



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



MINISTERO DELLA TRANSIZIONE ECOLOGICA



Ricerca di Sistema elettrico

Sviluppo di una metodologia di misura
della temperatura media radiante in
ambiente esterno urbano e valutazione
prestazionale energetica comparativa di
tecnologie di involucro verdi e
tradizionali

F. Causone, A. Tatti, M. Ferrando, S. Ferroni

Report RdS/PTR2020/128

SVILUPPO DI UNA METODOLOGIA DI MISURA DELLA TEMPERATURA MEDIA RADIANTE IN AMBIENTE ESTERNO URBANO E VALUTAZIONE PRESTAZIONALE ENERGETICA COMPARATIVA DI TECNOLOGIE DI INVOLUCRO VERDI E TRADIZIONALI

F. Causone, A. Tatti, M. Ferrando, S. Ferroni (Politecnico di Milano, Dipartimento di Energia)

Aprile 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico (oggi Ministero della Transizione Ecologica) - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II annualità

Obiettivo: N. 1 - *Tecnologie*

Progetto: 1.5 - *Tecnologie, tecniche e materiali per l'efficienza energetica ed il risparmio di energia negli usi finali elettrici degli edifici nuovi ed esistenti*

Work package: 2 - *Materiali e soluzioni innovative per ottimizzare l'isolamento dell'involucro edilizio*

Linea di attività: LA2.9 – *Metodologia di misura della temperatura media radiante in ambiente esterno e valutazione prestazionale di tecnologie di involucro verdi e tradizionali*

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

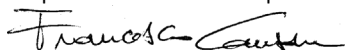
Responsabile del Work package: Giovanni Puglisi, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Sviluppo di una metodologia di misura della temperatura media radiante in ambiente esterno urbano e valutazione prestazionale energetica comparativa di tecnologie di involucro verdi e tradizionali"

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Fabio Zanghirella



Responsabile scientifico Dipartimento di Energia – Politecnico di Milano: Prof. Francesco Causone



Indice

INDICE	3
SOMMARIO	4
1. INTRODUZIONE E STRUTTURA DEL REPORT	5
2. MISURA DEL MICROCLIMA URBANO	7
3. MISURA DELLA TEMPERATURA MEDIA RADIANTE	8
3.1 Radiometro netto	8
3.2 Globotermometro	10
4. DEFINIZIONE DELLA STRUMENTAZIONE NECESSARIA PER LA MISURA DEL MICROCLIMA URBANO.....	13
4.1 RADIOMETRO NETTO	14
4.1.1 Equazioni di bilancio per il radiometro netto	16
4.1.2 Calcolo della Temperatura Media Radiante tramite tre radiometri netti.....	16
4.1.3 Calcolo della riflettanza e dell'assorbanza solare e infrarossa di una superficie, attraverso i radiometri netti	17
4.2 GLOBOTERMOMETRO	18
4.3 SENSORE MULTIPARAMETRO	19
4.4 DATALOGGER.....	20
5. METODOLOGIA DI MISURA UTILIZZATA.....	21
6. CAMPAGNA SPERIMENTALE E CALCOLO DELLA TEMPERATURA MEDIA RADIANTE IN AMBIENTE ESTERNO	23
6.1 TETTO PIANO CON FINITURA IN MEMBRANA BITUMINOSA ARDESIATA (20-21/07/2020).....	24
6.2 PARETE VERTICALE CON FINITURA IN INTONACO E PITTURA BIANCA (23/07/2020)	26
6.3 PARETE VERTICALE CON FINITURA IN LASTRE DI GRES PORCELLANATO (27/07/2020 E 18/09/2020)	28
6.4 PARCO CASCINA MERLATA (28/07/2020)	31
6.5 TETTO VERDE (26-27/08/2020)	33
6.6 PARETE VERTICALE CON FINITURA IN INTONACO E PITTURA CELESTE (01/09/2020)	37
6.7 STREET CANYON (09/09/2020)	39
6.8 PARETE VERDE, BOVISA (17/09/2020)	41
6.9 PARETE VERDE, Via BOVISASCA (06/10/2020).....	43
7. VALUTAZIONE DELLE PROPRIETÀ RADIATIVE DELLE SUPERFICI DI INVOLUCRO	45
8. DISCUSSIONI E CONCLUSIONI	51
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	53
APPENDICE.....	58

Sommario

In letteratura esistono metodologie e indici consolidati per la valutazione del microclima interno agli edifici, tuttavia, non esiste ancora una procedura di valutazione condivisa e riconosciuta internazionalmente per la caratterizzazione del microclima urbano esterno.

In particolare, la temperatura media radiante rappresenta un parametro fondamentale negli spazi esterni, poiché permette di tenere in considerazione contemporaneamente tutti i flussi radiativi che raggiungono il corpo umano. La procedura di misura più accurata per la valutazione di questo indice prevede l'uso di tre radiometri netti, tuttavia, si tratta di una procedura limitante per il costo elevato della strumentazione. L'impiego di globotermometri, strumenti di misura generalmente usati per la valutazione della temperatura media radiante negli spazi interni, potrebbe rappresentare un metodo alternativo e più economico per la valutazione dell'indice anche negli spazi esterni.

Il presente documento riporta i risultati di una prima campagna sperimentale volta alla caratterizzazione del microclima urbano esterno e dei suoi principali indici di misura in prossimità di superfici di involucro tradizionali e verdi (orizzontali e verticali), in campo libero e in street canyon. Le misure sono state effettuate tra luglio e ottobre 2020 impiegando simultaneamente tre radiometri netti disposti lungo i tre assi cartesiani e due diverse tipologie di globotermometri, uno nero da 150 millimetri di diametro e uno grigio da 50 millimetri, al fine di valutare in che misura i globotermometri possano essere impiegati in sostituzione di radiometri netti per il calcolo della temperatura media radiante.

Dai risultati delle analisi si può osservare che il globotermometro nero tende a sovrastimare la temperatura media radiante rispetto a quella calcolata attraverso i tre radiometri netti, al contrario, il globotermometro grigio tende a sottostimarla. Ulteriori approfondimenti e prove sperimentali in campo verranno effettuati per testare e consolidare la procedura di misura.

1. Introduzione e struttura del report

Circa il 55% della popolazione mondiale vive attualmente in aree urbane e questa percentuale è destinata a crescere fino al 68% entro il 2050 [1]. La costante crescita dell'urbanizzazione ha portato ad un altrettanto crescente interesse da parte della comunità scientifica e dell'opinione pubblica verso il tema della valutazione della qualità degli spazi urbani all'aperto, sia dal punto di vista microclimatico che di qualità dell'aria, poiché questi fattori influiscono sulla qualità della vita dei cittadini e sulla vivibilità degli spazi [2,3]. Condizioni microclimatiche esterne non confortevoli limitano infatti l'utilizzo delle aree urbane all'aperto, mentre condizioni favorevoli possono agevolare l'interazione sociale, con effetti positivi in termini di benessere generale della popolazione [4]. In particolare, l'aumento incontrollato della temperatura può avere effetti negativi a lungo termine sulla salute delle persone [5–8]. Le aree urbane sono infatti i luoghi più colpiti dal fenomeno chiamato “isola di calore” (in inglese, Urban Heat Island, UHI), che si verifica quando la temperatura dell'aria in città è significativamente superiore a quella registrata nelle aree rurali circostanti [9]. L'ampiezza della differenza tra le temperature varia nel tempo e nello spazio in relazione alle condizioni meteorologiche e alla morfologia del territorio urbano [10]. Questo fenomeno deve essere valutato e tenuto in considerazione nelle fasi di progettazione degli spazi esterni e nello studio delle aree urbane attraverso la progettazione di bacini idrici e parchi, chiamati anche infrastrutture blu e verdi, e attraverso una attenta progettazione dell'involucro degli edifici e dei materiali di finitura utilizzati [11–13].

Tutto ciò sta portando ad una domanda crescente, da parte di chi progetta e recupera aree urbane all'aperto, di metodi semplificati per la valutazione delle caratteristiche microclimatiche degli ambienti esterni [14]. La valutazione del microclima negli spazi esterni presenta una complessità maggiore rispetto alla valutazione del microclima negli spazi interni, poiché essa è legata a condizioni ambientali con una maggiore variabilità [15]. Diversi studi hanno portato all'identificazione dei parametri che maggiormente influiscono sullo studio del microclima esterno e sulla percezione termica dell'utente negli spazi all'aperto; essi includono: temperatura dell'aria (T_a), umidità relativa (RH), velocità dell'aria (v_a) e flussi radiativi [11,16]. In particolare, i flussi radiativi non sono facilmente quantificabili a causa delle loro rapide variazioni nello spazio e nel tempo dovute alle condizioni atmosferiche e alle proprietà degli elementi circostanti (es. assorbanza, riflettanza, ecc.) [17]. In condizioni di cielo sereno, la radiazione solare a bassa lunghezza d'onda mostra variazioni particolarmente significative, sia in termini temporali che spaziali [13,16–18]. Per valutare la complessità delle condizioni microclimatiche esterne, diventa pertanto necessario lo studio degli scambi di calore tra ambiente circostante e corpo umano. L'equazione 1 riporta i parametri interessati nel bilancio termico del corpo umano:

$$(M + \dot{Q}_R + \dot{Q}_C + \dot{Q}_K + \dot{Q}_{SW} + \dot{Q}_{Re}) - \dot{W} = S \left[W/m^2 \right] \quad (1)$$

i flussi di calore $\dot{Q}$ (radiativo $\dot{Q}_R$, convettivo $\dot{Q}_C$, conduttivo $\dot{Q}_K$, dovuto alla respirazione $\dot{Q}_{Re}$, e alla traspirazione $\dot{Q}_{SW}$) sono considerati positivi se entranti nel sistema termodinamico (corpo umano) e negativi se uscenti da esso, il tasso metabolico (M) è sempre positivo, mentre la densità di lavoro ($\dot{W}$) è positiva se applicata sul corpo e negativa se effettuata da esso verso l'ambiente circostante; il coefficiente S rappresenta la capacità di accumulo (storage) del corpo umano.

Per gestire e descrivere la grande varietà e complessità dei flussi radiativi, in letteratura è stato adottato il concetto di Temperatura Media Radiante (T_{mr}) [12,13,19,20], definita come “la temperatura uniforme di una cavità immaginaria (ambiente fittizio) nella quale il corpo umano scambierebbe la stessa quantità di calore per irraggiamento che scambia nell'ambiente reale non uniforme” [21]. Questo indice è applicabile anche a spazi esterni complessi, tenendo in considerazione tutti i flussi radiativi (incidenti e riflessi, radiazione diretta e diffusa a bassa lunghezza d'onda e radiazione ad elevata lunghezza d'onda proveniente dalle superfici circostanti, dal cielo e dal terreno) che raggiungono il corpo umano [20]. Si tratta quindi di un indice fondamentale per la valutazione del microclima esterno e per il bilancio energetico del corpo umano, specialmente durante le giornate estive con forte irraggiamento solare, in quanto, negli spazi aperti il bilancio

energetico è fortemente influenzato dall'effetto combinato dei carichi e delle perdite radiative e convettive [11,22–24].

La T_{mr} è un parametro fondamentale in diversi metodi di valutazione del microclima esterno [11], ed è inclusa nella formulazione di molti indici come il PET (Physiological Equivalent Temperature) [25], lo UTCI (Universal Thermal Climate Index) [26] e il WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) [27], applicabili in ambiente esterno. Maggiori dettagli sono riportati nei successivi capitoli del presente documento.

Il Capitolo 2 e il Capitolo 3 riportano l'analisi di letteratura sulle metodologie di misura del microclima urbano e dei parametri climatici comunemente usati per la sua valutazione. L'analisi ha lo scopo di evidenziare possibilità e limiti delle procedure di misura del microclima urbano e definire una metodologia di misura della temperatura media radiante alternativa a quella che prevede l'uso di radiometri netti. Il Capitolo 4 descrive la strumentazione sperimentale utilizzata durante la campagna di misura e necessaria alla determinazione della temperatura media radiante e degli indici di riflettanza e assorbanza delle varie superfici di involucro. I capitoli successivi definiscono in dettaglio la metodologia di misura e le equazioni utilizzate durante la campagna sperimentale (Capitolo 5), i risultati della campagna di misura sperimentale in ambiente urbano con tecnologie di involucro edilizio tradizionali e verdi, in termini di T_{mr} e UTCI (Capitolo 6) e in termini di riflettanza e assorbanza delle varie superfici di involucro (Capitolo 7).

La Figura 1 riassume sinteticamente i contenuti del presente report e la metodologia utilizzata per la sua stesura.

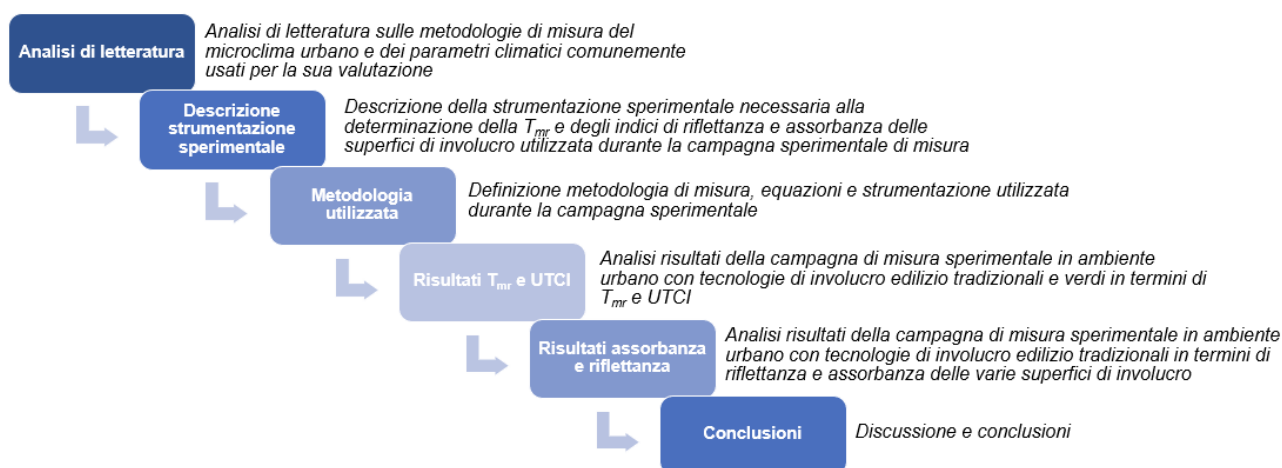


Figura 1. Struttura del report

2. Misura del microclima urbano

In letteratura esistono più di un centinaio di indici per lo studio del microclima interno degli edifici [28] ed alcuni essi sono definiti attraverso precise norme internazionali [29–31]. Al contrario, non è ancora disponibile uno standard riconosciuto internazionalmente per la valutazione del microclima urbano esterno [16] e, come indicato nella Tabella 1, gli indici disponibili in letteratura sono in gran parte derivati dall'adattamento di quelli utilizzati per gli ambienti interni [32,33].

Tabella 1. Descrizione dei principali indici per la valutazione del microclima in ambiente esterno

Indice	Rif.	Principali parametri	Descrizione generale/Dettagli
Equatorial comfort index	EC	[34,35] T_a, p_v, v_a	Indice ottimizzato per il clima di Singapore
Heat stress index	HSI	[36,37] T_{mr} , Temperatura superficiale della pelle, T_a, v_a traspirazione/sudorazione, massima capacità di evaporazione, pressione di vapore cutanea, p_v	Basato sul modello di bilancio termico, necessita di uno studio approfondito del corpo umano esposto all'ambiente
Humidex	-	[38] T_a, RH	Indice usato per stimare il pericolo di stress termico
Index of thermal stress	ITS	[37] M , Coefficiente convettivo di abbigliamento, v_a, T_g , Radiazione solare normale alla superficie, Ground and posture coefficient, coefficiente di evaporazione dell'abbigliamento, p_v	Il modello è stato adottato più volte per le condizioni esterne. Ha bisogno di una accurata conoscenza della tipologia e delle caratteristiche dell'abbigliamento
Klima Michel Model	KMM	[17] T_a, RH, v_a, T_{mr} , indice abbigliamento e attività	Adattamento del PMV [29], considera nel calcolo della T_{mr} un modello di radiazione a basse lunghezze d'onda. È stato definito considerando un "uomo di riferimento"
Outdoor standard effective temperature	OUT-SET*	[39] T_a, RH, v_a , Radiazione riflessa diretta/diffusa, Radiazione riflessa/emessa dal suolo, radiazione ad elevata lunghezza d'onda (verso il basso), radiazione emessa dal corpo	Basato su SET* [31], ma migliorato secondo un modello per calcolare la T_{mr} in condizioni esterne più estreme
Perceived temperature	PT	[40,41] T_a, RH, v_a, T_{mr} , indice abbigliamento e attività	Basato sull'indice di PMV [29] ma adattato per condizioni esterne
New perceived temperature	PT*	[17,42] T_a, RH, v_a, T_{mr} , indice abbigliamento e attività	Ulteriore adattamento di PT per ambienti esterni
Physiological equivalent temperature	PET	[43,44] T_a, RH, v_a, T_{mr} , indice abbigliamento e attività (standardizzati)	Basato sulla temperatura equivalente (ET) [36] ma adattato per ambienti esterni
Universal thermal climate index	UTCI	[26,45–49] T_a, RH, v_a, T_{mr} (condizioni di riferimento per abbigliamento e attività)	Indice più universale e facile da implementare
Wind chill temperature	WCT	[50] T_a, v_a	Indice basato su dati sperimentali e regressione lineare
Wet bulb globe temperature	WBGT	[51] T_g, T_{wb}, T_a	Basato su un globotermometro, presenta due diverse equazioni in base alla presenza o meno della radiazione solare

Tra gli indici elencati nella Tabella 1, l'UTCI fu sviluppato da Jendritzky et al. [45] con lo specifico scopo di elaborare un nuovo indice climatico universale che coprisse l'intero range di scambi termici fra corpo umano e ambiente esterno in diverse condizioni climatiche e stagioni e che risultasse applicabile nei diversi aspetti della bioclimatologia umana. Esso è universale anche perché è facilmente applicabile in situazioni in cui le condizioni climatiche sono note, ma non lo sono le caratteristiche del corpo umano o della sua attività. L'UTCI è calcolato sulla base di un'equazione in cui i parametri incogniti sono la temperatura dell'aria (T_a), l'umidità relativa (RH), la velocità dell'aria (v_a) e la temperatura media radiante (T_{mr}) [46]. L'equazione che combina tali variabili, fornisce come risultato la temperatura equivalente (UTCI) che può eventualmente essere associata ad una categoria di stress. Le categorie di stress, riportate nella Tabella 2, tentano di tradurre la temperatura equivalente in sensazioni percepite dal corpo umano nell'ambiente esterno (es. caldo eccessivo, freddo moderato, ecc.).

Tabella 2. UTCI range e Categorie di stress associate

UTCI (°C) – intervalli di temperatura	Categoria di stress
Oltre +46 °C	Stress termico estremo
Da +38 a +46 °C	Stress termico molto forte
Da +32 a +38 °C	Stress termico forte
Da +26 a +32 °C	Stress termico moderato
Da +9 a +26 °C	Nessuno stress termico
Da +9 a 0 °C	Leggero stress da freddo
Da 0 a -13 °C	Moderato stress da freddo
Da -13 a -27 °C	Forte stress da freddo
Da -27 a -40 °C	Stress da freddo molto forte
Sotto -40 °C	Stress da freddo estremo

I metodi di misura delle variabili meteorologiche come T_a , RH e v_a , sono normate da standard internazionali [52–59], pertanto, non rappresentano un problema nelle attività di studio del microclima in spazi esterni. Tuttavia, non è ancora disponibile uno standard internazionale che definisca una metodologia condivisa e accettata riguardante la misura della temperatura media radiante T_{mr} in ambienti esterni.

3. Misura della Temperatura Media Radiante

La T_{mr} può essere calcolata utilizzando software di modellazione come Rayman [13], SOLWEIG [60], ENVI-met [61] o CityComfort+ [62]. In questi software i dati meteorologici vengono inseriti come input, mentre l'ambiente urbano deve essere modellato considerando sia la geometria delle superfici che le loro caratteristiche; questi modelli sono pertanto affetti da un'incertezza intrinseca (in particolar modo per quanto riguarda i fattori di vista) e i loro risultati possono non essere sempre accurati [14,63].

Oltre al calcolo mediante software di modellazione, in letteratura sono proposte due tecniche di misura sperimentale della T_{mr} ; esse si fondano su misure effettuate adoperando tre radiometri netti o un globotermometro. Secondo quanto riportato in letteratura, l'utilizzo di radiometri netti rappresenta il metodo di misura più accurato della T_{mr} [4,64], tuttavia, l'utilizzo di tali strumenti per la valutazione del microclima degli spazi urbani è ostacolato dal costo elevato [12,18]. Inoltre, questa tecnica di misura non è ancora stata normata a livello internazionale, ma solamente da uno standard tedesco (VDI 3787) [40]. L'uso di globotermometri, inizialmente impiegati solo per lo studio del comfort termico in ambiente interno [65], rappresenta una soluzione più economica per valutare la T_{mr} anche in ambiente esterno; recentemente i globotermometri sono stati infatti impiegati anche per la valutazione del microclima urbano [4,12,16,18]. Va precisato tuttavia, che la letteratura non riporta in che misura i globotermometri possano essere impiegati in sostituzione dei più costosi radiometri netti per il calcolo della T_{mr} e per la valutazione dei principali indici di valutazione del microclima urbano.

3.1 Radiometro netto

Il radiometro netto è uno strumento di misura costituito dall'accoppiamento di due piranometri e due pirgeometri [15]. L'utilizzo di tre radiometri netti permette misurazioni simultanee della radiazione globale e di quella ad elevata lunghezza d'onda (radiazione infrarossa) nelle tre direzioni spaziali cartesiane, come mostrato in Figura 2.

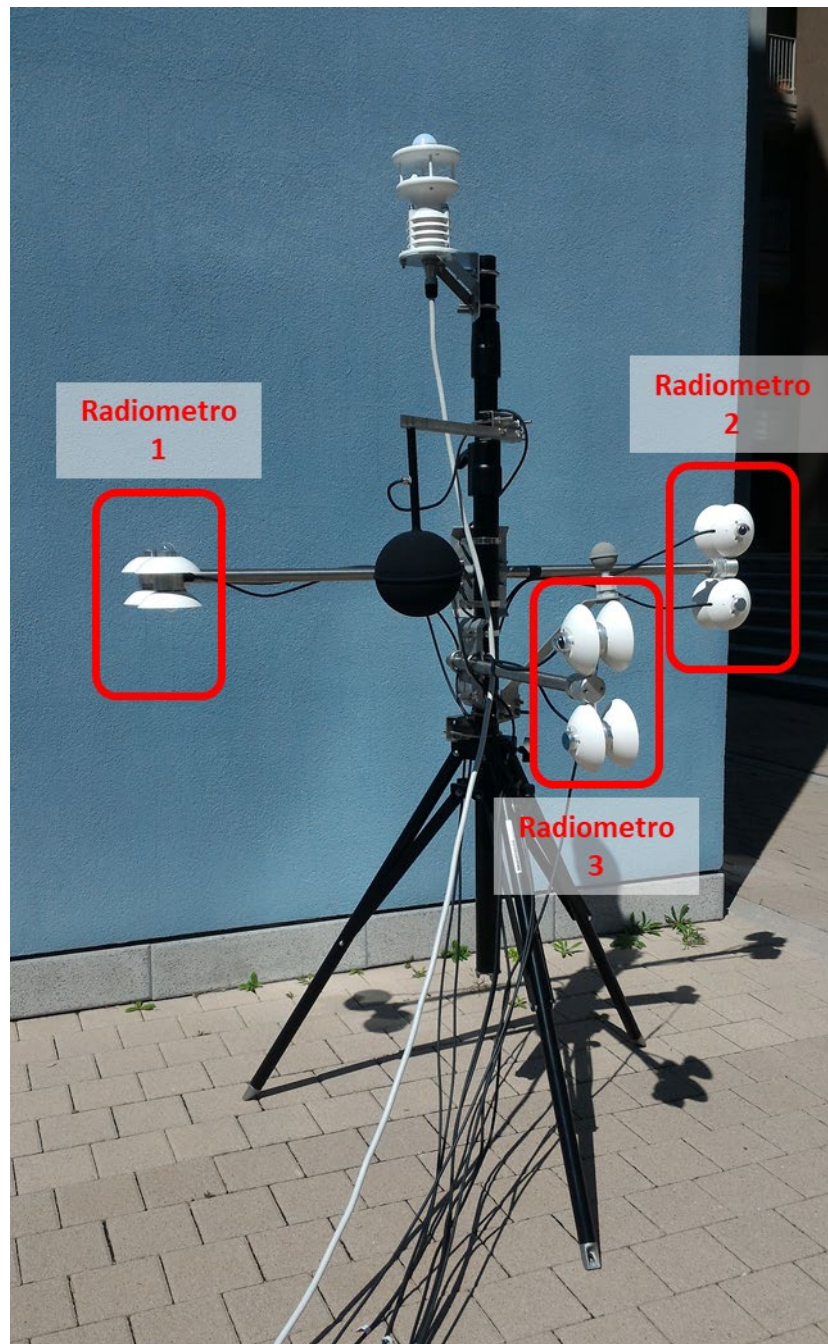


Figura 2. Strumentazione per la misura della radiazione attraverso tre radiometri netti orientati nelle tre direzioni spaziali

Un radiometro netto è composto quindi da due coppie di sensori posizionati in direzione opposta, in grado di registrare quattro valori di radiazione, in particolare, nel caso di posizionamento orizzontale: la radiazione solare globale dall'ambiente sovrastante, la radiazione solare riflessa dall'ambiente sottostante, la radiazione ad elevata lunghezza d'onda dall'ambiente sovrastante e sottostante. I piranometri misurano la densità di flusso della radiazione solare in watt per unità di superficie (W/m^2), tipicamente nel range di lunghezza d'onda da $0,3 \mu m$ a $3 \mu m$ (onde corte), mentre i pirgeometri misurano la radiazione infrarossa nello spettro di lunghezze d'onda da $4,5 \mu m$ a $100 \mu m$. Dalle misurazioni effettuate con il radiometro netto è quindi possibile ottenere i flussi di radiazione a bassa lunghezza d'onda (K_i) e ad elevata lunghezza d'onda (L_i). Questi risultati sono utilizzati per calcolare la densità di flusso media radiante S_{tr} in watt per unità di superficie, tramite l'Equazione 2, ripresa dallo standard tedesco VDI 3787 [40], che deriva a sua volta dagli studi di Fanger [39]:

$$S_{tr} = \alpha_k \sum_{i=1}^6 K_i F_i + \varepsilon_p \sum_{i=1}^6 L_i F_i \quad [W/m^2] \quad (2)$$

dove:

- F_i è il fattore di vista della i-esima direzione tra il corpo umano e le superfici circostanti, determinato dalla posizione e orientamento della persona,
- K_i è il flusso radiativo a bassa lunghezza d'onda nella direzione i-esima,
- L_i è il flusso radiativo ad elevata lunghezza d'onda nella direzione i-esima,
- α_k è il coefficiente di assorbimento dei flussi radiativi a bassa lunghezze d'onda (assunto 0,7 come valore standard nella VDI 3787 [40]),
- ε_p è l'emissività del corpo umano. Secondo la legge di Kirchoff, per corpi grigi ε_p è uguale al coefficiente di assorbimento (assunto pari al valore standard 0,97, VDI 3787 [40]).

