



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

**VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI DI SISTEMI DI RAFFRESCAMENTO
EVAPORATIVO PER LA MITIGAZIONE DELLE ISOLE DI CALORE URBANO**

**EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF AN EVAPORATIVE COOLING
SYSTEM FOR THE MITIGATION OF THE URBAN HEAT ISLANDS**

Relatore:

Prof. Ing. Gianluca Coccia, PhD

Tesi di Laurea di:

Eleonora Polenta

A.A. 2022/2023

INDICE DEI CONTENUTI

Introduzione	VIII
1. Stato dell'arte	1
1.1 Isole di Calore Urbane	1
1.2 Soluzioni di mitigazione	6
1.2.1 Alberi e zone verdi	6
1.2.2 Tetti e palazzi verdi	7
1.2.3 Materiali rinfrescanti	9
2. Acqua come elemento di mitigazione	13
2.1 Bacini idrici	13
2.2 Sistemi di raffrescamento evaporative	15
2.2.1 Luoghi di applicazione	16
2.2.2 Variabili	22
3. Caso di studio	26
3.1 Struttura e finalità	26
3.2 Raccolta dati	28
3.3 Risultati	31
4. Conclusioni	36

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1. Le cause del fenomeno isola di calore urbano (UHI).....	2
Figura 2. (b) Cambiamento negli anni degli effetti delle UHI considerando 3 scenari differenti, per la città di Tianjin; (c) Cambiamento negli anni degli effetti delle UHI considerando 3 scenari differenti, per la città di Shenzhen (lo scenario 1 rappresenta la situazione attuale delle due città, nello scenario 2 vengono rimossi i bacini idrici dall'area urbana, nello scenario 3 vengono rimossi i bacini idrici dall'area suburbana).....	14
Figura 3. (a) Struttura di un sistema di raffrescamento evaporativo in una zona di attesa; (b) Valutazione del mTSV prima e dopo l'attivazione del sistema di raffrescamento; (c) Valutazione del CSV prima e dopo l'attivazione del sistema di raffrescamento.....	18
Figura 4. Azione dei sistemi di raffrescamento evaporativo nelle zone di attesa dei mezzi pubblici sul clima esterno	19
Figura 5. Schematizzazione di un sistema di raffrescamento evaporativo applicato in una serra.....	21
Figura 6. Luogo dell'installazione, presso centro di ricerca Casaccia (ENEA). La figura di sinistra evidenzia la struttura vista dall'esterno. La figura a destra	

<p> rappresenta il sistema di raffrescamento evaporativo avviato, sono ben visibili le particelle d'acqua </p>	27
<p> Figura 7. Configurazione del sistema di raffrescamento evaporativo. La linea esterna rappresenta il tetto mentre quella tratteggiata identifica la griglia su cui sono montati gli ugelli (in questo caso nella configurazione con una distanza di 1.0m) </p>	27
<p> Figura 8. Differenza di temperatura tra la zona mitigata e quella indisturbata in relazione alla temperatura esterna (test 1 e test 2) </p>	31
<p> Figura 9. Differenza di umidità relativa tra la zona mitigata e quella indisturbata in relazione alla temperatura esterna (test 1 e test 2) </p>	32
<p> Figura 10. Differenza di temperatura tra la zona mitigata e quella indisturbata in relazione alla temperatura esterna (test 4 e test 5) </p>	32
<p> Figura 11. Differenza di temperatura tra la zona mitigata e quella indisturbata in relazione alla temperatura esterna (test 6 e test 7) </p>	33
<p> Figura 12. Valutazione del MOCI nella zona mitigata (MOCI_01) e nella zona indisturbata (MOCI_02) (test 1 e test 3) </p>	34
<p> Figura 13. Valutazione del MOCI nella zona mitigata (MOCI_01) e nella zona indisturbata (MOCI_02) (test 5 e test 6) </p>	34
<p> Figura 14. Valutazione del MOCI nella zona mitigata (MOCI_01) e nella zona indisturbata (MOCI_02) (test 6 e test 7) </p>	35

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1. Configurazione dei vari test	29
---	----

NOMENCLATURA

SIMBOLI

AT – Air temperature (°C)

GR – Horizontal global solar irradiation (kWh/m²)

GT – Globe temperature (°C)

H/W – Height-to-width

I_{cl} – Thermal resistance of clothes (°C/W)

LST – Land surface temperature (°C)

MRT – Mean radiant temperature (°C)

RH – Relative humidity (%)

SVF – Sky view factor

WD – Wind direction

WS – Wind speed (m/s)

ACRONIMI

ASHRAE – American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers

AUHI – Atmospheric urban heat island

CC – Cool colored

CSV – Comfort sensation vote

DCR – Daytime radiative cooling

FL – Fluorescent

GIS – Geographic information system
LC – Light colored
MOCI – Mediterranean outdoor comfort index
mTSV – Modified thermal sensation vote
PCM – Phase change
PET – Physiologically equivalent temperature
RR - Retroreflective
SUHI – Surface urban heat island
TC - Thermochromic
UGS – Urban Green Space
UHI – Urban heat island

Introduzione

Questa tesi verte sull'analisi di un sistema di raffrescamento evaporativo utilizzato per mitigare gli effetti delle isole di calore urbano; è stato preso in esame un particolare caso di studio svolto dall'agenzia ENEA a Roma. Tutte le variabili in gioco sono state prese in considerazione, sia quelle relative all'ambiente esterno sia quelle inerenti alla struttura e al controllo del sistema di raffrescamento evaporativo.

Nello stato dell'arte (capitolo 1) viene presentato il fenomeno dell'isola di calore urbano e lo sviluppo che ha avuto nel tempo, analizzando sia le cause che gli effetti finora conosciuti. Sono stati trattati i vari metodi utilizzati per mitigare le temperature nelle zone urbane, cercando la soluzione più prestante ed evidenziando anche gli aspetti più critici.

Nel secondo capitolo si trova un'analisi più dettagliata dell'utilizzo dell'acqua come mezzo per raffrescare le città, partendo da metodi naturali per arrivare ai sistemi di raffrescamento evaporativo. In particolare, si è concentrato lo studio sui vari luoghi di applicazione e sulle variabili che influenzano l'efficacia di questi sistemi.

Il terzo capitolo prende in considerazione uno studio sperimentale, effettuato da ENEA, in cui si vogliono verificare le prestazioni dei sistemi di raffrescamento evaporativo applicati in un contesto urbano sotto gli effetti dell'isola di calore e capire quali caratteristiche ne influenzano maggiormente il rendimento. L'analisi dati ha permesso di valutare varie configurazioni e modalità di controllo al fine di migliorare l'efficienza per implementare l'utilizzo dei sistemi di raffrescamento evaporativo.

Nella conclusione si evidenziano i principali risultati ottenuti dallo studio sperimentale, ponendo particolare attenzione alle variabili che hanno permesso di ottenere una maggiore efficienza e alcune criticità riscontrate.

1. Stato dell'arte

1.1 Isole di Calore Urbane

Negli ultimi anni si sta assistendo al fenomeno di “Isola di Calore Urbano” (Urban Heat Island – UHI), nel quale la temperatura delle zone urbane è superiore a quella delle aree circostanti. In generale, la differenza di temperatura tra le diverse località è più evidente durante la notte rispetto al giorno, in media si può osservare una differenza che varia da 1°C a 10°C [1].

Il fenomeno delle UHI è condizionato da diversi fattori, sia naturali che antropologici: condizioni meteorologiche, struttura morfologica della zona, presenza di aree verdi, complessi urbani e loro caratteristiche. Dalla variabilità di questi fattori si deduce la possibilità di una variazione temporale e spaziale delle isole di calore. Lo sviluppo delle UHI è fortemente collegata all'interazione della radiazione solare con l'atmosfera urbana, quest'ultima ha caratteristiche dipendenti dalla complessità del tessuto urbano. Si osservano tre livelli di interazione [1]; il primo coinvolge le proprietà termiche ed ottiche dei materiali usati, prende in considerazione la radiazione solare allo strato superficiale urbano. Il secondo livello si verifica al di sopra degli edifici, infine il terzo interessa l'interazione della radiazione solare con l'intera città.

Sono identificabili due categorie di UHI [2], di superficie (Surface Urban Heat Island – SUHI) e di atmosfera (Atmospheric Urban Heat Island – AUHI), aventi caratteristiche e metodi di rilevazione differenti. Nelle AUHI le differenze di temperatura sono più accentuate di notte mentre di giorno sono molto ridotte e in alcuni casi assenti [1]. La loro determinazione si basa sulla temperatura dell'aria che avviene tramite delle stazioni

termiche situate direttamente sulla superficie urbana e talvolta montate sopra i veicoli. Dall'analisi di questi dati si ottiene una rappresentazione puntuale, sia dal lato spaziale che temporale, delle variazioni di temperatura, potendo studiare in maniera più precisa l'impatto di fattori ambientali (nuvole, vento) e urbani [2]. Per le SUHI, la differenza di temperatura varia dai 10°C ai 15°C durante il giorno mentre la sera si abbassa tra i 5°C e i 10°C [3]; queste differenze di temperature sono accentuate durante il periodo estivo. Alla base della valutazione delle SUHI si trova la temperatura della superficie terrestre (Land Surface Temperature – LST) ottenibile da dati provenienti dalle misurazioni satellitari. La maggiore facilità e praticità nell'ottenere i dati relativi alle SUHI permette un'analisi di aree più grandi e di un maggior numero di città, potendo fare confronti tra diverse città e valutare l'effetto dell'urbanizzazione su di esse. Lo studio più completo e puntuale fatto per le AUHI può essere integrato in quello delle SUHI per renderlo ancora più completo.

Nella Review di Delicami [4] (2018) si evidenziano le principali cause delle UHI: copertura verde (44%), variabilità delle stagioni (33%), aree edificate (28%), differenza tra giorno e notte (25%) e la densità di popolazione (14%). Questi fattori possono essere suddivisi tra controllabili e incontrollabili, un'ulteriore distinzione è fatta tra variazioni temporali, permanenti e cicliche.

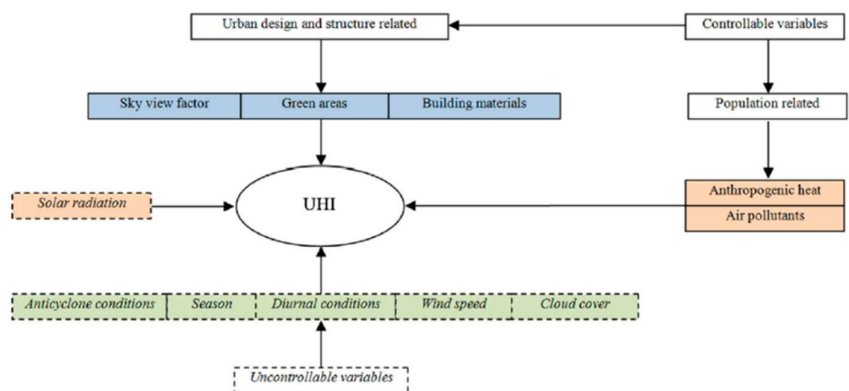


Figura 1. Le cause del fenomeno isola di calore urbano (UHI)

L'aumento della popolazione ha portato nel tempo a un ampliamento sempre maggiore dei centri urbani, andando ad alterarne la geometria e ad eliminare intere zone verdi. La densità di urbanizzazione e la necessità di costruire nuove zone urbane comporta un cambiamento nelle proprietà dei materiali utilizzati, che vanno a sostituire zone verdi e ricche di elementi naturali. I tipi di materiali impiegati per ricoprire queste aree e le loro caratteristiche, sono responsabili della differenza di temperatura nelle aree urbane [5]. Ad esempio, i materiali usati nell'edilizia urbana, con il loro colore scuro, possono raggiungere durante la giornata temperature molto più elevate di zone in cui sono presenti alberi e vegetazione. Per lo studio delle UHI, si prendono in considerazione le proprietà fisiche-termiche dei materiali e il bilanciamento termico, che coinvolge la quantità di radiazione solare assorbita e immagazzinata, la radiazione infrarossa rilasciata, il calore trasferito per convezione all'aria, il calore immagazzinato nella massa del materiale e il calore condotto a terra [6].

