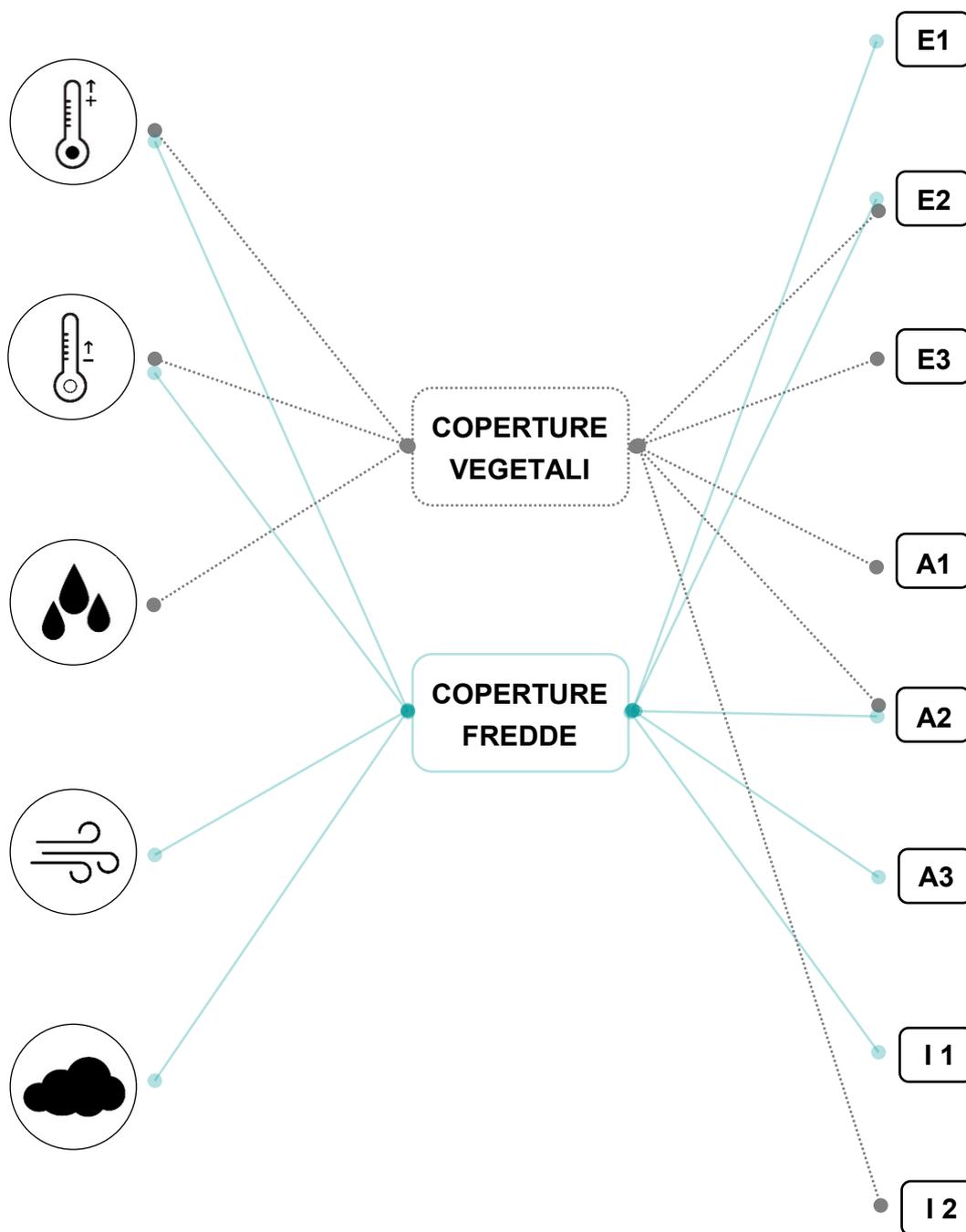
**Fig 6.2:** Schema delle interazioni dei sistemi con le variabili climatiche ed urbane per la definizione delle strategie di selezione.

## Interazione dei sistemi e le variabili Strategie di selezione

Elementi climatici

Tecnologie di copertura

Variabili urbane





# COPERTURE PER LA MITIGAZIONE

Strumento di selezione

## TECNOLOGIA VEGETALE

È un sistema naturale che fornisce il raffrescamento dell'aria mediante il suo processo naturale di evapotraspirazione, pertanto, ha un gran apporto nella riduzione nell'intensità dell'ICU superficiale nel periodo diurno, aumentando il flusso di calore latente e riducendo l'accumulo di calore.