Il fattore di vista F_i cambia a seconda che si consideri il corpo umano, in forma semplificata, come rappresentato da un parallelepipedo o da una sfera. Nel secondo caso tutti i flussi sono pesati ugualmente con il valore 0,167, invece, nel caso del parallelepipedo, assimilabile a una persona in piedi, il ruolo dei flussi laterali ha un impatto maggiore rispetto quello dei flussi verticali. In questo caso, come suggerito dall'analisi di Hoppe [66,67], il fattore di vista F_i assume rispettivamente i valori di 0,22 per i quattro flussi laterali e 0,06 per i due flussi provenienti dall'alto e dal basso. Questo è valido nel caso in cui la forma di una persona in piedi possa essere assimilata a quella di un parallelepipedo di base quadrata con un rapporto altezza/lunghezza pari a 3,5.

La T_{mr} , secondo la VDI 3787 [40], è calcolata come la temperatura di una cavità nera ideale in cui il corpo umano (modellato secondo un'approssimazione a parametri concentrati) assorbe un valore di radiazione ad elevata lunghezza d'onda, uguale alla somma della radiazione assorbita in un ambiente reale considerando sia la radiazione a bassa che ad elevata lunghezze d'onda. Considerando l'Equazione 2 in termini di T_{mr} , si ottiene l'Equazione 3, da cui è possibile calcolare la T_{mr} (in gradi Celsius, Equazione 4) [40]:

$$S_{tr} = \varepsilon_p \sigma T_{mr}^4 \quad [W/m^2] \quad (3)$$

$$T_{mr} = \sqrt[4]{\frac{S_{tr}}{\varepsilon_p \sigma}} - 273,15 \quad [^{\circ}C] \quad (4)$$

dove:

- σ è la costante di Stefan-Boltzmann ed è pari a $5,67 \times 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$.

Come già detto, i radiometri netti hanno un costo molto elevato (circa 5500 € per ciascun radiometro netto, IVA esclusa) se paragonato a quello dei sensori per lo studio delle comuni variabili meteorologiche, per queste ragioni, il loro utilizzo su larga scala è limitato. Inoltre, è importante ricordare che le tecniche di misura riportate nello standard tedesco VDI 3787 [40], non sono normate a livello internazionale. Le linee guida tedesche VDI 3787 suggeriscono, in alternativa, un metodo semplificato e più economico che prevede l'utilizzo di un solo radiometro netto fissato su bracci assiali mobili; durante il periodo di osservazione lo strumento deve essere orientato alternativamente nelle tre direzioni [40].

3.2 Globotermometro

Un sistema alternativo e meno costoso per la stima della T_{mr} consiste nell'utilizzo di un globotermometro (circa 430 € per il globotermometro nero standard da 150 millimetri di diametro e circa 270 € per il globotermometro grigio da 50 millimetri di diametro, IVA esclusa), esso è composto da un sensore di temperatura (tipicamente una termoresistenza PT100) situato al centro di una cavità sferica, verniciata in esterno solitamente di nero o di grigio [40]. Inizialmente fu introdotto da Vernon [68] per lo studio del comfort interno, esso era una sfera di rame vuota verniciata di nero, con un diametro esterno di 150

millimetri [69] e uno spessore di 0,4 mm [16]. Più recentemente, il globotermometro è stato utilizzato anche in ambienti esterni e alcuni ricercatori come Nikolopoulou et al. [70] hanno provato ad ottimizzare tale tecnica per studiare tali ambienti. Conoscendo la temperatura del globotermometro (T_g), la temperatura dell'aria, la velocità dell'aria e le caratteristiche del globo, è possibile calcolare la temperatura media radiante a partire dall'equazione di bilancio termico tra il globo e l'ambiente circostante:

$$q_{conv} + q_{rad} + q_{sol} = 0 \quad [W/m^2] \quad (5)$$

dove:

- q_{conv} rappresenta il flusso termico convettivo scambiato tra globo e ambiente [W/m^2],
- q_{rad} rappresenta il flusso termico radiativo ad elevata lunghezza d'onda scambiato tra globo e ambiente [W/m^2],
- q_{sol} rappresenta il flusso termico solare incidente sul globotermometro [W/m^2].

In condizione di equilibrio, tutti i flussi sono bilanciati e il globo raggiunge una temperatura di equilibrio. Esplicitando i termini dell'Equazione 5, si ottiene:

$$h_{conv}(T_a - T_g) + \varepsilon_g \sigma (T_{rad}^4 - T_g^4) + \alpha_g G_g = 0 \quad (6)$$

Dove:

- h_{conv} è il coefficiente di scambio termico convettivo tra l'aria e il globo [$W/(m^2K)$],
- T_a è la temperatura dell'aria [K],
- T_g è la temperatura di equilibrio del globo [K],
- ε_g è l'emissività del globo [-],
- σ è la costante di Stefan-Boltzmann, pari a $5,67 \times 10^{-8} [Wm^{-2}K^{-4}]$,
- T_{rad} è la temperatura radiante [K],
- α_g è il coefficiente di assorbimento solare del globo [-],
- G_g è l'irradianza solare incidente sul globo [W/m^2].

L'Equazione 6 può essere riscritta usando il concetto di T_{mr} (Equazione 7) che considera contemporaneamente i flussi radiativi a bassa ed elevata lunghezza d'onda. Infine, come descritto nella ISO 7726 [30], dall'Equazione 7 si può determinare la formula della T_{mr} (Equazione 8):

$$h_{conv}(T_a - T_g) + \varepsilon_g \sigma (T_{mr}^4 - T_g^4) = 0 \quad (7)$$

$$T_{mr} = \left[(T_g + 273.15)^4 + \frac{h_{cg}}{\varepsilon_g \sigma} (T_g - T_a) \right]^{1/4} - 273.15 \quad [^{\circ}C] \quad (8)$$

Dove:

- T_g è la temperatura del globo all'equilibrio con l'ambiente circostante ($^{\circ}C$),
- T_a è la temperatura dell'aria ($^{\circ}C$),
- h_{cg} è il coefficiente di scambio termico del globo in condizioni di convezione forzata o naturale [71].

Nel caso di convezione forzata il coefficiente h_{cg} è pari a $\frac{6,3 \cdot v^{0,6}}{D^{0,4}}$, in caso di convezione naturale è pari a $1,4 \frac{|T_a - T_g|^{0,25}}{D^{0,25}}$. Tali coefficienti provengono da analisi empiriche, pertanto in letteratura sono presenti diversi valori [4,63,72], che, a loro volta, determinano differenti risultati di T_{mr} . La ISO 7726, in ambienti sottoposti a un elevato stress termico, consiglia l'utilizzo del coefficiente di scambio termico in condizione di convezione forzata, pertanto nel presente rapporto si considererà nei calcoli il coefficiente di scambio termico $h_{cg} = \frac{6,3 \cdot v^{0,6}}{D^{0,4}}$.

- $h_{Rg} = \varepsilon_g \sigma$ è il coefficiente di scambio termico radiativo del globo.

Questa equazione è applicabile sotto due condizioni: la T_a deve essere compresa tra 0°C e 40°C e il numero di Reynolds (Re) nel range tra 10^2 e 10^5 .

Il globotermometro standard per gli ambienti interni è di colore nero, ha un diametro di 150 millimetri e uno spessore dell'involucro pari a 0,4 millimetri, generalmente di rame [71]. Globotermometri di tale dimensione e forma implicano un ampio tempo di risposta, fino a 15-30 minuti per raggiungere la temperatura di equilibrio con l'ambiente [71,73]. Pertanto, sebbene la misurazione della T_{mr} con un globotermometro sia più conveniente di quella effettuata utilizzando un radiometro netto, diversi ricercatori hanno segnalato i limiti di questa tecnica nella valutazione del microclima urbano, in particolare [73–75]:

- a causa delle condizioni estremamente variabili dell'ambiente esterno (e.g. flussi radiativi e condizioni del vento), il globo non ha il tempo per raggiungere l'equilibrio,
- a causa della forma del globo, la T_{mr} risultante non riesce perfettamente a rappresentare il carico di radiazione che insiste su una persona in piedi,
- a causa del colore nero lo strumento assorbe molta più radiazione a bassa lunghezza d'onda rispetto ai vestiti di una persona.

Per superare questi limiti e per meglio simulare le caratteristiche dei vestiti di una persona, sia la norma ISO 7726 [71] che il manuale ASHRAE "Handbook of Fundamentals" [74], propongono l'utilizzo di un globo di colore grigio, invece del nero, quando il globo è esposto alla radiazione solare diretta [15]. Un globotermometro grigio opaco da 40 millimetri (tempo di risposta tipico di 5-10 minuti) realizzato a partire da una pallina da tennis da tavolo dipinta di grigio, è stato utilizzato per diverse misurazioni [16,76].

Come già evidenziato, perché si possano registrare variazioni improvvise della T_{mr} con un globotermometro, esso deve avere un tempo di risposta sufficientemente breve. Per ottenerlo, il globo dovrebbe avere una dimensione ridotta e una bassa capacità termica [15,77]. D'altro canto però, più piccolo è il globo e maggiore è l'effetto dello scambio termico convettivo sulla temperatura risultante del globo, riducendo l'accuratezza del calcolo della T_{mr} [75].

Uno degli aspetti più critici riguardo le valutazioni del microclima degli ambienti esterni continua, tuttavia, ad essere la mancanza di una metodologia standardizzata in grado di descrivere le tecniche di misura dei parametri influenzanti il microclima esterno e di guidare il tecnico durante le prove di misura sperimentali. Come evidenziato in diversi studi [15,77], metodologie standardizzate dovrebbero guidare la scelta dei siti di misurazione, il tipo e il posizionamento della strumentazione, i metodi appropriati per determinare la T_{mr} e gli indici più adeguati per descrivere al meglio il microclima urbano.

Il presente documento riporta la descrizione della campagna sperimentale di misura volta alla caratterizzazione energetica in termini di scambi termici radiativi di diverse tecnologie di involucro edilizio. Per ciascuna tipologia di involucro edilizio selezionata, e al fine di definire una procedura di misura più economica e alternativa a quella dei radiometri netti, la T_{mr} è stata calcolata adottando contemporaneamente diverse strumentazioni sperimentali di misura, ovvero tre radiometri netti, un globotermometro nero da 150 millimetri di diametro e un globotermometro grigio da 50 millimetri di diametro.

La metodologia di lavoro utilizzata permetterà di comparare le misure effettuate con i globotermometri con quelle dei tre radiometri netti, usati come metodo di riferimento per il calcolo della T_{mr} in ambiente esterno.

4. Definizione della strumentazione necessaria per la misura del microclima urbano

In questa sezione si riporta la descrizione della strumentazione adottata per la valutazione degli indici di T_{mr} e UTCI in condizioni ambientali esterne differenti. La Tabella 3 riporta gli strumenti di misura e i parametri misurati durante la campagna sperimentale, includendo accuratezza e risoluzione degli strumenti. Attraverso il sensore multiparametro sono state misurate temperatura dell'aria, umidità relativa, velocità e direzione del vento, pressione atmosferica e radiazione solare globale. Ciascun radiometro netto ha permesso invece di misurare i flussi radiativi a bassa ed elevata lunghezza d'onda; infine, i globotermometri nero o grigio hanno permesso di misurare la temperatura globotermometrica.

La Figura 3 mostra la disposizione della strumentazione. Avendo bisogno di spostare spesso la strumentazione per svolgere misure in luoghi e momenti diversi, i sensori sono stati posizionati in campo utilizzando una struttura di supporto composta da un treppiede, con asta verticale regolabile in altezza, e delle aste orizzontali per il supporto dei radiometri e dei globotermometri. Due aste perpendicolari, all'estremità delle quali sono stati posizionati tre radiometri netti, sono state connesse all'asta verticale del treppiede tramite due piatti metallici fissati con viti. Il punto medio tra i due piatti è posto a 1,1 metri dal suolo, corrispondente all'altezza di riferimento per una persona in piedi. Due ulteriori barre sono state posizionate leggermente al di sopra di queste per supportare il globotermometro nero e quello grigio. Anche queste barre sono poste ad un'altezza tale che il centro dei due globotermometri sia mantenuto ad un'altezza di circa 1,1 metri dal suolo. Infine, sulla sommità dell'asta verticale, è stato fissato il sensore multiparametro direzionato secondo quanto definito nel manuale di installazione del sensore. I cavi dei sensori sono stati posizionati in modo tale da non ostruire il campo visivo dei radiometri netti.

La scelta del treppiede come struttura di supporto è stata fatta per avere una strumentazione leggera, facilmente montabile e smontabile e per limitare l'interferenza con gli strumenti di misura. L'ombra portata del palo è infatti trascurabile rispetto a quelle provenienti dall'ambiente circostante.

I paragrafi successivi riportano la descrizione più dettagliata dei singoli strumenti impiegati durante la campagna sperimentale di misura.

Tabella 3. Descrizione generale dei parametri misurati

Strumento di misura	Variabile	UdM	Sensore	Range di misura	Accuratezza	Risoluzione
Sensore multiparametro	Temperatura dell'aria	T_a °C	Diodo	-40 ÷ +80 °C	± 0,3 °C	0,1 °C
	Velocità del vento	v_a m/s	Ultrasonico	0 ÷ 60 m/s	± 0,3 m/s	0,01 m/s
	Direzione del vento	DIR_a °	Ultrasonico	0 ÷ 360 °	± 3°	0,1°
	Umidità relativa	RH %	Capacitivo	0 ÷ 100%	± 3%	0,10%
	Pressione	P_{atm} hPa	Piezoresistivo	600 ÷ 1100 hPa	± 0,5 hPa	0,1 hPa
	Irradianza solare globale	I_{sol} W/m ²	Fotodiodo	0 ÷ 2000 W/m ²	± 5 %	1 W/m ²
Radiometri netti	Flussi radiativi a bassa lunghezza d'onda	SW_i W/m ²	Piranometro	0 ÷ 2000 W/m ²	± 5 %	1 W/m ²
	Flussi radiativi a elevata lunghezza d'onda	LW_i W/m ²	Pirgeometro	-300 ÷ 300 W/m ²	± 5 %	1 W/m ²
Globotermometro (grigio e nero)	Temperatura globotermometrica	T_g °C	Resistenza PT100	-40 ÷ +80 °C	± 0,15 °C	0,01 °C

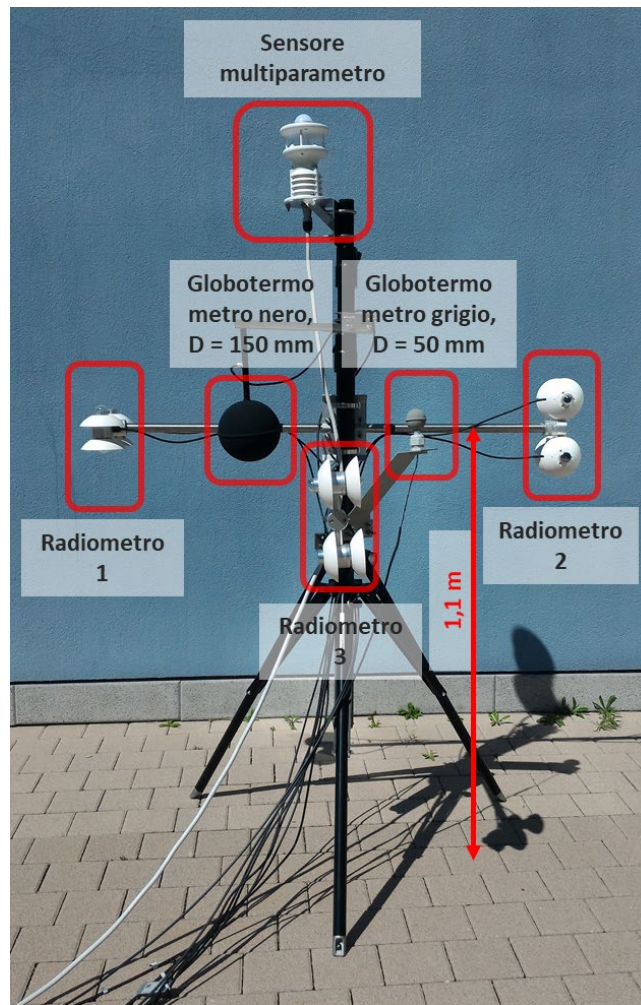


Figura 3. Configurazione completa della strumentazione utilizzata per i rilevamenti durante la campagna sperimentale

4.1 Radiometro netto

Per la campagna sperimentale di misura si è deciso di adottare come riferimento per la misura della T_{mr} il metodo che prevede l'utilizzo di tre radiometri netti, in grado di valutare l'intero spettro di radiazione incidente su un corpo in ambiente esterno, usando una discretizzazione dei flussi secondo le tre direzioni cartesiane.

Come detto poc'anzi, durante le misure i tre radiometri sono stati posizionati ad un'altezza di circa 1,1 metri da terra, corrispondente al valore di riferimento per una persona in piedi (Figura 4a). Per la valutazione dei flussi radiativi di tecnologie di involucro verticale, i radiometri indicati con i numeri 1 e 2 in Figura 4b sono stati posizionati alla distanza di un metro dal muro.

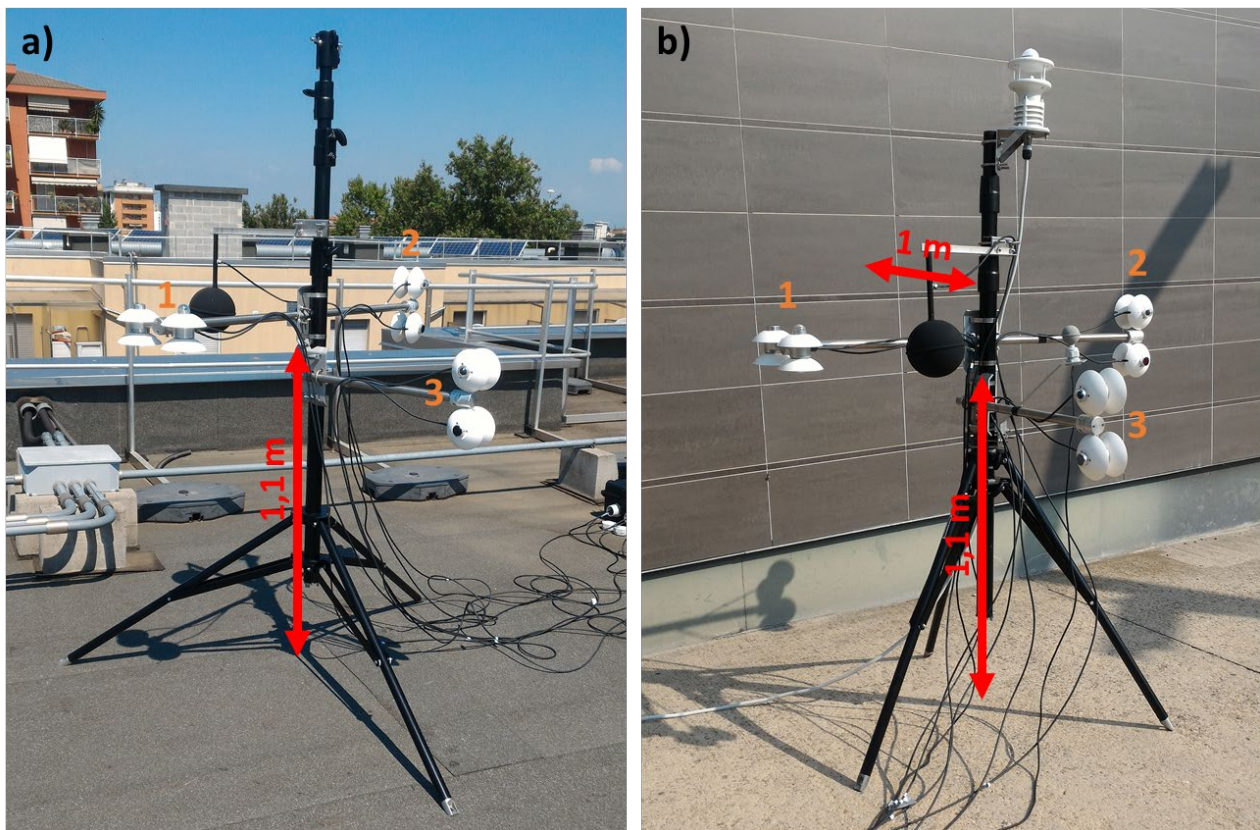


Figura 4. Disposizione e numerazione dei tre radiometri netti nel caso di valutazione prestazionale di involucri orizzontali (a) e verticali (b).

Il modello di radiometro netto scelto per la campagna di misura è il radiometro Hukseflux NR01 [78] (Figura 5), utilizzato seguendo le prassi raccomandate da ISO, IEC, WMO e ASTM [78–81]. Esso è un radiometro netto a quattro componenti, composto da due piranometri SR01, 2 pirgeometri del tipo IR01, una resistenza e una sonda di temperatura PT100. I piranometri e pirgeometri (i secondi con un input aggiuntivo per la misurazione della temperatura della superficie e del cielo) misurano la radiazione a bassa ed elevata lunghezza d'onda su una superficie piana, in W/m^2 . La resistenza presente serve per evitare la condensa di acqua sulla superficie vetrata del pirgeometro.

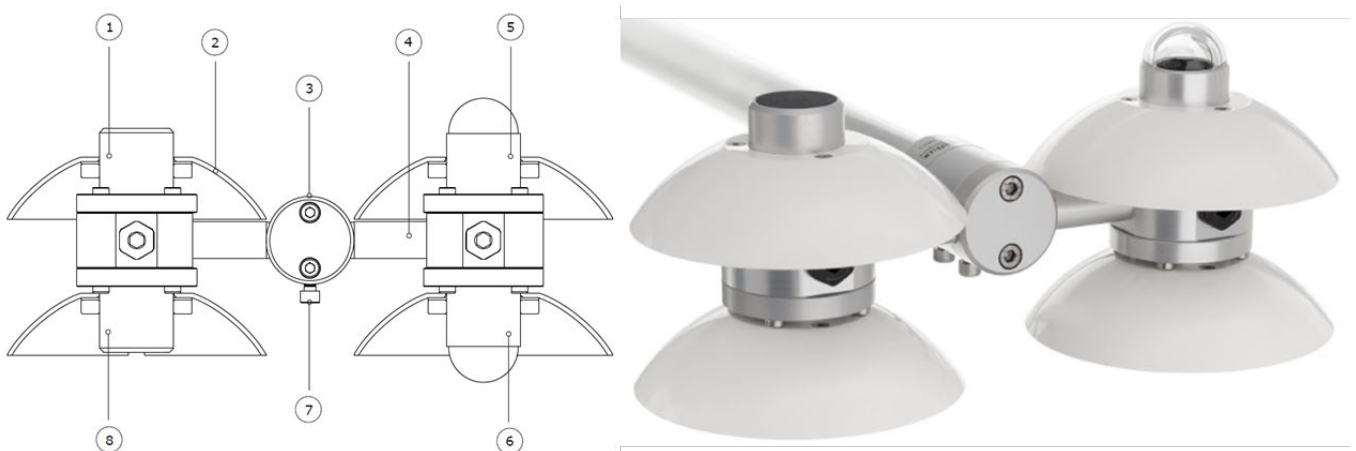


Figura 5. Radiometro NR01 [78], 1= Pirgeometro IR01 (componente verso l'alto), 8= Pirgeometro IR01 (componente verso il basso), 5= Piranometro SR01 (componente verso l'alto), 6= Piranometro SR01 (componente verso il basso).

4.1.1 Equazioni di bilancio per il radiometro netto

Il calcolo dell'irradianza solare globale sulla base delle misure dei piranometri è effettuabile a partire dall'Equazione 9:

$$E = \frac{U}{S} \quad [W/m^2] \quad (9)$$

dove:

- E è l'irradianza globale in W/m^2 ,
- U è l'output del sensore SR01 in termini di voltaggio in V,
- S è la sensibilità del sensore SR01 pari a $15 \times 10^{-6} V/(W/m^2)$.

L'irradianza ad elevata lunghezza d'onda, sempre in W/m^2 , viene invece calcolata dividendo l'output dell'IR01, ovvero il valore di voltaggio registrato, per la sensibilità dello strumento (rilasciato dal certificato di calibratura dell'IR01) più un fattore che tiene conto dell'energia termica irradiata dallo stesso sensore (legge di Stefan-Boltzmann). Il calcolo del flusso radiativo ad elevata lunghezza d'onda è descritto dall'Equazione 10:

$$E = \frac{U}{S} + \sigma \cdot (T + 273.15)^4 \quad [W/m^2] \quad (10)$$

Dove:

- E è l'irradianza ad elevata lunghezze d'onda in W/m^2
- U è l'output del sensore IR01 in termini di voltaggio in V
- S è la sensibilità del sensore IR01 pari a $15 \times 10^{-6} V/(W/m^2)$
- σ è la costante di Stefan-Boltzmann ed è pari a $5,67 \times 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$.
- T è la temperatura del sensore in °C.