La capacità di un materiale di assorbire e cedere calore è descritta dall'inerzia termica, definita come la capacità di un materiale di variare più o meno lentamente la sua temperatura in risposta a una variazione di temperatura esterna. I materiali da costruzione hanno un alto valore di inerzia termica, questo comporta un lasso di tempo maggiore necessario per tornare all'equilibrio termico.

Altre caratteristiche da prendere in considerazione sono la capacità termica e la conducibilità termica. La capacità termica è maggiore nei materiali da costruzione rispetto a quelli naturali, ciò permette una maggiore abilità nell'immagazzinare calore. La conducibilità termica ha invece bassi valori nelle superfici urbane, che non riescono a smaltire velocemente il calore con gli strati circostanti. La conducibilità termica del

materiale dipende dalla sua composizione, dai componenti utilizzati e la loro percentuale, dalla compattezza del materiale. Le proprietà dei componenti sono legate al tipo di materiale, la composizione mineraria, la densità e la dimensione delle particelle. I materiali con una maggiore porosità e permeabilità permettono maggiormente l'evaporazione, favorendo la dispersione di calore [7].

L'interazione della radiazione solare con le superfici urbane è descritta dall'albedo e dall'emissività. Quando la radiazione solare colpisce una superficie, una parte viene assorbita andando ad aumentare la sua energia termica e una parte viene riflessa. L'albedo è un indicatore dell'energia riflessa e varia nel tempo a causa del deterioramento dei materiali e degli agenti atmosferici [8]. Una parte della radiazione assorbita viene riflessa nell'atmosfera, l'emissività è il rapporto dell'energia irradiata dalla superficie rispetto all'energia emessa da un corpo nero nelle stesse condizioni.

Tutte queste caratteristiche dei materiali usati nella costruzione delle aree urbane, vanno ad influenzare l'interazione con la radiazione solare, portando alla variazione delle temperature e alla formazione delle isole di calore urbano UHI.

Il fenomeno delle isole di calore influenza l'ambiente e chi vive nelle zone urbane. Il confort termico è definito come “una condizione mentale di soddisfazione nei riguardi dell'ambiente termico” [9], è quindi influenzato dalla temperatura dell'aria, dalla presenza e dalla velocità del vento, dall'umidità e dalla radiazione solare. Le alte temperature caratteristiche delle UHI sono messe in stretta relazione con il confort termico delle città, in particolare se ne evidenzia la correlazione durante il periodo estivo, quando le ore di discomfort sono superiori [10]. Gli effetti delle UHI sull'uomo e sulla sua condizione fisica possono essere suddivisi in diretti (aumento della mortalità, minor soddisfazione dello stile

di vita) e indiretti, comprendenti una serie di malattie derivanti dall'esposizione ad alte temperature (malattie cardiopolmonari, problemi respiratori, privazione del sonno [11]). Questi effetti sono accentuati nelle zone in via di sviluppo [12], dove l'urbanizzazione è più evidenziata, e nelle persone fragili [13], anziani o soggetti con malattie pregresse.

L'aumento delle temperature nelle UHI porta ad un maggiore consumo dei sistemi di raffrescamento usati in abitazioni private, uffici ed edifici commerciali, causando un aumento nella richiesta di energia. Si arriva ad un circolo vizioso in cui per abbassare la temperatura esterna si usano strumenti che, tramite le emissioni che producono, vanno ad aumentare la temperatura esterna. Numerosi studi affermano che l'aumento di 1°C della temperatura giornaliera può portare ad un aumento dei consumi di energia dal 2% al 4% [14]; questo porta a picchi nella richiesta di energia, specialmente nel periodo estivo dove il fenomeno delle UHI è più accentuato. Tuttavia, la relazione tra UHI e consumo di energia varia in base alla località presa in considerazione; nelle città situate in zone caratterizzate da climi freddi l'aumento delle temperature a causa delle UHI porta a una riduzione nell'utilizzo di sistemi di riscaldamento, ottenendo anche una minore emissioni di gas e utilizzo di combustibili fossili [15].

L'aumento delle temperature ha effetti anche sui corsi d'acqua. L'impatto di questo inquinamento è negativo quando la temperatura dell'aria atmosferica e del punto di rugiada sono superiori della temperatura del corso d'acqua e quando gli eventi piovosi sono brevi e intervallati da grandi periodi più aridi [16]. I fattori che influenzano maggiormente l'aumento delle temperature dei corsi d'acqua sono le condizioni meteorologiche e l'urbanizzazione, in quanto va ad aumentare le superfici impermeabili. La combinazione di alte temperature e forti piogge influenzano tutti i bacini idrici e le concentrazioni di

nutrienti ed inquinanti disciolti nell'acqua. L'aumento della temperatura dell'acqua porta ad un aumento del tasso di mineralizzazione e ad una riduzione della concentrazione di ossigeno.

1.2 Soluzioni di mitigazione

1.2.1 Alberi e zone verdi

Una soluzione naturale alle UHI è l'ampliamento delle zone verdi urbane (Urban Green Space – UGS), che rivestono un ruolo fondamentale nell'abbassamento della temperatura superficiale delle città grazie alle capacità delle piante di assorbire calore e del suo trasferimento tramite il processo di evaporazione [17]. Le variabili che influenzano la mitigazione delle zone verdi nella città sono principalmente tre: il tipo di vegetazione utilizzato, la forma e la equità spaziale della loro disposizione.

Al fine di massimizzare la capacità di raffrescamento delle UGS è importante studiare quali tipi di piante sono le più indicate. Una prima condizione è data dalla città in cui ci si trova e il clima di quella specifica zona geografica. Inoltre, aree dove sono presenti alberi hanno un effetto più mitigativo rispetto a zone con solo erba [18]. Da alcuni studi [19] è emerso che aumentando le zone verdi con un 10% di vegetazione forestale si ottiene una diminuzione della temperatura di quasi 0,83°C; utilizzando solamente vegetazione forestale si raggiunge la massima diminuzione di temperatura (-4,9°C).

L'effetto di mitigazione delle UGS è collegato anche alla loro area, perimetro e fattore di forma. La variabilità di questi fattori non influenza direttamente la distanza dell'area raffrescata ma solamente la diminuzione della temperatura; quindi, aumentando l'area o la

circonferenza delle UGS si avrebbe un miglior risultato con un basso costo [20]. In più, effetti di mitigazione sulle UHI si ottengono con UGS aventi fattori di forma piccoli.

Nelle città si ha una distribuzione non omogenea delle UGS, portando effetti di mitigazione differenti nelle varie zone residenziali della città stessa. La giusta distribuzione delle UGS ha una grande influenza sulla mitigazione degli effetti delle UHI e sul miglioramento dell'ambiente urbano, per questo è oggi un punto cruciale nella progettazione delle future zone verdi urbane. Una maggiore uniformità delle UGS porta alla riduzione delle aree calde e fredde mentre aumenta la quantità di aree mediamente calde e mediamente fredde [17]. Da questi risultati, apparentemente contrastanti, si conclude che favorendo l'equità spaziale delle UGS si raggiunge il miglioramento dell'ambiente termico urbano complessivo grazie alla riduzione della temperatura della superficie terrestre (LST) all'interno delle aree urbane.

1.2.2 Tetti e palazzi verdi

L'utilizzo di alberi e vegetazione negli edifici porta numerosi avanzamenti nelle zone urbane: migliora la qualità dell'aria riducendo l'inquinamento atmosferico, aumenta la biodiversità, porta a benefici in ambito economico e sociale [21]. Contribuisce inoltre nella mitigazione delle UHI andando a modificare il microclima delle città [22].

La normativa italiana UNI 11235 [23] prevede una classificazione, dividendo in due principali categorie i tetti verdi:

- Copertura a verde estensivo, sistema che utilizza specie vegetali in grado di adattarsi e svilupparsi nelle condizioni ambientali in cui sono poste, richiedente minimi interventi di manutenzione
- Copertura a verde intensivo, sistema che utilizza specie vegetali in grado di adattarsi e svilupparsi nelle condizioni ambientali in cui sono poste, pur con il necessario ausilio di una manutenzione di intensità media ed alta, in funzione delle associazioni di specie vegetali.

I primi vengono usati maggiormente per giardini pensili in edifici di dimensioni modeste, mentre i secondi sono utilizzati per superfici più ampie come i tetti dei grandi edifici commerciali.

Implementare coperture verdi in un contesto urbano, prevede un'analisi del contesto verde urbano preesistente in modo da intervenire portando miglioramenti al comfort dell'area cittadina. Il primo passo è quello di studiare la quantità e la disposizione delle aree verdi urbane grazie all'utilizzo di software basati su informazioni geografiche (Geographic information system – GIS) spesso provenienti da immagini satellitari. In seguito, si passa all'analisi del comfort termico utilizzando stazioni meteorologiche che tengono conto di più informazioni come la temperatura e l'umidità dell'aria, la velocità del vento e la radiazione solare [17].

L'aumento della temperatura nelle UHI è influenzato anche dagli edifici presenti nel contesto urbano e dalle caratteristiche dei materiali utilizzati. Creare superfici verdi che coprono e sostituiscono le superfici degli edifici (tipicamente con bassi valori di albedo) porta a una diminuzione della LST [24]. Altri fattori si riferiscono alle strade, la loro forma ed orientazione, all'altezza e alla densità degli edifici [25]. Prendendo in considerazione il

rapporto tra altezza e larghezza (Height-to-Width – H/W) degli edifici, si nota che un alto valore di H/W comporta un aumento della velocità del vento, questo si traduce in una minore variabilità del comfort termico con un andamento dell'indice termico PET (Physiologically Equivalent Temperature – PET) caratterizzato da un numero minore di picchi; tutto ciò si traduce in un miglioramento del comfort termico a livello della strada [26]. Un altro elemento che favorisce questo miglioramento è la presenza dell'ombra, caratteristica maggiormente presente nel caso di edifici con un alto valore di H/W [27]. Alcuni studi analizzano il fattore di vista degli immobili (Sky View Factor – SVF) che identifica la percentuale di cielo visibile ad una certa posizione. C'è una relazione tra il SVF e il PET anche se varia in base alle stagioni: durante l'estate il comfort è migliore con un basso valore di SVF, al contrario in inverno lo stesso valore porterebbe discomfort [28].

