



## 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, A. Banfi

## 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, A. Banfi (Politecnico di Milano, Dipartimento di Energia)

Dicembre 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 - III annualità

Obiettivo: *Tecnologie*

Progetto: Tema 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: *WP2 - Materiali e soluzioni innovative per ottimizzare l'isolamento dell'involucro edilizio*

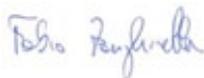
Linea di attività: *LA2.10 – Consolidamento della metodologia di misura sviluppata ed ampliamento della valutazione prestazionale di tecnologie di involucro verdi e tradizionali*

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

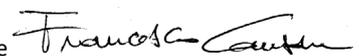
Responsabile del Work package: Giovanni Puglisi, ENEA

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

LISTA DEI SIMBOLI .....	4
SOMMARIO.....	5
1. INTRODUZIONE ALLA VALUTAZIONE DEL MICROCLIMA URBANO E STRUTTURA DEL REPORT .....	6
2. VALUTAZIONE DEL MICROCLIMA URBANO .....	8
2.1 VALUTAZIONE DELLA TEMPERATURA MEDIA RADIANTE .....	8
2.1.1 <i>Radiometri Netti</i> .....	8
2.1.2 <i>Globotermometri</i> .....	10
2.2 VALUTAZIONE DELLO UTCI E DEL MICROCLIMA IN AMBIENTE ESTERNO.....	11
3. METODOLOGIA DI MISURA E DESCRIZIONE DELLA CAMPAGNA SPERIMENTALE.....	12
3.1 CAMPAGNA SPERIMENTALE.....	13
3.1.1 <i>Area di studio</i> .....	13
3.1.2 <i>Set-up sperimentale</i> .....	15
3.2 IPOTESI INTRODOTTE.....	17
4. RISULTATI E DISCUSSIONI .....	19
4.1 VALUTAZIONE DELLA TEMPERATURA MEDIA RADIANTE .....	19
4.1.1 <i>Andamento generale</i> .....	19
4.1.2 <i>Influenza del tempo di elaborazione</i> .....	20
4.1.3 <i>Influenza delle variabili meteorologiche</i> .....	23
4.1.4 <i>Analisi dell'errore</i> .....	24
4.2 ANALISI DI REGRESSIONE LINEARE MULTIPLA .....	25
4.3 VALUTAZIONE DELL'INDICE UTCI.....	29
4.4 ESTENSIONE DELL'USO DEL MODELLO DI REGRESSIONE A MISURE EFFETTUATE IN CAMPO APERTO E SEMI-APERTO .....	31
4.4.1 <i>Campo aperto</i> .....	32
4.4.2 <i>Campo semi-aperto</i> .....	35
4.5 VALUTAZIONE DELLE PROPRIETÀ RADIATIVE DELLE SUPERFICI DI INVOLUCRO .....	38
4.5.1 <i>Calcolo della riflettanza e dell'assorbanza solare di una superficie attraverso i radiometri netti</i> .....	38
4.5.2 <i>Calcolo proprietà radiative di una superficie attraverso un globotermometro</i> .....	43
5. CONCLUSIONI.....	45
5.1 POSSIBILI SVILUPPI FUTURI .....	48
6. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	50
APPENDICE A .....	53
APPENDICE B.....	98
APPENDICE C.....	102

## Lista dei simboli

	DEFINIZIONE	UNITÀ DI MISURA
$\alpha_k$	Coefficiente di assorbimento dei flussi radiativi a bassa lunghezza d'onda (corpo umano)	-
$\alpha_{Gl}$	Assorbanza solare della superficie analizzata	-
$\alpha_{IR}$	Assorbanza infrarossa della superficie esaminata	-
<b>D</b>	Diametro	<b>mm</b>
$\epsilon_g$	Emissività del globotermometro	-
$\epsilon_i$	Emissività della superficie/corpo analizzata	-
$\epsilon_p$	Emissività del corpo umano	-
$F_i$	Fattore di vista	-
$f_p$	Surface projection factor	-
$h_{cg}$	Coefficiente di scambio termico convettivo	<b>W/m<sup>2</sup>K</b>
$h_{rg}$	Coefficiente di scambio termico radiativo	<b>W/m<sup>2</sup>K</b>
<b>I</b>	Radiazione solare diretta (normale alla superficie)	<b>W/m<sup>2</sup></b>
$K_i$	Flussi radiativi a bassa lunghezza d'onda	<b>W/m<sup>2</sup></b>
$K_{iDiff}$	Flussi radiativi a bassa lunghezza d'onda diffusi	<b>W/m<sup>2</sup></b>
$L_i$	Flussi radiativi ad elevate lunghezza d'onda	<b>W/m<sup>2</sup></b>
$\lambda$	Lunghezza d'onda	<b>nm</b>
$p_{atm}$	Pressione atmosferica	<b>hPa</b>
$\dot{Q}_c$	Flussi termici scambiati per convezione	<b>W/m<sup>2</sup></b>
$q_{c,g}$	Flusso termico convettivo tra strumento/corpo e ambiente	<b>W/m<sup>2</sup></b>
$\dot{Q}_k$	Flussi termici scambiati per conduzione	<b>W/m<sup>2</sup></b>
$\dot{Q}_R$	Flussi termici scambiati per irraggiamento	<b>W/m<sup>2</sup></b>
$q_{r,g}$	Flusso termico radiativo tra strumento/corpo e ambiente	<b>W/m<sup>2</sup></b>
$\rho$	Riflettanza	-
$\rho_{Gl}$	Riflettanza solare della superficie analizzata	-
$\rho_{IR}$	Riflettanza infrarossa della superficie esaminata	-
$R_{GL}$	Radiazione globale	<b>W/m<sup>2</sup></b>
<b>Re</b>	Numero di Reynolds	-
<b>RH</b>	Umidità relativa	<b>%</b>
<b>S</b>	Capacità di accumulo (storage) del corpo umano	<b>W/m<sup>2</sup></b>
$S_{tr}$	Densità del flusso medio radiante	<b>W/m<sup>2</sup></b>
$\sigma$	Costante di Stefan-Boltzmann	<b>W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup></b>
$T_a$	Temperatura dell'aria	<b>K o °C</b>
$T_g$	Temperatura del globo	<b>K o °C</b>
$T_i$	Temperatura della superficie i-esima	<b>K o °C</b>
$T_{mr}$	Temperatura media radiante	<b>K o °C</b>
<b>UTCI</b>	Universal Thermal Climate Index	<b>K o °C</b>
$v_a$	Velocità dell'aria	<b>m/s</b>
$\dot{W}$	Densità di lavoro	<b>W/m<sup>2</sup></b>