Il sistema vegetale ha degli apporti specifici, quali: migliora del microclima, controllo di deflusso, cattura di CO<sub>2</sub>, abbattimento polveri aumento di biodiversità, isolamento acustico, isolamento termico e risparmio energetico. Le condizioni climatiche richiedono di specie vegetali resistenti alla siccità, quale Sedum.

Caratteristiche del sistema vegetale di tipo estensivo:

8 - 20 cm

70 - 250 kg/m<sup>2</sup>

45 - 55 anni

I livelli prestazionali del sistema è condizionato all'idratazione (si consiglia di adottare un sistema di irrigazione per il controllo di acqua utilizzata e di consumo energetico)

La specie vegetale sedum richiede di ridotte esigenze di manutenzione, (1-2 interventi/anno).

## TECNOLOGIA FREDDA

Il sistema è caratterizzato da materiali con elevati valori di riflettività ed emissività alla radiazione solare. La sua maggiore influenza nella riduzione dell'ICU si concentra nei periodi diurni, dato che limita l'assorbimento dell'energia solare, e di conseguenza riduce l'emissione di calore nei periodi notturni, contribuendo ai bassi flussi di calore sensibile.

I tipi di materiali riflettenti sono presentati come materiale liquido o prodotto.

La tecnologia contribuisce all'isolamento termico e al risparmio energetico degli edifici e alla migliore della qualità d'aria con la diminuzione della formazione di smog.

Caratteristiche della membrana elastomerica:

15 - 30 mm

20 - 30 anni

Applicato con un rullo o a spruzzo

Livello di manutenzione medio per prevenire la riduzione del valore di albedo dall'accumulo di sporcizia, si consiglia il lavaggio della copertura come misura efficiente (2 interventi/anno).

## CARATTERISTICHE FISICO - TECNICHE

Albedo	0,25 - 0,30
Emissività	Emissività
Capacità termica	80% (70% usato nell'evapotraspirazione)
Permeabilità	Si

Albedo	0,65 - 0,9
Emissività	0,85 - 0,91
Capacità termica	20%
Permeabilità	No

## CONTRIBUTO

La temperatura superficiale può arrivare ai 33-48°C (senza irrigazione), e può diminuire di 2-4°C con sistema di irrigazione, nel momento in cui una copertura convenzionale ha dei 76°C.

La temperatura massima superficiale dei materiali con elevata riflettività può arrivare ai 45°C, in confronto con quelli di bassa riflettività con temperature di 75-80°C.

## VARIABILI URBANISTICHE

### LOCALIZZAZIONE

E1

E2

E3

### ALTEZZA

A1

A2

A3

### ATTIVITÀ

I1

I2

### COPERTURA VEGETALE

E2  E3  A1  A2  I2

### COPERTURA FREDDA

E1  E2  A2  A3  I1

## LOCALIZZAZIONE

E1

**Edificio singolo**

Sono gli edifici localizzati in una zona distante da altre costruzioni, in questo modo hanno minori rischi di causare effetti negativi sulle altre superfici circostanti per la riflettività della radiazione incidente, ed anche sono più esposti agli elementi del clima.

E2

**Edificio ad angolo**

Sono posizionati in una zona esposta alla radiazione solare ed anche sono vicini ad altre costruzioni. Devono essere quindi considerate delle misure per affrontare sia l'incidenza degli elementi climatici, che evitare di causare effetti avversi sulle superfici vicine.

E3

**Edificio addossato**

Sono edifici circoscritti da altre costruzioni. Ciò conduce a misure di attuazione rigorose in quanto alla vulnerabilità delle superfici circostanti, e la possibilità di migliorare la condizione termica generata dagli stessi edifici dell'intorno.

## ALTEZZE

A1

**Altezza minima**

3-5 piani

A2

**Altezza media**

6-8 piani

A3

**Altezza massima**

9-12,18 piani

## ATTIVITÀ

I1

**Basso inquinamento**

Strade di basso flusso di traffico e la presenza di vegetazione che cattura il CO2 emesso dai veicoli.

I2

**Alto inquinamento**

Strade principali di maggiore flusso di traffico e la scarsità di vegetazione

## 6.2 Applicazione dello strumento nel quartiere di Gaztambide a Madrid

Nella presente sezione si espone l'analisi di una copertura realizzato in un edificio all'interno del quartiere di Gaztambide, nella quale sono state realizzate una serie di misurazioni con il fine di avere una base di dati reali per il successivo utilizzo dello strumento di selezione delle tecnologie, il quale potrà indirizzare la scelta giusta delle coperture per la mitigazione del fenomeno dell'isola di calore.