1.2.3 Materiali rinfrescanti

L'urbanizzazione riveste un ruolo importante all'interno del fenomeno UHI. La continua sostituzione di aree verdi e rurali con superfici cementificate come marciapiedi e edifici influenza l'aumento delle temperature nelle città. Essendo difficile una riduzione delle costruzioni presenti nelle città, usare materiali che aiutano a diminuire l'impatto sull'ambiente è di fondamentale importanza per contribuire alla mitigazione delle UHI.

La radiazione solare che arriva sulla superficie terrestre può essere riflessa, trasmessa, assorbita ed emessa. Le superfici che sono maggiormente esposte sono i tetti dei palazzi e le pavimentazioni cementificate (ad esempio i marciapiedi); i materiali di cui sono fatti assorbono gran parte della radiazione solare che poi rilasciano sotto forma di calore sensibile, causando un aumento di temperatura [29]. I materiali che contribuiscono alla

mitigazione del surriscaldamento urbano devono avere precise caratteristiche, come un'elevata riflettanza solare e emissività termica; in questo modo non solo si migliora il comfort termico esterno, anche quello interno viene ottimizzato provocando una diminuzione nella richiesta di raffrescamento degli edifici [30].

I materiali rinfrescanti (cool materials) possono essere applicati sia su superfici orizzontali, nel caso di tetti o marciapiedi, sia su superfici verticali come pareti o finestre. Un recente studio [31] sui materiali rinfrescanti più prestanti, propone una suddivisione basata sulla riflettanza e sul range dello spettro elettromagnetico.

- Materiali di colore chiaro (Light colored – LC)

Questi materiali hanno un alto valore di riflettanza nello spettro del visibile (400-700 nm) riflettendo la maggior parte della radiazione incidente, questo permette di mantenere la temperatura superficiale degli edifici più bassa. Sono materiali non troppo performanti ma di interesse per le zone in cui il limitato progresso tecnologico non permette l'utilizzo di materiali più innovativi.

- Materiali di colore freddo (Cool colored – CC)

Sono materiali molto riflettenti nella radiazione infrarossa, che rappresenta la maggior parte dello spettro solare. Nonostante le buone prestazioni sono materiali poco utilizzati per ragioni principalmente estetiche, possono infatti procurare problemi di abbagliamento a causa del loro colore.

- Materiali retroriflettenti (retroreflective – RR)

Questi materiali hanno la capacità di riflettere la radiazione nella stessa direzione in cui colpisce. Il loro utilizzo è più performante in contesti urbani caratterizzati da edifici bassi; dove sono presenti grattacieli e infrastrutture molto ravvicinate, si

favorisce la riflessione multipla tra gli edifici facendo rimanere la radiazione solare all'altezza del terreno, all'interno del contesto urbano.

- **Materiali per il raffreddamento radiativo diurno (daytime radiative cooling – DCR)**
Questa tecnica di raffreddamento prevede l'esposizione delle superfici alla radiazione solare diretta durante tutto il giorno; i materiali sono caratterizzati da un'elevata riflettanza all'interno dello spettro solare, bassa riflettanza e alta emissività all'interno della finestra atmosferica. L'efficienza di questi materiali è fortemente influenzata da fattori ambientali come l'umidità relativa e la presenza di inquinanti presenti in atmosfera.
- **Materiali termocromici (thermochromic – TC)**
Hanno come principale proprietà il termocromismo, che permette il cambiamento di colore con il variare della temperatura. Il principale vantaggio, soprattutto rispetto ai materiali CC, è quello di cambiare tono in base all'ambiente circostante.
- **Materiali a cambiamento di fase (phase change – PCM)**
Sono in grado di assorbire o cedere calore durante il passaggio di fase, dallo stato liquido a quello solido o viceversa. Vengono classificati in base alla loro composizione chimica e si dividono in composti organici, composti inorganici e miscele eutettiche.
- **Materiali fluorescenti (fluorescent – FL)**
Questi materiali emettono energia elettromagnetica nella gamma UV quando sono eccitati da una proprietà nota come fluorescenza. La fluorescenza è definita come la capacità di alcune sostanze di emettere energia sotto forma di luce dopo aver assorbito energia elettromagnetica.

Conoscendo le caratteristiche dei materiali ad oggi sviluppati, la soluzione costruttiva che punta alla migliore mitigazione delle UHI è la combinazione di più materiali, sfruttando i benefici di ognuno. L'utilizzo di materiali rinfrescanti negli edifici è strettamente legato allo sviluppo tecnologico; la ricerca su questi materiali porterà ad un maggior utilizzo grazie anche a una migliore efficacia nelle tecniche di produzione e di valutazione [32].

2. Acqua come elemento di mitigazione

2.1 Bacini idrici

L'acqua può essere usata per mitigare gli effetti delle UHI sfruttando il processo endotermico che permette di togliere il calore dalla superficie e dall'aria raffrescando le loro temperature [33]. Il trasferimento di calore avviene grazie all'evaporazione dell'acqua ma anche grazie al trasferimento di calore convettivo tra l'aria e la superficie dell'acqua; quest'ultima si trova sempre a una temperatura minore dell'aria circostante creando un gradiente termico maggiore [34].

Nei contesti urbani è possibile trovare l'acqua sia naturalmente, fiumi, laghi, stagni, sia a seguito di interventi antropologici come riserve idriche o bacini artificiali. Nell'analizzare il bilancio energetico superficiale è necessario tener conto dove si trovano le fonti d'acqua; il flusso di calore nelle aree urbane è diverso da quello osservabile in natura, in quanto è influenzato dalle emissioni delle vetture e degli edifici [35].

Un recente studio [36] ha analizzato la variazione di temperatura nelle UHI in relazione alla presenza di fonti d'acqua di vario genere in due grandi città della Cina (Tianjin e Shenzhen), prendendo in considerazione gli anni dal 2016 al 2021. In questo periodo si è registrato un aumento di temperatura tra 1.2°C e 1.4°C come effetto del fenomeno UHI. Per poter quantificare l'efficienza dell'acqua come metodo di mitigazione è stata fatta una simulazione, valutando l'aumento di temperatura nel caso di completa rimozione di zone contenenti acqua, sia in un contesto urbano sia in un contesto suburbano.

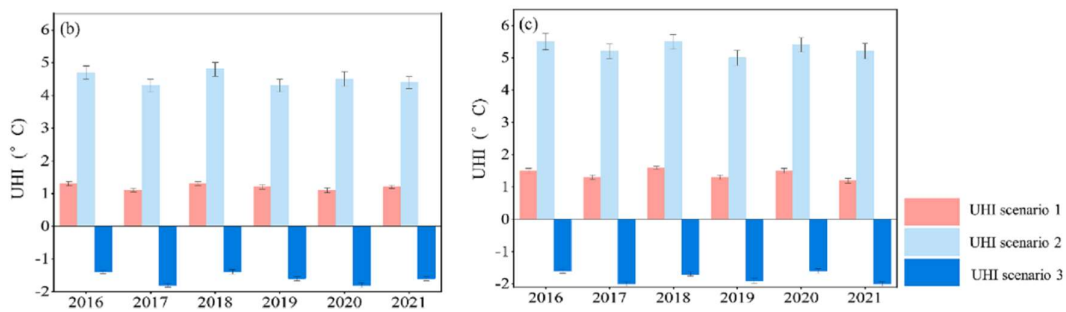


Figura 2. (b) Cambiamento negli anni degli effetti delle UHI considerando 3 scenari differenti, per la città di Tianjin; (c) Cambiamento negli anni degli effetti delle UHI considerando 3 scenari differenti, per la città di Shenzhen (lo scenario 1 rappresenta la situazione attuale delle due città, nello scenario 2 vengono rimossi i bacini idrici dall'area urbana, nello scenario 3 vengono rimossi i bacini idrici dall'area suburbana)

Quello che si evince dallo studio è una diminuzione di temperatura tra 4.5°C e 5.3°C nelle principali zone urbane delle due città, considerando invece le zone suburbane si ha una diminuzione di -1.6°C e -1.8°C. Questa analisi sottolinea come la presenza di fonti d'acqua in un contesto urbano contribuisca notevolmente alla mitigazione degli effetti causati dal fenomeno UHI.

Il potere di mitigazione dei corpi idrici è fortemente influenzato dalla loro superficie e dal loro volume, molto meno dalla profondità. Un maggior numero di elementi contenente acqua, di grandi dimensioni, nelle aree urbane permette di attenuare gli effetti delle UHI, grazie ad una più consistente evaporazione dell'acqua [36].

Le zone in cui si trovano i bacini idrici possono variare l'efficienza del loro potere di mitigazione. Nei contesti urbani in cui il fenomeno dell'urbanizzazione è sempre più accentuato, con un crescente numero di edifici, centri commerciali e palazzi, la temperatura media superficiale dell'acqua potrebbe aumentare andando a diminuire il gradiente termico con l'aria circostante [37], elemento alla base della mitigazione.

Mettendo a confronto l'utilizzo di zone verdi con la presenza di corpi idrici, per la mitigazione delle temperature in un'area urbana, si nota che la presenza dell'acqua comporta un'evaporazione più veloce rispetto a quella proveniente dall'utilizzo della vegetazione nel contesto urbano [38].

2.2 Sistemi di raffrescamento evaporative

I sistemi di raffrescamento evaporativo contribuiscono alla mitigazione delle temperature immettendo nell'ambiente microparticelle d'acqua nebulizzata. Questo processo può essere considerato un'umidificazione adiabatica, teoricamente isoentalpica. La rimozione del calore avviene principalmente nel cambiamento di fase dell'acqua e in maniera più marginale dal trasferimento di calore convettivo delle particelle in movimento, quest'ultimo varia in base alla presenza, o meno, di ventole che impongono una ventilazione forzata.

L'utilizzo dell'evaporazione dell'acqua come sistema di raffrescamento ha origini molto lontane nel tempo, già nel XVII secolo in Giappone era usuale la pratica "Uchimizu" che consisteva nel lanciare acqua piovana nelle strade, durante le stagioni molto calde, per raffrescare l'aria. Con l'avanzamento tecnologico si è passati ad utilizzare goccioline d'acqua sempre più piccole, in modo da permettere l'evaporazione totale dopo poco tempo dall'iniezione e non bagnare a livello pedonale. Utilizzare goccioline più piccole permette di aumentare il tempo di permanenza in volo a causa delle forze di attrito [39], favorendo una più veloce evaporazione, e di farle rimbalzare tra loro invece che rompersi [40].

I sistemi di raffrescamento evaporativo, oltre a mitigare le temperature, contribuiscono ad allontanare polvere, pollini ed insetti, attenuare la radiazione solare nel vicino e medio infrarosso [41] e schermare i raggi UV più dannosi.

2.2.1 Luoghi di applicazione

Avendo come obiettivo primario la riduzione degli effetti causati dalle UHI, come l'aumento delle temperature, i sistemi che sfruttano l'evaporazione dell'acqua si trovano principalmente nelle zone esterne delle città; tuttavia, questa tecnologia trova applicazioni anche in aree semi aperte e in particolari edifici.