4.1.2 Calcolo della Temperatura Media Radiante tramite tre radiometri netti

L'Equazione 11 riporta il calcolo della T_{mr} considerando le misure simultanee dei flussi radiativi a bassa ed elevata lunghezza d'onda nelle sei direzioni, con il corrispondente fattore di vista F_i tra il corpo e l'ambiente circostante, l'equazione deriva dall'Equazione 2 definita in precedenza:

$$T_{mr} = \left(\frac{\sum_{i=1}^3 [F_i (\alpha_k (SW_{UP,i} + SW_{DOWN,i}) + \varepsilon_p (LW_{UP,i} + LW_{DOWN,i}))]}{\sigma \varepsilon_p} \right)^{0.25} - 273,15 \quad [^{\circ}C] \quad (11)$$

dove:

- F_i è il fattore di vista per la direzione i-esima tra il corpo umano e le superfici circostanti, dovute sia dalla posizione che dall'orientamento della persona,
- $SW_{UP,i}$ è il flusso radiativo a bassa lunghezza d'onda dall'i-esima direzione, misurato dal corrispondente piranometro e diretto verso l'alto,
- $SW_{DOWN,i}$ è il flusso radiativo a bassa lunghezza d'onda dall'i-esima direzione, misurata dal corrispondente piranometro diretto verso il basso,
- $LW_{UP,i}$ è il flusso radiativo ad elevata lunghezza d'onda dall'i-esima direzione, misurato dal corrispondente pirgeometro diretto verso l'alto,
- $LW_{DOWN,i}$ è il flusso radiativo ad elevata lunghezza d'onda dall'i-esima direzione, misurato dal corrispondente pirgeometro diretto verso il basso,
- α_k è il coefficiente di assorbimento dei flussi radiativi a bassa lunghezza d'onda, assunto pari a 0,7 come valore standard [40],
- ε_p è l'emissività del corpo umano assunta pari a 0,97 come valore standard [40],
- σ è la costante Stefan-Boltzmann ed è uguale a $5,67 \times 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$.

I fattori di vista F_i possono cambiare in relazione alla forma (sfera o parallelepipedo) a cui viene assimilato il corpo umano in un determinato ambiente. In questo rapporto si utilizzerà l'approccio che considera una persona in piedi assimilabile ad un parallelepipedo a base quadrata con un rapporto altezza/lunghezza pari a 3,5.

4.1.3 Calcolo della riflettanza e dell'assorbanza solare e infrarossa di una superficie, attraverso i radiometri netti

Per ciascuna delle misure sperimentali condotte è stato effettuato anche il calcolo delle proprietà radiative delle superfici circostanti all'ambiente studiato, al fine di caratterizzare le condizioni dell'ambiente stesso e i parametri che lo influenzano. Differenti proprietà delle superfici circostanti implicano un quantitativo differente di radiazione, riflessa, assorbita e riemessa nell'ambiente, determinando variazioni nella percezione da parte di un soggetto immerso nell'ambiente. Le superfici per le quali sono state calcolate la riflettanza e l'assorbanza sono tutte le superfici orizzontali e verticali testate durante la campagna sperimentale.

Riflettanza e assorbanza solare (radiazione a bassa lunghezza d'onda) valutate per una superficie

Durante tutte le misure in campo, il radiometro 1 è stato disposto parallelamente alla superficie di pavimento e il radiometro 2 parallelamente alla superficie verticale di involucro (vedi Figura 4). Questo ha permesso di calcolare le proprietà radiative (riflettanza e l'assorbanza) delle superfici orizzontali e verticali nel campo della radiazione solare (globale) attraverso le Equazioni 12 e 13 (:

$$\rho_{Glo} = \frac{SW_{DOWN}}{SW_{UP}} [-] \quad (12)$$

$$\alpha_{Glo} = 1 - \rho_{Glo} [-] \quad (13)$$

dove:

- ρ_{Glo} è la riflettanza solare della superficie esaminata,
- α_{Glo} è l'assorbanza solare della superficie esaminata,
- SW_{DOWN} è il flusso radiativo a bassa lunghezza d'onda misurato dal piranometro rivolto verso la superficie esaminata,
- SW_{UP} è il flusso radiativo a bassa lunghezza d'onda misurato dal piranometro rivolto verso il resto dell'ambiente.

Riflettanza e assorbanza infrarossa (radiazione ad elevata lunghezza d'onda) valutate per una superficie

Allo stesso modo sono state calcolate le proprietà radiative nel campo dell'infrarosso (elevata lunghezza d'onda) per le stesse superfici orizzontali e verticali di involucro:

$$\rho_{IR} = \frac{LW_{DOWN}}{LW_{UP}} [-] \quad (14)$$

$$\alpha_{IR} = 1 - \rho_{IR} [-] \quad (15)$$

dove:

- ρ_{IR} è la riflettanza infrarossa della superficie esaminata,
- α_{IR} è l'assorbanza infrarossa della superficie esaminata,
- LW_{DOWN} è il flusso radiativo ad elevata lunghezza d'onda misurato dal pirgeometro rivolto verso la superficie esaminata,
- LW_{UP} è il flusso radiativo ad elevata lunghezza d'onda misurato dal pirgeometro rivolto verso il resto dell'ambiente.

Le Equazioni 1, 2, 14 e 15 seguono le seguenti assunzioni:

- la radiazione a bassa/elevata lunghezza d'onda incidente su una superficie orizzontale o verticale è uguale alla quantità di radiazione a bassa/elevata lunghezza d'onda che raggiunge il sensore rivolto verso il resto dell'ambiente,
- la radiazione a bassa/elevata lunghezza d'onda riflessa da una orizzontale o verticale è uguale alla quantità di radiazione a bassa/elevata lunghezza d'onda misurata dal sensore rivolto verso la superficie. La distanza di 1 m circa tra la superficie e il sensore è stata scelta come ragionevole compromesso per limitare la vista di altre superfici riflettenti da parte del sensore e al contempo perché il sensore non interferisse con il fenomeno di riflessione mettendo in ombra la superficie.
- Il coefficiente di trasmissione della superficie è stato considerato pari a 0.

4.2 Globotermometro

L'altra tecnica di misura utilizzata per calcolare la T_{mr} è quella che prevede l'utilizzo del globotermometro in combinazione con misurazioni di temperatura dell'aria e di velocità del vento. Come descritto nella Sezione 3.1, in letteratura si trova una grande varietà di globotermometri [15] in termini di:

- dimensioni, se ne possono trovare con diametri variabili tra i 38 mm e i 150 mm,
- materiali, che possono essere sia plastici che metallici (tipicamente rame),
- colore (generalmente nero o grigio).

Il globotermometro standard per usi in ambienti interni è nero, ma quando il globo è esposto alla radiazione solare, gli standard ISO 7726 e l'ASHRAE Handbook of Fundamentals raccomandano di utilizzare un globo di colore grigio [15]. Per poter avere dei tempi di risposta sufficientemente brevi e registrare variazioni rapide nella T_{mr} , il globo deve essere di piccole dimensioni e avere una bassa inerzia termica [15,77]. Tuttavia, più piccolo è il globo, maggiore è l'effetto dello scambio termico convettivo (dipendente da temperatura dell'aria e velocità del vento) sulla temperatura risultante del globo e ciò riduce l'accuratezza del calcolo della T_{mr} [4]. Per poter attuare un confronto anche in riferimento a quanto descritto in letteratura, durante la campagna sono stati usati sia un globo nero che un globo grigio di rame, di diametro rispettivamente pari a 150 millimetri e 50 millimetri (Figura 6), quelli più comunemente prodotti ed usati in ambito professionale.

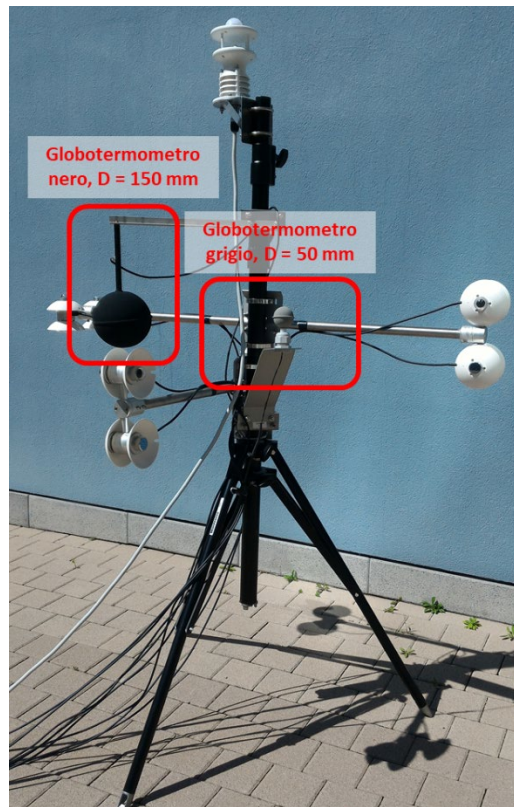


Figura 6. Globotermometro nero e grigio utilizzati durante la campagna sperimentale

Per il presente studio, le emissività del globo nero e grigio ε_g utili per calcolare il coefficiente di scambio termico radiativo al livello del globo (Equazione 8), sono state ricavate attraverso analisi di laboratorio volte alla caratterizzazione della vernice utilizzata per il rivestimento di rame esterno. La norma ISO 7726 [30] suggerisce infatti l'utilizzo di un valore standard di emissività per una vernice nera opaca di 0,95, mentre lo standard tedesco (VDI 3787) [40], propone un valore di 0,97 per il corpo umano. Al fine di migliorare l'affidabilità dei risultati, in questo studio è stata eseguita una caratterizzazione dettagliata del rivestimento dei due globotermometri, sia per il colore nero che per il colore grigio.

I globotermometri, tipo LSI LASTEM EST131 [82], sono stati infatti rivestiti con due specifiche pitture: NEXTEL Velvet Coating 811-21 Optic Black [83], per il colore nero e Suede Coating 3101 [84] nel colore S774 Light Grey, per il grigio. Per la valutazione dell'emissività sono stati utilizzati lo spettrometro FT-IR e lo spettrofotometro UV-VIS-NIR del ThermALab del Politecnico di Milano, in particolare, uno spettrometro FT-IR Perkin Elmer Frontier e uno spettrofotometro Perkin Elmer Lambda 950.

La Figura 7 riporta l'andamento della riflettanza infrarossa calcolata per i provini di vernice grigia e nera pesata sullo spettro di emissione del corpo nero e in funzione del range di temperatura (compreso tra 173,15 K e 373,15 K) al fine di includere tutte le possibili condizioni reali raggiunte da provini durante la campagna sperimentale. I risultanti valori medi di riflettanza, assorbanza ed emissività per la vernice nera e grigia sono riportati in Tabella 4.

Tabella 4. Riflettanza, assorbanza ed emissività dei provini di vernice nera globali ed infrarossi. N.B. riflettanza e assorbanza globali sono state calcolate secondo la EN 410: 2011 [85]

Provino vernice	ρ_{Glo} [%]	α_{Glo} [%]	ρ_{IR} [%]	α_{IR} [%]	ε_{IR} [%]
Grigio	24,4	75,6	7,1	92,9	92,9
Nero	2,9	97,1	3,7	96,3	96,3

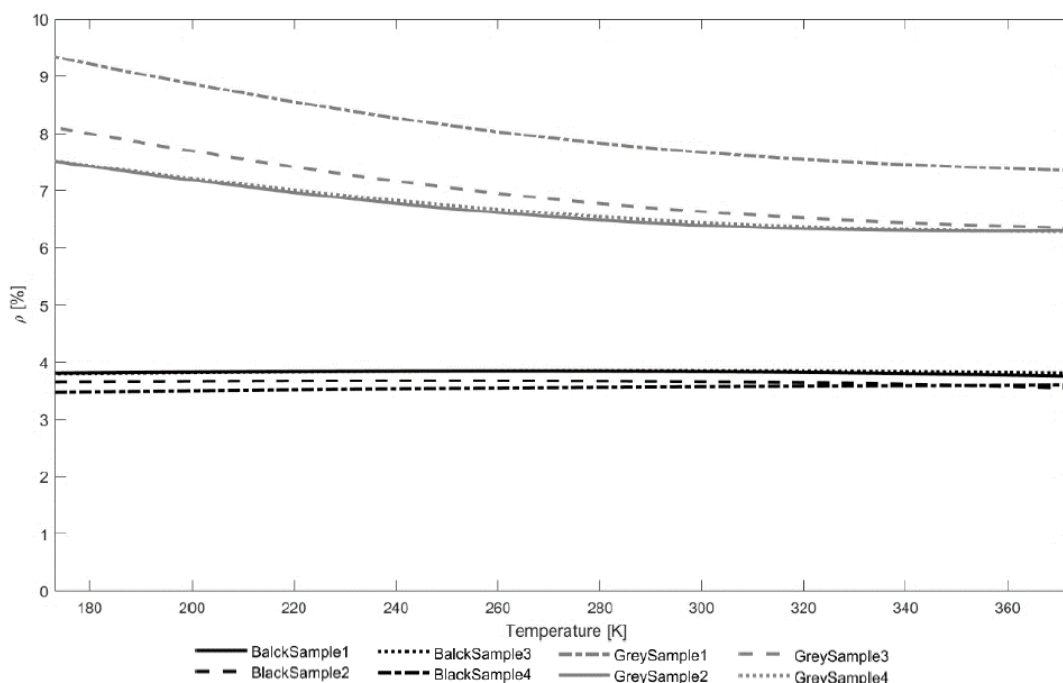


Figura 7. Riflettanza infrarossa dei provini di vernice nera e grigia analizzati in funzione della temperatura

4.3 Sensore multiparametro

Il sensore multiparametro "All-in-one" tipo compatto, della LSI-LASTEM [82] (Figura 8) consente di misurare i restanti parametri meteorologici richiesti per le analisi del microclima in ambiente urbano. Questo apparecchio integra un anemometro sonico con una capacità di risposta rapida per la misura della direzione e velocità del vento, un sensore per la temperatura dell'aria e di umidità relativa, un sensore barometrico di

pressione e un sensore per la radiazione solare globale. Per caratterizzare correttamente la direzione del vento, il sensore è stato direzionato verso nord, come descritto dal produttore. Le Tabella 3 riporta il range di misura, l'accuratezza e la risoluzione dei singoli sensori.

Il sensore multiparametro "All-in-one" è stato posizionato sulla sommità del palo che fa da supporto anche agli altri sensori in modo da evitare ogni possibile interferenza da parte del resto della strumentazione. Inoltre, il cavo che connette il sensore al Sistema di acquisizione dell'informazione è stato sempre posizionato in modo da non ostruire il campo dei tre radiometri netti.

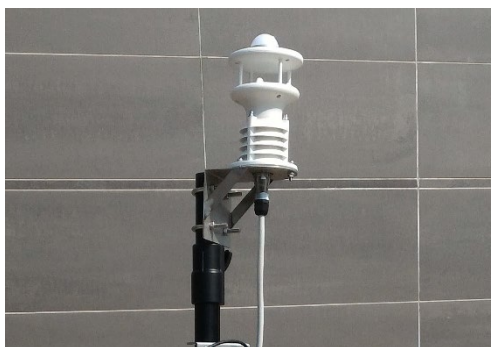


Figura 8. Sensore multiparametro "All-in-one" per la misura della velocità e direzione del vento, temperatura dell'aria, radiazione solare, umidità dell'aria e la pressione atmosferica.

4.4 Datalogger

Un sistema di acquisizione dei dati è necessario per ricevere e processare i dati misurati, a questo scopo si è scelto un Alpa-Log datalogger della LSI-LASTEM [86], al quale sono stati connessi: due estensioni ingressi (ALIEM – Input extension module), i radiometri netti, i globi e il sensore multiparametro "All-in-one".

Le estensioni ingressi (ALIEM – Input extension module) sono state utilizzate per ricevere tutti gli output della strumentazione appena descritta e quindi per incrementare il numero dei terminali disponibili per la registrazione del dato. Il range temporale di acquisizione dei dati permesso dall'Alpha-Log è compreso tra 1 secondo e 12 ore, esso permette l'acquisizione dei dati tramite una serie di canali e la loro visualizzazione in tempo reale tramite un display locale. Prima di procedere con le misurazioni in campo, è stato necessario configurare il sistema. La configurazione è consistita nella connessione fisica dei sensori al datalogger e nella programmazione del sistema di acquisizione usando il software 3DOM, scaricabile gratuitamente dal sito web di LSI-LASTEM. Una volta che il sistema è configurato, l'unità di controllo è in grado di acquisire e registrare i dati che possono essere scaricati connettendo il datalogger al computer su cui è stato installato il software dedicato.

Durante le rilevazioni, sia l'Alpha-Log che le estensioni ALIEM sono state collocate all'interno di custodie protettive, resistenti agli urti, di dimensioni 340x270x140 mm (Figura 9) per limitare possibili urti e/o il surriscaldamento dell'unità di controllo. Ciascuna custodia è dotata di una batteria di accumulo elettrochimico ricaricabile (15 Ah) ed alimentatore/carica batterie (220/24-12 Vca/Vcc, 50 W) al fine di svolgere l'attività di misura in assenza di alimentazione da rete elettrica.

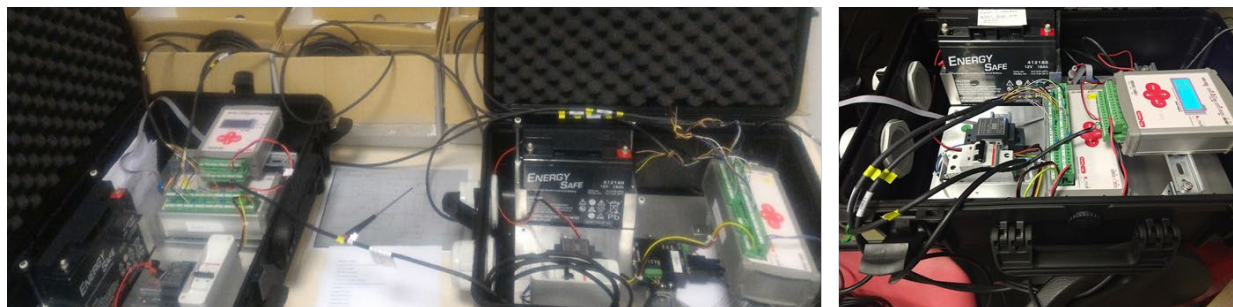


Figura 9. Datalogger Alpha-Log e le due estensioni ALIEM nelle custodie resistenti agli urti

5. Metodologia di misura utilizzata

La strumentazione descritta nel paragrafo precedente è stata utilizzata per valutare i parametri principali per la caratterizzazione del microclima urbano, in particolare la temperatura media radiante, oltre che per la valutazione delle proprietà radiative delle superfici circostanti all'ambiente studiato (superfici verticali e orizzontali di involucro).

Come mostrato in Figura 10, dopo aver individuato l'ambiente o le superfici di involucro da studiare, si è proceduto al montaggio della strumentazione secondo la configurazione di Figura 3. La procedura di trasporto, montaggio e posizionamento in campo della strumentazione ha richiesto mediamente 2 ore per ciascuna prova, per questo è in corso la costruzione di un dispositivo mobile di supporto della strumentazione che permetta di trasportare e posizionare più agevolmente la strumentazione già montata nel punto identificato per la misura.

Una volta montata la strumentazione e acceso il sistema di acquisizione dei dati, si è proceduto alla misura e registrazione di tutti i parametri utili al calcolo della T_{mr} e dell'UTCI attraverso diverse procedure al fine di sviluppare e testare una metodologia di misura alternativa e più economica rispetto a quella che prevede l'uso simultaneo di tre radiometri netti disposti nelle tre direzioni spaziali. A questo scopo, come mostrato in Figura 3 e Figura 10, sono stati usati:

- tre radiometri netti disposti lungo le tre direzioni cartesiane,
- un globotermometro di rame pitturato di nero da 150 millimetri di diametro,
- un globotermometro di rame pitturato di grigio da 50 millimetri di diametro,
- un sensore multiparametro per la misura dei parametri fondamentali per il calcolo della T_{mr} e UTCI, ovvero la temperatura dell'aria (T_a), l'umidità relativa (RH) e la velocità dell'aria (v_a).

Tutti i parametri misurati dai sensori riportati in elenco sono stati registrati attraverso l'Alpa-Log datalogger della LSI-LASTEM [86] con una frequenza pari a 1 minuto. I sensori sono stati posizionati e distanziati dall'involucro orizzontale/verticale come raffigurato in Figura 4a e Figura 4b.

Nel caso di misure effettuate con i radiometri netti, la T_{mr} è stata calcolata secondo l'Equazione 11 definita nella Sezione 4.1.2 e in Figura 10, assumendo:

- un coefficiente di assorbimento dei flussi radiativi a basse lunghezze d'onda α_k pari a 0,7 [40],
- l'emissività del corpo umano ε_p pari a 0,97 [40],
- i fattori di vista F_i pari a rispettivamente 0,22 per i quattro flussi laterali e 0,06 per i flussi dall'alto e dal basso. L'assunzione assimila una persona in piedi alla forma di un parallelepipedo di base quadrata con un rapporto altezza/lunghezza pari a 3,5.

Nel caso dei globotermometri nero e grigio la T_{mr} è stata invece calcolata secondo l'Equazione 8, definita in Sezione 3.2 e in Figura 10, considerando le caratteristiche geometriche e termiche di seguito riportate:

- coefficiente di scambio termico in convezione forzata a livello del globo $h_{cg} = \frac{6,3 * v^{0.6}}{D^{0.4}}$ [71],
- diametro D del globo nero pari a 150 millimetri ed emissività ε_g pari a 0,963,
- diametro D del globo grigio pari a 50 millimetri ed emissività ε_g pari a 0,929.

Una volta calcolati T_{mr} e l'UTCI sia sulla base delle misure dei tre radiometri netti che di quelle dei due globotermometri, si è proceduto alla comparazione dei risultati, come riportato all'interno della Sezione 6 del presente documento. Infine, attraverso i dati registrati dai radiometri netti, è stato possibile caratterizzare le proprietà radiative, in termini di riflettanza e assorbanza, delle superfici orizzontali e verticali di involucro testate. L'assorbanza e la riflettanza nel campo del visibile e dell'infrarosso sono state calcolate utilizzando le Equazioni 12, 13, 14, 15 definite nella sezione 4.1.3 e utilizzando i dati misurati attraverso il radiometro 1 per le superfici orizzontali e il radiometro 2 per le superfici di involucro verticale. La Figura 10 schematizza la metodologia appena descritta e utilizzata per la campagna sperimentale effettuata durante i mesi estivi del 2020.

Una volta definito il luogo di misura, la metodologia ha previsto l'installazione della strumentazione, la registrazione dei dati e l'analisi dei dati. In particolare, l'analisi dei dati è stata svolta considerando come riferimento la T_{mr} e l'UTCI calcolati attraverso l'uso simultaneo dei tre radiometri netti:

- soluzione 1 (riferimento) per il calcolo della T_{mr} : tre radiometri netti,
- soluzione 2 per il calcolo della T_{mr} : globotermometro nero e sensore multiparametro,
- soluzione 3 per il calcolo della T_{mr} : globotermometro grigio e sensore multiparametro,
- soluzione 1 (riferimento) per il calcolo dello UTCI: tre radiometri netti e sensore multiparametro,
- soluzione 2 per il calcolo dello UTCI: globotermometro nero e sensore multiparametro,
- soluzione 3 per il calcolo dello UTCI: globotermometro grigio e sensore multiparametro.

La caratterizzazione delle proprietà radiative delle superfici ambientali in cui è svolta la misura è un'operazione indipendente dalla verifica della T_{mr} e dello UTCI, anche se per i calcoli della riflettanza e della assorbanza, sono usati gli output dei radiometri netti.