L'analisi è stata determinata nel seguente modo:

- selezione del materiale, laddove è stato definito di valutare le coperture nere in modo di comprendere le quali sono i peggiori scenari;
- selezione dell'edificio, il quale raccoglie le caratteristiche comuni del quartiere definite dallo studio;
- definizione del programma di misurazione, il quale prende i dati delle diverse tappe termiche nel trascorso della giornata.

### *Programma di misurazioni*

L'intenzione della misurazione è stata generare uno scenario di una giornata di alta radiazione solare nella città di Madrid di una copertura che ha le peggiori prestazioni, ed è anche comunemente impiegata nella città. Pertanto, si è proposta la selezione della copertura nera (impermeabilizzazione con bitume), impiegata in un edificio localizzato in una zona residenziale di configurazione urbana densa, con eventuali locali commerciali al piano terra ed una strada di basso flusso di traffico, la sua destinazione d'uso è anche residenziale, di tipologia di edificio addossato ed una altezza di 5 piani (altezza bassa).

Si procede alla definizione del programma di misurazione fondamento dalla letteratura studiata. Innanzitutto, si definisce il giorno di misurazione in modo di ottenere i dati sotto condizione di elevata radiazione solare, posteriormente sono state stabilite le serie di misurazione, considerando un intervallo di 3 ore con il fine di riconoscere le reazioni del materiale nelle diverse fasi termiche (13:00, 16:00, 19:00) e per ultimo, si è determinato che, in modo di avere dati più specifici, la misurazione (di ogni serie) prenderà 3 misure diverse (3 volte in un intervallo di 9 minuti).

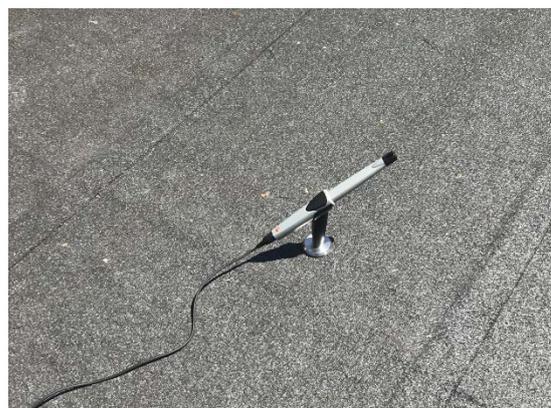
Il rilevamento dei dati è stato realizzato con lo strumento di misurazione *Testo 435*, con il quale è stato possibile rilevare valori di diverse variabili climatiche, quali temperatura superficiale, temperatura dell'aria e l'umidità relativa. Il *Testo 435* lavora con una gamma di accessori i quali permettono di realizzare l'analisi più preciso. I dati che non sono stati possibili di ottenere con lo strumento, sono stati presi dalla stazione

meteorologica *Ciudad Universitaria*, la quale si trova ad una distanza di circa 1,55 km dell'edificio studiato.

Di seguito, si presentano delle immagini della copertura e gli accessori utilizzati nel programma di misurazione:



**Fig. 6.3:** Copertura di impermeabilizzazione con bitume - Edificio Hilarión E. 36

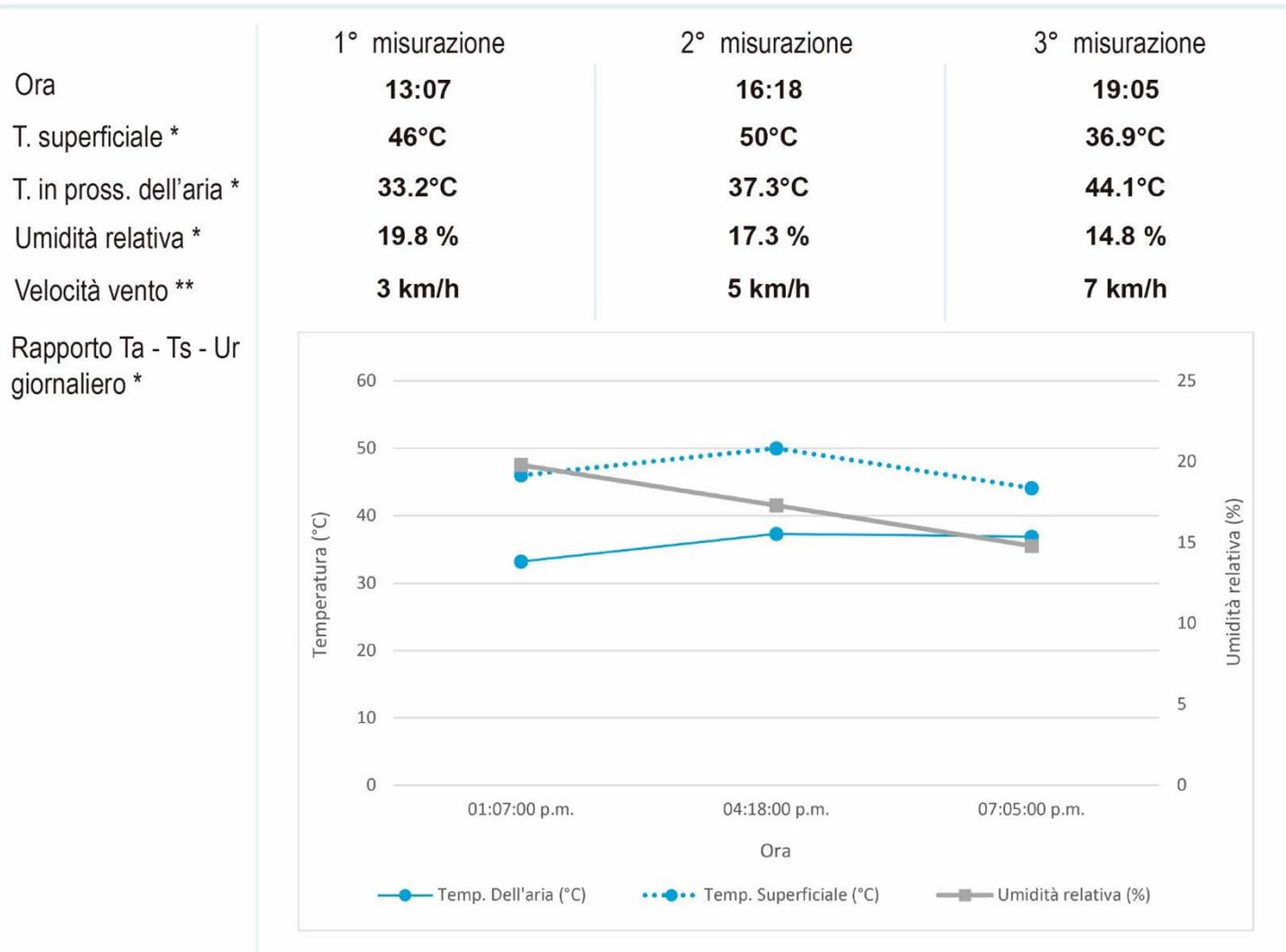


**Fig. 6.4:** Accessorio per misurazione di temperatura superficiale.



**Fig. 6.5:** Accessorio per misurazione di temperatura dell'aria e l'umidità relativa.

Caso studio - Edificio residenziale, Hilarón E. 36



(\*) Dati misurati con l'istrumento 'Testo 435'

(\*\*) Dati ricavati dalla stazione meteorologica 'Ciudad Universitaria'

## Caso studio - Edificio residenziale, Hilarión E. 36

### VARIABILI URBANISTICHE

#### LOCALIZZAZIONE

E1

E2

E3

#### ALTEZZA

A1

A2

A3

#### ATTIVITÀ

I1

I2

#### COPERTURA VEGETALE

E2  E3  A1  A2  I2

#### COPERTURA FREDDA

E1  E2  A2  A3  I1

### LOCALIZZAZIONE

E1

**Edificio singolo**

Sono gli edifici localizzati in una zona distante da altre costruzioni, in questo modo hanno minori rischi di causare effetti negativi sulle altre superfici circostanti per la riflettività della radiazione incidente, ed anche sono più esposti agli elementi del clima.

E2

**Edificio ad angolo**

Sono posizionati in una zona esposta alla radiazione solare ed anche sono vicini ad altre costruzioni. Devono essere quindi considerate delle misure per affrontare sia l'incidenza degli elementi climatici, che evitare di causare effetti avversi sulle superfici vicine.

E3

**Edificio addossato**

Sono edifici circoscritti da altre costruzioni. Ciò conduce a misure di attuazione rigorose in quanto alla vulnerabilità delle superfici circostanti, e la possibilità di migliorare la condizione termica generata dagli stessi edifici dell'intorno.