## Sommario

La costante crescita del processo di urbanizzazione determina una percentuale sempre più elevata di individui concentrati in aree urbane, per cui, l'interesse pubblico verso la valutazione del microclima urbano esterno sta progressivamente aumentando.

Il microclima in ambienti urbani esterni, contrariamente a quello in ambienti interni, è un campo di ricerca relativamente nuovo, caratterizzato dall'assenza di uno standard internazionale che ne definisca un'univoca procedura di valutazione. In particolare, nell'ambito della biometeorologia umana, la variabile più sfidante da misurare sperimentalmente è la Temperatura Media Radiante ( $T_{mr}$ ).

La procedura di misura più accurata della  $T_{mr}$  prevede l'uso di tre radiometri netti, tuttavia, tali sensori presentano un costo elevato, limitante per un eventuale impiego su larga scala. Alcuni studi propongono l'utilizzo dei globotermometri come alternativa più economica ai radiometri netti. Tali sensori, però, nascono per un utilizzo in ambienti interni e la loro precisione in un contesto urbano complesso è ancora un'incognita.

Il lavoro qui riportato illustra i risultati della campagna sperimentale di misura svolta nel 2021, proseguimento di quella del 2020, e offre un dettagliato confronto tra diverse tecniche di misura della  $T_{mr}$  e del microclima urbano, valutato tramite l'Universal Thermal Climate Index (**UTCI**), al fine di stabilire in che misura i globotermometri possano essere impiegati in campo esterno come alternativa ai radiometri netti. Per fare ciò il confronto tra le prestazioni, in aree densamente edificate, di tre radiometri netti, un globotermometro nero standard ( $D=150$  mm) e un globotermometro grigio ( $D=50$  mm) è stato consolidato rispetto a quello presentato nel precedente report.

I risultati mostrano la tendenza del globo nero a sovrastimare la  $T_{mr}$  (e lo **UTCI**) e quella del globo grigio a sottostimarla. Inoltre, le analisi hanno evidenziato la presenza di una forte fluttuazione nel profilo della  $T_{mr}$  calcolata con l'utilizzo di globotermometri, dovuta all'effetto combinato della rapida variazione delle variabili ambientali e del lungo tempo di risposta dei sensori. Per migliorare la corrispondenza tra i risultati dei globotermometri e dei radiometri netti (assunti come riferimento) sono state proposte delle funzioni di regressione, la cui applicazione ha permesso un significativo miglioramento delle prestazioni del globotermometro nero. La stessa strumentazione è stata utilizzata per calcolare le proprietà radiative delle tecnologie di involucro di diversi edifici mostrando, tuttavia, sostanziali limiti.

## 1. Introduzione alla valutazione del microclima urbano e struttura del report

A causa della progressiva crescita della popolazione mondiale residente in aree urbane [1], negli ultimi decenni l'interesse per la qualità degli spazi esterni urbani, sia in termini di inquinamento atmosferico che di microclima urbano, sta progressivamente aumentando, diventando uno degli obiettivi chiave nella progettazione e pianificazione delle città [2,3]. Condizioni climatiche esterne sfavorevoli possono limitare l'uso di determinate aree, mentre microclimi confortevoli possono incoraggiare l'attività all'aperto e la socializzazione, aumentando il benessere generale della popolazione [4,5].

Per comprendere appieno la percezione che una persona può avere del microclima in un determinato ambiente, è importante applicare un approccio multidisciplinare che valuti l'effetto combinato delle condizioni atmosferiche (es., temperatura dell'aria, velocità del vento, ecc.), degli effetti fisiologici (es., influenza del clima, inquinamento dell'aria, ecc.) e dei fattori psicologici (es., adattamento, aspettative, ecc.) [6–9].

La valutazione della percezione termica in ambienti esterni, rispetto a quella in ambienti interni, è una branca di ricerca relativamente nuova, priva di uno standard internazionalmente riconosciuto che ne regoli la procedura di valutazione sperimentale [10]. I modelli sviluppati per l'analisi del microclima in ambiente interno, infatti, non sono sempre in grado di fornire risultati coerenti quando impiegati in ambienti esterni, a causa della complessità del contesto ambientale e della variabilità (in termini spaziali e temporali) delle condizioni climatiche [11,12]. Tuttavia, la temperatura dell'aria, la velocità del vento, l'umidità relativa e i flussi radiativi ad onde corte ed onde lunghe emergono, secondo numerosi studi [5,13-16], come i parametri fondamentali nella definizione delle condizioni microclimatiche in aree esterne. In particolare, in condizioni di cielo terso, lo scambio radiativo rappresenta il termine che maggiormente condiziona il bilancio termico tra una persona e l'ambiente circostante [16,17]. In questo contesto, per valutare la complessità delle condizioni microclimatiche in un ambiente, risulta essenziale la scrittura di un'equazione di bilancio che descriva tutti i flussi energetici coinvolti nello scambio termico tra il corpo umano e l'ambiente circostante. Nella scrittura di tale modello, i flussi termici ( $\dot{Q}_i$ , si veda la lista dei simboli per lo specifico flusso termico) sono assunti positivi se entranti nel corpo e negativi se uscenti; il tasso metabolico ( $M$ ) è sempre assunto positivo mentre la densità di lavoro ( $\dot{W}$ ) è considerata positiva se effettuata dal corpo verso l'ambiente circostante e negativa se effettuata dall'ambiente circostante verso il corpo:

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

Dal punto di vista del bilancio termico del corpo umano, lo scambio conduttivo non svolge tipicamente un ruolo significativo, a differenza dei flussi termici convettivi e radiativi che ne determinano un effetto apprezzabile [16,17]. Lo scambio termico convettivo è governato dai valori di temperatura dell'aria e di velocità del vento, variabili le cui metodologie di misura sono ben descritte da standard internazionali [18–25]. Al contrario, lo scambio radiativo risulta più difficile da analizzare per la presenza di numerosi componenti di flusso ad onde corte e lunghe. I flussi radiativi possono variare rapidamente in un ambiente esterno a causa della variabilità delle condizioni climatiche e possono essere fortemente influenzati dalla presenza di superfici assorbenti, riflettenti o emmissive presenti nelle vicinanze [8].

Come già descritto nel precedente report, per semplificare lo studio degli scambi termici radiativi tra una persona e l'ambiente, è stato introdotto il concetto di Temperatura Media Radiante ( $T_{mr}$ ) [5,26–28]. La  $T_{mr}$  viene definita come “la temperatura uniforme di una cavità immaginaria costituita da superfici nere, in cui lo scambio termico radiativo cui è soggetto il corpo umano equivale allo scambio termico per irraggiamento dello stesso corpo nell'ambiente reale non uniforme” [29].

Dunque, la  $T_{mr}$  riassume in un unico termine l'effetto di tutti i flussi radiativi (incidenti e riflessi, diretti e diffusi, a onde corte ed onde lunghe) provenienti da tutte le superfici circostanti il corpo, cielo e terreno inclusi [30], e per questa ragione rappresenta un parametro chiave per la valutazione del bilancio termico

tra corpo e ambiente circostante. Inoltre, la  $T_{mr}$  viene impiegata nella formulazione di diversi indici di valutazione del microclima come il **PET** (Physiological Equivalent Temperature) [31], lo **UTCI** (Universal Thermal Climate Index) [32] o il **WBGT** (Wet Bulb Globe Temperature) [33].

Malgrado la sua importanza, però, non esiste ancora a livello internazionale uno standard che definisca una metodologia di misura sperimentale della  $T_{mr}$  in ambienti urbani esterni. Secondo la letteratura scientifica il metodo più accurato è quello descritto dallo standard tedesco VDI 3787 [34], che prevede l'utilizzo di tre radiometri netti orientati secondo le tre direzioni spaziali [4,13]. Nonostante l'accuratezza, l'impiego su scala urbana di questi sensori è spesso ostacolato dal loro elevato costo [28,35].

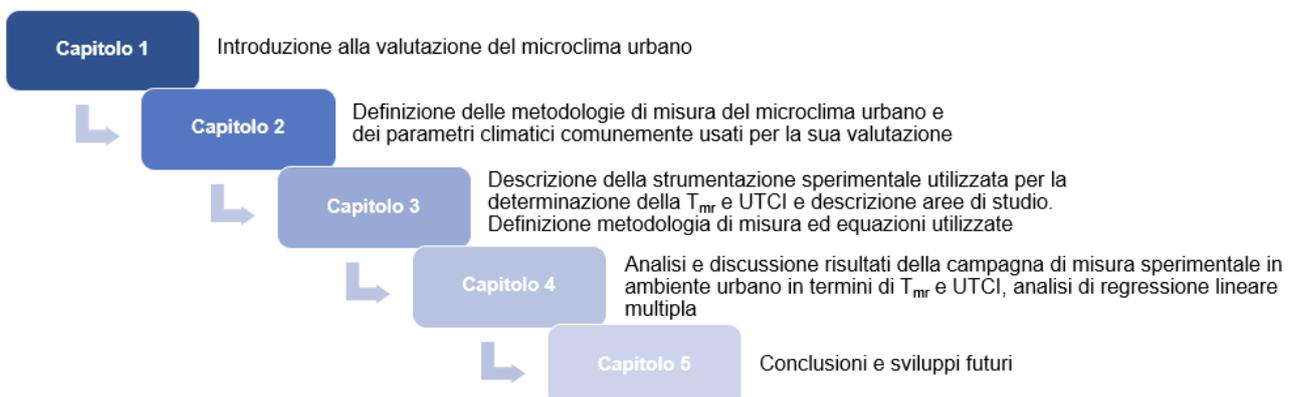
Per superare le limitazioni imposte dai radiometri netti, in numerosi studi è stato proposto l'utilizzo dei globotermometri come tecnica più economica per la stima della  $T_{mr}$  in condizioni esterne [4,13,28,30,36]. I globotermometri sono tuttavia sensori introdotti originariamente per valutazioni in ambienti interni [37–39] e la loro accuratezza in condizioni esterne è ancora oggetto di studio.

In questo contesto, lo scopo della presente ricerca è quello di fornire informazioni circa l'effettiva possibilità di sostituire i radiometri netti con i globotermometri per il calcolo della  $T_{mr}$  e la valutazione del microclima in ambienti esterni. Il presente documento offre i risultati di un'estesa campagna sperimentale volta al confronto dei valori della  $T_{mr}$  calcolati a partire dalle misure di tre radiometri netti e di due diversi globotermometri, ottenute in diversi siti e condizioni. In particolare, sono stati impiegati un globotermometro nero standard di rame (con diametro di 150 mm) ed un globotermometro grigio opaco di rame (con diametro di 50 mm).

Poiché la ricerca svolta è finalizzata alla definizione di una metodologia di calcolo della  $T_{mr}$  alternativa a quella che prevede l'utilizzo dei radiometri netti, sono state proposte delle semplici funzioni correttive, frutto di un'analisi di regressione lineare, che consentono di incrementare l'accuratezza della  $T_{mr}$  calcolata tramite le misure dei globotermometri.