Temperature più basse sono state registrate utilizzando sistemi di raffrescamento evaporativo in spazi ristretti, con una diminuzione di 6-12°C [42]. In altri studi questi sistemi sono stati posizionati negli atri di alcuni palazzi, riuscendo a misurare, sul tetto degli edifici, una diminuzione di temperatura di 5-5.6°C; la differenza di temperatura si nota anche tra i piani superiori e quelli inferiori (3.2-4.1°C) con un aumento dell'umidità relativa che va dal 9% al 16%. Altri esperimenti che hanno applicato i sistemi di raffrescamento evaporativo in ambito residenziale hanno quantificato l'effetto di raffreddamento con una diminuzione media di 3°C, l'area raffrescata si estende in un raggio di 3m anche con velocità del vento inferiori a 3.3m/s.

Installare i sistemi di raffrescamento nei tetti e nei balconi delle abitazioni aiuta a mitigare le temperature esterne favorendo una diminuzione del flusso di calore del 60%, questo comporta un minore utilizzo dei condizionatori all'interno degli edifici con una riduzione dei consumi di energia dell'80% [42]. Dalla relazione tra l'abbassamento delle temperature esterne e il comfort interno degli edifici, deriva un altro grande beneficio. I risultati di

alcuni studi [43] mostrano che l'utilizzo di sistemi di raffrescamento evaporativo installati sui tetti degli edifici, oltre ad abbassare la temperatura esterna dell'aria, causa una diminuzione di 4.8-19.5°C della temperatura superficiale dei tetti. Questo calo favorisce il raffrescamento dei locali interni, con una diminuzione di temperatura tra i 0.2°C e i 4.9°C.

Il miglioramento del comfort percepito dalle persone che vivono in città caratterizzate dal fenomeno UHI, è valutabile attraverso la diminuzione della temperatura dell'aria e da fattori relativi alle persone, come la temperatura della pelle. Analizzando un sistema di raffrescamento evaporativo a cui è stato aggiunto un dispositivo per la ventilazione forzata al fine di migliorare le prestazioni, si nota una diminuzione della temperatura dell'aria di 3.6°C, l'aumento dell'umidità relativa (15.9%) e una diminuzione della temperatura della pelle di 1.1°C [44].

A causa dell'urbanizzazione, del numero sempre crescente di chi vive nei centri città e dell'aumento delle persone con medi e bassi redditi, i mezzi di trasporto pubblici sono diventati il principale mezzo di spostamento nelle grandi città. Da qui la necessità di raffrescare le zone di attesa dei mezzi pubblici (autobus, taxi, metropolitane, treni...) per migliorare il comfort termico delle persone che viaggiano; i sistemi di raffrescamento evaporativo risultano i migliori da utilizzare.

Diminuendo la temperatura dell'aria e aumentando l'umidità relativa è possibile migliorare in maniera significativa la sensazione e il comfort termico dei viaggiatori in attesa, per valutare questi dati sono stati introdotti degli indici, come il CSV (Comfort Sensation Vote) e il mTSV (Modified Thermal Sensation Vote), basati su una scala a sette punti, ognuno dei quali corrisponde a una condizione termica percepita dal soggetto.

L'applicazione dei sistemi di raffrescamento evaporativo nelle stazioni dei taxi mostra una diminuzione di temperatura di 4.3°C e un aumento dell'umidità relativa del 10.1%; quest'ultima, seppur registrata dalla strumentazione, non comporta una sensazione di bagnato nei soggetti e non influenza il comfort termico. Gli stessi sistemi possono essere utilizzati sulle banchine delle stazioni, dove si nota un abbassamento delle temperature di 4.9-6.0°C in base alla dimensione delle particelle e alla pressione dell'acqua.

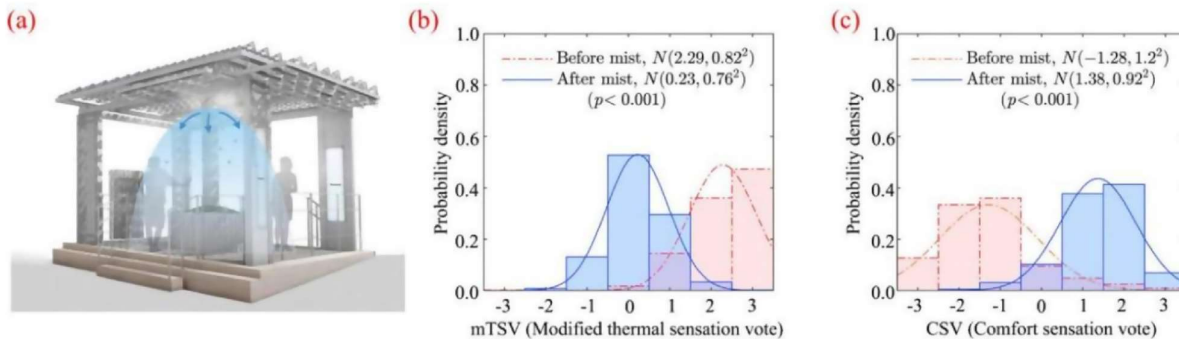


Figura 3. (a) Struttura di un sistema di raffrescamento evaporativo in una zona di attesa; (b) Valutazione del mTSV prima e dopo l'attivazione del sistema di raffrescamento; (c) Valutazione del CSV prima e dopo l'attivazione del sistema di raffrescamento

Alcuni studi numerici hanno preso in analisi l'utilizzo di sistemi di raffrescamento evaporativo nei tunnel delle metropolitane, notando che la zona in testa al treno è quella che più risente del raffrescamento mentre nella parte posteriore del treno non c'è eccessivo

accumulo di calore. I risultati che si ottengono, aggiungendo anche un impianto di ventilazione, mostrano una diminuzione di temperatura tra i 4°C e i 5°C.

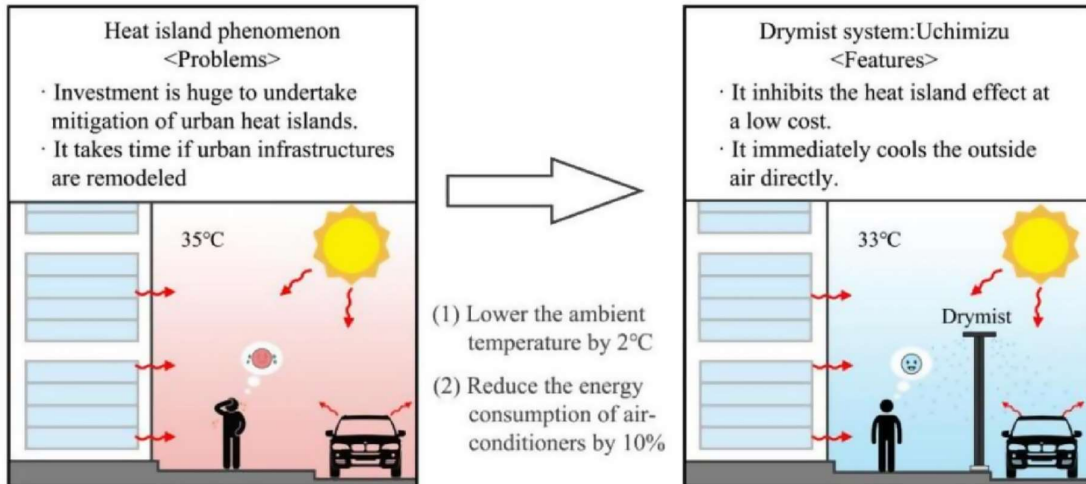


Figura 4. Azione dei sistemi di raffrescamento evaporativo nelle zone di attesa dei mezzi pubblici sul clima esterno

Altri esperimenti hanno preso in considerazione non solo la temperatura dell'aria ma anche la variazione di temperatura dei soggetti che si trovano nelle zone influenzate dai sistemi di raffrescamento evaporativo, notando una diminuzione della temperatura della testa, della cavità nasale e del torace (rispettivamente 2.6°C, 2.1°C, 3.3°C), migliorando notevolmente gli indici del comfort termico [45].

I lavori che prevedono l'utilizzo di alte temperature si trovano in ambienti chiusi, dove le classiche tecnologie di raffrescamento non sono abbastanza efficaci per abbassare la temperatura quanto basta per migliorare il comfort dei lavoratori. In questi casi sono utilizzati i sistemi di raffrescamento evaporativo, che hanno ottenuto buoni risultati.

Nei silos, destinati a vari scopi, un'apparecchiatura che usa il principio di raffreddamento evaporativo permette di abbassare la temperatura della superficie di 2-11°C senza andare ad influenzare il lavoro degli operai o la stabilità della struttura.

Tramite una simulazione si è studiata l'influenza di un sistema composto da un ventilatore spray applicato nella cabina di camion di grandi e medie dimensioni. I risultati mostrano una diminuzione della temperatura misurata a livello della testa del conducente di 1.2-3.0°C, e un aumento di umidità relativa del 5%. È possibile ottenere una maggior efficienza e conseguentemente un miglior livello di comfort termico diminuendo la velocità del vento e riducendo la temperatura dell'acqua.

Confrontando l'efficienza dei sistemi di raffreddamento evaporativi con le classiche tecnologie, applicate alle cabine di una nave, si nota una maggiore diminuzione di temperatura e un minor consumo di energia. In particolare, è possibile portare la temperatura da 40°C alla temperatura ambiente in soli 2 minuti, un'efficienza 7 volte superiore a quella della ventilazione meccanica.

Solitamente i sistemi di raffreddamento evaporativo non sono utilizzati nelle residenze in quanto l'aumento dell'umidità relativa potrebbe portare delle problematiche. In edifici particolari, come gli allevamenti e le serre, l'umidità e la temperatura sono parametri da tenere sotto controllo, l'uso di sistemi con nebulizzazione dell'acqua hanno dimostrato efficienza migliore e minori consumi rispetto alle tecnologie più classiche.

Nelle strutture in cui sono allevati animali, ambienti rigidi con alte temperature influenzano la salute degli animali stessi abbassando il tasso di sopravvivenza [46]; è quindi di fondamentale importanza l'utilizzo di un sistema di raffreddamento che, oltre a migliorare le condizioni del bestiame, non abbia un elevato consumo energetico, poiché

devono essere attivi per molte ore e le strutture hanno tipicamente scarse prestazioni di isolamento. Per questi motivi sostituire i tradizionali metodi di raffreddamento con sistemi di raffreddamento evaporativo risulta la scelta migliore.

Analizzando i risultati ottenuti da diversi studi, che prendono in considerazione diversi allevamenti e diversi animali (polli, bovini, suini) si conclude una diminuzione dell'aria che varia dai 3.0°C ai 10.5°C e un aumento dell'umidità relativa del 13.7-20.0%, migliorando la vita degli animali e diminuendo lo stress termico a cui sarebbero altrimenti sottoposti.

Anche la crescita delle piante è strettamente legata alle condizioni ambientali; l'ambiente interno delle serre, soprattutto d'estate, raggiunge temperature molto più elevate di quelle adatte per la crescita e lo sviluppo delle piante (20-30°C). L'utilizzo dei sistemi di raffreddamento evaporativo risulta la scelta migliore in quanto l'aumento dell'umidità relativa non porta effetti negativi alle piante.