### ALTEZZE

A1

**Altezza minima**

3-5 piani

A2

**Altezza media**

6-8 piani

A3

**Altezza massima**

9-12, 18 piani

### ATTIVITÀ

I1

**Basso inquinamento**

Strade di basso flusso di traffico e la presenza di vegetazione che cattura il CO2 emesso dai veicoli.

I2

**Alto inquinamento**

Strade principali di maggiore flusso di traffico e la scarsità di vegetazione

### Caso studio – Edificio residenziale, Hilarion E. 36

Posteriormente alla realizzazione delle misurazioni della copertura e lo studio di essa all'interno del quartiere, è stato applicato lo strumento per indirizzare la selezione qualitativa della copertura capace di contribuire al migliorare le condizioni climatiche dell'ambiente urbano.

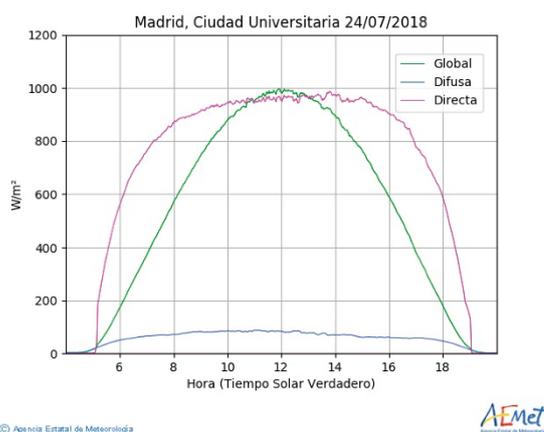
Date le variabili urbane che caratterizzano l'edificio ed il suo intorno, il risultato ottenuto è stato la tecnologia vegetale, il quale ha l'obiettivo di migliorare le condizioni microclimatiche generate dalle costruzioni nell'intorno della copertura in analisi (data la caratteristica di edificio addossato ed una altura minore rispetto agli altri edifici), le quali tendono a concentrare il calore trattenuto nei suoi materiali. Mediante l'impiego della tecnologia vegetale, l'effetto della concentrazione di calore può essere controllato dato che la vegetazione lo utilizza nel suo processo naturale di evapotraspirazione, la quale contribuisce alla mitigazione dell'effetto dell'isola di calore urbana ed anche permette una leve umidificazione dell'ambiente caratterizzato dalla siccità nei periodi estivi. Un'altro apporto dall'impiego del sistema a verde in confronto con il sistema freddo, è quello di limitare la generazione degli effetti avversi sugli edifici circondanti, quale l'assorbimento della radiazione solare riflessa dalla copertura, come precedentemente accennato. Contemporaneamente, anche se le attività del contesto non sono caratterizzate da alti livelli di inquinamento, la vegetazione ha la capacità di catturare il CO<sub>2</sub> emesso dalle macchine.

A causa delle condizioni di clima secco e caldo nelle stagioni estive della città di Madrid, il sistema deve prevedere uno studio che possa dimostrare la sua resistenza ai requisiti delle condizioni climatiche ed anche quelle del sistema stesso, quali: la specie vegetale deve garantire la resistenza della siccità di Madrid, pertanto si propone l'impiego della specie *sedum* la quale presenta caratteristiche di resistenza alla radiazione solare e alle alte temperature. Un altro requisito per il buon funzionamento del sistema è la prevenzione di un impianto di irrigazione che possa essere controllato e possa soddisfare le esigenze della vegetazione e del clima, fornendo l'idratazione del sistema, il quale richiede un contenuto d'acqua nel substrato di 0.35 – 0.45 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, e può essere previsto con un sistema a goccia il che garantisce un consumo appropriato delle acque.

Lo stato attuale della copertura evidenzia che le temperature superficiali possono arrivare ai 50°C in una giornata di temperature atmosferiche intorno ai 37.3°C, e una radiazione solare diretta di circa i 1000 W/m<sup>2</sup> nel suo momento massimo, dai quali verranno successivamente riemessi circa un 80% della radiazione assorbita nei periodi notturni.

Da un'altra parte, quando le temperature superficiali delle coperture nere (membrana bituminosa) arrivano circa i 70°C, le coperture vegetali invece, come citato nello strumento, sono capaci di ridurre le temperature superficiali fino a 30-40°C rispetto a quelle nere, presentando solo un incremento di 3-4°C sulle temperature in prossimità della superficie, riguardo a quelle superficiali.