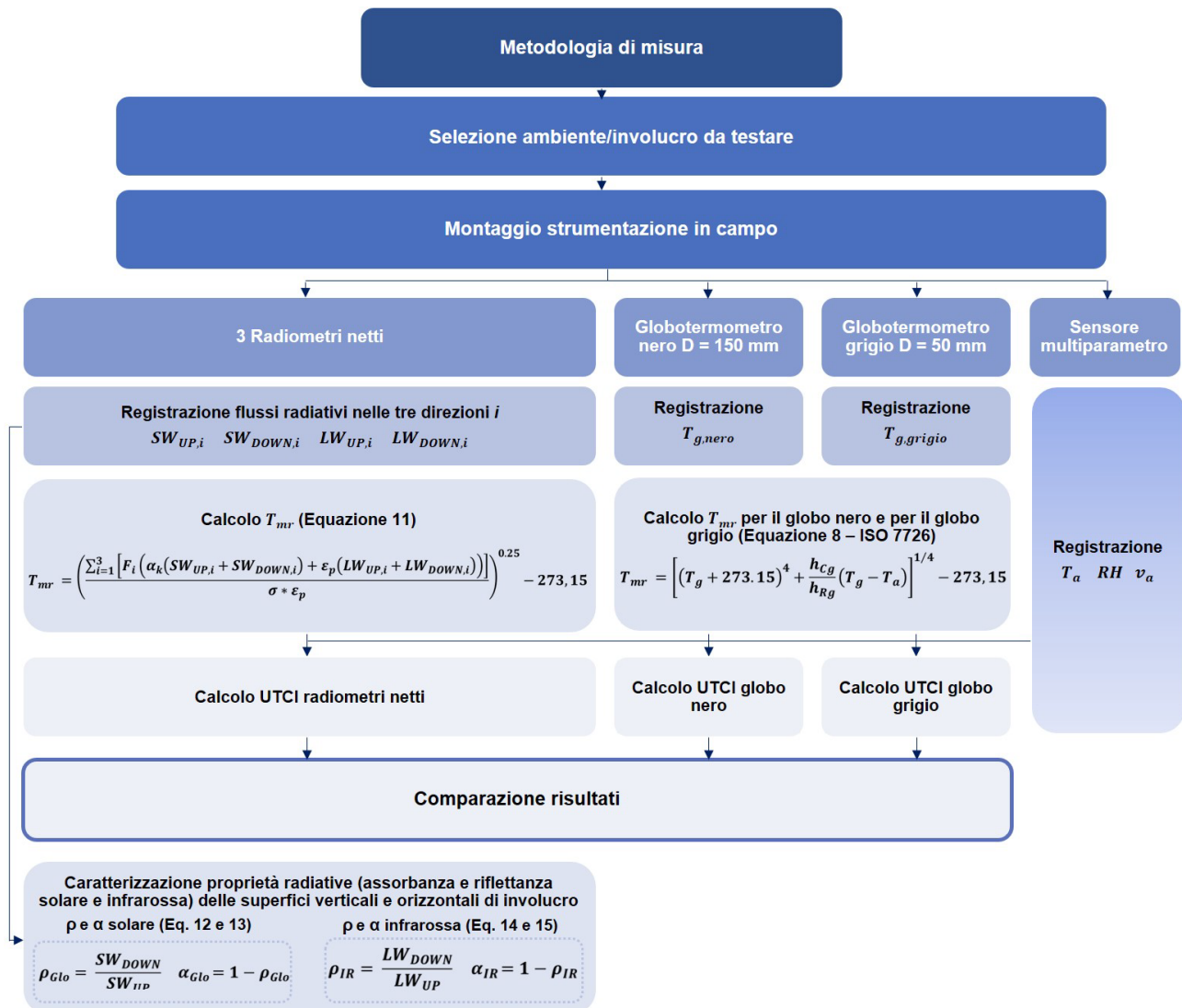


Figura 10. Metodologia utilizzata per la valutazione del microclima urbano

6. Campagna sperimentale e calcolo della temperatura media radiante in ambiente esterno

La campagna di misura sperimentale per la valutazione della T_{mr} in ambienti caratterizzati da differenti tecnologie di involucro edilizio è stata effettuata durante i mesi di luglio, agosto, settembre e ottobre del 2020, poiché a causa della pandemia in corso, negli altri mesi dell'anno non è stato possibile circolare liberamente ed accedere alle aree di misura selezionate. La situazione al contorno ha inoltre rallentato la consegna di alcuni strumenti di misura, per cui le misure effettuate il 20 e 21 di luglio non includono il sensore multiparametro ed il globotermometro grigio; per questa prima campagna di misura i valori di T_a , RH e v_a sono stati ricavati da una centralina meteorologica presente in sito e dotata di sensori con caratteristiche metrologiche simili a quelle del sensore multiparametro. Le misure del 23, del 27 e del 28 luglio non includono il globo grigio, la cui consegna è avvenuta a fine agosto. Le attività sono state svolte in determinate fasce orarie all'interno di singole giornate, perché la condizione al contorno ha determinato dei limiti di accesso legati sia al personale preposto per la sorveglianza delle aree, sia alla necessità di garantire la presenza di un operatore in sito per la sorveglianza della strumentazione.

La Tabella 5 riporta l'elenco delle misure sperimentali effettuate includendo i dettagli sulla tipologia di involucro edilizio testato, la data di esecuzione della misura, la strumentazione utilizzata e la frequenza di campionamento dei dati ambientali. Come anticipato, a causa dei ritardi dovuti alla produzione e alla consegna di una parte della strumentazione, per le misure iniziali (fine luglio-agosto) verranno presentati i risultati della T_{mr} e UTCI relativi solo ai radiometri e al globotermometro nero. Si prevede di ripetere simili misure con la strumentazione di misura completa, inclusiva del globotermometro grigio, nel corso del 2021 nella fase di consolidamento della metodologia stessa.

Tabella 5. Riassunto misure sperimentali effettuate tra luglio e ottobre 2020

Involucro edilizio testato	Sito	Data della misurazione	Strumenti di misura della T_{mr}			Frequenza di registrazione del dato
			Globo nero (150 mm)	Globo grigio (50 mm)	Radiometri netti	
Tetto piano con finitura in membrana bituminosa ardesiata	Milano, Via Feltrinelli 16	20/07/2020 21/07/2020	x		x	10 minuti*
Parete verticale, finitura intonaco + pittura bianca	Milano, Edificio BL28, Via Lambruschini	23/07/2020	x		x	1 minuto
Parete verticale, finitura in gres porcellanato	Milano, Edificio BL26, Via Lambruschini	27/07/2020	x		x	1 minuto
		18/09/2020	x	x	x	
Campo aperto, parco verde	Milano, Cascina Merlata	28/07/2020	x		x	1 minuto
Tetto verde	Milano, Via Ponzio 31	26/08/2020	x		x	1 minuto
		27/08/2020	x	x	x	
Parete verticale, finitura intonaco + pittura celeste	Milano, Cascina Merlata	01/09/2020	x	x	x	1 minuto
Street canyon	Milano, edifici BL25-26, Via Lambruschini	09/09/2020	x	x	x	1 minuto
Parete verticale verde 1	Milano, Bovisa, Via Lambruschini	17/09/2020	x	x	x	1 minuto
Parete verticale verde 2	Milano, Via Bovisasca	06/10/2020	x	x	x	1 minuto

*Temperatura e velocità dell'aria e umidità relativa sono ricavati da una centralina in sito

6.1 Tetto piano con finitura in membrana bituminosa ardesiata (20-21/07/2020)

Il primo test della campagna sperimentale è stato effettuato su una copertura piana di un edificio residenziale, sito in Via Feltrinelli a Milano, con finitura in membrana bituminosa ardesiata (Figura 11). Le misure sono state svolte dalle 12:00 alle 19:30 durante il giorno 20/07/2020 e dalle 9:00 alle 15:40 durante il giorno 21/07/2020. La frequenza di registrazione dei dati per questa prova sperimentale è stata di 10 minuti poiché la temperatura dell'aria, l'umidità relativa e la velocità del vento sono state misurate tramite una centralina climatica già presente e installata a livello della copertura a pochi metri dai tre radiometri e dal globotermometro nero.



Figura 11. Misure effettuate su una copertura piana con finitura in membrana bituminosa ardesiata

La Figura 12 e la Figura 13 riportano i risultati del calcolo della T_{mr} e l'andamento della temperatura dell'aria durante i due giorni di misurazioni. L'andamento della temperatura dell'aria è mostrato con una linea azzurra, quello della T_{mr} calcolata attraverso il globotermometro nero con una linea arancione e quello della T_{mr} calcolata attraverso i radiometri netti in grigio. Dalle due figure si può notare che il globotermometro nero tende a sovrastimare la T_{mr} rispetto al valore calcolato tramite i radiometri netti. Durante il primo giorno di misurazioni, si è rilevata una differenza tra le due T_{mr} tra 0,7 °C (raggiunta alle 19:30) e 24,15 °C (raggiunta alle 14:40), mentre la T_{mr} media calcolata tramite il globotermometro nero assume un valore di 75,9 °C e quella calcolata tramite i radiometri netti un valore medio di 60,2 °C. Durante il secondo giorno di misurazioni, il 21/07/2020, la differenza tra la T_{mr} calcolata tramite il globotermometro nero e quella calcolata tramite i radiometri netti varia tra -6,6 °C e 22,7 °C. Mediamente le due temperature hanno assunto valori pari a 67,6 °C per il globo nero e 58,6 °C per il radiometro netto. Osservando le due figure, si può notare che la differenza tra le due temperature aumenta nelle ore in cui l'altezza solare è massima e diminuisce quando l'altezza solare è meno elevata. Nelle ore serali e nelle prime ore del mattino la differenza tra le due T_{mr} è infatti minima e durante le prime ore del mattino il globotermometro tende a sottostimare la T_{mr} rispetto a quella calcolata con i radiometri netti.

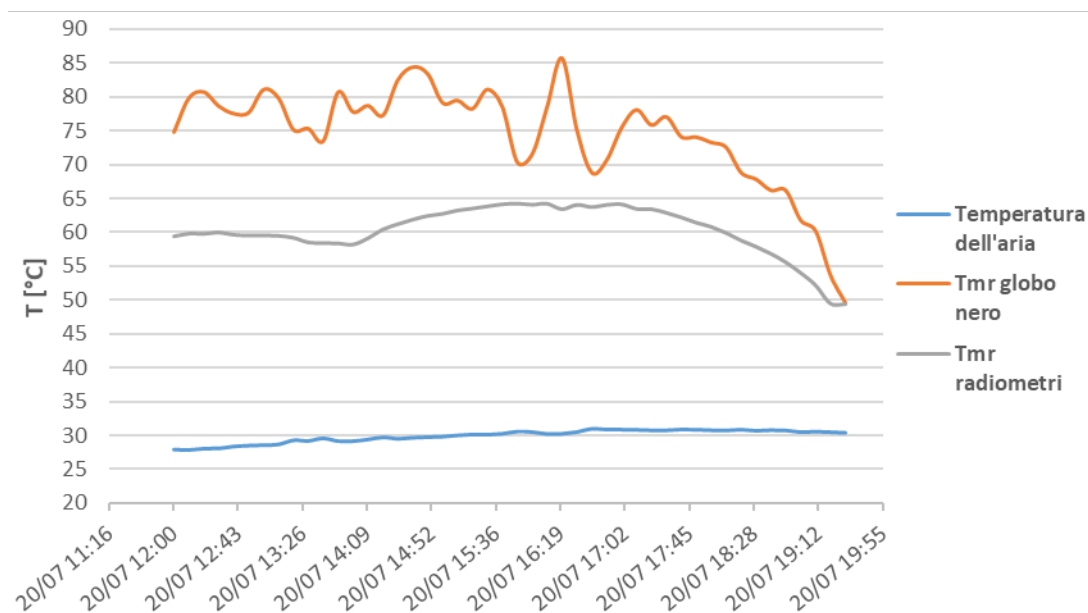


Figura 12. T_{mr} misurata attraverso il globotermometro nero e i tre radiometri netti in contrasto con la temperatura dell'aria misurata attraverso il sensore All-in-one. Giorno 20/07/2020

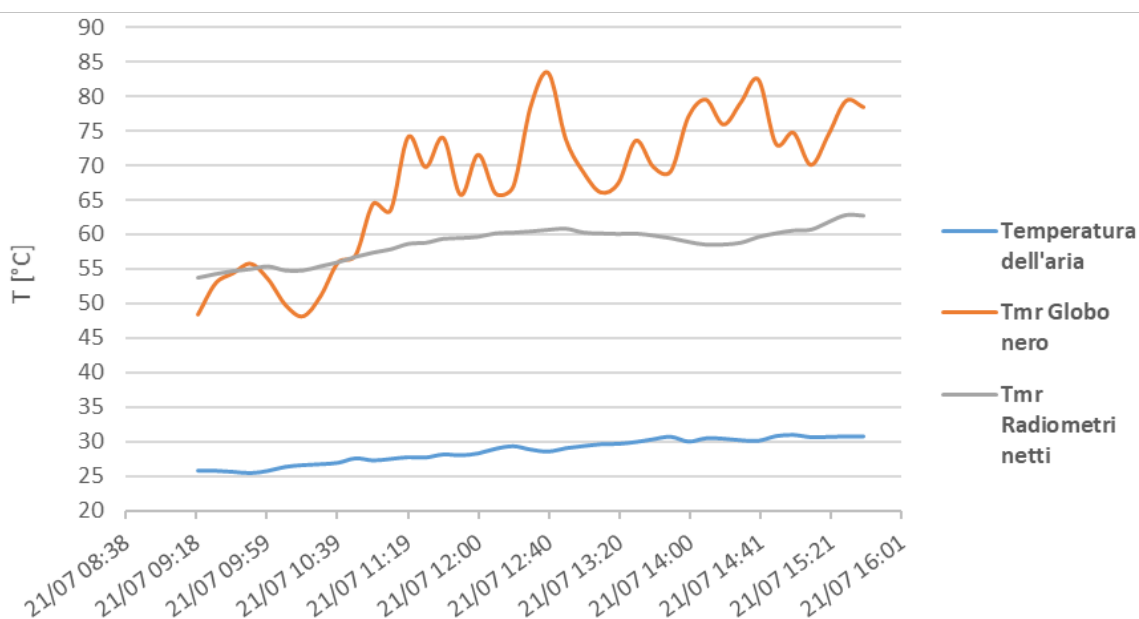


Figura 13. T_{mr} misurata attraverso il globotermometro nero e i tre radiometri netti in contrasto con la temperatura dell'aria misurata attraverso il sensore All-in-one. Giorno 21/07/2020

Lo stesso confronto è stato fatto anche in termini di UTCI nella Figura 14 e nella Figura 15. L'andamento dell'indice UTCI calcolato considerando i dati misurati dal globotermometro nero (in arancione) e quello calcolato considerando i dati misurati dai radiometri netti (in grigio) ricalcano lo stesso andamento della T_{mr} . Durante il primo giorno di misurazioni (20/07) i due indici UTCI assumono valori più simili nelle ore serali, e ricadono all'interno della stessa categoria di stress termico (Stress termico forte, $32 \leq \text{UTCI} < 38^\circ\text{C}$) in modo continuativo solo dalle 19:00 circa in poi. Nel resto della giornata il globo nero indica uno stress termico molto forte e i radiometri uno stress termico forte. Il valore medio dell'UTCI calcolato tramite il globotermometro nero assume un valore pari a $40,7^\circ\text{C}$ mentre se calcolato tramite i radiometri netti assume un valore di $36,8^\circ\text{C}$. La differenza assoluta tra i due UTCI calcolati varia da $0,2^\circ\text{C}$ a $6,0^\circ\text{C}$. Durante il secondo giorno di misurazioni, gli indici ricadono all'interno della stessa categoria di stress (Stress termico forte, $32 \leq \text{UTCI} < 38^\circ\text{C}$) solo nelle prime ore del mattino, fino alle 11:15 circa. In questo caso, l'UTCI medio calcolato a partire dai dati registrati

tramite il globotermometro nero è pari a 38,3 °C e quello calcolato tramite i radiometri è pari a 36,0 °C. La differenza assoluta tra i due indici calcolati tramite il globotermometro nero e i radiometri varia tra -1,7 °C e 5,7 °C. Si può inoltre notare che le risposte “istantanee” degli strumenti sono spesso in contro tendenza, quando lo stress termico cresce per il globo nero, spesso cala per i radiometri. Il trend giornaliero è tuttavia simile.

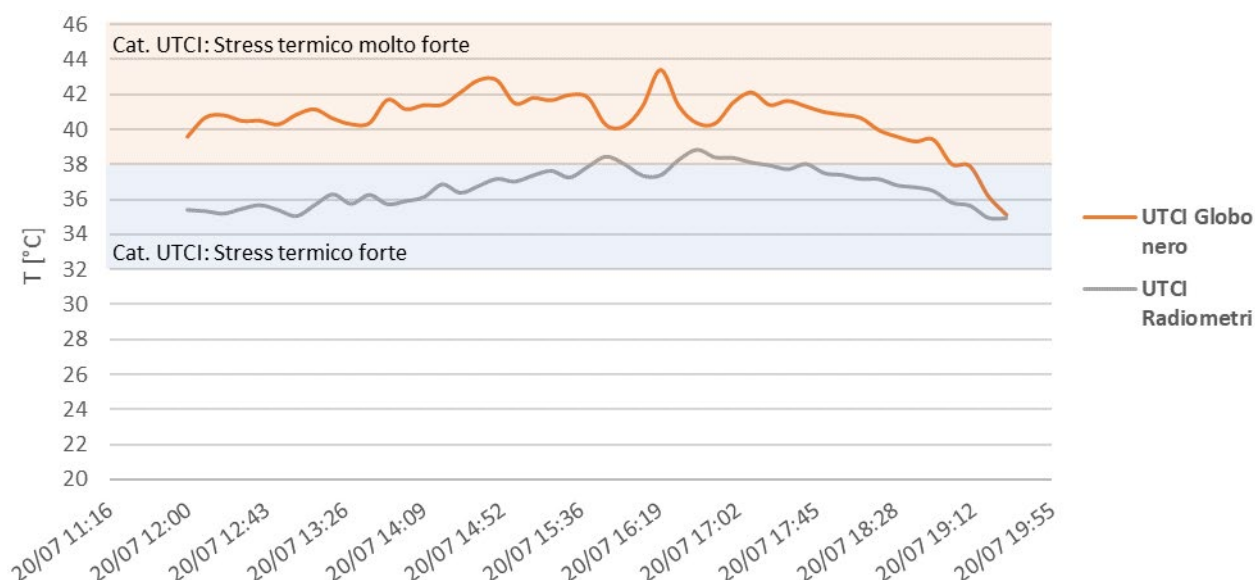


Figura 14. UTCI valutato tramite misure con globotermometro nero e con radiometri netti. Giorno 20/07/2020

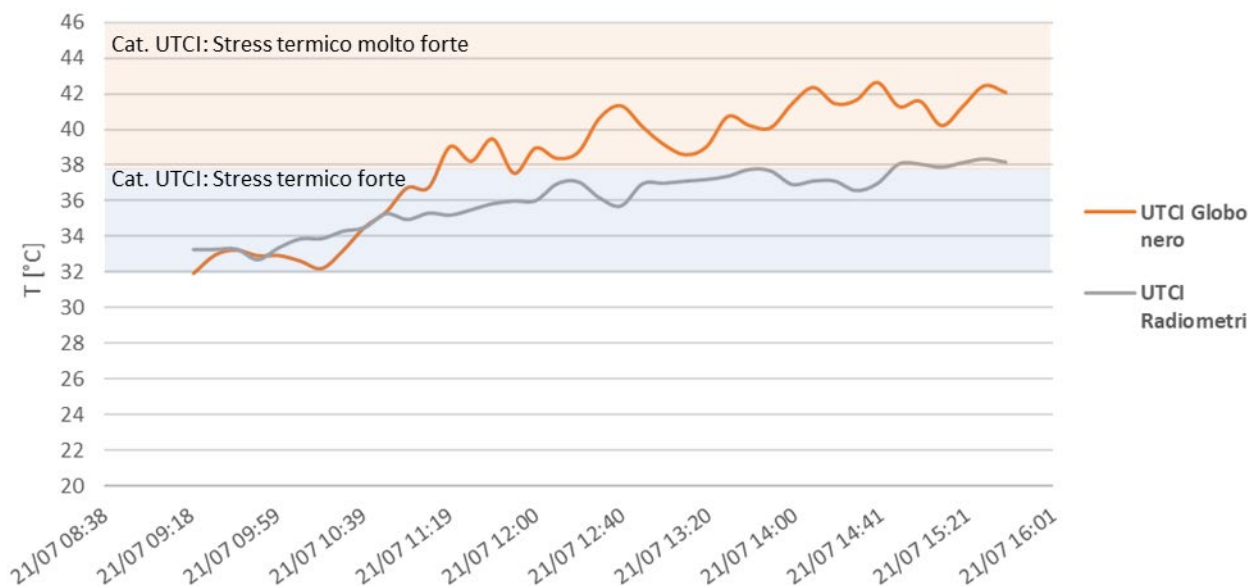


Figura 15. UTCI valutato tramite misure con globotermometro nero e con radiometri netti. Giorno 21/07/2020

6.2 Parete verticale con finitura in intonaco e pittura bianca (23/07/2020)

Il 23/07/2020 sono state ripetute le prove di misura del microclima esterno in prossimità di una parete verticale con finitura esterna in intonaco e pittura chiara (bianca). La parete si trova nel quartiere Bovisa di Milano, Via Lambruschini; le misure sono state effettuate dalle 13:00 alle 16:30. Anche la superficie orizzontale di pavimento è caratterizzata da colore chiaro, essendo realizzata in cemento spazzolato per esterni. La Figura 16 mostra la configurazione di misura della strumentazione sperimentale adottata e le superfici orizzontali e verticali di involucro circostanti il punto di misura. I dati sono stati registrati ogni minuto.

La T_{mr} , e di conseguenza l'UTCI, sono stati valutati considerando solo le misurazioni effettuate con il globotermometro nero e i tre radiometri netti, poiché il globotermometro grigio non era ancora stato consegnato.



Figura 16. Misure effettuate in prossimità di una parete verticale con finitura in intonaco e pittura bianca

La Figura 17 riporta l'andamento della T_{mr} calcolata per il globotermometro nero (linea arancione) e per i radiometri netti (linea grigia). Come visto precedentemente, il globotermometro tende a sovrastimare la T_{mr} rispetto a quella calcolata con dati rilevati dai radiometri netti, la T_{mr} media calcolata tramite il globotermometro nero è pari a 80,2 °C e quella calcolata tramite i radiometri netti è pari a 65,4 °C. La differenza tra le due temperature varia da -4,7 °C alle 16:20 a 37,7 °C alle 13:50 e diminuisce a partire dalle 15:50 circa, quando, a causa dell'ombreggiamento derivante dalla parete verticale, la strumentazione non è più stata esposta alla radiazione solare diretta. È interessante notare come la T_{mr} calcolata attraverso le misurazioni con il globotermometro nero risenta fortemente dei repentini cambiamenti delle altre variabili meteorologiche, questo è evidenziato dal suo andamento poco stabile rispetto a quello calcolato con i radiometri netti.

Il confronto appena descritto è stato fatto anche in termini di UTCI (Figura 18), il valore medio dell'indice calcolato attraverso il globotermometro nero è pari a 44,7 °C, mentre quello calcolato con i radiometri netti è pari a 40,9 °C. Per buona parte della misura, gli UTCI calcolati con il globotermometro nero e con i radiometri netti ricadono all'interno della stessa categoria di stress termico, ma l'UTCI calcolato con il globotermometro raggiunge spesso valori (≥ 46 °C) appartenenti alla categoria "stress termico estremo". Infine, verso le 15:50, a causa dell'ombreggiamento, i due indici ricadono entrambi all'interno della categoria di stress termico forte, nel range tra 32 °C e 38 °C. In termini assoluti, la differenza tra i due indici calcolati varia da -1,2 °C a 10,0 °C.

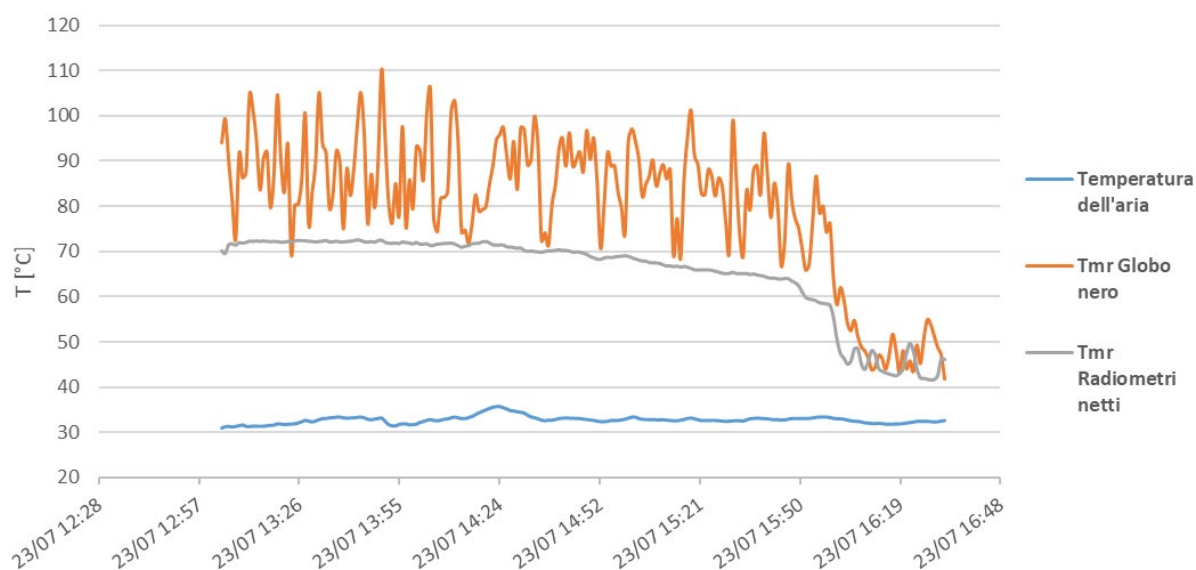


Figura 17. T_{mr} misurata attraverso il globotermometro nero e i tre radiometri in contrasto con la temperatura dell'aria misurata attraverso il sensore All-in-one. Giorno 23/07/2020

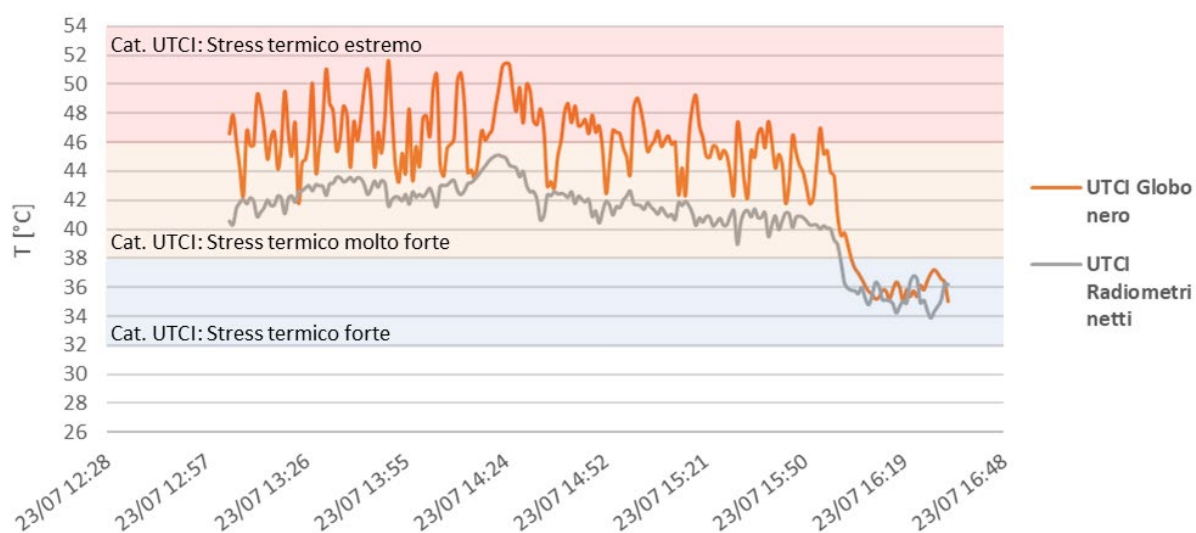


Figura 18. UTCI valutato tramite misure con globotermometro nero e con radiometri netti. Giorno 23/07/2020

6.3 Parete verticale con finitura in lastre di gres porcellanato (27/07/2020 e 18/09/2020)

Il calcolo degli indici utili alla valutazione del microclima esterno in prossimità di una parete con finitura in lastre di gres porcellanato è stato ripetuto due volte: a fine luglio (28/07/2020) e successivamente a metà settembre (18/09/2020), al fine di testare le prestazioni di involucro anche con il globotermometro grigio. La parete analizzata è situata a Milano nel quartiere Bovisa, in Via Lambruschini, in prossimità di un edificio del Politecnico di Milano. Le misure del 27/07/2020 sono state effettuate dalle 12:00 alle 17:00 circa e quelle del 18/09 dalle 11:30 alle 17:20 circa. La Figura 19 rappresenta le superfici di involucro orizzontale e verticale in prossimità delle quali sono state effettuate le misurazioni. La superficie di involucro verticale è caratterizzata da pannelli di gres porcellanato grigio scuro e quella di involucro orizzontale da calcestruzzo levigato.