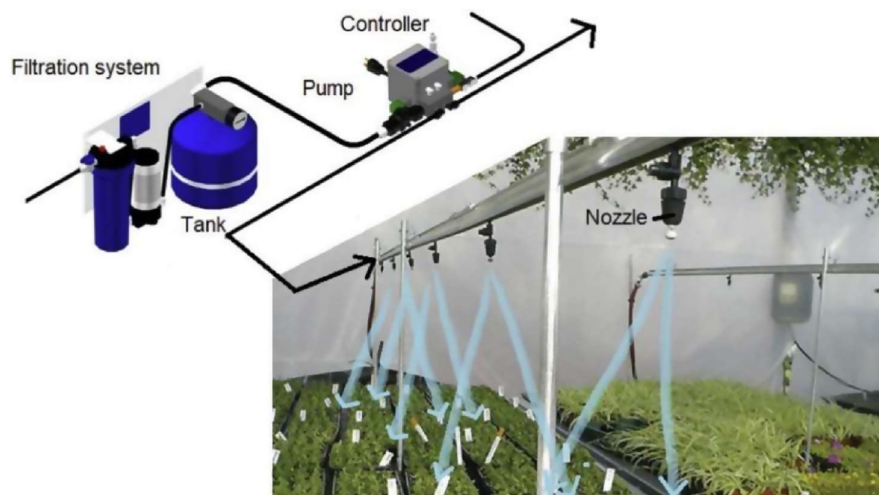


Figura 5. Schematizzazione di un sistema di raffreddamento evaporativo applicato in una serra

Secondo diversi studi i sistemi di raffrescamento evaporativo portano, nelle serre, alla diminuzione della temperatura dell'aria di 1.0-7.0°C e l'aumento dell'umidità relativa di 10.-29%. L'efficienza di questi sistemi aumenta se vengono affiancati da reti per l'ombreggiatura solare.

2.2.2 Variabili

L'efficienza dei sistemi di raffrescamento evaporativo è influenzata da diversi fattori, alcuni modificabili perché legati alla struttura, altri collegati all'ambiente dove si trovano.

Un componente che svolge un ruolo importante in tutta l'apparecchiatura è l'ugello, da cui si determina la dimensione media delle goccioline spruzzate. Alcuni studi fatti durante l'Expo di Shanghai hanno evidenziato che, per ottenere i migliori risultati, la pressione ottimale è di 6Mpa e la portata d'acqua di 50mL/min. Espellere l'acqua ad una pressione maggiore garantisce la totale evaporazione in aria delle particelle fluide e migliora la capacità di trasferimento di calore. La comparazione tra sistemi ad alta e a bassa pressione conferma questi risultati, affermando che a parità di portata i sistemi ad alta pressione portano ad un raffrescamento maggiore [47].

Anche l'altezza e l'angolo di installazione degli ugelli influenzano l'efficienza dei sistemi di raffrescamento evaporativo. Gli studi effettuati sull'angolo di installazione hanno concluso che l'angolo che massimizza il trasferimento di calore è di 30° o 120° , mentre l'angolo di 180° è risultato il peggiore [48]. Per l'altezza degli ugelli si notano due andamenti contrastanti. Da un lato aumentando l'altezza aumenta l'area di copertura [49], dall'altro con l'aumento dell'altezza diminuisce l'efficienza dei sistemi, ottenendo una diminuzione di temperatura minore [50]. Valutando questi diversi andamenti in funzione

del comfort termico, si conclude che l'altezza migliore a cui posizionare gli ugelli è tra 1.2m e 1.5m [51], prendendo soprattutto in considerazione la percezione delle persone. Aumentando l'altezza degli ugelli si favorisce una più ampia copertura, ma le goccioline raggiungono il processo di evaporazione molto prima di raggiungere la superficie del corpo umano.

Analizzando le goccioline d'acqua utilizzate nei sistemi di raffrescamento evaporativo, si nota che goccioline più piccole migliora l'effetto di raffreddamento e l'umidità relativa ha un maggiore effetto sulla diminuzione della temperatura dell'aria [52]. Da altri studi sperimentali [53] si mostra come migliori prestazioni di raffreddamento si ottengono con una distribuzione più ampia e dimensioni minori delle goccioline, quest'ultimo comporta un assorbimento del calore più veloce, accelerando il processo di evaporazione.

La temperatura dell'acqua potrebbe portare dei miglioramenti, ma analizzando meglio i risultati sperimentali ottenuti [54], si conclude che una temperatura minore aumenta la velocità di evaporazione ma riduce la vita dell'ugello. Questa variabile non è presa in considerazione, in quanto non portano grandi miglioramenti all'efficienza dei sistemi di raffrescamento evaporativo.

Le particelle d'acqua evaporano nell'ambiente esterno, i parametri di quest'ultimo, quindi, variano l'efficienza dei sistemi di raffrescamento evaporativo.

La temperatura e l'umidità relativa dell'aria rappresentano i parametri di progettazione iniziale per questi sistemi di raffrescamento, infatti sia le temperature più alte, sia l'umidità relativa più bassa possono accelerare il processo di evaporazione. Studiando un apparato sperimentale di raffreddamento ad evaporazione e analizzando la variazione di temperatura dell'aria si nota che maggiore è la temperatura iniziale dell'aria ambiente, maggiore è

l'efficienza di evaporazione, che si traduce in un'efficienza di raffreddamento superiore. Anche esperimenti effettuati in ambienti estremamente caldi e umidi hanno rilevato un'ottima efficienza dei sistemi di raffrescamento evaporativo, senza aumenti significativi dell'umidità relativa [55]. Studiando questi sistemi in vari ambienti, si conclude che l'umidità relativa ambientale ha un effetto di raffrescamento migliore della temperatura; partendo da una situazione ambientale di 35°C e 45% di umidità relativa, l'efficienza dei sistemi di raffrescamento evaporativo potrebbero raggiungere il 65%, registrando una diminuzione della temperatura di 5-7°C mantenendo il livello di umidità relativa controllata sotto il 70% [52]. Si è inoltre dimostrato che la percezione di bagnato che potrebbe derivare da un eccessivo aumento di umidità relativa è più confortevole per gli esseri umani rispetto a quella del sudore sulla pelle.

Il vento può avere una duplice e controversa influenza sull'efficienza dei sistemi di raffrescamento evaporativo. Da un lato può accelerare l'evaporazione dell'acqua, dall'altro può trasportare le goccioline d'acqua lontano dal luogo specifico e abbassare l'efficienza di raffrescamento. In alcuni studi l'influenza della velocità del vento sull'efficienza porta ad un aumento dell'area raffrescata [56], evidenziata dalla diminuzione della temperatura anche lontano dagli ugelli. Si conclude, però, che questi miglioramenti si ottengono solo entro una soglia di velocità del vento, superata questa soglia il vento è troppo forte e sposta le goccioline d'acqua che non riescono a raggiungere la zona da raffrescare [57].

La radiazione solare è uno dei fattori che più influenza la temperatura, per questo deve essere presa in considerazione nella progettazione dei sistemi di raffrescamento evaporativo. Una ricerca sperimentale [57] ha mostrato che l'evaporazione dell'acqua è stata accelerata a causa della radiazione solare, concludendo che la radiazione solare e

l'abbassamento di temperatura sono correlati negativamente tra loro. Per poter utilizzare ugualmente questi sistemi in situazioni di forte radiazione solare, si ricorre a strutture ombreggianti in modo da garantire un migliore effetti di raffrescamento e ridurre il consumo di energia.

3. Caso di studio

3.1 Struttura e finalità

Diversi progetti promossi da ENEA (Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile) mirano allo studio dell'efficienza dei sistemi di raffrescamento evaporativo, utilizzati per mitigare le temperature nelle UHI.

Un recente studio si è incentrato sull'utilizzo combinato di un sistema di raffrescamento evaporativo con altre tecnologie, quali delle coperture per il sole e per il vento. Gli esperimenti sono stati svolti durante i periodi estivi del 2021 e del 2022. La struttura era pensata per essere installata nel centro città di Roma, in modo da analizzare un'area sottoposta maggiormente agli effetti delle UHI e poter coinvolgere i cittadini studiando le loro sensazioni e preferenze; purtroppo, a causa di alcune restrizioni, non è stato possibile. L'installazione è stata spostata nel centro di ricerca Casaccia di ENEA, 25km a nord di Roma, in una zona caratterizzata dal clima mediterraneo. La struttura è formata da uno scheletro metallico avente una copertura inclinata e, nel lato ovest, una copertura per il vento e per il sole; quest'ultime consentono di effettuare i test con più parametri da variare, potendo analizzare le prestazioni in diverse configurazioni. Gli ugelli del sistema di nebulizzazione sono ancorati tramite delle travi al tetto della struttura. L'area d'installazione è una zona semi chiusa, delimitata a sud da un magazzino metallico, come visibile dalla figura 6.



Figura 6. Luogo dell'installazione, presso centro di ricerca Casaccia (ENEA). La figura di sinistra evidenzia la struttura vista dall'esterno. La figura a destra rappresenta il sistema di raffreddamento evaporativo avviato, sono ben visibili le particelle d'acqua

Insieme al sistema di ugelli montato su una griglia, sono presenti altri componenti che permettono il corretto funzionamento di tutto il sistema. Una pompa da 700 W consente all'acqua di circolare con una pressione costante di 70 bar; l'energia elettrica che alimenta la pompa proviene direttamente dalla rete o da un sistema di pannelli fotovoltaici da 1200 W, per garantire l'autonomia energetica è presente anche una batteria al litio da 1200 Wh posta al centro della struttura.

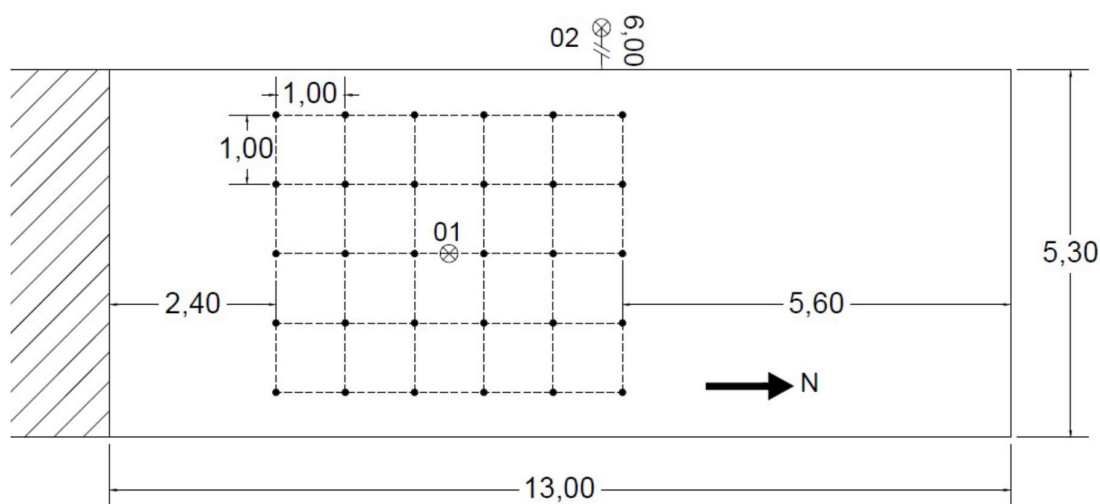


Figura 7. Configurazione del sistema di raffreddamento evaporativo. La linea esterna rappresenta il tetto mentre quella tratteggiata identifica la griglia su cui sono montati gli ugelli (in questo caso nella configurazione con una distanza di 1.0m)

Sono state prese in considerazione due configurazioni:

1. Copertura di 20 m² (4x5m) utilizzando 30 ugelli distanziati tra loro di 100 cm
2. Copertura di 26 m² (3.9x6.5m) utilizzando 24 ugelli distanziati tra loro di 130 cm

In tutte le configurazioni l'altezza degli ugelli è posta fissa a 300 cm e non determina una variabile dello studio. Anche la temperatura dell'acqua non viene presa in considerazioni e non ci sono strumentazioni che la vanno a controllare; è stata adottata questa semplificazione in quanto, anche in letteratura, non sono presenti correlazioni evidenti tra la temperatura dell'acqua e un miglioramento delle prestazioni di sistemi di raffrescamento evaporativo.