In fine, nella selezione tra i due sistemi di copertura studiati c'è da considerare i contributi che possa fornire ognuno di essi nella mitigazione del fenomeno di isola di calore urbana in base alle condizioni di ogni edificio. In questo caso, gli studi della tecnologia vegetale hanno evidenziato i rilevanti apporti al microclima urbano, i loro limiti, e le misure per un buon funzionamento.



**Fig 6.3:** Radiazione solare globale, diffusa e diretta.



## PAROLE CHIAVE

## BIBLIOGRAFIA

### CAPITOLO 1

- 1 IPCC. (2014). *Cambio climático* 2014. <https://doi.org/10.1256/004316502320517344>
- 2 [ec.europa.eu](http://ec.europa.eu)
- 3 [www.epa.gov](http://www.epa.gov)
- 4 L'indice annuale dei gas effetto serra è definito come il rapporto tra il totale della forza radiativa diretta dovuto ai gas serra a lunga durata per qualsiasi anno. Il 1990 è stato scelto perché è l'anno di riferimento per il Protocollo di Kyoto.
- 5 [www.climate.nasa.gov](http://www.climate.nasa.gov)
- 6 Mills, G. (2008). Luke Howard and The Climate of London. *Weather*, 63(6), 153–157. <https://doi.org/10.1002/wea.195>
- 7 Galderisi, A., & Ferrara, F. F. (2012). Enhancing urban resilience in face of climate change: a methodological approach. *Tema. Journal of Land Use, Mobility and Environment*, 5(2), 69–88. <https://doi.org/10.6092/1970-9870/936>
- 8 Beretta, S. (2012). Gli Effetti Del Verde Sulla Mitigazione dell'isola di calore urbana
- 9 Jim, C. Y. (2017). Urban Forestry & Urban Greening An archaeological and historical exploration of the origins of green roofs. *Urban Forestry & Urban Greening*, 27(June), 32–42. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.06.014>
- 10 Enrico Mandolesi, *Edilizia*, Torino, “UTET Unione Tipografico – Editrice Torinese”, Volume 3, 1991.
- 11 Guzmán-sánchez, S., Jato-espino, D., Lombillo, I., & Diaz-sarachaga, J. M. (2018). Assessment of the contributions of different flat roof types to achieving sustainable development. *Building and Environment*, 141(May), 182–192. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.063>

### CAPITOLO 2

- 1 [www.mapama.gob.es](http://www.mapama.gob.es)
- 2 Il COP 21 è stata la Conferenza delle Nazioni Unite sul Cambiamento Climatico tenuta a Parigi nell'anno 2015, nella quale hanno stabilito un incremento medio della temperatura mondiale minore ai 2°C rispetto ai livelli preindustriali.

- 3 Cambio, R. D. E. (n.d.). IPCC-AR5
- 4 IPCC. (2014). *Cambio climático* 2014.  
<https://doi.org/10.1256/004316502320517344>
- 5 [www.sustainabledevelopment.un.org](http://www.sustainabledevelopment.un.org)
- 6 Espa, O., Clim, O. L. A. D. E. C., Para, T. S. G., Prevenci, L. A., Contaminaci, D. E. L. A., Clim, D. E. L. C., ... Ambiente, D. E. M. (n.d.). Adaptación al cambio marco para la coordinación entre administraciones públicas para las actividades de evaluación de impactos

### CAPITULO 3

- 1 Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island - A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 224–240.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.047>
- 2 Gavin\_Gui Jooseng, Phelan Patrick E, Kaloush Kamil E, Golden Jay S. Impact of Pavement thermophysical properties on surface temperatures. *Journa lof Materials in Civil Engineering* 2007;19:8.
- 3 Li, H., Harvey, J. T., Holland, T. J., & Kayhanian, M. (2013). The use of reflective and permeable pavements as a potential practice for heat island mitigation and stormwater management.
- 4 Doulos, L., Santamouris, M., & Livada, I. (2004). Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials. *Solar Energy*, 77(2), 231–249.
- 5 Dessì, V. (2007). Progettare il comfort urbano. Soluzione per un'integrazione tra società e territorio. *Architettura sostenibile*. 280 p., ill.
- 6 Synnefa, A., Santamouris, M., & Livada, I. (2006). A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment. *Solar Energy*, 80(8), 968–981.
- 7 Li, H., Harvey, J., & Jones, D. (2013). Multi-dimensional transient temperature simulation and back-calculation for thermal properties of building materials. *Building and Environment*, 59, 501–516.  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.09.019>
- 8 Carta di Aalborg, è frutto della I Conferenza Europea sulle Città sostenibili, organizzata dal Consiglio internazionale per le iniziative ambientali locali nel 1994. Con la Carta si dà inizio alla “Campagna Europea delle Città Sostenibili”

e si formalizzano i concetti di partecipazione e di “buona governance del territorio”, le città europee iniziano ad elaborare l’Agenda 21 per ogni località con criteri di sviluppo durevole e sostenibile.