Inoltre, con l'obiettivo di valutare il microclima urbano, il confronto tra metodologie di misura e calcolo della  $T_{mr}$  è stato esteso all'effetto che determinano sull'indice **UTCI**.

Come riportato in *Figura 1*, il *Capitolo 2* del presente documento riporta le metodologie di misura del microclima urbano e dei parametri climatici comunemente usati per la sua valutazione. Il *Capitolo 3* descrive la metodologia di misura e la strumentazione sperimentale utilizzata durante la campagna di misura effettuata nel 2021 e necessaria alla determinazione della temperatura media radiante e alla valutazione del microclima urbano esterno. I risultati della campagna sperimentale e il loro approfondimento attraverso analisi di correlazione con le variabili meteorologiche, oltreché la proposta di funzioni empiriche in grado di migliorare la corrispondenza tra i valori della  $T_{mr}$  calcolati a partire dalle misure di tre radiometri netti e di due diversi globotermometri, e la valutazione delle proprietà radiative delle superfici di involucro testate sono riportate all'interno del *Capitolo 4*. Infine, nel *Capitolo 5* sono contenute le conclusioni e gli sviluppi futuri del presente lavoro.



**Figura 1. Struttura del report**

## 2. Valutazione del microclima urbano

### 2.1 Valutazione della Temperatura Media Radiante

Il concetto di Temperatura media radiante è stato introdotto con lo scopo di riassumere in un unico valore (misurato in °C o K) l'effetto complessivo dello scambio termico radiativo tra il corpo umano e l'ambiente circostante.

Fanger [6] propose una metodologia teorica per il calcolo della  $T_{mr}$  (Equazione 2) basata sulla partizione dell'ambiente circostante il corpo in  $n$  superfici isoterme, ciascuna delle quali identificabile tramite la propria temperatura  $T_i$  ed emissività  $\varepsilon_i$ . In questo modello la posizione e l'orientamento del corpo nello spazio sono modellati tramite i fattori di vista  $F_i$  e il fattore  $f_p$ , funzione dell'altezza solare e della postura del corpo. Infine, gli altri parametri considerati all'interno dell'equazione di Fanger sono i flussi radiativi ad onde lunghe  $L_i$ , la radiazione diffusa ad onde corte  $K_{i,diff}$  e la radiazione solare diretta  $I$ :

$$T_{mr} = \left[ \frac{1}{\sigma} \cdot \left( \sum_{i=1}^n L_i F_i + \frac{\alpha_k}{\varepsilon_p} \sum_{i=1}^n K_{i,diff} F_i + \frac{\alpha_k}{\varepsilon_p} f_p I \right) \right]^{0,25} - 273,15 \quad [^{\circ}C] \quad (2)$$

Tuttavia, l'applicazione pratica di questa procedura in un ambiente esterno richiede diverse semplificazioni, principalmente legate al calcolo dei fattori di vista  $F_i$  in un contesto urbano complesso [40]: la caratterizzazione della relazione geometrica tra il corpo e l'ambiente circostante risulta essere impraticabile poiché, in principio, dovrebbe considerare tutte le differenti parti del corpo (ciascuna con la propria temperatura ed emissività) e la loro posizione nello spazio [41].

Per tutti questi motivi, nel corso degli anni sono state sviluppate diverse metodologie semplificate per il calcolo della  $T_{mr}$  in ambienti urbani, basate su misurazioni effettuate in campo [4,5,13] oppure su software di modellazione [14,42,43], seppure non sia ancora stato elaborato uno standard internazionale che definisca una procedura condivisa per la sua valutazione sperimentale.

#### 2.1.1 Radiometri Netti

Secondo la letteratura scientifica la metodologia più accurata per la valutazione sperimentale della  $T_{mr}$  in ambienti esterni si basa sulla misura diretta dei flussi radiativi, ad onde corte e lunghe, lungo le tre direzioni spaziali [4,13]. Tale tecnica, introdotta da Höpfe [44] e descritta dallo standard tedesco VDI 3787 [34], prevede l'impiego di tre radiometri netti (Figura 2) e l'applicazione di un'equazione derivante direttamente dal modello teorico di Fanger [6].

L'installazione di tre radiometri netti è necessaria per la misurazione simultanea dei flussi radiativi provenienti dalle quattro direzioni laterali (Nord, Sud, Est e Ovest) e dalle due verticali (dall'alto e dal basso). Gli strumenti devono essere installati ad un'altezza di 1,1 m, ovvero la posizione approssimativa del centro di gravità di una persona in piedi [34]. La Figura 2 mostra le due configurazioni (mobile e fissa) di misura utilizzate per la campagna sperimentale descritta nel presente rapporto tecnico.

I radiometri netti sono strumenti costituiti da due coppie di sensori, ciascuna composta da un piranometro e un pirgeometro, posizionate in direzioni opposte. I piranometri hanno il compito di misurare la densità di flusso della radiazione solare (in un range di lunghezza d'onda da 0,3  $\mu\text{m}$  a 33  $\mu\text{m}$ ) mentre i pirgeometri misurano la densità di flusso della radiazione infrarossa (ovvero avente lunghezza d'onda compresa tra 4,53  $\mu\text{m}$  e 1003  $\mu\text{m}$ ). In caso di installazione orizzontale (es., sensore 1 in Figura 2), un piranometro ed un pirgeometro vengono posizionati orientati verso l'alto, per rilevare la radiazione solare e infrarossa proveniente dalla volta celeste, l'altra coppia di sensori, orientata verso il basso, misura la radiazione solare e infrarossa riflessa dal terreno.