3.2 Raccolta dati

Vari sensori sono stati posti all'interno dell'area di interesse per monitorare le variabili, in particolare sono stati presi in esame due specifici punti, uno sotto la griglia su cui sono montati gli ugelli e un altro a sei metri di distanza dalla zona contenente il sistema di raffrescamento evaporativo (01 e 02 nella figura 7). Questi punti rappresentano rispettivamente il punto medio in cui domina l'effetto del raffrescamento e un punto indisturbato per monitorare le condizioni ambientali medie. I sensori sono stati montati ad un'altezza di 150 cm per ottenere misurazioni più vicine possibili alla percezione di un corpo umano. Le variabili prese in considerazione sono la temperatura dell'aria (AT), la temperatura del globo (GT), l'umidità relativa dell'aria (RH), la velocità del vento (WS) e la sua direzione (WD), in più solo nel punto 02 è stata valutata la radiazione solare orizzontale (GR).

I dati sono stati acquisiti considerando 8 diverse configurazioni durante le estati del 2021 e 2022 (tabella 1), i fattori che variano da una configurazione all'altra sono: l'utilizzo del sistema di raffrescamento evaporativo, la modalità del controllo, la spaziatura tra gli ugelli, la presenza della copertura per il vento.

Tabella 1. Configurazione dei vari test

Test	Mitigazione	Telo vento	Controllo	Distanza	Periodo
1	on	off	manuale	100 cm	06/08/2021 15/08/2021
2	on	off	automatico	100 cm	16/08/2021 23/08/2021
3	off	off	manuale	100 cm	24/08/2021 02/09/2021
4	on	on	manuale	100 cm	03/09/2021 09/09/2021
5	on	on	manuale	100 cm	20/07/2022 01/08/2022
6	on	on	manuale	130 cm	02/08/2022 08/08/2022
7	on	off	manuale	130 cm	08/08/2022 19/08/2022
8	off	off	manuale	130 cm	20/08/2022 01/09/2022

Solamente in un caso (test 2) l'attivazione della pompa non è avvenuta manualmente ma tramite un sistema di controllo automatizzato, basato sul livello del MOCI (Mediterranean Outdoor Comfort Index). Nello specifico la pompa veniva attivata quando il MOCI aveva un valore superiore a 1.1 e veniva spenta con un valore inferiore a 0.9.

L'efficienza dei sistemi di raffrescamento evaporativo, in questo studio, viene valutato analizzando due differenti parametri: la differenza di temperatura tra la zona vicino agli ugelli e l'area dove si registrano le condizioni ambientali, e il MOCI preso come indice di

benessere termico. Il MOCI è un indice basato su una scala a 7 punti ASHRAE, permette di prevedere il voto medio che gli abitanti di una zona con clima mediterraneo potrebbero dare, basandosi sulle condizioni dell'ambiente esterno [58]. La formula utilizzata per il MOCI è:

$$MOCI = -4.068 + 0.264 * I_{cl} + 0.058 * RH + 0.083 * MRT - 0.272 * WS$$

dove I_{cl} è la resistenza termica dei vestiti, considerata in questo caso costante con un valore tipico dell'abbigliamento estivo, pari a 0.75. MRT è la temperatura media radiante, tiene conto della temperatura del globo, la temperatura dell'aria, la velocità del vento ed è calcolata tramite la formula:

$$MRT = [(GT + 273.15)^4 + \frac{1.1 * 10^8 * WS^{0.6}}{\epsilon * D^{0.4}} (GT - AT)]^{0.25} - 273.15$$

Questa formula del MOCI è utilizzata solamente per la zona interna più vicina al sistema di raffrescamento evaporativo, in quanto la MRT è influenzata dai lunghi tempi che richiede la misurazione con il termometro a globo, non adattandosi alla frequente variazione delle temperature ambientali. Nella zona indisturbata dal sistema di raffrescamento il MOCI viene calcolato con un'altra formula:

$$MOCI = -4.257 + 0.325 * I_{cl} + 0.146 * AT + 0.005 * RH + 0.001 * GR - 0.235 * WS$$

che prende in considerazione la radiazione solare orizzontale (GR).

3.3 Risultati

L'efficienza dei sistemi di raffrescamento evaporativo è valutata tramite grafici che mettono in relazione la temperatura esterna (asse delle ascisse) con la differenza della temperatura tra la zona sotto il reticolato di ugelli e la zona indisturbata (asse delle ordinate).

Mettendo a confronto il controllo manuale e quello automatico, test 1 e test 2 (figura 8), si notano prestazioni simili nei range tra 32°C e 34°C, con una diminuzione di temperatura intorno ai 6°C. La principale differenza sta nei diversi tempi di utilizzo della pompa: nel caso del controllo manuale la pompa è stata attiva per 10.07 ore in media, mentre nel caso del controllo tramite MOCI i tempi sono dimezzati, media di 4.97 ore. Conseguentemente si ha un minor utilizzo di elettricità e di acqua, quest'ultima ha influenza anche sull'umidità relativa (figura 9). A parità di diminuzione di temperatura, il controllo automatico tramite MOCI utilizza meno acqua causando un incremento minore di umidità relativa.

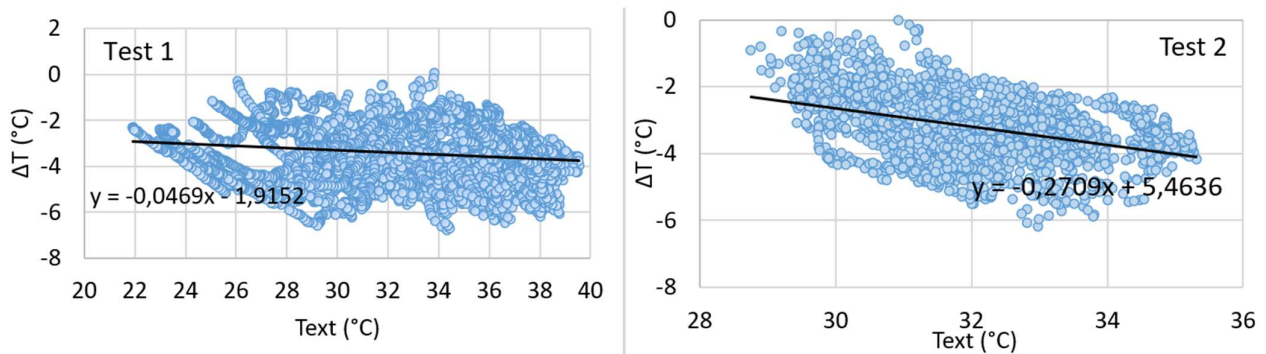


Figura 8. Differenza di temperatura tra la zona mitigata e quella indisturbata in relazione alla temperatura esterna (test 1 e test 2)

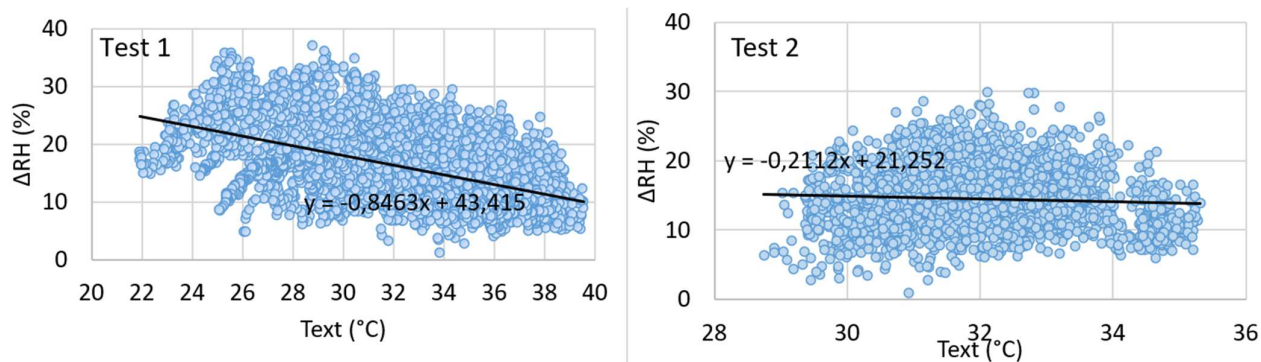


Figura 9. Differenza di umidità relativa tra la zona mitigata e quella indisturbata in relazione alla temperatura esterna (test 1 e test 2)

Paragonando periodi diversi ma stesse condizioni costruttive (test 4 e test 5, figura 10) si ottengono diminuzioni di temperatura simili, anche nel caso del test 5 che registra temperature esterne nettamente più alte. In questi casi la presenza della tenda per limitare l'effetto del vento permette di abbassare maggiormente la temperatura, registrando un gradiente di 10°C.

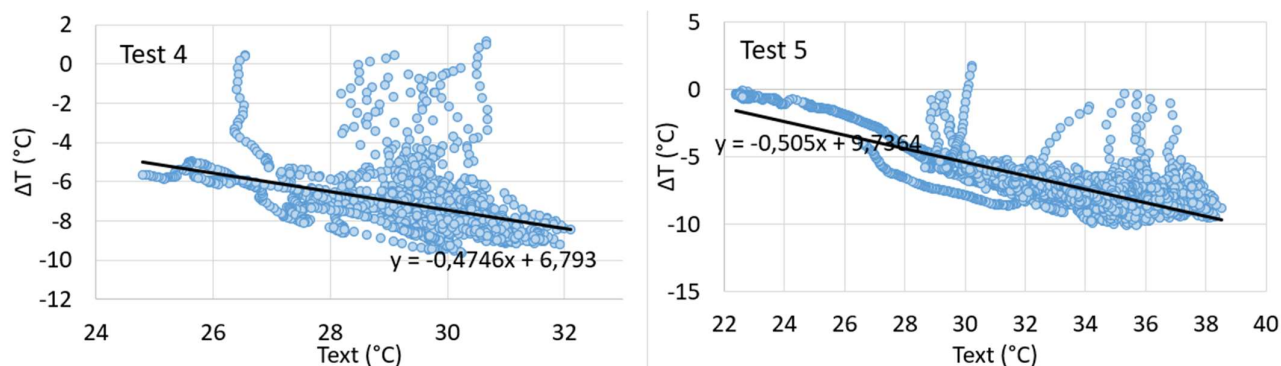


Figura 10. Differenza di temperatura tra la zona mitigata e quella indisturbata in relazione alla temperatura esterna (test 4 e test 5)

I miglioramenti che porta l'utilizzo di una tenda per limitare il vento sono visibili anche dal confronto tra il test 6 e il test 7 (figura 11): con la tenda si raggiunge una differenza di temperatura pari a 7.3°C, quando la tenda viene tolta la temperatura si abbassa per un massimo di 4.2°C.