- 9 Giordano, R., Scudo, G., Grosso, M. (2010). I prodotti per l’edilizia sostenibile. La compatibilità ambientale dei materiali nel processo edilizio. *Architettura sostenibile AS20*. 434 p.

## CAPITOLO 4

- 1 EPA. (2008). Reducing Urban Heat Islands: Green Roofs. *Heat Island Reduction Activities*, 1–23. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2002\)041<0792:THFIUA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2002)041<0792:THFIUA>2.0.CO;2)
- 2 Dessì, V. (2007). Progettare il comfort urbano. Soluzione per un’integrazione tra società e territorio. *Architettura sostenibile*. 280 p., ill.
- 3 Montacchini, E., & Tedesco, S., (2017). Tetti verdi. *CittàStudi* (160 p., ill.)
- 4 Guzmán-Sánchez, S., Jato-Espino, D., Lombillo, I., & Diaz-Sarachaga, J. M. (2018). Assessment of the contributions of different flat roof types to achieving sustainable development. *Building and Environment*, 141(April), 182–192. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.063>
- 5 Heusinger, J., Sailor, D. J., & Weber, S. (2018). Modeling the reduction of urban excess heat by green roofs with respect to different irrigation scenarios. *Building and Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.01.003>
- 6 EnergyPlus is frequently used to model and simulate building energy consumption. It has the capability to accurately model the energy flow between a building and its environment.
- 7 Li, D., Bou-Zeid, E., & Oppenheimer, M. (2014). The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies. *Environmental Research Letters*, 9(5). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/5/055002>
- 8 Roman, K. K., O’Brien, T., Alvey, J. B., & Woo, O. J. (2016). Simulating the effects of cool roof and PCM (phase change materials) based roof to mitigate UHI (urban heat island) in prominent US cities. *Energy*, 96, 103–117. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.11.082>

- 9 Wright, J. (1989). Whiter than White. *Physiotherapy (United Kingdom)*, 75(6), 324. [https://doi.org/10.1016/S0031-9406\(10\)62549-7](https://doi.org/10.1016/S0031-9406(10)62549-7)
- 10 Susca, T. (2012). Enhancement of life cycle assessment (LCA) methodology to include the effect of surface albedo on climate change: Comparing black and white roofs. *Environmental Pollution*, 163, 48–54. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.12.019>
- 11 [www.heatland.lbl.gov](http://www.heatland.lbl.gov)
- 12 Epa, U. S. (2008). Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. *Heat Island Reduction Activities*, 1–23. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2002\)041<0792:THFIUA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2002)041<0792:THFIUA>2.0.CO;2).
- 13 [www.nationalcoatings.com](http://www.nationalcoatings.com)
- 14 Imran, H. M., Kala, J., Ng, A. W. M., & Muthukumaran, S. (2018). Effectiveness of green and cool roofs in mitigating urban heat island effects during a heatwave event in the city of Melbourne in southeast Australia. *Journal of Cleaner Production*, 197, 393–405. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.179>
- 15 [www.un.org](http://www.un.org)
- 16 [www.mapama.gob.es](http://www.mapama.gob.es)
- 17 [ec.europa.eu](http://ec.europa.eu)
- 18 Tumini, I. (2010). Estrategias para reducción del efecto isla de calor en los espacios urbanos. Estudio aplicado al caso de Madrid. *Congreso Internacional Sobre Edificación Sostenible SB10mad*, 1–15. Retrieved from [www.sb10mad.com/ponencias/archivos/a/A033.pdf](http://www.sb10mad.com/ponencias/archivos/a/A033.pdf)
- 19 Li, D., Bou-Zeid, E., & Oppenheimer, M. (2014). The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies. *Environmental Research Letters*, 9(5). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/5/055002>
- 20 Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island - A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 224–240. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.047>