**Figura 2. Set-up sperimentale per la rilevazione simultanea dei flussi radiativi: tre radiometri netti sono installati secondo le tre direzioni spaziali.**

Dall'output di ciascun radiometro netto è quindi possibile ricavare i flussi radiativi a bassa lunghezza d'onda ( $K_i$ ) e ad elevata lunghezza d'onda ( $L_i$ ) provenienti da ciascuna direzione spaziale. Questi risultati possono essere impiegati per il calcolo della densità di flusso media radiante assorbita dal corpo  $S_{tr}$  (Equazione 3):

$$S_{tr} = \alpha_k \sum_{i=1}^6 K_i F_i + \epsilon_p \sum_{i=1}^6 L_i F_i \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (3)$$

Dove, secondo lo standard VDI 3787 [34]:

- $\alpha_k$  rappresenta il coefficiente di assorbimento dei flussi radiativi a basse lunghezze d'onda e viene assunto pari a 0,7;
- $\epsilon_p$  rappresenta l'emissività del corpo umano. Secondo la legge di Kirchhoff (valida per un corpo grigio nello spettro infrarosso),  $\epsilon_p$  è pari al coefficiente di assorbimento dei flussi radiativi ad elevate lunghezze d'onda, e viene assunto pari al valore standard di 0,97;
- $F_i$  ( $i=1-6$ ) sono i fattori di vista tra il corpo umano e le superfici circostanti, i cui valori dipendono dalla posizione e dall'orientamento della persona nello spazio [6].  $F_i$  è assunto pari a 0,22 per i quattro flussi laterali e 0,06 per i due flussi verticali.

I valori proposti dallo standard tedesco [34] per i fattori di vista sono gli stessi proposti da Höpfe [44] per una persona in piedi, o in cammino, la cui forma viene assimilata a quella di un parallelepipedo a base quadrata con rapporto altezza/lunghezza pari a 3,5. Se la persona, anziché in piedi, si trova seduta la sua rappresentazione geometrica può essere semplificata in una sfera. In questo caso i flussi radiativi vengono pesati ugualmente, e i fattori di vista sono assunti pari a 0,167 per tutte le direzioni [4].

Noto il valore di  $S_{tr}$ , è possibile calcolare la temperatura media radiante  $T_{mr}$  applicando l'Equazione 5, ottenuta partendo dall'applicazione della legge di Stephan-Boltzmann per un corpo grigio (Equazione 4):

$$S_{tr} = \epsilon_p \sigma T_{mr}^4 \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (4)$$

$$T_{mr} = \sqrt[4]{\frac{S_{tr}}{\epsilon_p \sigma}} - 273,15 \quad [^{\circ}C] \quad (5)$$

Tuttavia, come già accennato, i radiometri netti presentano un costo elevato e il loro utilizzo su larga scala non sempre risulta pratico o conveniente [40]. Inoltre, questa tecnica di misura è espressa esclusivamente da uno standard tedesco [34] e non esistono linee guida internazionali che ne regolino la procedura di applicazione.

### 2.1.2 Globotermometri

Un sistema alternativo e meno costoso per la stima della  $T_{mr}$  è quello basato sull'utilizzo simultaneo di un globotermometro e di un anemometro [4]. Il globotermometro è uno strumento costituito da una sonda di temperatura (tipicamente una termoresistenza PT100) posizionata all'interno di una sfera cava [45]. Tali sensori furono introdotti per la prima volta nel 1932 da Vernon [46] e sviluppati per applicazioni in ambienti interni [38,45]. Il globotermometro standard inizialmente proposto da Vernon è costituito da una sfera di rame dal diametro di 150 mm e spessore di 0,4 mm ricoperta da vernice nera opaca [46] ma negli anni, sono stati sviluppati numerosi modelli alternativi con diverso diametro, spessore o materiale [13].

Recentemente, l'impiego dei globotermometri è stato esteso anche ad ambienti esterni, come alternativa più economica ai radiometri netti [4,47,48]. Tuttavia, l'accuratezza di questi strumenti in ambienti urbani complessi ed in diverse condizioni climatiche rappresenta ancora un'incognita [4,13,48].

La teoria del globotermometro è riportata nel lavoro di Kuehn et al. [45]: la temperatura registrata all'interno del globo ( $T_g$ ), è determinata dall'effetto combinato di scambi termici convettivi e radiativi e dunque dipende dal valore della temperatura dell'aria  $T_a$ , della velocità del vento  $v_a$  e della temperatura media radiante  $T_{mr}$ . Quando il globotermometro raggiunge una condizione di equilibrio termico la temperatura  $T_g$ , misurata dal sensore interno, risulta pari alla temperatura del guscio esterno e dell'aria che esso contiene [48]. Inoltre, poiché gli scambi termici convettivi e radiativi sono bilanciati,  $T_g$  rappresenta la media pesata della temperatura media radiante e della temperatura dell'aria [4,13].

Note le caratteristiche del globo (emissività  $\epsilon_g$  e diametro  $D$ ),  $T_g$ ,  $T_a$  e  $v_a$  è possibile calcolare la  $T_{mr}$  come suggerito dallo standard ISO 7726 [49] (Equazione 6):

$$T_{mr} = \sqrt[4]{(T_g + 273,15)^4 + \frac{h_{cg}}{h_{rg}}(T_g - T_a) - 273,15} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (6)$$

Dove:

- $T_g$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] è la temperatura assunta dal globo in condizioni di equilibrio termico;
- $T_a$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] è la temperatura dell'aria;
- $h_{cg}$  [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ] è il coefficiente di scambio termico convettivo. Lo standard ISO 7726 [49] propone due diverse espressioni per questo parametro, una da utilizzare nel caso di condizioni di convezione naturale,  $h_{cg} = 1,4 \left( \frac{|T_a - T_g|^{0,25}}{D^{0,25}} \right)$ , l'altra nel caso di convezione forzata  $h_{cg} = \frac{6,3 \cdot v_a^{0,6}}{D^{0,4}}$ ;
- $h_{rg} = \epsilon_g \sigma$  [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ] è il coefficiente di scambio termico radiativo.