Figura 19. Misure effettuate in prossimità di una parete verticale con lastre di gres porcellanato

La Figura 20 riporta in arancione l'andamento della T_{mr} calcolata con il globotermometro nero e in grigio quella calcolata con i radiometri netti. I risultati si riferiscono alla giornata di prova di fine luglio 2020 durante la quale la temperatura dell'aria si è mantenuta sempre sopra i 30 °C, ma si sono registrati frequenti episodi di nuvolosità. Tali episodi hanno influenzato l'andamento della T_{mr} calcolata sia da dati rilevati con il globotermometro che con i radiometri. Durante gli episodi di nuvolosità le due temperature assumono valori molto simili per poi discostarsi maggiormente nei momenti di cielo sereno. Mediamente, la T_{mr} calcolata da dati rilevati con il globotermometro è pari a 71,1 °C, mentre quella calcolata da dati rilevati con i radiometri netti è pari a 64,2 °C. La differenza tra le T_{mr} calcolate con i diversi sensori varia da -23,1 °C a 38,1 °C ed è dovuta, in parte, al diverso tempo di risposta dei sensori. In generale, la risposta del globotermometro nero è sempre più lenta rispetto a quella dei radiometri netti.

Lo stesso andamento può essere apprezzato in termini di UTCI come mostrato nella figura successiva. Tuttavia, i due indici ricadono per la maggior parte del tempo all'interno della stessa categoria di stress termico (stress termico molto forte, $38 \leq \text{UTCI} < 46$ °C), e solo in alcuni momenti l'UTCI relativo al globotermometro nero raggiunge la categoria di stress più estrema (≥ 46 °C). Il valore medio dell'UTCI calcolato con il globotermometro nero è pari a 42,6 °C, mentre quello calcolato con i radiometri netti è pari a 40,9 °C. In termini assoluti, la differenza tra i due indici varia da -6,0 °C a 9,5 °C.

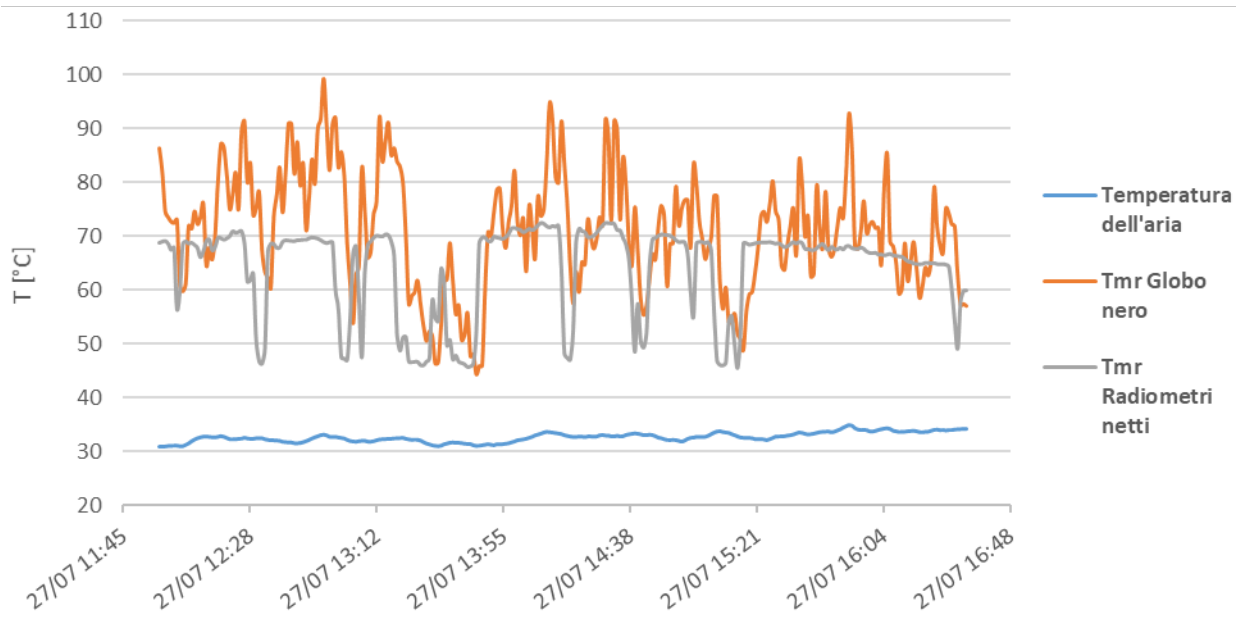


Figura 20. T_{mr} misurata attraverso il globotermometro nero e i tre radiometri in contrasto con la temperatura dell'aria misurata attraverso il sensore All-in-one. Giorno 27/07/2020

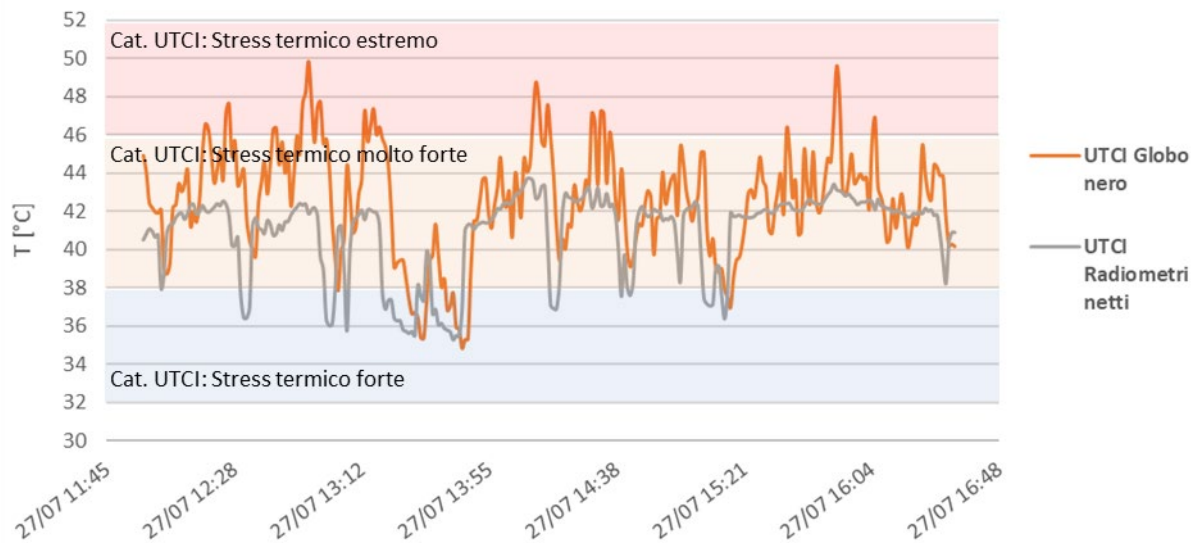


Figura 21. UTCI valutato tramite misure con globotermometro nero e con radiometri netti. Giorno 27/07/2020

Durante la seconda giornata di misurazioni in prossimità della stessa parete è stato possibile calcolare la T_{mr} da dati rilevati anche con il globotermometro grigio. La Figura 22 ne mostra i risultati. Rispetto al radiometro netto, il globotermometro grigio tende a sottostimare la T_{mr} , mentre il globotermometro nero, come già visto in precedenza, tende a sovrastimarla soprattutto nelle ore del giorno in cui l'altezza solare è massima. La T_{mr} media calcolata con il globotermometro nero è pari a 66,7 °C, quella calcolata con il globotermometro grigio è pari a 57,1 °C e quella calcolata con i radiometri netti è pari a 63,4 °C. La differenza tra le T_{mr} calcolate attraverso dati rilevati dal globotermometro nero e i radiometri netti varia tra -11,6 °C e 23,0 °C, mentre quella tra radiometri e globotermometro grigio varia tra -11,5 °C e 20,9 °C. In ogni caso, le differenze tra le temperature si attenuano dalle 16:00 circa in poi e nella parte terminale della prova, quando anche il globotermometro nero tende a sottostimare la T_{mr} rispetto a quella calcolata con i radiometri netti. Lo stesso andamento si può vedere in termini di UTCI nella Figura 23, l'indice relativo al globotermometro nero e ai radiometri netti ricade sempre nella stessa categoria di stress (stress termico molto forte, $38 \leq \text{UTCI} < 46$ °C), mentre quello relativo al globotermometro grigio ricade spesso nella categoria di stress inferiore

(stress termico forte, $32 \leq \text{UTCI} < 38 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Il valore medio dell'UTCI calcolato con il globotermometro nero, grigio e radiometri netti è pari rispettivamente a $40,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $37,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e $39,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$. La differenza tra UTCI calcolato con il globotermometro nero e i radiometri netti varia tra $-2,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e $5,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$, mentre quella tra UTCI calcolato con i radiometri netti e il globotermometro grigio varia tra $-2,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e $5,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

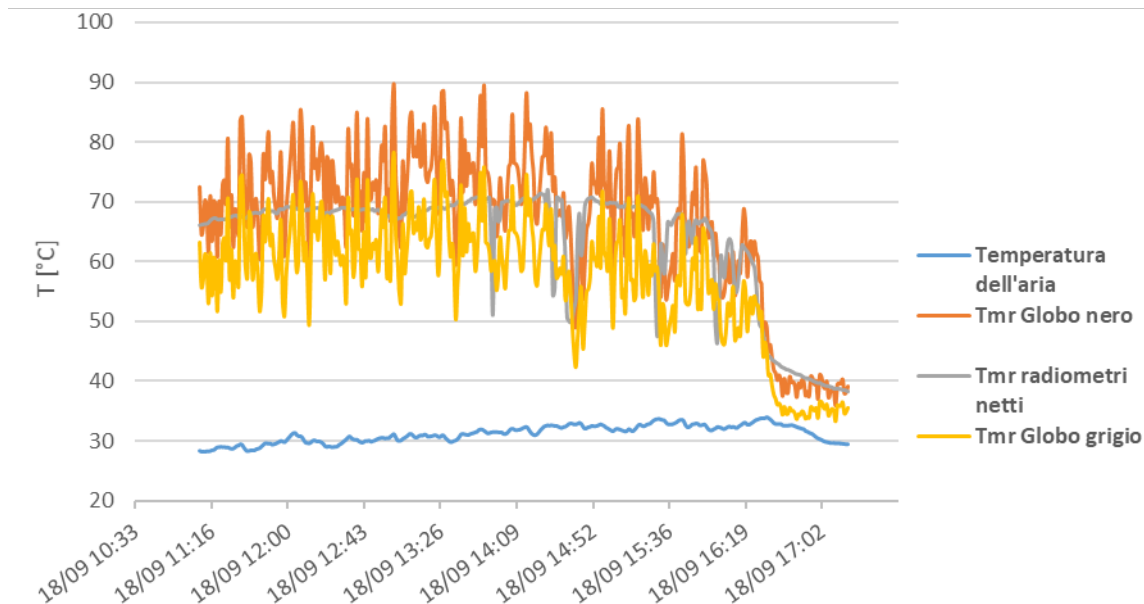


Figura 22. T_{mr} attraverso il globotermometro nero, grigio e i tre radiometri in contrasto con la temperatura dell'aria misurata attraverso il sensore All-in-one. Giorno 18/09/2020

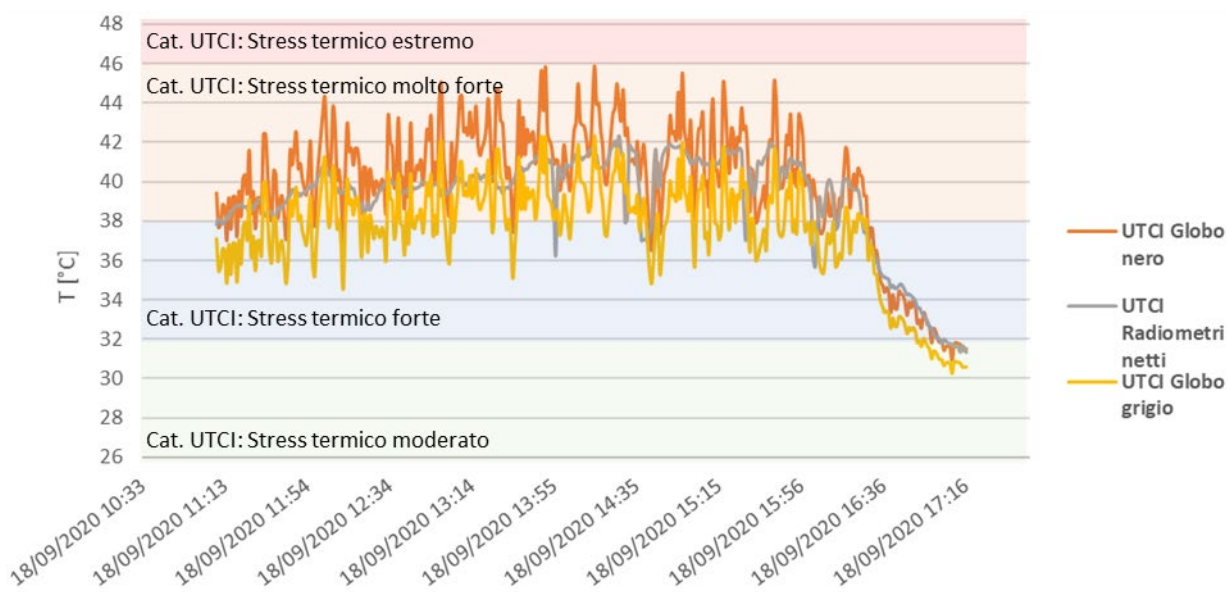


Figura 23. UTCI valutato tramite misure con globotermometro nero, grigio e con radiometri netti. Giorno 18/09/2020

6.4 Parco Cascina Merlata (28/07/2020)

La valutazione del microclima urbano in termini di T_{mr} e UTCI è stata effettuata anche in campo aperto e, in particolare, in un parco verde situato nella zona di Cascina Merlata a Milano. La prova è stata effettuata a fine luglio, il 28/07 dalle 11:30 alle 16:30 circa.

La Figura 24 rappresenta l'ambiente scelto per la prova sperimentale e la configurazione di montaggio della strumentazione, la valutazione è stata fatta con il globotermometro nero e i radiometri netti.



Figura 24. Misure effettuate nel parco di Cascina Merlata

La Figura 25 riporta i risultati del calcolo della T_{mr} e la Figura 26 quelli del calcolo dell'UTCI. La T_{mr} media calcolata con il globotermometro nero è pari a 77,4 °C, mentre quella calcolata con i radiometri netti è pari a 60,6 °C. Durante tutta la prova, la T_{mr} calcolata con il globotermometro nero risulta infatti fortemente sovrastimata, anche di circa 30 °C, rispetto a quella calcolata con i radiometri netti. In particolare, la differenza tra le T_{mr} calcolate attraverso dati rilevati dal globotermometro nero e i radiometri netti varia tra -7,0 °C e 37,6 °C. Tuttavia, in caso di assenza e ostruzioni, e quindi in campo libero, i flussi radiativi provenienti dal suolo e dal cielo potrebbero avere una maggiore importanza e quindi non essere correttamente valutati dai fattori di vista adottati che assimilano il corpo umano ad un parallelepipedo (fattori di vista pari a 0,06 sia per la direzione verso l'alto che verso il basso). Utilizzando i fattori che assimilano il corpo umano a una sfera, la T_{mr} calcolata con i radiometri risulterebbe più prossima a quella calcolata con il globotermometro nero. In termini di UTCI, l'indice calcolato sia con il globotermometro che con i tre radiometri netti ricade per quasi l'intera prova all'interno della stessa categoria di stress termico (stress termico molto forte, $38 \leq UTCI < 46$ °C) e soltanto in pochi momenti l'UTCI calcolato con i radiometri netti ricade nella categoria inferiore. Il valore medio dell'UTCI calcolato con il globotermometro nero e con i tre radiometri netti è pari rispettivamente a 42,9 °C e 38,8 °C, mentre la differenza tra UTCI calcolato con il globotermometro nero e i radiometri netti varia tra -1,7 °C e 9,3 °C.

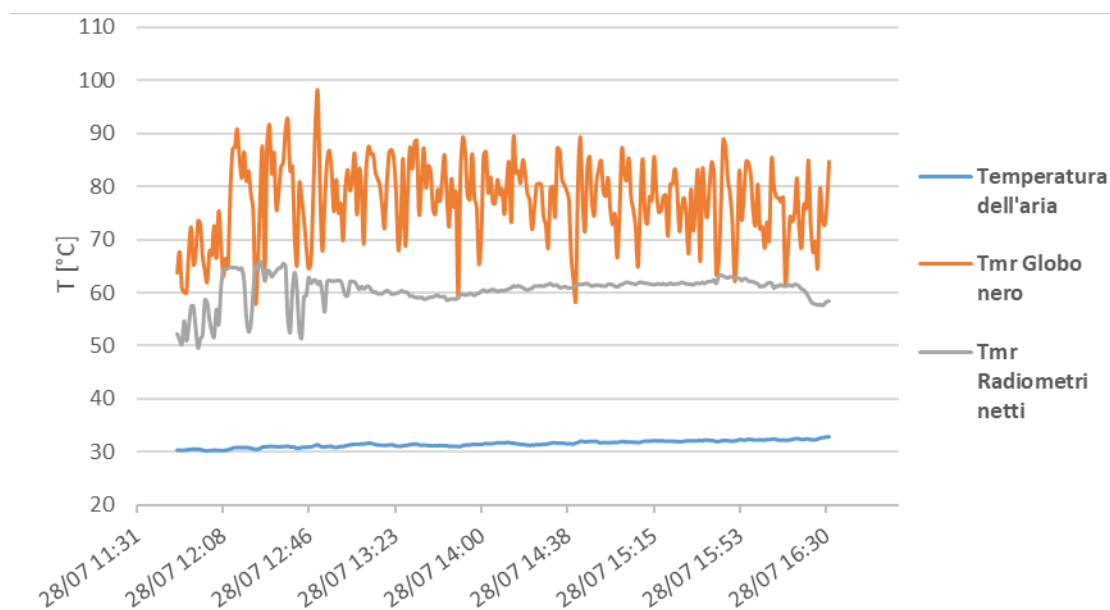


Figura 25. T_{mr} misurata attraverso il globotermometro nero e i tre radiometri in contrasto con la temperatura dell'aria misurata attraverso il sensore All-in-one. Giorno 28/07/2020

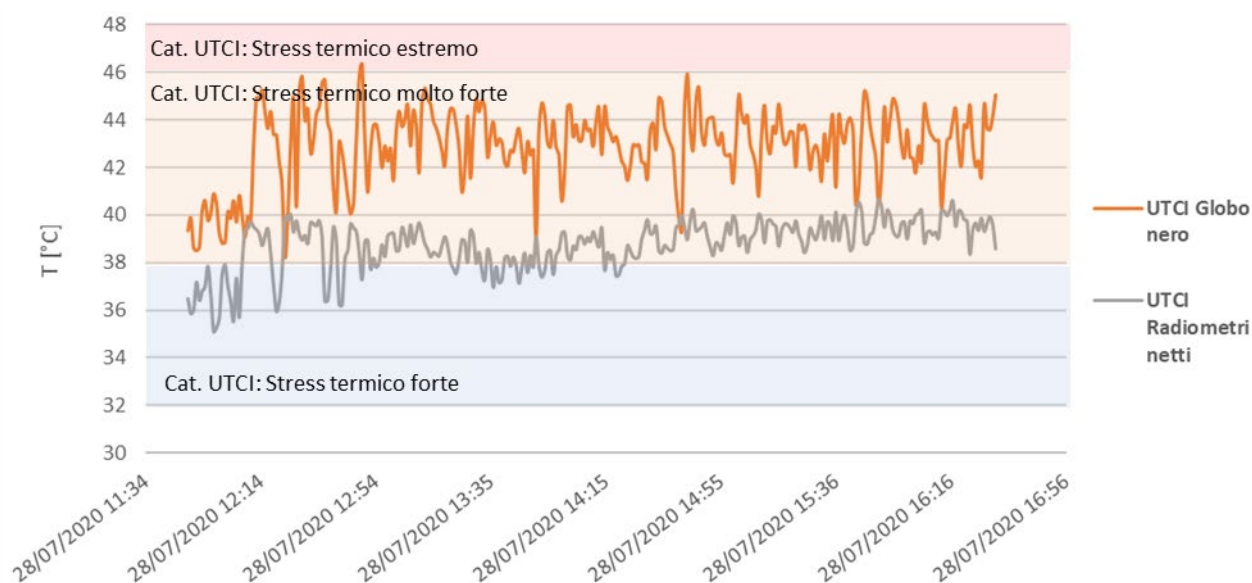


Figura 26. UTCI valutato tramite misure con globotermometro nero e con radiometri netti. Giorno 28/07/2020

6.5 Tetto verde (26-27/08/2020)

Il 26 e il 27/08 sono state effettuate due prove di valutazione del microclima urbano su una copertura piana verde caratterizzata da sedum situata a Milano, presso il Dipartimento ABC Politecnico. Il globotermometro grigio è stato montato durante la seconda giornata di prove, pertanto T_{mr} e UTCI sono stati calcolati solo per la seconda giornata di prove.

La Figura 27 mostra la configurazione della strumentazione e le caratteristiche dell'ambiente circostante il punto di misura.

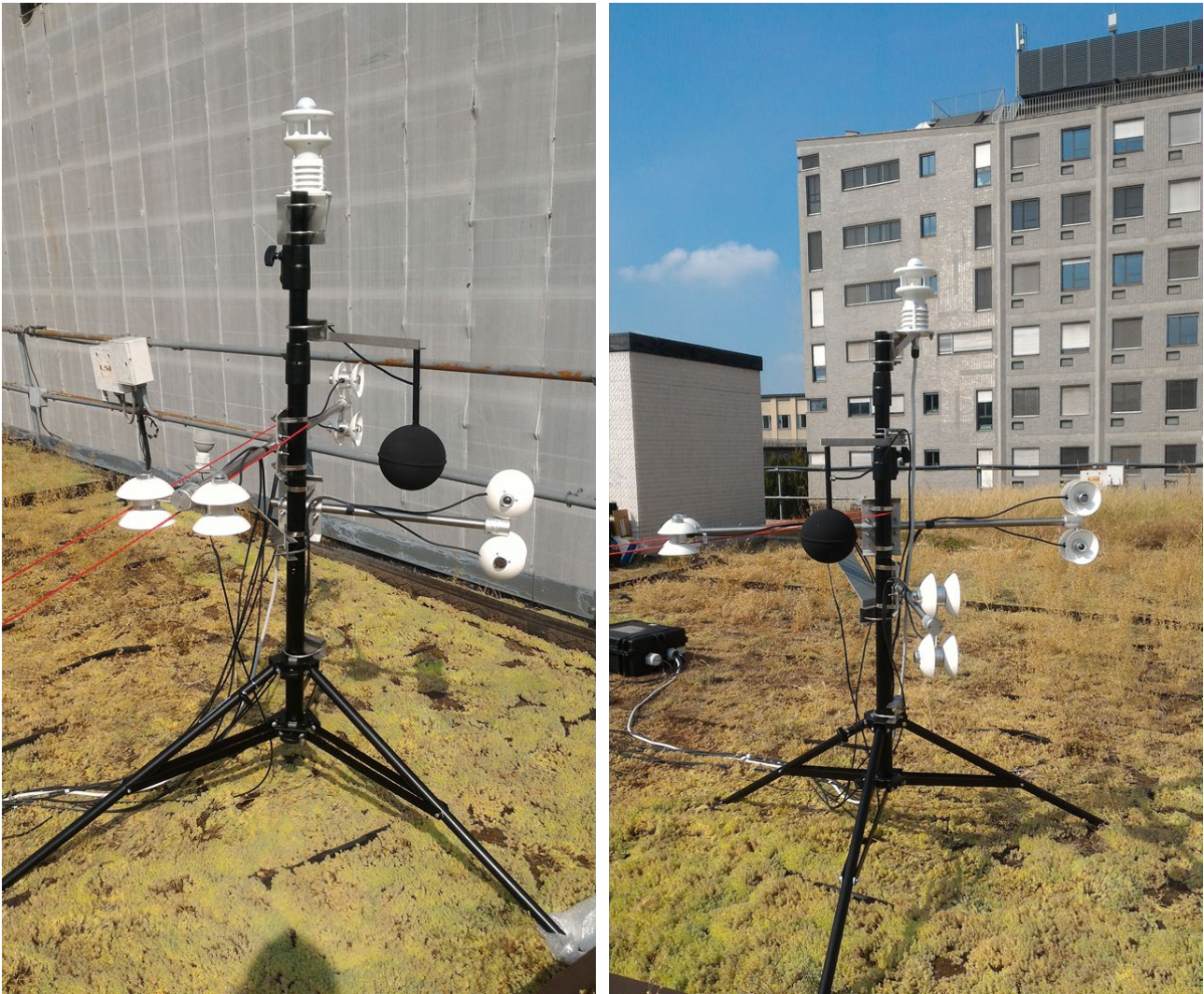


Figura 27. Misure effettuate nel tetto verde del Dipartimento ABC del Politecnico di Milano

Il 26/08 le prove sono state effettuate dalle 15:00 fino a tarda sera (21:00 circa). La Figura 28 riporta l'andamento della T_{mr} calcolata con i radiometri netti e con il globotermometro nero per la prima giornata di misure. In questo caso, il globotermometro nero sottostima, solo per certi intervalli di tempo, la T_{mr} rispetto ai radiometri netti. La T_{mr} media calcolata con il globotermometro nero è infatti pari a 41,0 °C, mentre quella calcolata con i radiometri netti è pari a 41,6 °C. Nonostante le T_{mr} calcolate attraverso dati rilevati dal globotermometro nero e i radiometri netti vari tra -25,9 °C e 22,2 °C, gli andamenti delle due temperature risultano essere molto simili per l'intera durata della prova sperimentale, e, in particolare, dalle 17:15 circa in poi quando l'altezza solare inizia a calare. Dalle 18:00 in poi la strumentazione si trova in una situazione di ombreggiamento.