- 21 Li, H., Harvey, J., & Jones, D. (2013). Multi-dimensional transient temperature simulation and back-calculation for thermal properties of building materials. *Building and Environment*, 59, 501–516. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.09.019>
- 22 US EPA, C. P. P. D. (2012). Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies - Urban Heat Island Basics.
- 23 Asaadaa, T., & Ca, V. T. (2000). Characteristics of Permeable Pavement during Hot Summer Weather and Impact on the Thermal Environment. *Building And Environment*, 35, 363±375.
- 24 Montacchini, E., & Tedesco, S., (2017). Tetti verdi. *CittàStudi* (160 p., ill.)
- 25 Guzmán-Sánchez, S., Jato-Espino, D., Lombillo, I., & Diaz-Sarachaga, J. M. (2018). Assessment of the contributions of different flat roof types to achieving sustainable development. *Building and Environment*, 141(April), 182–192. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.063>
- 26 Rosenfeld, A. H., Akbari, H., Bretz, S., Fishman, B. L., Kurn, D. M., Sailor, D., & Taha, H. (1995). Mitigation of urban heat islands: materials, utility programs, updates. *Energy and Buildings*, 22(3), 255–265. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(95\)00927-P](https://doi.org/10.1016/0378-7788(95)00927-P).
- 27 Oquendo, V., (2017). Sistemi innovativi di living wall system: Prestazioni ambientali e tecnologiche. (376 p., ill.)

## CAPITOLO 5

- 1 Ambiente, D. E. M. (n.d.). *Atlas Climático Ibérico Iberian Climate Atlas*.
- 2 Dessì, V. (2007). Progettare il comfort urbano. Soluzione per un'integrazione tra società e territorio. *Architettura sostenibile*. 280 p., ill.
- 3 Cambio, R. D. E. (n.d.). IPCC-AR5.
- 4 [www.adaptecca.es](http://www.adaptecca.es)
- 5 Prentice IC, Farquhar GD, Fasham MJR, Goulden ML, Heimann M, Jaramillo VJ, Kheshgi HS, Le Quéré C, Scholes RJ, W. D. (2001). The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*.

*Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 881. <https://doi.org/10.1256/004316502320517344>

- 6 OECC. (2006). Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático, 59.
- 7 Alobaydi, D., Bakarman, M. A., & Obeidat, B. (2016). The Impact of Urban Form Configuration on the Urban Heat Island: The Case Study of Baghdad, Iraq. *Procedia Engineering*, 145, 820–827. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.107>
- 8 Hu, Y., White, M., & Ding, W. (2016). An Urban Form Experiment on Urban Heat Island Effect in High Density Area. *Procedia Engineering*, 169, 166–174. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.10.020>
- 9 Dessì, V. (2007). Progettare il comfort urbano. Soluzione per un'integrazione tra società e territorio. *Architettura sostenibile*. 280 p., ill.
- 10 Sperimentale, A., & Fenomeno, D. E. L. (2012). Università degli Studi di Padova Dipartimento di Tecnica e Gestione dei sistemi industriali Tesi di laurea magistrale in ingegneria gestionale, 1–60.
- 11 Rosenfeld, A. H., Akbari, H., Bretz, S., Fishman, B. L., Kurn, D. M., Sailor, D., & Taha, H. (1995). Mitigation of urban heat islands: materials, utility programs, updates. *Energy and Buildings*, 22(3), 255–265. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(95\)00927-P](https://doi.org/10.1016/0378-7788(95)00927-P)

## CAPITOLO 6

- 1 Synnefa, A., Santamouris, M., & Livada, I. (2006). A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment. *Solar Energy*, 80(8), 968–981. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.08.005>
- 2 Imran, H. M., Kala, J., Ng, A. W. M., & Muthukumaran, S. (2018). Effectiveness of green and cool roofs in mitigating urban heat island effects during a heatwave event in the city of Melbourne in southeast Australia. *Journal of Cleaner Production*, 197, 393–405. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.179>

## **SITOGRAFIA**

[ec.europa.eu](http://ec.europa.eu)

[www.epa.gov](http://www.epa.gov)

[www.climate.nasa.gov](http://www.climate.nasa.gov)

[www.mapama.gob.es](http://www.mapama.gob.es)

[www.sustainabledevelopment.un.org](http://www.sustainabledevelopment.un.org)

[www.heatiland.lbl.gov](http://www.heatiland.lbl.gov)

[www.nationalcoatings.com](http://www.nationalcoatings.com)

[www.un.org](http://www.un.org)

[www.adaptecca.es](http://www.adaptecca.es)

[www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)

[www.mapama.gob.es](http://www.mapama.gob.es)

[www.madrid.es](http://www.madrid.es)

[www.aemet.es](http://www.aemet.es)

[www.coolroofs.org](http://www.coolroofs.org)

[www.carbonsolutions.com](http://www.carbonsolutions.com)