Poiché le espressioni proposte per  $h_{cg}$  derivano da analisi empiriche, in letteratura [10,48] sono presenti diverse alternative, che conducono, di conseguenza, a diverse stime della  $T_{mr}$ . In caso di ambienti caratterizzati da condizioni di elevato stress termico, la norma ISO 7726 [49] suggerisce l'impiego del coefficiente di scambio termico per convezione forzata [49].

L'Equazione 6 è valida qualora vengano rispettate due condizioni [49]: la  $T_a$  deve essere compresa tra 0  $^{\circ}\text{C}$  e 40  $^{\circ}\text{C}$  e il numero di Reynolds  $Re$  deve assumere valori nel range  $10^2$  e  $10^5$ .

Nonostante i vantaggi economici e la minor complessità degli strumenti, l'utilizzo dei globotermometri per la valutazione della  $T_{mr}$  in microclimi urbani presenta numerose limitazioni. In particolare [4,17,48]:

- in ambienti esterni le variabili meteorologiche, come  $T_a$ ,  $v_a$  o il campo radiativo, sono soggette a rapide e significative variazioni. Allo stesso tempo, un globotermometro nero standard presenta una notevole inerzia termica, dovuta al materiale con cui viene realizzato ed alle sue dimensioni, risultante in un tempo di risposta di almeno 20 minuti [49]. Dunque, quando impiegato in ambienti esterni, un

globotermometro standard raggiunge raramente condizioni di equilibrio, con conseguente stima incerta della  $T_{mr}$ ;

- la forma sferica dei globotermometri pesa ugualmente i flussi radiativi provenienti da tutte le direzioni, fornendo una buona approssimazione del corpo seduto ma non in piedi (posizione in cui i flussi laterali sono dominanti);
- il rivestimento di vernice nera di un globo standard tende a sovrastimare l'assorbimento della radiazione a basse lunghezze d'onda, rispetto all'assorbimento tipico di cute o indumenti.

Per risolvere questi problemi sono state proposte diverse soluzioni: ad esempio, il tempo di risposta dei globi può essere ridotto riducendo le sue dimensioni [4,13] o la sua capacità termica [47,48] (cambiando materiale o spessore); oppure, le proprietà radiative di cute e indumenti possono essere imitate con utilizzo di una vernice grigio opaca [29,49].

In questo studio viene analizzato il comportamento di due differenti globotermometri: uno è il globo nero di rame standard (con diametro di 150 mm), l'altro è un globo grigio di rame (con diametro di 50 mm).

## 2.2 Valutazione dello *UTCI* e del microclima in ambiente esterno

In letteratura sono presenti più di cento indici diversi per la valutazione del microclima in ambiente esterno [50], ma la maggior parte di essi non presenta una stretta relazione con la risposta fisiologica umana [32]. Lo *UTCI* (Universal Thermal Climate Index), sviluppato da Jendritzky et al. [32], è invece un indice capace di coprire l'intero spettro degli scambi termici tra corpo e ambiente e risulta valido in diverse condizioni climatiche e stagioni. La definizione dello *UTCI* è basata su un modello termo-fisiologico multinodale, capace di predire sia gli effetti termici globali (relativi all'intero corpo) che gli scambi termici locali a livello della cute [51]. L'universalità di questo indice è legata alla sua applicabilità ad un ampio spettro di condizioni in cui le variabili climatiche sono note ma le caratteristiche di una persona e la sua attività sono sconosciute. Il modello include infatti la rappresentazione di una "persona standard", la cui superficie corporea è pari a 1,85 m<sup>2</sup>, il peso a 73,4 kg e la percentuale di massa grassa è del 14% [51], e considera il comportamento stagionale, in termini di abbigliamento dei cittadini europei [32].

Lo *UTCI* è calcolato tramite un'equazione le cui incognite sono: la temperatura dell'aria  $T_a$ , l'umidità relativa  $RH$ , la velocità del vento  $v_a$  e la temperatura media radiante  $T_{mr}$ . Una volta ottenuto, il valore dello *UTCI* viene associato ad una categoria di stress termico (*Tabella 1*), che cerca di tradurre l'indice nella sensazione che una persona proverebbe nell'ambiente considerato.

Per tutte queste ragioni, nelle analisi effettuate si è scelto di adottare lo *UTCI* come indice di riferimento per la valutazione del microclima urbano. In particolare, lo *UTCI* è stato valutato a partire dai valori della  $T_{mr}$  ottenuti tramite le metodologie descritte in precedenza, per promuovere un confronto tra esse e indagare il loro effetto sulla valutazione del microclima urbano.

**Tabella 1. *UTCI* e categorie di stress termico**

<b>UTCI [°C]</b>	<b>Categoria di stress termico</b>
Superiore a 46	Stress da caldo estremo
Da +38 a +46	Stress da caldo molto forte
Da +32 a +38	Stress da caldo forte
Da +26 a +32	Stress da caldo moderato
Da +9 a +26	Nessuno stress termico
Da 0 a +9	Stress da freddo leggero
Da -13 a 0	Stress da freddo moderato
Da -27 a 0	Stress da freddo forte
Da -40 a -27	Stress da freddo molto forte
Inferiore a -40	Stress da freddo estremo

### 3 Metodologia di misura e descrizione della campagna sperimentale

Lo studio qui riportato approfondisce il confronto tra due diverse tecniche di misura per la valutazione sperimentale della  $T_{mr}$  in ambiente esterno. In particolare, le tecniche analizzate hanno visto l'implementazione di:

- Tre radiometri netti;
- Un globotermometro nero standard (diametro 150 mm);
- Un globotermometro grigio (diametro 50 mm).

Il confronto è stato effettuato con l'obiettivo di definire una metodologia, alternativa alla rilevazione dei flussi radiativi tramite radiometri netti, per la valutazione in campo della  $T_{mr}$ . Per questo motivo l'accuratezza dei globotermometri nella valutazione di questo indice è stata valutata assumendo come valore di riferimento la  $T_{mr}$  calcolata con l'impiego dei radiometri netti e l'errore è stato definito come deviazione rispetto a tale valore.