La Figura 29 riporta il confronto tra l'UTCI calcolato con i radiometri netti e con il globotermometro nero. L'indice calcolato con i due sensori ricade sempre nella stessa categoria di stress termico per tutta la durata della prova e tocca, a seconda delle ore della giornata, tre diverse categorie di stress termico: molto forte, forte e moderato. Il valore medio dell'UTCI calcolato con il globotermometro nero e con i tre radiometri netti è praticamente uguale e pari rispettivamente a 33,4 °C e 33,5 °C, mentre la differenza tra UTCI calcolato con il globotermometro nero e i radiometri netti varia tra -6,5 °C e 5,5 °C.

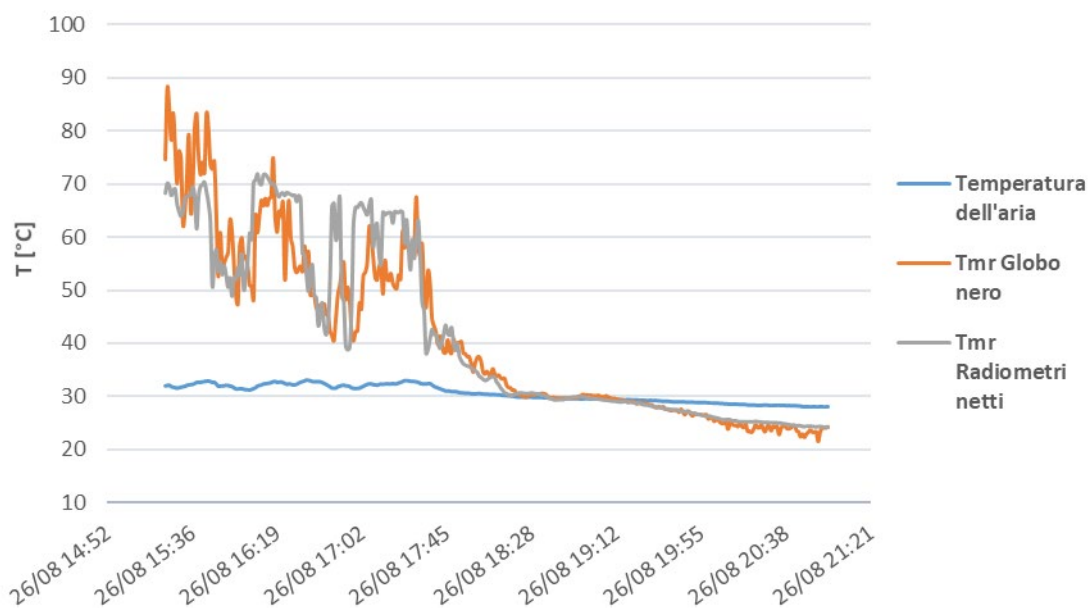


Figura 28. T_{mr} misurata attraverso il globotermometro nero e i tre radiometri in contrasto con la temperatura dell'aria misurata attraverso il sensore All-in-one. Giorno 26/08/2020

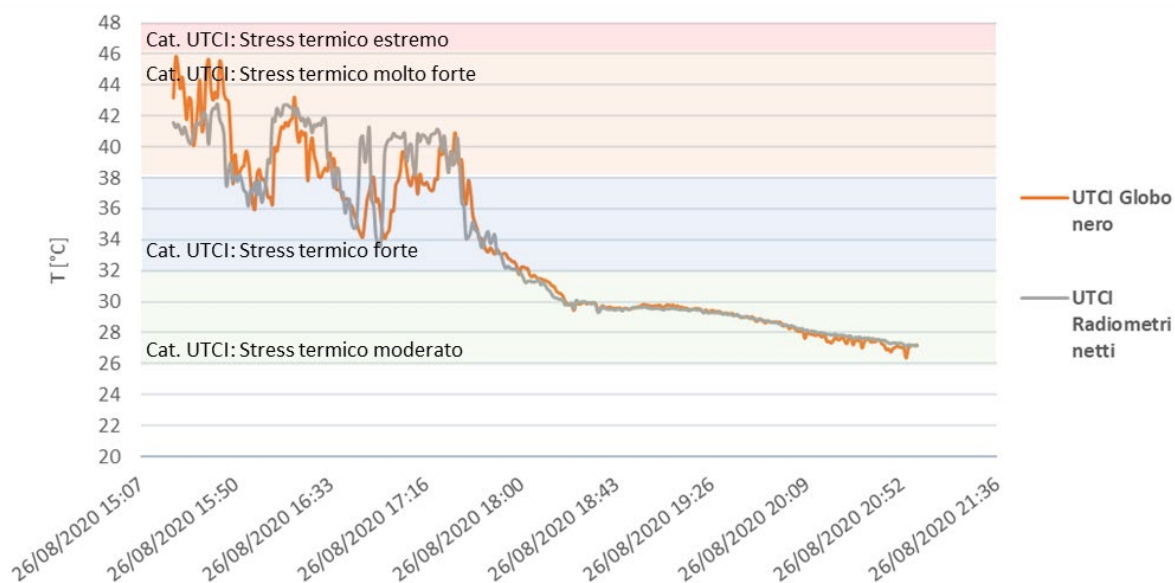


Figura 29. UTCI valutato tramite misure con globotermometro nero e con radiometri netti. Giorno 26/08/2020

Il 27/08 le prove sono state effettuate dalle 08:00 fino alle 17:00 in modo da valutare gli indici utili a descrivere il microclima urbano anche nelle prime ore della giornata. Le temperature calcolate da dati rilevati con i due globi e con i radiometri netti risultano essere molto simili nella prima ora di monitoraggio e in caso di passeggeri eventi nuvolosi. La T_{mr} media calcolata con il globotermometro nero è pari a 63,6 °C, quella calcolata con il globotermometro grigio è pari a 54,1 °C e quella calcolata con i radiometri netti è pari a 55,0 °C. Il globotermometro nero sovrastima sempre la T_{mr} , mentre quello grigio inizialmente la sottostima e dalle 14:00 circa tende anch'esso a sovrastimarla, anche se in minor misura rispetto al globo nero. La differenza tra le T_{mr} calcolate attraverso dati rilevati dal globotermometro nero e i radiometri netti varia tra -18,1 °C e 38,0 °C, mentre quella tra radiometri e globotermometro grigio varia tra -24,7 °C e 21,0 °C.

Le stesse considerazioni possono essere fatte osservando la Figura 31, la quale riporta l'andamento dell'UTCI e le relative categorie di stress termico. Il valore medio dell'UTCI calcolato con il globotermometro nero, grigio e radiometri netti è pari rispettivamente a 38,5 °C, 36,1 °C e 36,3 °C. La differenza tra UTCI calcolato con il globotermometro nero e i radiometri netti varia tra -4,5 °C e 9,4 °C, mentre quella tra UTCI calcolato

con i radiometri netti e il globotermometro grigio varia tra -6,1 °C e 5,6 °C. Le categorie di stress termico all'interno delle quali l'UTCI ricade sono in questo caso: molto forte, forte e moderato.

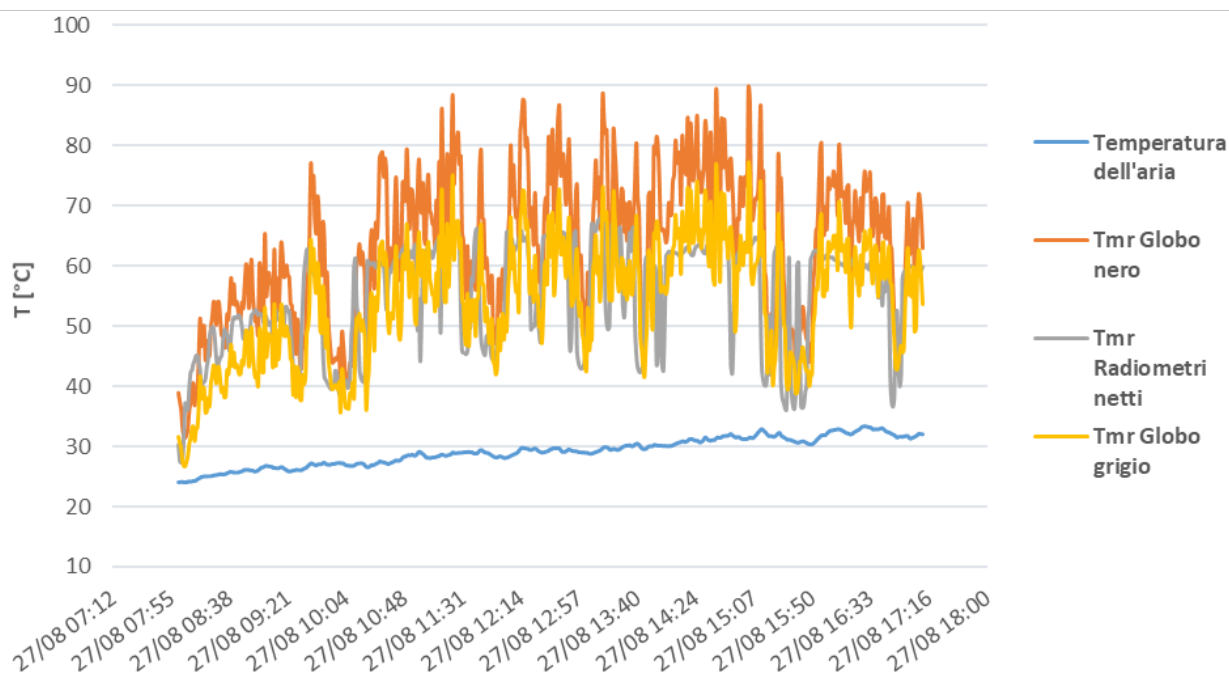


Figura 30. T_{mr} misurata attraverso il globotermometro nero, grigio e i tre radiometri in contrasto con la temperatura dell'aria misurata attraverso il sensore All-in-one. Giorno 27/08/2020

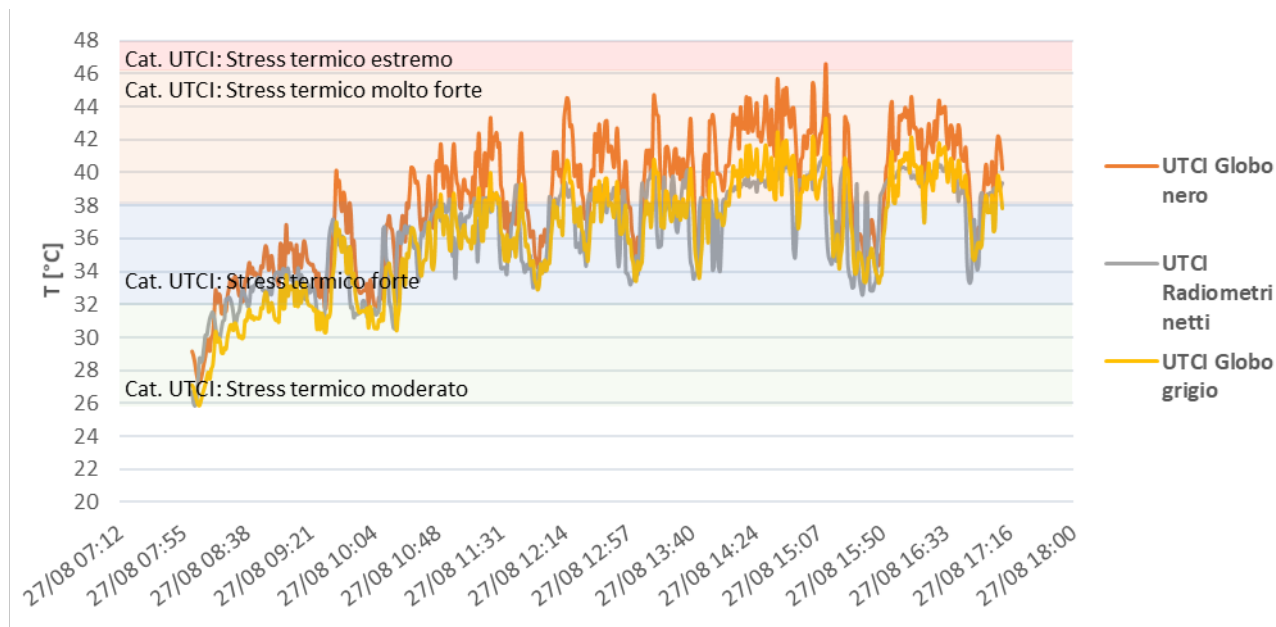


Figura 31. UTCI valutato tramite misure con globotermometro nero, grigio e con radiometri netti. Giorno 27/08/2020

6.6 Parete verticale con finitura in intonaco e pittura celeste (01/09/2020)

Il giorno 01/09/2020 sono state effettuate le prove di misura del microclima esterno in prossimità di una parete verticale con finitura esterna in intonaco, questa volta pitturata con una vernice celeste. La parete studiata si trova a Milano in un edificio residenziale nel complesso abitativo di Cascina Merlata. Le misure sono state effettuate dalle 11:30 alle 17:00. Come si può vedere dalla Figura 32, la superficie orizzontale di pavimento è caratterizzato da autobloccanti.



Figura 32. Misure effettuate in prossimità di una parete verticale con intonaco e pittura celeste. Giorno 01/09/2020

La Figura 33 e la Figura 34 riportano i risultati dei calcoli di T_{mr} e UTCI valutati con il globotermometro nero, con quello grigio e con i tre radiometri netti. Dalle 15:00 in poi la strumentazione si trova in una situazione di ombreggiamento, pertanto tutte le T_{mr} e gli indici UTCI assumono valori molto simili. In generale, il globotermometro nero tende a sovrastimare la T_{mr} , invece quello grigio a sottostimarla. Considerando l'intera prova sperimentale, la T_{mr} media calcolata con il globotermometro nero è pari a 59,8 °C, quella calcolata con il globotermometro grigio è pari a 49,3 °C e quella calcolata con i radiometri netti è pari a 54,4 °C. La differenza tra le T_{mr} calcolate attraverso dati rilevati dal globotermometro nero e i radiometri netti varia tra -9,4 °C e 25,0 °C, mentre quella tra radiometri e globotermometro grigio varia tra -10,8 °C e 20,8 °C. L'andamento delle T_{mr} calcolate con entrambi i globotermometri hanno un andamento poco stabile, infatti, come già visto in precedenza, si può notare come i due globotermometri risentano maggiormente dei cambi repentini dei parametri climatici rispetto ai radiometri netti.

In termini di UTCI questo si traduce in una sovrastima della categoria di stress termico per il caso del globotermometro nero, l'indice relativo al globotermometro nero ricade infatti spesso nella categoria di

stress termico superiore rispetto a quella indicata dall'UTCI calcolato tramite i radiometri netti e il globotermometro grigio. In termini generali, il valore medio dell'UTCI calcolato con il globotermometro nero, grigio e radiometri netti è pari rispettivamente a 35,0 °C, 32,4 °C e 33,7 °C. La differenza tra UTCI calcolato con il globotermometro nero e i radiometri netti varia tra -2,3 °C e 6,4 °C, mentre quella tra UTCI calcolato con i radiometri netti e il globotermometro grigio varia tra -2,7 °C e 5,2 °C.

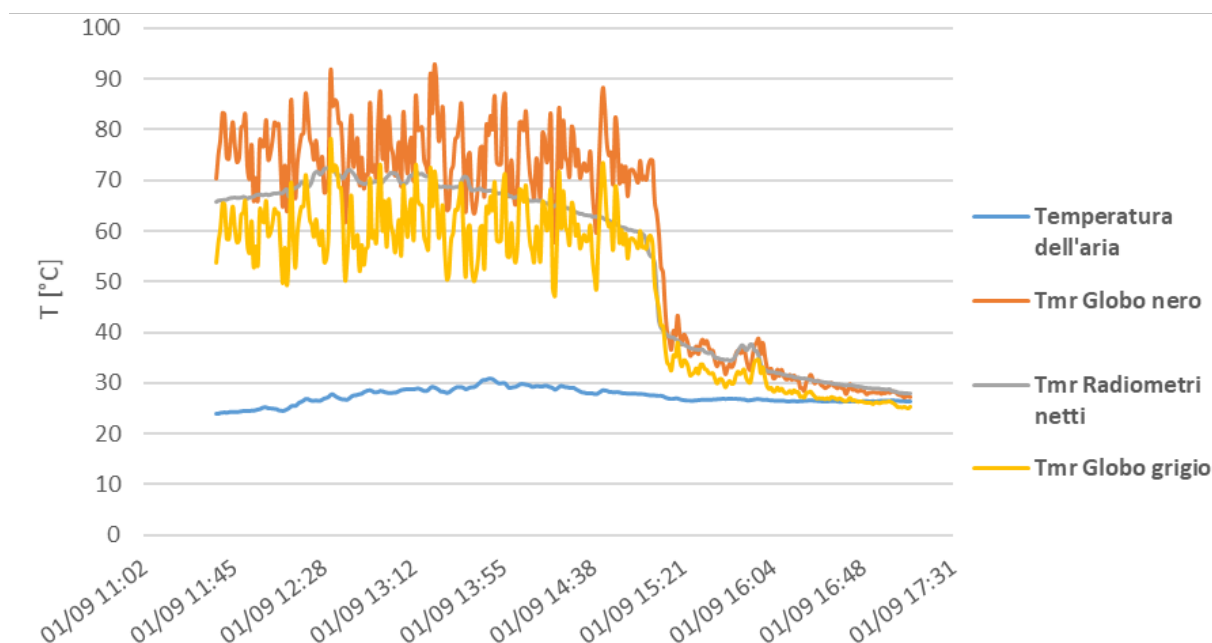


Figura 33. T_{mr} misurata attraverso il globotermometro nero, grigio e i tre radiometri in contrasto con la temperatura dell'aria misurata attraverso il sensore All-in-one. Giorno 01/09/2020

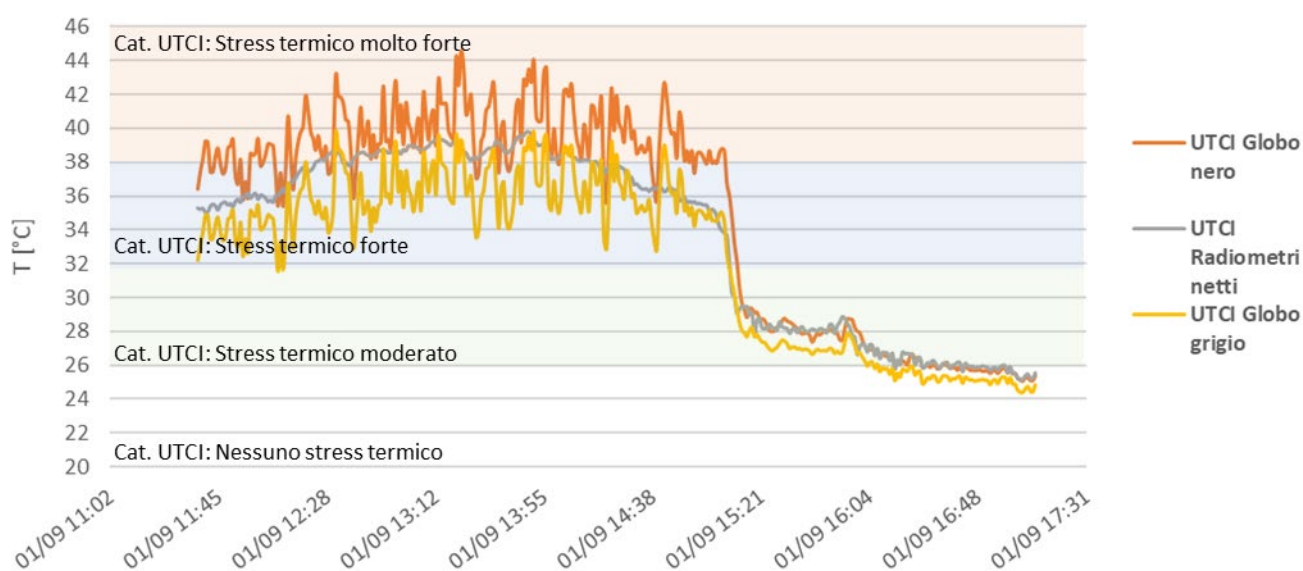


Figura 34. UTCI valutato tramite misure con globotermometro nero e con radiometri netti. Giorno 01/09/2020

6.7 Street canyon (09/09/2020)

La valutazione del microclima esterno in termini di T_{mr} e UTCI è stata effettuata anche per uno street canyon come in Figura 35. La strumentazione è stata posizionata tra due edifici del Politecnico di Milano in Via Lambruschini, la pavimentazione è in calcestruzzo chiaro battuto, la parete a sinistra della strumentazione è in gres porcellanato e a destra è presente una siepe. La strumentazione, essendo posizionata tra due edifici, è stata per la maggior parte del tempo in ombra.



Figura 35. Misure effettuate in uno street canyon. Giorno 09/09/2020.

La Figura 36 presenta l'andamento della T_{mr} relativa alle misurazioni effettuate con il globotermometro nero, con quello grigio e con i tre radiometri netti. La strumentazione è stata esposta alla radiazione diretta solo per pochi minuti durante la prova; verso le ore 16:30 si può chiaramente identificare il momento in cui la radiazione solare ha colpito la strumentazione per l'improvviso aumento della T_{mr} . Le T_{mr} calcolate con il globo grigio e il globo nero non differiscono significativamente da quella calcolata con i radiometri netti; il globo grigio tende, tuttavia, a sottostimare la temperatura e quello nero a sovrastimarla. Mediamente, la T_{mr} calcolata con il globotermometro nero è pari a 35,8 °C, quella calcolata con il globotermometro grigio è pari a 31,7 °C e quella calcolata con i radiometri netti è pari a 33,8 °C. In termini di variazione invece, la differenza tra le T_{mr} calcolate attraverso dati rilevati dal globotermometro nero e i radiometri netti varia tra -12,2 °C e 15,9 °C, mentre quella tra radiometri e globotermometro grigio varia tra -6,4 °C e 10,8 °C.

La Figura 37 presenta i risultati del calcolo dell'UTCI, per quasi tutta la durata della misurazione i tre indici ricadono all'interno della stessa categoria di stress termico (stress termico moderato, $36 \leq \text{UTCI} < 32$ °C). Nei minuti finali della prova, quando i sensori non sono più in una situazione di ombreggiamento, l'UTCI di tutti e tre i sensori ricade invece all'interno della categoria di stress immediatamente successiva, ovvero quella di

stress termico forte ($32 \leq \text{UTCI} < 38 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Mediamente il valore dell'UTCI calcolato con il globotermometro nero, grigio e radiometri netti è pari rispettivamente a $29,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $28,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e $28,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$. La differenza tra UTCI calcolato con il globotermometro nero e i radiometri netti varia tra $-3,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e $4,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, mentre quella tra UTCI calcolato con i radiometri netti e il globotermometro grigio varia tra $-1,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e $2,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

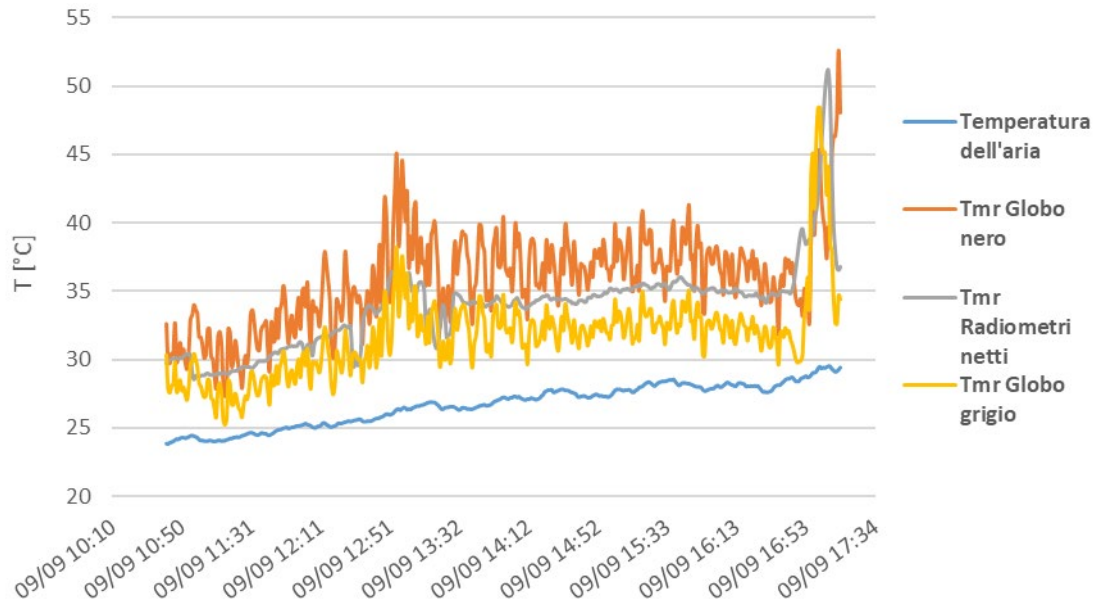


Figura 36. T_{mr} misurata attraverso il globotermometro nero, grigio e i tre radiometri in contrasto con la temperatura dell'aria misurata attraverso il sensore All-in-one. Giorno 09/09/2020

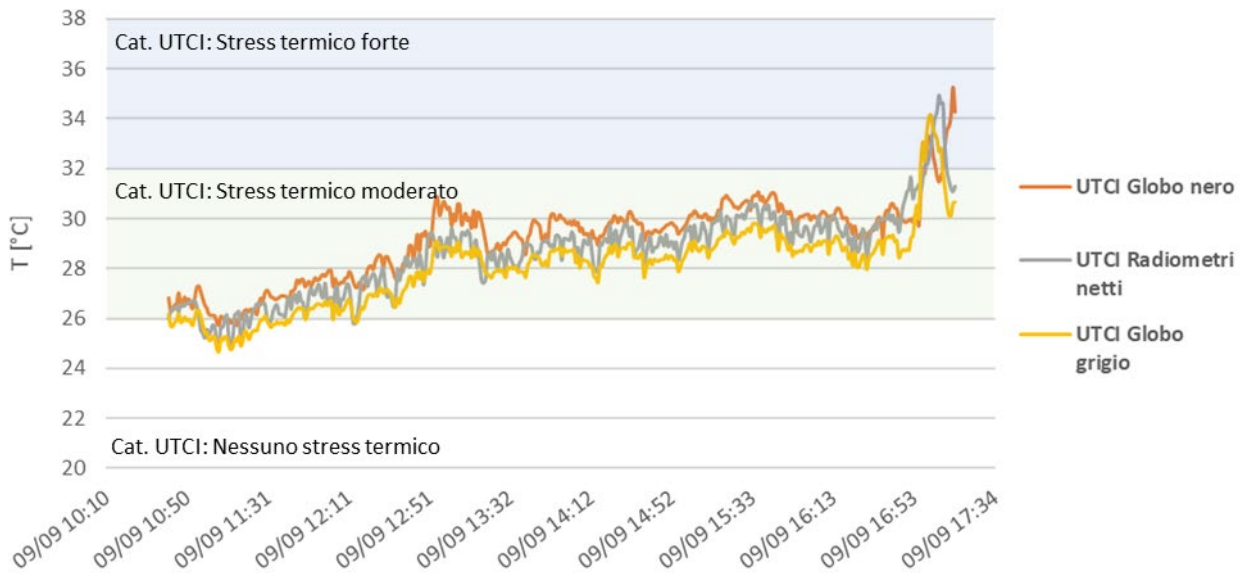


Figura 37. UTCI valutato tramite misure con globotermometro nero, grigio e con radiometri netti. Giorno 09/09/2020

6.8 Parete verde, Bovisa (17/09/2020)

Il 17/09 sono state effettuate misure del microclima esterno in prossimità di una parete verde, ricoperta da vite americana, a Milano, in Bovisa nelle adiacenze del Politecnico di Milano (Figura 38). La prova è stata effettuata dalle 11:00 alle 17:00 circa, dalle 13:30 la strumentazione si è trovata in una situazione di ombreggiamento.