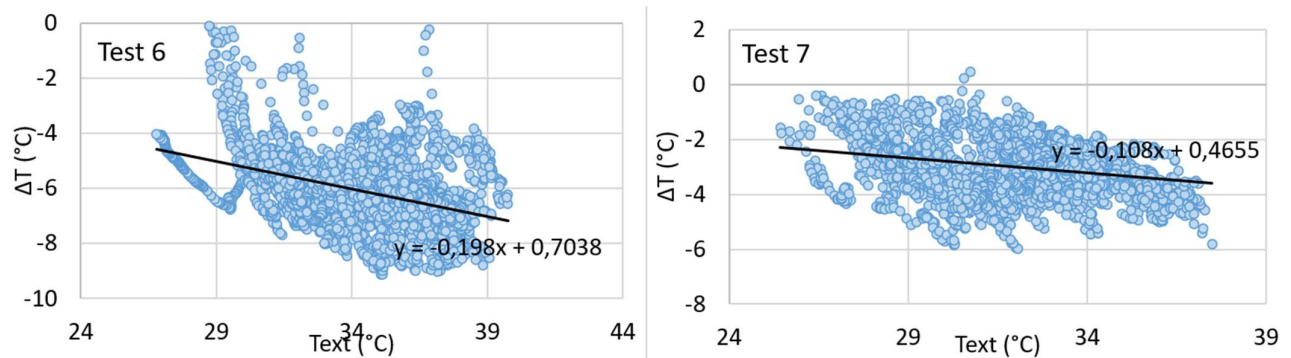


Figura 11. Differenza di temperatura tra la zona mitigata e quella indisturbata in relazione alla temperatura esterna (test 6 e test 7)

Anche l'andamento del MOCI permette l'analisi dell'efficienza dei sistemi di raffrescamento evaporativo.

Confrontando due situazioni con sistema attivo e non (test 1 e test 3, figura 12) è subito evidente che nel caso in cui il sistema di raffrescamento evaporativo non è funzionante la differenza tra il MOCI valutato nei due punti, MOCI_01 e MOCI_02, è minima e del tutto trascurabile. Studiando l'andamento dei MOCI nel test 1, invece, si nota che la condizione "neutra" (MOCI=0) nella posizione 01 si ottiene quando nella zona indisturbata 02 si ha una condizione di "leggermente caldo" (MOCI=1). Pertanto, come già previsto, i sistemi di raffrescamento evaporativo influenzano la temperatura dell'aria, l'umidità relativa e la temperatura media radiante, tutti fattori che contribuiscono alla variazione del MOCI.

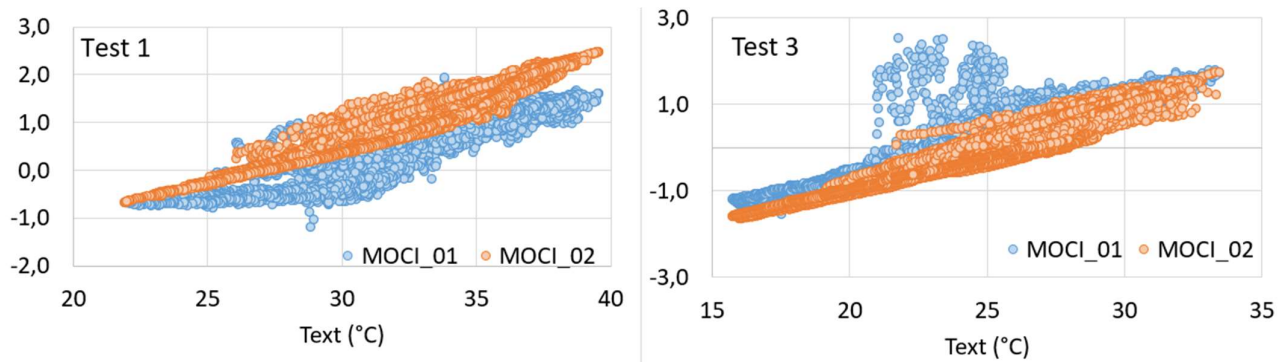


Figura 12. Valutazione del MOC I nella zona mitigata (MOCI_01) e nella zona indisturbata (MOCI_02) (test 1 e test 3)

Si è già notato che la distanza tra gli ugelli influenza notevolmente la temperatura dell'aria; un risultato simile si ottiene analizzando l'andamento dei MOC I (test 5 e test 6, figura 13). Entrambe le condizioni portano benefici al comfort termico, prestazioni migliori si ottengono nel caso di ugelli posti a una distanza più ravvicinata (test 5).

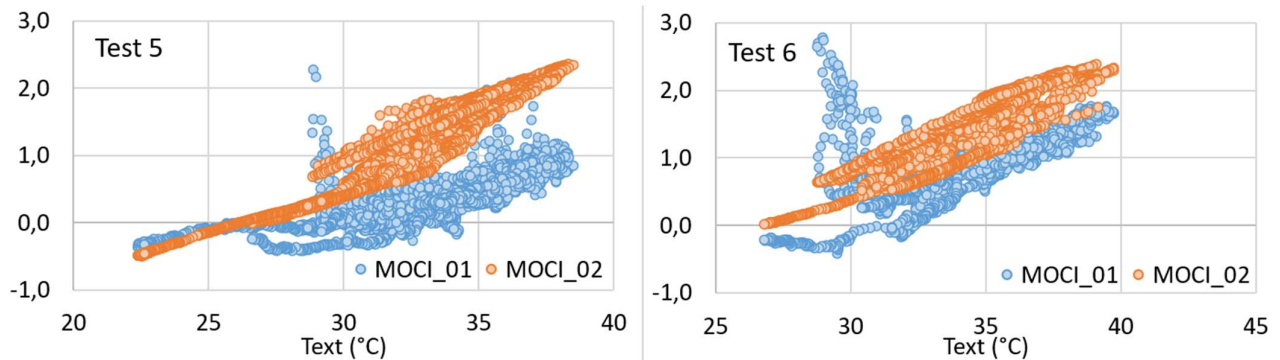


Figura 13. Valutazione del MOC I nella zona mitigata (MOCI_01) e nella zona indisturbata (MOCI_02) (test 5 e test 6)

Comparando i test 6 e 7 (figura 14) che differiscono solo per la presenza del telo per il vento, si nota un andamento opposto a quello ottenuto nel caso delle temperature. Nell'andamento del MOC I non ci sono effetti evidenti sul comfort termico, a differenza delle temperature dove l'utilizzo del telo comportava una diminuzione della temperatura

maggiore rispetto alla situazione opposta. Questo andamento è spiegabile da due effetti contrastanti: l'utilizzo del telo da un lato porta a temperature più basse, dall'altra aumenta l'umidità relativa, in quanto l'acqua nebulizzata è costretta ad evaporare in una zona più delimitata.

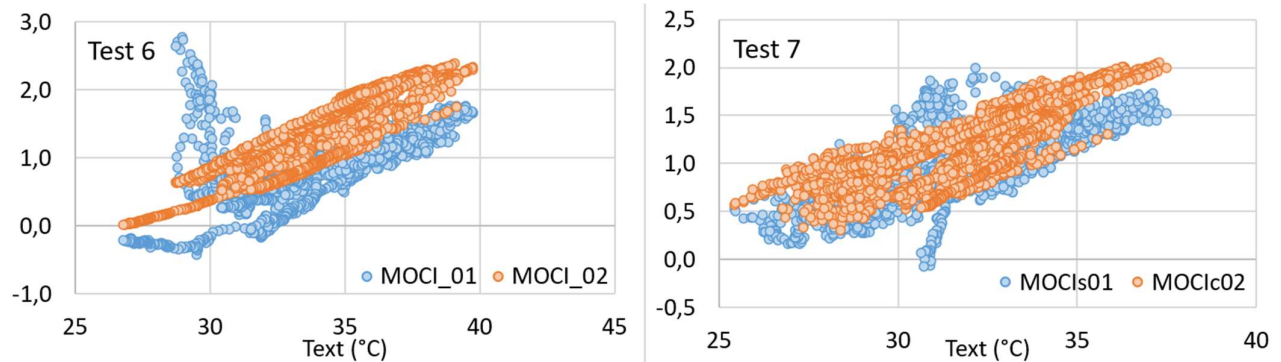


Figura 14. Valutazione del MOCi nella zona mitigata (MOCI_01) e nella zona indisturbata (MOCI_02) (test 6 e test 7)

4. Conclusioni

Il fenomeno delle isole di calore urbano è sempre più frequente in molte città del mondo, le principali cause sono il cambiamento climatico, accentuato dalle attività inquinanti dell'uomo, e la crescente urbanizzazione. Il principale effetto riscontrabile dalle persone che vivono in queste città è l'aumento di temperature che porta, tra le varie conseguenze, a problemi di salute negli individui.

Trovare la giusta metodologia per mitigare il clima nelle città abbassando le temperature è un aspetto fondamentale per combattere gli effetti delle isole di calore. Tecniche più classiche come l'utilizzo del verde in luoghi pubblici e in edifici, l'impiego di materiali da costruzione innovativi, permettono un miglioramento del comfort termico ma hanno grossi limiti. Il più evidente è la poca adattabilità a schemi urbanistici preesistenti: per apprezzare i risultati è necessaria un'ottima progettazione urbanistica, inserire queste tecniche di raffrescamento in contesti urbani già ben strutturati risulta molto più difficile.

Anche l'acqua può essere utilizzata per mitigare le temperature, nonostante risulta essere un metodo efficiente, l'applicazione è difficile in contesti urbani, in quanto sono necessari dei grandi volumi di acqua. I sistemi di raffrescamento evaporativo permettono di utilizzare l'acqua come mezzo per ridurre le temperature nelle città utilizzando sistemi meccanici più facilmente applicabili alle strutture urbane già esistenti.

Lo studio sperimentale portato avanti da ENEA ha valutato le prestazioni di questi sistemi analizzando sia la parte strutturale, sia la parte del controllo.

Sono state riscontrate buone prestazioni, con una diminuzione della temperatura di 6°C, montando gli ugelli ad un'altezza di 300 cm e ad una distanza l'uno dall'altro di 100 cm,

utilizzando sempre la stessa pompa che garantisce una pressione dell'acqua costante di 70bar. Una maggiore diminuzione di temperatura, fino ad un massimo di 10°C, è stata riscontrata ponendo un telo che schermasse dall'effetto del vento; in questo modo le goccioline d'acqua rimangono nella zona delimitata, implementando il raffrescamento.