Le emissività del globo nero e del globo grigio sono state ricavate attraverso analisi di laboratorio volte alla caratterizzazione delle proprietà termiche ed ottiche della vernice utilizzata per il rivestimento esterno della calotta di rame. Inoltre, al fine di incrementare le prestazioni dei globotermometri nella valutazione della  $T_{mr}$ , sono state proposte delle funzioni empiriche che hanno consentito di migliorare la corrispondenza tra la  $T_{mr}$  ottenuta con le misurazioni dei globi e quella ottenuta con l'impiego dei radiometri netti.

Il confronto tra metodologie si è poi spostato sulla valutazione dello **UTCI**. Poiché la  $T_{mr}$  calcolata utilizzando i radiometri netti è stata assunta come riferimento, lo **UTCI** ottenuto tramite tale  $T_{mr}$  è stato a sua volta assunto come valore di riferimento per la valutazione di tale indice.

Grazie al proseguimento della campagna sperimentale, svolta in diversi siti dell'area metropolitana di Milano nei mesi primaverili ed estivi del 2021, è stato possibile ampliare il database di misure su cui svolgere le analisi. A differenza di precedenti studi presenti in letteratura, l'area analizzata non è stata infatti limitata ad un singolo sito di misura, ma ha incluso in tutto diversi luoghi: 8 tipici ambienti urbani caratterizzati dalla presenza circostante, su almeno tre lati, di edifici con superfici d'involucro realizzate in materiali differenti (es., intonaco, cemento, pareti verdi, ecc.), 3 condizioni di campo aperto e 2 definite di campo semi-aperto. In questo modo è stato possibile analizzare la risposta della strumentazione in un ampio range di condizioni.

Le analisi sono state condotte elaborando i dati raccolti nelle campagne sperimentali sia del 2021 che del 2020, analizzando dapprima i dati delle prove di misura effettuate in siti di misurazione definiti come campo urbano (*Paragrafi 4.1 - 4.3*), caratterizzati dalla presenza di edifici di svariata altezza su almeno tre lati della strumentazione e ad una distanza massima di 30 m da essa, poiché rappresentante la tipica morfologia di un ambiente urbano. Successivamente, le analisi sono state estese al campo aperto (*Paragrafo 4.4.1*) e semi-aperto (*Paragrafo 4.4.2*) per testare le performance del modello di regressione identificato con misure effettuate in diverse condizioni morfologiche.

Durante l'intera campagna sperimentale 2020-2021 i dati sono stati registrati come il valore medio sul singolo minuto di campionamenti effettuati ogni 10 secondi. Tuttavia, si è scelto di svolgere le analisi per tempi di elaborazione pari a 1-min, 5-min, 10-min, 15-min e 20-min, al fine di indagare la possibile presenza di un tempo più adeguato all'obiettivo di studio. Per ciascun tempo di elaborazione i dati sono stati ottenuti come media, nel tempo considerato, dei valori registrati al minuto. Una volta ottenuto il database di studio nei vari tempi di elaborazione, i dati sono stati analizzati al fine di identificare le differenze tra le diverse tecniche di misura, in termini di  $T_{mr}$  e **UTCI**, e la possibile influenza delle variabili meteorologiche sulla risposta dei globotermometri. La *Figura 3* riassume le attività svolte.