Figura 38. Misure effettuate in prossimità di una parete verde. Giorno 17/09/2020.

La T_{mr} calcolata attraverso i dati misurati dai due globotermometri è riportata in Figura 39. Durante le ore di ombreggiamento essa assume valori molto prossimi alla temperatura dell'aria (in azzurro) e a quella valutata con i radiometri netti. L'andamento della T_{mr} calcolata attraverso il globotermometro nero segue l'andamento di quella calcolata con i tre radiometri, ma tra le 12:15 e le 13:15, in corrispondenza di un temporaneo episodio di nuvolosità, uno dei tre radiometri e il globo nero sono rimasti in ombra per qualche minuto. A questo è dovuto l'andamento opposto di questo globo rispetto al grigio. Dalle 14:00 in poi il cielo è rimasto sempre velato. In termini di T_{mr} media, quella calcolata con il globotermometro nero è pari a 41,1 °C, quella calcolata con il globotermometro grigio è pari a 36,9 °C e quella calcolata con i radiometri netti è pari a 39,0 °C. La differenza tra le T_{mr} calcolate attraverso dati rilevati dal globotermometro nero e i radiometri netti varia tra -11,0 °C e 25,6 °C, mentre quella tra radiometri e globotermometro grigio varia tra -19,9 °C e 12,7 °C.

La Figura 40 riporta i risultati dei calcoli dell'UTCI per il globotermometro nero, grigio e i radiometri netti, il suo andamento segue quello già descritto per la T_{mr} , il globotermometro nero, a causa della sovrastima della T_{mr} , registra valori di UTCI che ricadono nella categoria di stress termico "forte". In termini di UTCI, il suo valore medio calcolato con il globotermometro nero, grigio e radiometri netti è pari rispettivamente a 32,8 °C, 31,7 °C e 32,3 °C. La differenza tra UTCI calcolato con il globotermometro nero e i radiometri netti varia tra -

2,9 °C e 6,4 °C, mentre quella tra UTCI calcolato con i radiometri netti e il globotermometro grigio varia tra -5,0 °C e 3,3 °C

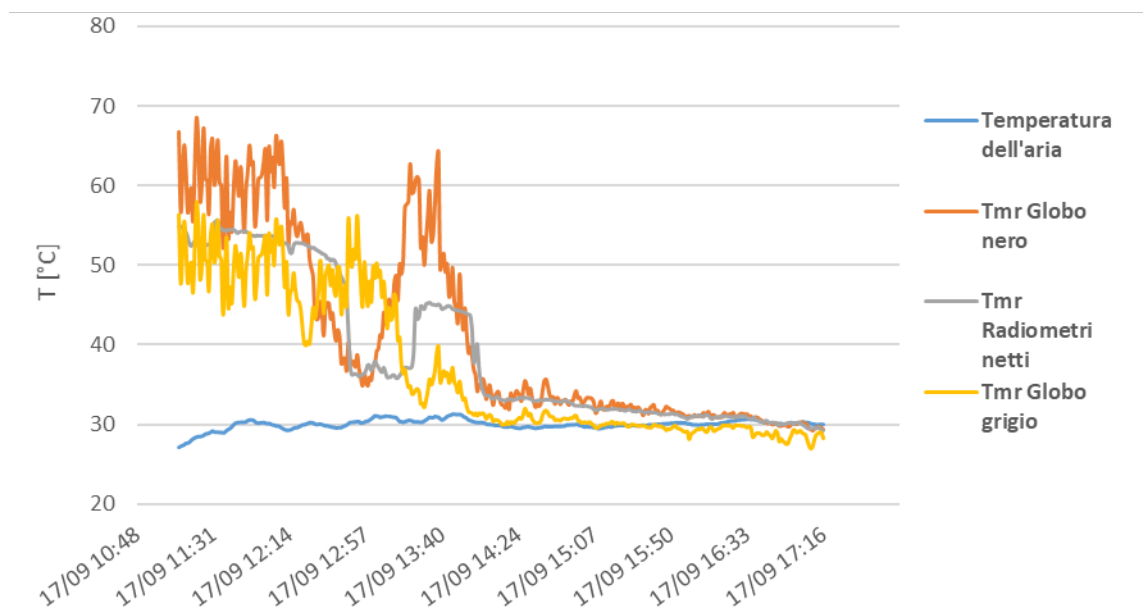


Figura 39. T_{mr} misurata attraverso il globotermometro nero, grigio e i tre radiometri in contrasto con la temperatura dell'aria misurata attraverso il sensore All-in-one. Giorno 17/09/2020

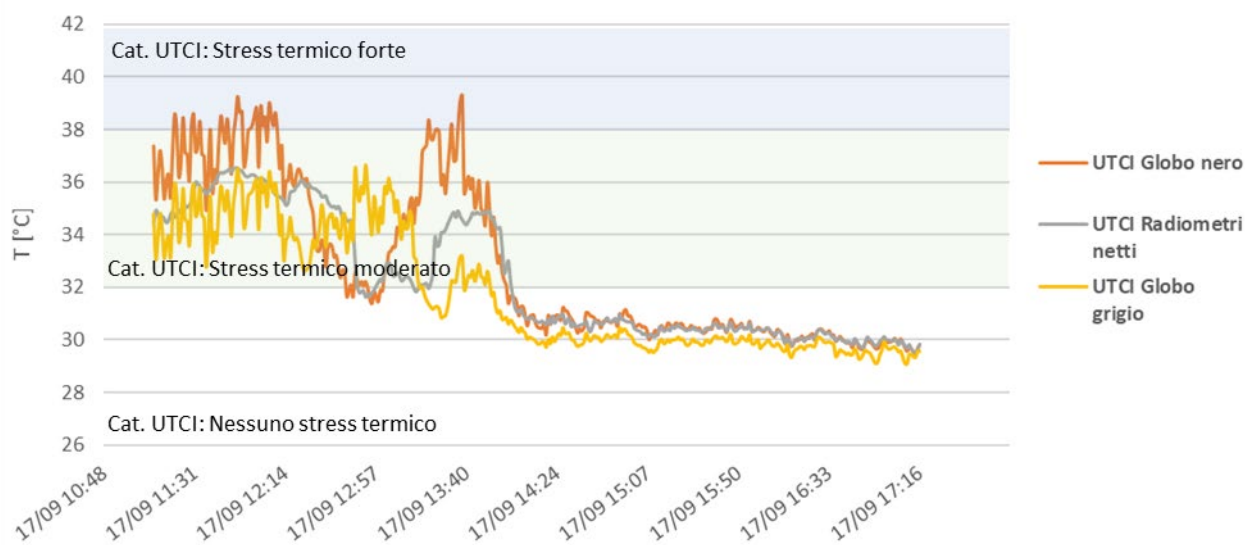


Figura 40. UTCI valutato tramite misure con globotermometro nero, grigio e con radiometri netti. Giorno 17/09/2020

6.9 Parete verde, Via Bovisasca (06/10/2020)

Il 06/10 sono state effettuate le prove di misura del microclima esterno in prossimità di un'altra parete verde in vite americana. La parete si trova in Via Bovisasca, nel cortile di un edificio ad uso uffici/terziario. Le prove sono state effettuate dalle 10:00 alle 17:30 circa e la strumentazione è rimasta in ombra dalle 15:00. La giornata ha comunque registrato frequenti episodi di nuvolosità.

La Figura 41 mostra la configurazione di misura della strumentazione sperimentale adottata e le superfici orizzontali e verticali di involucro circostanti il punto di misura. La superficie orizzontale è costituita da una pavimentazione in sanpietrini.



Figura 41. Misure effettuate in prossimità di una parete verde. Giorno 06/10/2020.

La Figura 42 riporta l'andamento della T_{mr} calcolata attraverso i dati rilevati dai radiometri netti e dai due globotermometri. La differenza tra queste temperature non è significativa per tutta la durata della misurazione; come già ampiamente riscontrato nelle precedenti analisi il globo nero tende però a sovrastimare la T_{mr} e il globo grigio a sottostimarla, anche se in maniera meno marcata rispetto alle altre prove, a causa probabilmente del più contenuto valore dei flussi radiativi solari durante il mese di ottobre. La T_{mr} media calcolata con il globotermometro nero è pari a 21,9 °C, quella calcolata con il globotermometro grigio è pari a 19,6 °C e quella calcolata con i radiometri netti è pari a 21,2 °C. La differenza tra le T_{mr} calcolate attraverso dati rilevati dal globotermometro nero e i radiometri netti varia invece tra -14,0 °C e 14,4 °C, mentre quella tra radiometri e globotermometro grigio varia tra -10,7 °C e 16,8 °C.

La Figura 43 riporta i risultati dell'analisi effettuata in termini di UTCI, esso non rileva alcuno stress termico durante l'intera durata della misurazione sia che l'indice sia stato calcolato da dati rilevati dai radiometri netti che dai globotermometri, sempre in ragione del valore moderato della temperatura dell'aria e del flusso

termico solare. Il valore medio dell'UTCI calcolato con il globotermometro nero, grigio e radiometri netti è infatti molto simile e pari rispettivamente a 19,5 °C, 18,7 °C e 19,3 °C. La differenza tra UTCI calcolato con il globotermometro nero e i radiometri netti varia tra -4,5 °C e 4,7 °C, mentre quella tra UTCI calcolato con i radiometri netti e il globotermometro grigio varia tra -3,5 °C e 5,3 °C.

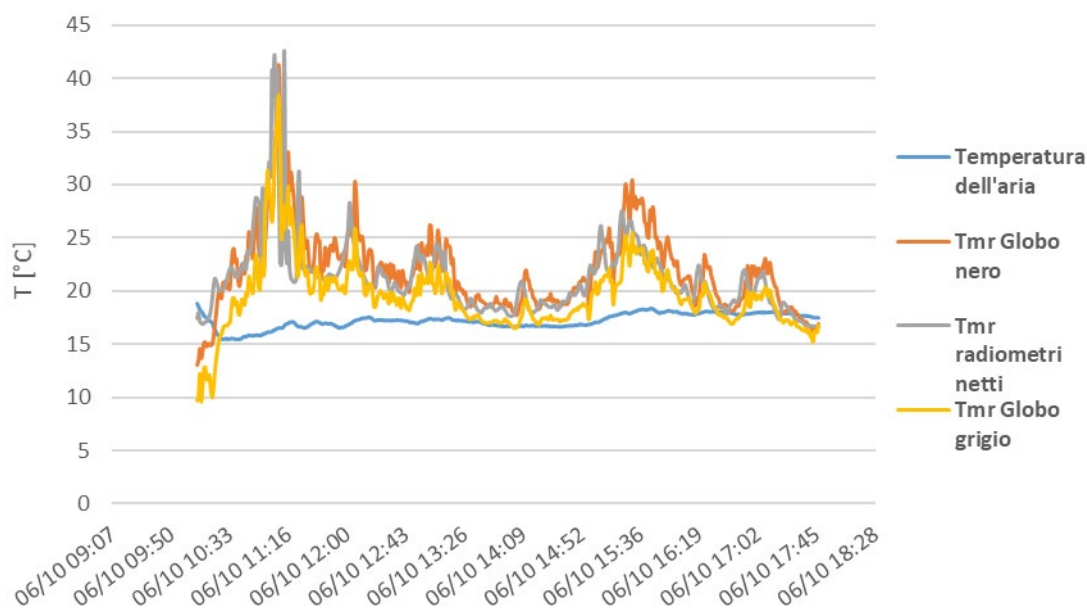


Figura 42. T_{mr} misurata attraverso il globotermometro nero, grigio e i tre radiometri in contrasto con la temperatura dell'aria misurata attraverso il sensore All-in-one. Giorno 06/10/2020

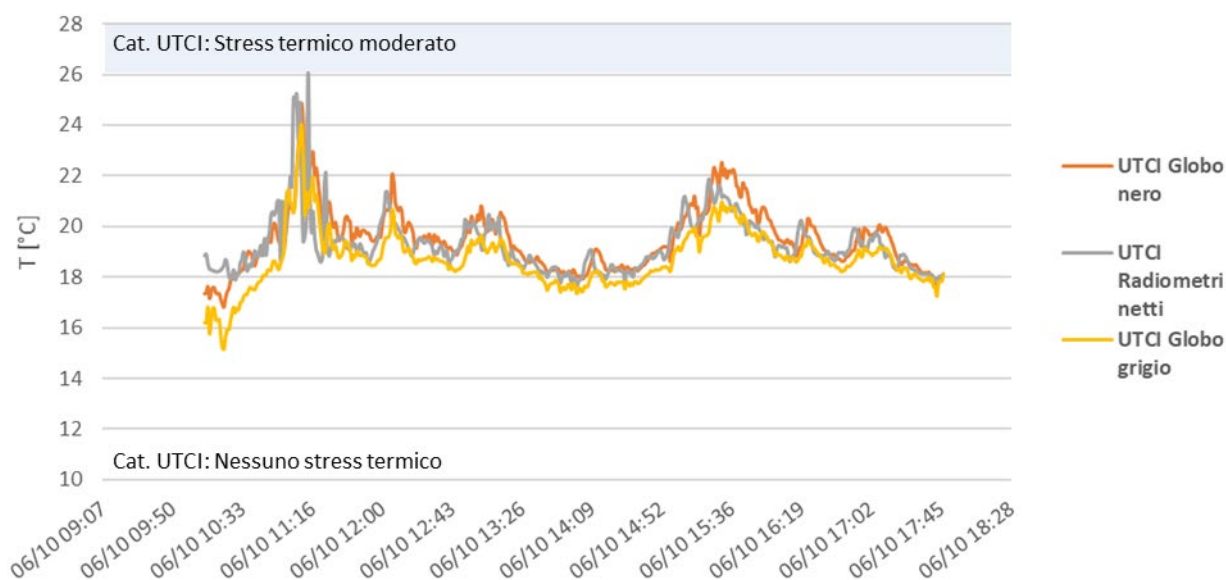


Figura 43. UTCI valutato tramite misure con globotermometro nero, grigio e con radiometri netti. Giorno 06/10/2020

7. Valutazione delle proprietà radiative delle superfici di involucro

L'analisi dei dati monitorati attraverso i radiometri netti ha permesso di valutare anche le proprietà radiative delle superfici orizzontali e verticali circostanti l'ambiente studiato utilizzando la metodologia di calcolo definita nel paragrafo 4.1.3 e citata nel capitolo 5. Le differenti proprietà termo-ottiche delle superfici influenzano infatti il microclima di un ambiente e quindi anche la percezione che un soggetto ne può avere. Per tutte le superfici orizzontali e verticali analizzate durante la campagna sperimentale sono state calcolate la riflettanza (ρ) e l'assorbanza (α) solare e infrarossa e comparate con le stesse proprietà delle superfici di involucro verdi. La Tabella 6 riporta la riflettanza (ρ) e assorbanza (α) medie solari e infrarosse risultanti dalle analisi delle superfici orizzontali testate durante la campagna sperimentale, mentre la Tabella 7 riporta le stesse informazioni per le superfici di involucro verticale.

È necessario sottolineare che si tratta di indici approssimativi che derivano da un bilancio radiativo delle superfici realizzato attraverso le misure dei radiometri netti. Una caratterizzazione sperimentale più precisa richiederebbe dei campioni e una verifica in laboratorio attraverso uno spettrofotometro. Purtroppo, questa non è un'operazione semplice ed economica e andrebbe ripetuta con dei campioni invecchiati in campo per tenere conto dello sporco e dell'invecchiamento dei materiali in conseguenza all'esposizione alla radiazione solare ultravioletta e agli altri agenti atmosferici. Il bilancio termico radiativo in campo tramite radiometri netti fornisce quindi valori indicativi, ma utili, per i materiali considerati, visto che la letteratura scientifica non riporta dati di riferimento significativi.

Per quanto riguarda le superfici di involucro orizzontali, la membrana bituminosa ardesiata della copertura piana sulla quale sono state effettuate le prime prove, ha registrato, a causa del suo colore scuro, il valore più alto di assorbanza solare (0,89) e, pertanto, il valore più basso di riflettanza solare (0,11). Nel campo dell'infrarosso questi due valori risultano simili e pari a 0,10 per la riflettanza e 0,90 per l'assorbanza. La superficie orizzontale di involucro per la quale si registra il valore maggiore di riflettanza è invece la pavimentazione in cemento chiaro spazzolato testata il 23/07/2020. La riflettanza solare di questa superficie è pari a 0,37, mentre quella nel campo dell'infrarosso è pari a 0,26. La pavimentazione in cemento battuto ha registrato valori di assorbanza solare pari a 0,76, quelle con autobloccanti tra 0,72 e 0,80. Infine, per la pavimentazione in sanpietrini è stata calcolata una assorbanza solare media pari a 0,88. In tutti i casi, l'assorbanza nel campo dell'infrarosso aumenta e, di conseguenza, la riflettanza diminuisce. Considerando le pavimentazioni verdi testate, esse registrano valori molto simili tra loro, con una riflettanza nel campo del solare di 0,20 per il prato del parco di Cascina Merlata e di 0,21 per la copertura verde, e, pertanto una assorbanza di 0,80 per il primo caso e di 0,79 per il secondo. Nel campo dell'infrarosso, la riflettanza di entrambe le superfici risulta essere maggiore, 0,30 nel caso della copertura verde e 0,23 nel caso del parco di Cascina Merlata. Se nel campo del solare queste superfici registrano dei valori di assorbanza e riflettanza paragonabili alle superfici con autobloccanti (test 17/09/2020) e alla pavimentazione in cemento battuto (test 27/07 e 18/09/2020), nel campo dell'infrarosso hanno prestazioni paragonabili a quelle registrate per la pavimentazione grigio chiaro in cemento per esterni spazzolato (test 23/07/2020).

Per quanto riguarda le superfici verticali (Tabella 7), la parete in gres porcellanato ha registrato un valore di assorbanza solare pari a 0,72, le superfici intonacate con finitura in pittura bianca e celeste hanno invece registrato valori medi di assorbanza solare pari a rispettivamente 0,52 e 0,69. Anche in questo caso, i valori di riflettanza nel campo dell'infrarosso diminuiscono e quelli di assorbanza aumentano. La finitura in pittura chiara testata il 23/07/2020 presenta un valore di riflettanza infrarossa pari a 0,07 e un valore di assorbanza pari a 0,93. Le due pareti verdi testate registrano valori paragonabili a quelli del gres porcellanato e della parete con finitura azzurra nel campo del solare (riflettanza 0,27 e 0,34), mentre valori più simili a quelli registrati dalla parete con pittura chiara nel campo infrarosso (riflettanza infrarossa pari a 0,01 e assorbanza infrarossa pari a 0,99 per entrambe le pareti verdi).

Sia nel caso di superfici orizzontali che verticali, gli involucri verdi presentano pertanto valori di assorbanza e riflettanza paragonabili a quelli registrati per superfici non estremamente chiare, ma nel campo dell'infrarosso, esse presentano prestazioni paragonabili a quelle delle superfici più chiare testate (pavimentazione in cemento chiaro spazzolato e parete verticale con finitura in pittura chiara).

L'effetto utile delle pareti verdi non si limita però alle sole caratteristiche di riflettanza ed assorbanza, poiché esse determinano anzitutto un effetto di ombreggiamento sulle superfici di involucro evitando che queste siano direttamente investite dai carichi radiativi e in termini di microclima contribuiscono anche sulla parte "latente" attraverso fenomeno di evotraspirazione.

Tabella 6. Riflettanza e assorbanza delle superfici orizzontali testate

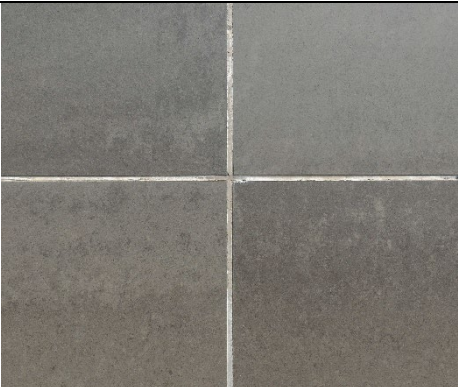
Identificazione test di misura	Involucro edilizio orizzontale	Foto	ρ_{Glo} [-]	α_{Glo} [-]	ρ_{IR} [-]	α_{IR} [-]
Tetto piano con finitura in membrana bituminosa ardesiata (20-21/07/2020)	Copertura piana con membrana ardesiata		0,11	0,89	0,10	0,90
Parete verticale con finitura in intonaco e pittura bianca (23/07/2020)	Pavimentazione e in cemento chiaro spazzolato		0,37	0,63	0,26	0,74
Parete verticale con finitura in lastre di gres porcellanato (27/07/2020 e 18/09/2020) Street canyon (09/09/2020)	Pavimentazione e in cemento battuto		0,24	0,76	0,20	0,80

Identificazione test di misura	Involucro edilizio orizzontale		ρ_{Glo} [-]	α_{Glo} [-]	ρ_{IR} [-]	α_{IR} [-]
Parete verticale con finitura in intonaco e pittura celeste (01/09/2020)	Autobloccanti		0,28	0,72	0,13	0,87
Parete verde, Bovisa (17/09/2020)	Autobloccanti		0,20	0,80	0,16	0,84
Parete verde, Via Bovisasca (06/10/2020)	Sanpietrini		0,12	0,88	0,05	0,95

Identificazione test di misura	Involucro edilizio orizzontale		ρ_{Glo} [-]	α_{Glo} [-]	ρ_{IR} [-]	α_{IR} [-]
Tetto verde (26-27/07/2020)	Manto erboso – tetto verde		0,21	0,79	0,30	0,70
Parco Cascina Merlata (28/07/2020)	Manto erboso		0,20	0,80	0,23	0,77

Tabella 7. Riflettanza e assorbanza delle superfici verticali testate

Identificazione test di misura	Involucro edilizio verticale	Foto	ρ_{Glo} [-]	α_{Glo} [-]	ρ_{IR} [-]	α_{IR} [-]
Parete verticale con finitura in intonaco e pittura bianca (23/07/2020)	Finitura pittura chiara – bianca		0,48	0,52	0,07	0,93

Identificazione test di misura	Involucro edilizio verticale		ρ_{Glo} [-]	α_{Glo} [-]	ρ_{IR} [-]	α_{IR} [-]
Parete verticale con finitura in lastre di gres porcellanato (27/07/2020 e 18/09/2020)	Lastre di gres porcellanato		0,28	0,72	0,21	0,79
Parete verticale con finitura in intonaco e pittura celeste (01/09/2020)	Pittura celeste		0,31	0,69	0,14	0,86
Parete verde, Bovisa (17/09/2020)	Finitura con vite americana		0,27	0,73	0,01	0,99

Identificazione test di misura	Involucro edilizio verticale	Foto	ρ_{Glo} [-]	α_{Glo} [-]	ρ_{IR} [-]	α_{IR} [-]
Parete verde, Via Bovisasca (06/10/2020)	Finitura con vite americana		0,34	0,66	0,01	0,99

8. Discussioni e conclusioni

L'analisi di letteratura ha mostrato l'esistenza di diversi indicatori in grado di caratterizzare il microclima esterno. Tra i parametri ambientali da misurare per arrivare ad una definizione sperimentale di quasi tutti gli indicatori, la temperatura media radiante risulta l'unico per il quale non è disponibile una procedura di misura condivisa e standardizzata internazionalmente. Questo parametro è tuttavia cruciale, specialmente in estate, poiché in ambiente esterno, in area urbana, i flussi radiativi possono determinare il rapido passaggio da condizioni accettabili a condizioni di stress termico.