I risultati ottenuti, oltre che dalla diminuzione di temperatura, sono evidenziati dall'andamento del MOCI, un indice che permette di valutare il comfort termico. Con l'utilizzo dei sistemi di raffrescamento evaporativo il valore del MOCI tende ad avvicinarsi al valore 0, rappresentativo della neutralità termica.

In questo studio è stata svolta un'importante analisi sul controllo dei sistemi di raffrescamento evaporativo. Di norma la pompa che mette in circolo l'acqua veniva attivata manualmente, in questo caso si è cercato un modo per automatizzare il processo, utilizzando come parametro il valore del MOCI. Comparando i risultati ottenuti da entrambi i metodi di controllo, questi risultano molto simili, sia per la differenza di temperatura che per l'aumento dell'umidità. Il principale vantaggio legato al controllo automatico è il minor tempo di utilizzo della pompa; a differenza del controllo manuale, questa si attiva solo quando veramente necessario, portando a un minor consumo di elettricità e, nel complesso, a una maggiore efficienza.

I risultati ottenuti sono stati riscontrati per brevi periodi, bisognerebbe ampliare gli studi di questo metodo di controllo automatico per verificare ulteriormente le conclusioni già ottenute.

In conclusione, i sistemi di raffrescamento evaporativo risultano una buona soluzione per mitigare gli effetti delle isole di calore urbano, avendo anche la possibilità di essere

applicati in molti più contesti urbani. La loro semplicità costruttiva permette di integrarli in edifici già esistenti con molta più facilità.

Per migliorare ulteriormente il comfort termico e ottenere una diminuzione di temperatura maggiore, la scelta più efficace risulta quella di affiancare a questi sistemi di raffrescamento evaporativo altre tecnologie come il verde urbano e i materiali rinfrescanti.

Bibliografia

- [1] Urban Heat Island: Causes, consequences, and mitigation measures with emphasis on reflective and permeable pavements. S. Vujovic, B. Haddad, H. Karaky, N. Sebaibi, M. Boutouil
- [2] The surface urban heat island response to urban expansion: A panel analysis for the conterminous United States. X. Li, Y. Zhou, G. R. Asrar, M. Imhoff, X. Li
- [3] Assessing the relationship between surface urban heat island and landscape patterns across climatic zones in China, Q. Yang, X. Huang, J. Li
- [4] Urban heat island effect: A systematic review of spatio-temporal factors, data, methods, and mitigation measures. K. Deilami, Md. Kamruzzaman, Y. Liu
- [5] Urbanization and global environmental change: local effects of urban warming. S. Grimmond
- [6] Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island – A review of the actual developments. M. Santamouris
- [7] Experimental investigation on evaporation rate for enhancing evaporative cooling effect of permeable pavement materials. H. Li, J. Harvey, Z. Ge
- [8] U.S. Environmental Protection Agency. “Cool Pavements”. Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies
- [9] <https://www.inail.it/cs/internet/attivita/prevenzione-e-sicurezza/conoscere-il-rischio/ergonomia/comfort-termico.html>
- [10] Urban heat island and thermal comfort conditions at micro-climate scale in a tropical planned city. A. Qaid, H. B. Lamit, D. R. Ossen, R. N. R. Shahminan
- [11] Exploring the effects of urban heat island: A case study of two cities in Thailand and Indonesia. S. D. Arifwidodo, O. Chandrasiri, R. Abdulharis, T. Kubota

- [12] Overview of urban heat island (UHI) phenomenon towards human thermal comfort. Y. Lee, M. F. Md Din, M. Ponraj, Z. Z. Noor, K. Iwao, S. Chellipan
- [13] Heatwave and health impact research: A global review. S. Campbell, T. A. Remenyi, C. J. White, F. H. Johnston
- [14] Characterizing the fabric of the urban environment: A case study of Greater Houston, Texas. L. S. Rose, H. Akbari, H. Taha
- [15] Urban heat island impact on state residential energy cost and CO₂ emissions in the United States. J. Roxon, F. J. Ulm, R. J. M. Pellenq
- [16] Thermal pollution of streams by runoff from paved surfaces. W. R. Herb, B. Janke, O. Mohseni, G. Stefan
- [17] Can improving the spatial equity of urban green space mitigate the effect of urban heat islands? An empirical study. C. Xu, G. Chen, Q. Huang, M. Su, Q. Rong, W. Yue, D. Haase
- [18] Comparison of cooling effect between green space and water body. X. Tan, X. Sun, C. Huang, Y. Yuan, D. Hou
- [19] Effects of spatial pattern of greenspace on urban cooling in large metropolitan area of eastern China. F. Kong, H. Yin, P. James, L. R. Hutyra, H. S. He
- [20] Study of the cooling effects of urban green space in Harbin in terms of reducing the heat island effect. M. Huang, P. Cui, X. He
- [21] A new approach on rapid appraisal of green roof potential in urban area. Y. Li, A. J. Brimicombe
- [22] Quantifying the city's green area potential gain using the remote sensing data. T. Santos, J. A. Tenedorio, J. A. Goncalves
- [23] Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione, il controllo e la manutenzione di coperture a verde, UNI 11235
- [24] Land surface temperature analysis over Akure. M. Daramola, E. Eresanya
- [25] Evaluation of the effect of urban redevelopment on surface urban heat island. F. Renard, L. Alonso, Y. Fitts, A. Hadjiosif, J. Comby

- [26] Urban geometry and the microclimate of street canyons in tropical climate. L. P. Muniz-Gaal, C. C. Pezzuto, M. F. Henriques de Carvalho, L. T. M. Mota
- [27] Urbana shading – a design option for the tropics? A study in Colombo, Sri Lanka. R. Emmanuel, H. Rosenlund, E. Johansson
- [28] The role of sky view factor and urban street greenery in human thermal comfort and heat stress in a desert climate. A. A. Venhari, M. Tenpierik, M. Teleghani
- [29] Local climate zones for urban temperature studies. I. D. Stewart, T. R. Oke
- [30] State of the art on the development of cool coatings for buildings. A. L. Pisello
- [31] Recent development and research priorities on cool and super cool materials to mitigate urban heat island. M. Santamouris, G. Y. Yun
- [32] On the potential of cool materials in the urban heat island context: Scalability challenges and technological setbacks towards building decarbonization. S. Morales-Inzunza, M. E. Gonzalez-Trevizo, K. E. Matinez-Torres, A. Luna-Leon, U. J. Tamayo-Perez, F. Fernandez-Melchor, M. Santamouris
- [33] Assessing the impact of urbanization on urban evapotranspiration and its components using a novel four-source energy balance model. H. Chen, J. J. Huang, S. S. Dash, E. McBean, Y. Wei, H. Li
- [34] A big picture of urban heat island mitigation strategies and recommendations for India. V. R. Khare, A. Vajpai, D. Gupta
- [35] Estimating multi-temporal anthropogenic heat flux based on the top-down method and temporal downscaling methods in Beijing, China. X. Li, W. Yue, Y. Zhou, Y. Liu, C. Xiong, Q. Li
- [36] Revealing the response of urban heat island effect to water body evaporation from main urban and suburb areas. H. Chen, J. J. Huang, H. Li, Y. Wei, X. Zhu
- [37] How to effectively mitigate urban heat island effect? A perspective of waterbody patch size threshold. J. Peng, Q. Liu, Z. Xu, D. Lyu, Y. Du, R. Qiao, J. Wu

- [38] Urban evapotranspiration estimation based on anthropogenic activities and modified Penman-Monteith model. J. Chen, J. Bu, Y. Su, M. Yuan, K. Cao, Y. Gao
- [39] Droplet evaporation with reference to the effectiveness of water-mist cooling. H. Barrow, C. V. Pope
- [40] Cooling effect of a mist fan for large indoor spaces. C. Farham, L. Zhang, J. Yuan, T. Mizuno, K. Emura, A. Ashraful
- [41] Attenuation of solar radiation by a water mist from the ultraviolet to the infrared range. L. A. Dombrovsky, V. P. Solovjov, B. W. Webb
- [42] Effect of the evaporative cooling techniques by spraying mist water on reducing urban heat flux and saving energy in apartment house. D. Narumi, K. Shigematsu, Y. Shimoda
- [43] Cooling effects of a mist-spraying system on ethylene tetrafluoroethylene cushion roofs in hot humid areas: a case study in Guangzhou, China. H. Mao, Q. Meng, S. Li, Q. Qi, S. Wang, J. Wang
- [44] Evaluation of mist-spraying environment on thermal sensations, thermal environment, and skin temperature under different operation modes. W. Oh, R. Ooka, J. Nakano, H. Kikumoto, O. Ogawa
- [45] Outdoor comfort level improvement in the traffic waiting areas by using a mist spray system: an experiment and questionnaire study. M. Zhang, C. Xu, L. Meng, X. Meng
- [46] Environmental stress and livestock productivity in hot-humid tropics: alleviation and future perspectives. O. E. Oke, V. A. Uyanga, O. S. Iyasere, F. O. Oke, B. C. Majekodunmi, M. O. Logunleko, J. A. Abiona, E. U. Nwosu, M. O. Abioja, J. O. Daramola, O. M. Onagbesan
- [47] Comparing low-pressure and high-pressure fogging system in naturally ventilated greenhouses. S. Li, S. H. Willits
- [48] Experimental investigation on the performance of water spray cooling system. Z. Nianyoung, C. Fujiang, C. Yuchun, C. Mengmeng, W. Yu

- [49] Parametric study of heat transfer characteristics of enhanced surfaces in a spray cooling system: an experimental investigation. A. S. Salman, N. M. Abdulrazzaq, A. Tikadar, S. K. Oudah, J. A. Khan
- [50] The research and application of spray cooling technology in Shanghai Expo. C. Huang, D. Ye, H. Zhao, T. Liang, Z. Lin, H. Yin, Y. Yang
- [51] Thermal comfort improvement in urban spaces with water spray systems: field measurements and survey. G. Ulpiani, E. Di Giuseppe, C. Di Perna, M. D'Orazio, M. Zinzi
- [52] Solving model of temperature and humidity profiles in spray cooling zone. C. Huang, J. Cai, Z. Lin, Q. Zhang, Y. Cui
- [53] CFD analysis of the impact of physical parameters on evaporative cooling by a mist spray system. H. Montazeri, B. Blocken, J. L. M. Hensen
- [54] Effect of water temperature on evaporation of mist sprayed from a nozzle. C. Farnham, M. Nakao, M. Nishioka, M. Nabeshima, T. Mizuno
- [55] The spatial comfort and thermal delight of outdoor misting installations in hot and humid extreme environments. A. Desert, E. Naboni, D. Garcia
- [56] Numerical modelling and experimental validation of the microclimatic impacts of water mist cooling in urban areas. E. Di Giuseppe, G. Ulpiani, C. Cancellieri, C. Di Perna, M. D'Orazio, M. Zinzi
- [57] Mist cooling in urban spaces: understanding the key factors behind the mitigation potential. G. Ulpiani, C. Di Perna, M. Zinzi