Il metodo di misura della temperatura radiante ad oggi più accreditato è quello che fa uso di tre radiometri netti, come definito dalla norma tedesca VDI 3787 [40]. Nella letteratura scientifica sono però riportati metodi alternativi, basati sull'uso di globotermometri, più economici e maneggevoli. Si tratta di due metodi di misura molto diversi ed un confronto chiaro ed estensivo tra gli output di misura non è disponibile, così come manca una vera e propria metodologia che chiarifichi, per un operatore, come adottare un globotermometro in sostituzione dei radiometri netti e quali limitazioni siano da considerarsi nella presentazione dei risultati.

Al fine di rispondere a queste domande, è stata predisposta una strumentazione sperimentale mobile, adatta all'uso in ambiente urbano, che permettesse di confrontare i risultati di misura ottenuti con la strumentazione e la metodologia di calcolo proposta dalla norma VDI 3787 (radiometri netti) e quelli ottenuti con l'uso di un globotermometro nero da 150 millimetri di diametro ed uno grigio da 50 millimetri di diametro. Per questi ultimi sono state individuate le metodologie di calcolo più adatte alla stima della temperatura media radiante e dello UTCI, scelto come indice di valutazione del microclima urbano, per il suo valore di universalità. Durante l'estate e l'autunno del 2020 è stata predisposta una campagna di misure sperimentali nell'area urbana di Milano cercando di identificare uno spettro di configurazioni e materiali sufficientemente ampio per poter attuare un confronto attendibile tra le due tecniche di misura identificate. Durante la campagna di misure, i materiali di pavimentazione e di involucro edilizio selezionati, sono stati caratterizzati in termini di riflettanza e assorbanza solare globale e nel campo dell'infrarosso, permettendo di chiarificare ulteriormente le diverse condizioni al contorno assunte per la campagna sperimentale.

Gli output di questa prima campagna sperimentale hanno portato ad alcune considerazioni iniziali. Il globotermometro nero tende a sovrastimare il valore della T_{mr} rispetto a quella calcolata attraverso i radiometri netti, e, al contrario, il globotermometro grigio tende a sottostimarne il valore. Questo comportamento si attenua nelle ore del mattino e della sera, quando l'altezza solare e il valore dell'irradianza sono più bassi. Nei periodi di assenza di radiazione, a causa di nuvolosità o per le ombre portate, i valori ottenuti con i tre diversi apparati di misura divengono molto simili tra loro. La sovrastima della T_{mr} da parte del globotermometro nero raggiunge valori fino a 38 °C nelle ore centrali dei giorni estivi, mentre la sottostima da parte del globotermometro grigio raggiunge valori, nelle stesse ore, fino a -24 °C. L'andamento poco stabile della T_{mr} valutata con i globotermometri evidenzia, inoltre, come questi strumenti risentano fortemente dei repentini cambiamenti delle variabili climatiche, in particolare della velocità del vento e dei flussi radiativi solari. Mentre i radiometri basano il calcolo della T_{mr} solo sulle misure di flussi radiativi (e di ipotesi geometriche, ovvero i fattori di vista), i globotermometri permettono la stima dell'indice sulla base di una misura di temperatura e di un bilancio termico sensibile, a cui poi viene sottratta la quota convettiva. I globotermometri misurano quindi una temperatura ambientale dipendente sia da scambi radiativi che da scambi convettivi e risentono anche degli effetti convettivi dovuti alla velocità del vento. Per dare luogo ad una misura accurata, un globotermometro dovrebbe raggiungere una condizione di stabilità, cosa impossibile in ambiente esterno. Il tempo di risposta, più o meno lungo, di tali strumenti introduce quindi un elemento di incertezza nella stima della T_{mr} , che andrebbe ulteriormente approfondito attraverso misure di laboratorio. Anche il colore della strumentazione è molto importante, infatti il globo nero riflette meno la radiazione solare a bassa lunghezza d'onda, rispetto al globo grigio.

Anche il calcolo della T_{mr} con dati rilevati dai radiometri netti, qui usato come riferimento per la valutazione della accuratezza della misura tramite i globotermometri, presenta alcune incertezze; in particolare per ciò

che concerne i fattori di vista da utilizzare nell'equazione di calcolo della T_{mr} proposta dallo standard VDI 3787. I fattori di vista cambiano a seconda che il corpo umano sia assimilato a una sfera o a un parallelepipedo; nel caso della sfera i flussi radiativi vengono pesati allo stesso modo, nel caso del parallelepipedo invece i flussi radiativi dall'alto e dal basso assumono minore importanza. Nel presente studio sono stati considerati i fattori di vista "standard", relativi alla forma di un parallelepipedo.

Gli output relativi all'indice UTCI hanno dato risultati simili a quelli riportati per la temperatura media radiante. In particolare, si riscontra come l'indice calcolato attraverso le misure del globotermometro nero tenda a individuare maggiori rischi di stress termico estremo, per la sovrastima dell'effetto dei carichi radiativi solari. La sovrastima dell'indice UTCI da parte del globotermometro nero e la sottostima di quello grigio sono comunque più limitate rispetto a quelle registrate nel calcolo della T_{mr} poiché all'interno del calcolo dell'UTCI gli altri parametri climatici (temperatura dell'aria, umidità relativa e velocità del vento) hanno un peso paragonabile a quello della T_{mr} . La sovrastima dell'UTCI da parte del globotermometro nero rispetto a quello calcolato con i radiometri netti raggiunge i 10 °C e la sottostima da parte del globotermometro grigio i -6 °C.

In generale, i valori calcolati attraverso i globotermometri hanno andamenti meno stabili rispetto a quelli calcolati attraverso i radiometri netti, questo perché sono influenzati sia dai rapidi cambiamenti di irraggiamento solare, che dallo scambio termico convettivo. In campo aperto, in particolare, i globotermometri sono molto influenzati dalla velocità del vento e quindi la stima della T_{mr} potrebbe essere particolarmente falsata. Tuttavia, questa maggiore sensibilità al vento potrebbe non essere così negativa nella valutazione dell'UTCI, che ovviamente dipende da un bilancio energetico generale e non solo radiativo.

Dal punto di vista delle proprietà radiative delle superfici di involucro orizzontale, le superfici verdi hanno registrato valori di riflettanza e assorbanza nel campo del solare rispettivamente di circa 0,20 e 0,80, similmente a quelli registrati per pavimentazioni color grigio scuro. Nel campo dell'infrarosso l'assorbanza diminuisce ed entrambe le proprietà risultano invece essere più simili a quelle calcolate per pavimentazioni molto chiare (riflettanza tra 0,23 e 0,30 e assorbanza tra 0,77 e 0,70). Lo stesso discorso può essere fatto per le superfici di involucro verde verticale, la riflettanza e l'assorbanza nel campo del solare presentano valori simili (riflettanza solare media pari di circa 0,30 e assorbanza solare media di circa 0,70) a quelli calcolati per superfici di involucro grigio scuro o con pittura azzurra, mentre nel campo dell'infrarosso esse presentano prestazioni (riflettanza infrarossa media pari di circa 0,01 e assorbanza infrarossa media di circa 0,99) paragonabili a quelle delle superfici verticali più chiare testate. In generale, nonostante le incertezze dovute alla valutazione in campo, si può osservare come le superfici tradizionali più chiare abbiano registrato le prestazioni migliori nel campo del solare presentando i maggiori valori di riflettanza solare e, di conseguenza, i valori più bassi di assorbanza solare. Le superfici verdi, pur avendo registrato valori di assorbanza e riflettanza solare simili a superfici più scure, hanno però prestazioni e benefici aggiuntivi dovuti all'ombreggiamento e all'evotraspirazione.

Al fine di chiarire le problematiche individuate attraverso le misure del 2020, nel corso dell'anno 2021 verrà svolta una ulteriore campagna di misure in ambito urbano, che aggiornerà e consoliderà la metodologia di misura sia della T_{mr} che dello UTCI, attraverso i globotermometri, al fine di costituire una base per una standardizzazione ed una maggiore diffusione in ambito professionale.

Riferimenti bibliografici

- [1] United Nations, World Urbanization Prospects - Population Division, Popul. Div. (2018). <https://population.un.org/wup/DataQuery/> (accessed March 4, 2020).
- [2] M. Taleghani, L. Kleerekoper, M. Tenpierik, A. van den Dobbelsteen, Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands, *Build. Environ.* 83 (2015) 65–78. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.014>.
- [3] J. Spagnolo, R. de Dear, A field study of thermal comfort in outdoor and semi-outdoor environments in subtropical Sydney Australia, *Build. Environ.* 38 (2003) 721–738. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(02\)00209-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00209-3).
- [4] N. Kántor, A. Kovács, T.-P. Lin, Looking for simple correction functions between the mean radiant temperature from the “standard black globe” and the “six-directional” techniques in Taiwan, *Theor. Appl. Climatol.* 121 (2015) 99–111. <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1211-2>.
- [5] C.Y. Park, D.K. Lee, E. Krayenhoff, H.K. Heo, S. Ahn, T. Asawa, A. Murakami, H. Kim, A multilayer mean radiant temperature model for pedestrians in a street canyon with trees, *Build. Environ.* 141 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.058>.
- [6] W. Klemm, B. Heusinkveld, S. Lenzholzer, B. Hove, Street greenery and its physical and psychological impact on thermal comfort, *Landsc. Urban Plan.* 138 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.02.009>.
- [7] E.M. Fischer, C. Schär, Consistent geographical patterns of changes in high-impact European heatwaves, *Nat. Geosci.* (2010). <https://doi.org/10.1038/ngeo866>.
- [8] L.W.A. van Hove, C.M.J. Jacobs, B.G. Heusinkveld, J.A. Elbers, B.L. Van Driel, A.A.M. Holtslag, Temporal and spatial variability of urban heat island and thermal comfort within the Rotterdam agglomeration, *Build. Environ.* (2015). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.08.029>.
- [9] V. Sangiorgio, F. Fiorito, M. Santamouris, Development of a holistic urban heat island evaluation methodology, *Sci. Rep.* (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75018-4>.
- [10] L. Kleerekoper, M. Van Esch, T.B. Salcedo, How to make a city climate-proof, addressing the urban heat island effect, *Resour. Conserv. Recycl.* (2012). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.06.004>.
- [11] A. Lai, M. Maing, E. Ng, Observational studies of mean radiant temperature across different outdoor spaces under shaded conditions in densely built environment, *Build. Environ.* 114 (2017) 397–409. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.034>.
- [12] C. Tan, N.H. Wong, S. Jusuf, Outdoor mean radiant temperature estimation in the tropical urban environment, *Build. Environ.* 64 (2013) 118–129. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.03.012>.
- [13] A. Matzarakis, F. Rutz, H. Mayer, Modelling radiation fluxes in simple and complex environments—application of the RayMan model, *Int. J. Biometeorol.* 51 (2007) 323–334. <https://doi.org/10.1007/s00484-006-0061-8>.
- [14] Á. Gulyás, J. Unger, A. Matzarakis, Assessment of the microclimatic and human comfort conditions in a complex urban environment: Modelling and measurements, *Build. Environ.* 41 (2006) 1713–1722. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.07.001>.
- [15] E. Johansson, S. Thorsson, R. Emmanuel, E. Krüger, Instruments and methods in outdoor thermal comfort studies – The need for standardization, *Urban Clim.* 10 (2014) 346–366. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.uclim.2013.12.002>.
- [16] S. Thorsson, F. Lindberg, I. Eliasson, B. Holmer, Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting, *Int. J. Climatol.* 27 (2007) 1983–1993. <https://doi.org/10.1002/joc.1537>.
- [17] G. Jendritzky, W. Nübler, A model analysing the urban thermal environment in physiologically significant terms, *Arch. Meteorol. Geophys. Bioclimatol. Ser. B.* 29 (1981) 313–326. <https://doi.org/10.1007/BF02263308>.
- [18] N. Khrit, M. Alghoul, K. Sopian, A. Lahimer, O.K. Elayeb, Assessing the accuracy of globe thermometer method in predicting outdoor mean radiant temperature under Malaysia tropical microclimate, *E3S*

- Web Conf. 23 (2017) 1006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172301006>.
- [19] A. Atef, Z. Nouredine, F. Soufiane, SPUCAL_mrt as a New Model for Estimating the Mean Radiant Temperature in Arid Lands, *Energy Procedia*. 74 (2015) 273–280. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.603>.
- [20] A. Henrique, T. Gál, Comparison of measured and computationally simulated Mean Radiant Temperature. Case study of Campo de Ourique quarter in Lisbon, Finisterra. 50 (2016). <https://doi.org/10.18055/Finis3265>.
- [21] American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE Handbook 2001 Fundamentals, ASHRAE Handb. Fundam. (2001). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- [22] A. Matzarakis, F. Rutz, H. Mayer, Modelling radiation fluxes in simple and complex environments - Application of the RayMan model, *Int. J. Biometeorol.* (2007). <https://doi.org/10.1007/s00484-006-0061-8>.
- [23] A. Matzarakis, C. Endler, Climate change and thermal bioclimate in cities: Impacts and options for adaptation in Freiburg, Germany, *Int. J. Biometeorol.* (2010). <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0296-2>.
- [24] H. Mayer, P. Höppe, Thermal comfort of man in different urban environments, *Theor. Appl. Climatol.* (1987). <https://doi.org/10.1007/BF00866252>.
- [25] T. Honjo, Thermal Comfort in Outdoor Environment, *Glob. Environ. Res.* 13 (2009).
- [26] K. Blazejczyk, P. Bröde, D. Fiala, G. Havenith, I. Holmér, G. Jendritzky, B. Kampmann, A. Kunert, Principles of the New Universal Thermal Climate Index (UTCI) and its Application to Bioclimatic Research in European Scale, *Misc. Geogr.* 14 (2010) 91–102. <https://doi.org/10.2478/mgrsd-2010-0009>.
- [27] R. Stull, Wet-Bulb Temperature from Relative Humidity and Air Temperature, *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 50 (2011) 2267–2269. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0143.1>.
- [28] A. Auliciems, S. V. Szokolay, Thermal comfort, in: PLEA Passiv. Low Energy Archit. Int. Dep. Archit. Univ. Queensl., Singapore, 2007. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63912-7.00015-1>.
- [29] International Organization for Standardization, ISO 7730: Ergonomics of the thermal environment Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, 2005.
- [30] International Organization for Standardization, EN ISO 7726: Ergonomics of the thermal environment – Instruments for measuring physical quantities, 2001. <https://doi.org/ISO 7726:1998>.
- [31] ASHRAE, Standard 55 - Thermal environmental conditions for human occupancy, 2017.
- [32] L.M. Monteiro, Review of Numerical Modelling of Outdoor Thermal Comfort, *World Sustain. Build. Conf. 2005* (2005) 2252–2259. <http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB3877.pdf>.
- [33] W. Walls, N. Parker, J. Walliss, R. Crawford, A. Stephan, Designing with thermal comfort indices in outdoor sites, in: *Living Learn. Res. a Better Built Environ.*, Univ Melbourne, 2015: pp. 1117–1128. http://anzasca.net/wp-content/uploads/2015/12/107_Walls_Parker_Walliss_ASA2015.pdf.
- [34] C.G. Webb, Thermal Discomfort in an Equatorial Climate. A Nomogram for the Equatorial Comfort Index., *J. Inst. Heat. Vent. Eng.* 28 (1960) 297–304.
- [35] M. Santamouris, D. Asimakopoulos, Thermal comfort, in: *Passiv. Cool. Build.*, 1st Editio, BEST (Buildings Energy and Solar Technology), Routledge, 1996: pp. 129–170.
- [36] H.S. Belding, T.F. Hatch, Index for evaluating Heat Stress in Terms of resulting Physiological Strains., *Heating, Pip. Air Cond.* 27 (1955) 129–136.
- [37] B. Givoni, Man, climate, and architecture, 1st Editio, Elsevier architectural science series, 1969.
- [38] J.M. Masterton, Service de l'environnement atmosphérique, F.A. Richardson, Humidex: a Method of Quantifying Human Discomfort Due to Excessive Heat and Humidity, Canada, 1979.
- [39] P.O. Fanger, Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering, 1970.
- [40] Verein Deutscher Ingenieure, VDI 3787 - Environmental meteorology. Methods for the human biometeorological evaluation of climate and air quality for urban and regional planning at regional level. Part I: Climate, 2008.
- [41] H. Staiger, G. Laschewski, A. Grätz, The perceived temperature – a versatile index for the assessment

- of the human thermal environment. Part A: scientific basics, *Int. J. Biometeorol.* 56 (2012) 165–176. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0409-6>.
- [42] G. Jendritzky, H. Staiger, K. Bucher, A. Graetz, G. Laschewski, A. Grätz, G. Laschewski, The Perceived Temperature: The Method of the Deutscher Wetterdienst for the Assessment of Cold Stress and Heat Load for the Human Body, *Int. J. Biometeorol.* 56 (2012) 165–76. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0409-6>.
- [43] H. Mayer, P. Höppe, Thermal comfort of man in different urban environments, *Theor. Appl. Climatol.* 38 (1987) 43–49. <https://doi.org/10.1007/BF00866252>.
- [44] P. Höppe, The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment, *Int. J. Biometeorol.* 43 (1999) 71–75. <https://doi.org/10.1007/s004840050118>.
- [45] G. Jendritzky, A. Maarouf, H. Staiger, Looking for a Universal Thermal Climate Index UTCI for Outdoor Applications, *Wind. Conf. Therm. Stand.* (2001).
- [46] P. Bröde, D. Fiala, K. Blazejczyk, Y. Epstein, I. Holmér, G. Jendritzky, B. Kampmann, M. Richards, H. Rintamäki, A. Shitzer, G. Havenith, Calculating UTCI Equivalent Temperatures, in: Castellani, J.W., Endrusick, T.L. *Environ. Ergon. XIII, Proc. 13th Int. Conf. Environ. Ergonomics*, Boston, MA, 2 - 7 August 2009, Univ. Wollongong, Wollongong, Pp 49 - 53. *Assess. Urban O*, 2009: pp. 521–524. <http://www.utci.org>.
- [47] K. Blazejczyk, Y. Epstein, G. Jendritzky, H. Staiger, B. Tinz, Comparison of UTCI to selected thermal indices, *Int J Biometeorol.* 56(3) (2012) 515–35. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0453-2>.
- [48] K. Pantavou, G. Theoharatos, M. Santamouris, D. Asimakopoulos, Outdoor thermal sensation of pedestrians in a Mediterranean climate and a comparison with UTCI, *Build. Environ.* 66 (2013) 82–95. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.02.014>.
- [49] G. Havenith, D. Fiala, K. Blazejczyk, M. Richards, P. Bröde, I. Holmér, H. Rintamäki, Y. Benshabat, G. Jendritzky, The UTCI-clothing model, *Int. J. Biometeorol.* 56 (2011) 461–470. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0451-4>.
- [50] P.A. Siple, C.F. Passel, Measurements of Dry Atmospheric Cooling in Subfreezing Temperatures, *Proc. Am. Philos. Soc.* 89 (1945) 177–199. <http://www.jstor.org/stable/985324>.
- [51] C.P. Yaglou, D. Minaed, Control of Heat Casualties at Military Training Centers., *Arch. Indust. Heal.* 16 (1957) 302–316. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19582900896>.
- [52] ISO (International Organization for Standardization), ISO 9060: Solar energy - Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation, 2018.
- [53] ISO (International Organization for Standardization), 17713-1: Meteorology — Wind measurements — Part 1: Wind tunnel test methods for rotating anemometer performance, 3, 2007.
- [54] ISO (International Organization for Standardization), ISO 17714:2007 Meteorology - Air temperature measurements - Test methods for comparing the performance of thermometer shields/screens and defining important characteristics, 2007. http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=31498.
- [55] ISO (International Organization for Standardization), ISO 19289: Air quality - Meteorology - Siting classifications for surface observing stations on land, 2015.
- [56] ISO (International Organization for Standardization), ISO 19926-1: Meteorology — Weather radar Part 1: System performance and operation, 2019.
- [57] ISO (International Organization for Standardization), ISO 28902-2: Air quality — Environmental meteorology Part 2: Ground-based remote sensing of wind by heterodyne pulsed Doppler lidar, 2017.
- [58] ISO (International Organization for Standardization), ISO 28902-3: Air quality — Environmental meteorology Part 3: Ground-based remote sensing of wind by continuous-wave Doppler lidar, 2018.
- [59] ISO (International Organization for Standardization), ISO 28902-1: Air quality - Environmental meteorology Part 1: Ground-based remote sensing of visual range by lidar, 2012. [doi:10.1017/cbo9780511844652.021](https://doi.org/10.1017/cbo9780511844652.021).
- [60] F. Lindberg, B. Holmer, S. Thorsson, SOLWEIG 1.0 – Modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings, *Int. J. Biometeorol.* 52 (2008) 697–713.

- <https://doi.org/10.1007/s00484-008-0162-7>.
- [61] M. Bruse, Microclimate Simulations | ENVI_MET, (2011). <https://www.envi-met.com/> (accessed March 5, 2020).
 - [62] J. Huang, J. Laurent, J. Spengler, CityComfort+: A simulation-based method for predicting mean radiant temperature in dense urban areas, *Build. Environ.* 80 (2014) 84–95. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.05.019>.
 - [63] E.L. Krüger, F.O. Minella, A. Matzarakis, Comparison of different methods of estimating the mean radiant temperature in outdoor thermal comfort studies, *Int. J. Biometeorol.* 58 (2014) 1727–1737. <https://doi.org/10.1007/s00484-013-0777-1>.
 - [64] A. Atef, Z. Noureddine, F. Soufiane, SPUCAL-mrt as a New Model for Estimating the Mean Radiant Temperature in Arid Lands, in: *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2015: pp. 273–280. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.603>.
 - [65] F.R. d'Ambrosio Alfano, M. Dell'Isola, B.I. Palella, G. Riccio, A. Russi, On the measurement of the mean radiant temperature and its influence on the indoor thermal environment assessment, *Build. Environ.* 63 (2013) 79–88. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.01.026>.
 - [66] P. Höppe, A new procedure to determine the mean radiant temperature outdoors, *Wetter Und Leb.* (1992).
 - [67] P. Höppe, The physiological equivalent temperature - A universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment, *Int. J. Biometeorol.* 43 (1999) 71–75. <https://doi.org/10.1007/s004840050118>.
 - [68] H.M. Vernon, The Measurement, in Relation to Human Comfort, of the Radiation Produced by Various Heating Systems., *Domest. Eng.* 52 (1932) 246–250.
 - [69] S. Wang, Y. Li, Suitability of acrylic and copper globe thermometers for diurnal outdoor settings, *Build. Environ.* 89 (2015) 279–294. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.002>.
 - [70] M. Nikolopoulou, N. Baker, K. Steemers, Improvements to the Globe Thermometer for Outdoor Use, *Archit. Sci. Rev.* 42 (1999) 27–34. <https://doi.org/10.1080/00038628.1999.9696845>.
 - [71] I. Standard, ISO 7726 Ergonomics of the thermal environment — Instruments for measuring physical quantities, *ISO Stand.* (1998).
 - [72] L.A. Kuehn, R.A. Stubbs, R.S. Weaver, Theory of the globe thermometer, *J. Appl. Physiol.* 29 (1970). <https://doi.org/https://doi.org/10.1152/jappl.1970.29.5.750>.
 - [73] J. Spagnolo, R. de Dear, A field study of thermal comfort in outdoor and semi-outdoor environments in subtropical Sydney Australia, *Build. Environ.* (2003). [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(02\)00209-3](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00209-3).
 - [74] Ashrae Standard, ASHRAE Handbook 2001 Fundamentals, 2001.
 - [75] N. Kántor, T.P. Lin, A. Matzarakis, Daytime relapse of the mean radiant temperature based on the six-directional method under unobstructed solar radiation, *Int. J. Biometeorol.* (2014). <https://doi.org/10.1007/s00484-013-0765-5>.
 - [76] M.W. Yahia, E. Johansson, Evaluating the behaviour of different thermal indices by investigating various outdoor urban environments in the hot dry city of Damascus, Syria, *Int. J. Biometeorol.* (2013). <https://doi.org/10.1007/s00484-012-0589-8>.
 - [77] M. Nikolopoulou, N. Baker, K. Steemers, Improvements to the Globe Thermometer for Outdoor Use, *Archit. Sci. Rev.* (1999). <https://doi.org/10.1080/00038628.1999.9696845>.
 - [78] Hukseflux, Hukseflux Thermal Sensors USER MANUAL NR01 / RA01, (2017) 71. https://www.hukseflux.com/uploads/product-documents/NR01_RA01_manual_v1710.pdf.
 - [79] ISO, ISO/TR 9901, 1990.
 - [80] WMO, WMO-No.8, 2008.
 - [81] ASTM, ASTM G183-05, (n.d.).
 - [82] LSI Lastem, Globotermometro per applicazioni indoor e outdoor, LSI Lastem Prod. (2020). <https://www.lsi-lastem.com/it/blog/globotermometro-per-applicazioni-indoor-e-outdoor/>.
 - [83] NEXTEL, NEXTEL, SCHEDA TECNICA APPLICATIVA Velvet Coating 811-21 Nero Ottico, (n.d.). www.upcoat.com.

- [84] NEXTEL, NEXTEL, SCHEDA TECNICA APPLICATIVA Suede Coating 3101, (n.d.).
- [85] European committee for standardization, EN 410 - Glass in building - Determination of luminous and solar characteristics of glazing, 2011.
- [86] LSI Lastem, Alpha-Log, LSI Lastem Prod. (2020). <https://www.lsi-lastem.com/PDF/MW9005/MW9005-ITA-01-Alpha-Log.pdf>.

Appendice

Il gruppo di lavoro impegnato nell'attività:

il gruppo di ricerca del prof. Causone è attivo dal 2013 presso il Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano e svolge attività di ricerca sul tema delle prestazioni energetiche ed ambientali degli edifici e delle città (smart city, simulazione energetica degli edifici ed urbana, comfort termico indoor ed outdoor, IAQ, carbon neutrality e LCA). Il gruppo composto dal prof. Francesco Causone, Ing. Anita Tatti (assegnista), Ing. Sibilla Ferroni (assegnista), Ing. Martina Ferrando (dottoranda) e Ing. Martina Pelle (dottoranda), partecipa a diversi progetti di ricerca europei, nazionali e locali, affiancando all'attività di ricerca quella di trasferimento tecnologico sul territorio.