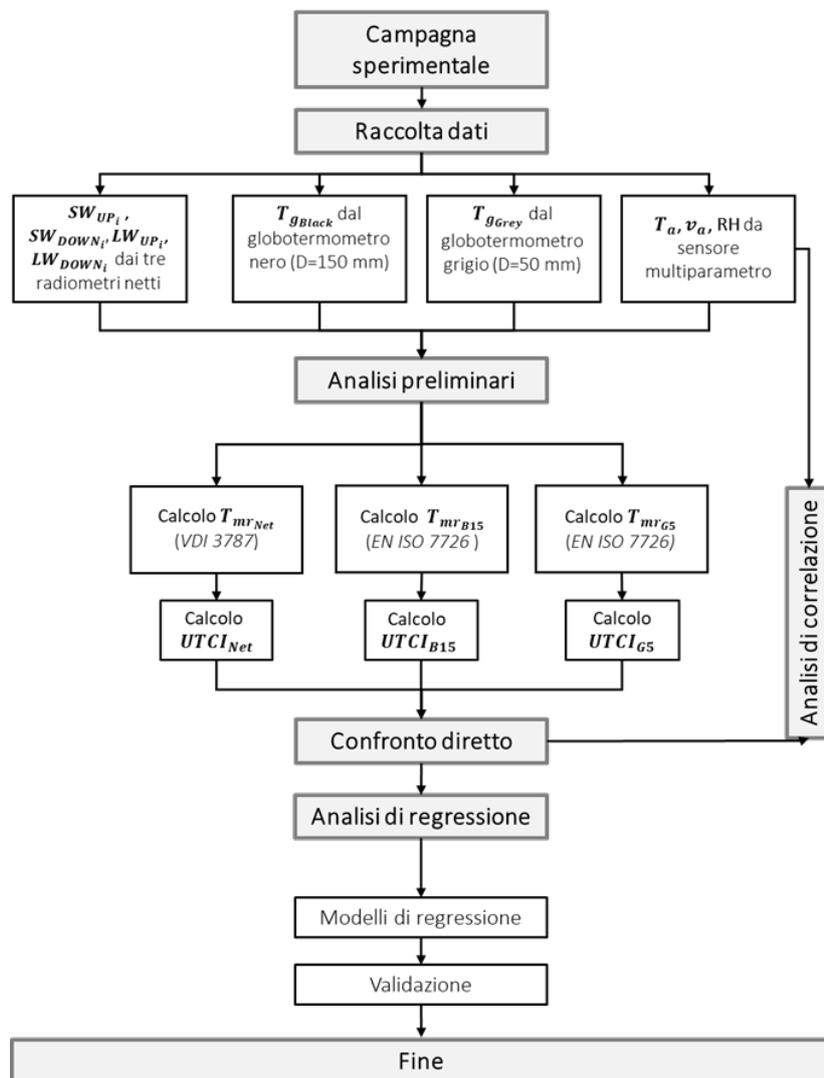


Figura 3. Schema delle attività svolte e approccio metodologico utilizzato

### 3.1 Campagna Sperimentale

#### 3.1.1 Area di studio

La campagna sperimentale del 2021 è stata condotta durante marzo, giugno e luglio 2021, mentre quella del 2020 tra giugno ed ottobre, come già detto, in diversi siti dell'area metropolitana di Milano (45°28'1"N, 9°11'24"E). Secondo la classificazione climatica di Köppen [52], Milano rientra nella categoria climatica *Cfa*, ovvero clima umido subtropicale, caratterizzata da estati calde ed umide ed inverni miti. La *Tabella 2* riporta il valore medio, il minimo, il massimo e la deviazione standard delle principali variabili meteorologiche, registrati durante l'intera campagna 2020-2021.

Tabella 2. Range di variazione delle principali variabili meteorologiche misurati a Milano durante la campagna sperimentale 2020-2021

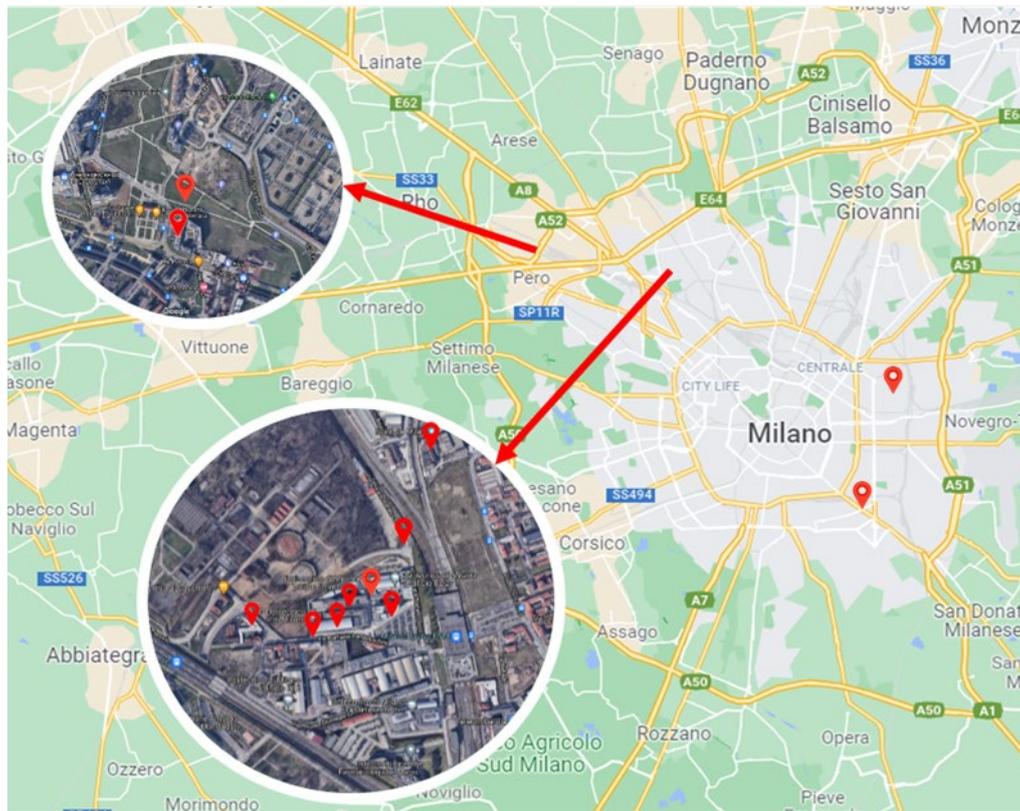
	Radiazione solare globale	Temperatura dell'aria	Velocità del vento	Umidità relativa
<i>UdM</i>	$W/m^2$	$^{\circ}C$	$m/s$	%
Valore medio	448,9	26,3	1,1	47,8
Dev. Std	342,2	5,9	0,7	12,3
Minimo	0	5,1	0	20
Massimo	1263	37	6,9	84,2

Poiché la  $T_{mr}$  è fortemente influenzata dalla geometria e dalle proprietà radiative delle superfici circostanti [8], le analisi sono state svolte dapprima per i contesti urbani complessi, ovvero, in presenza di edifici e strutture realizzati con diversi materiali su almeno tre lati della strumentazione e ad una distanza massima da essa di 30 m, così da analizzare il comportamento della strumentazione sotto varie condizioni al contorno, e poi in contesti urbani definiti aperti e semi-aperti.

La campagna sperimentale condotta nel 2021 ha ampliato notevolmente il database di dati sui quali sono state svolte le analisi, nel 2021 le giornate di misura svolte in diversi siti dell'area metropolitana milanese sono state 21. La *Tabella 3* riassume i dettagli degli ambienti testati tra il 2020 e il 2021, riportando in grassetto le misure effettuate nel 2021, mentre la *Figura 4* riporta una mappa con l'immagine satellitare di tutti i siti di misura.

**Tabella 3. Riassunto misure sperimentali effettuate nel biennio 2020-2021 in ambiente urbano complesso, aperto e semi-aperto**

Sito	Data e ora della misurazione	Involucro edilizio delle superfici prossime alla strumentazione
<b>Contesto urbano complesso</b>		
Milano, Via Lambruschini 4	<b>05/07/2021 10:20-16:40</b>	<u>Orizzontale</u> : cemento chiaro spazzolato <u>Verticale</u> : intonaco chiaro
Milano, Via Lambruschini 36	<b>06/07/2021 14:00-17:15</b>	<u>Orizzontale</u> : cemento battuto <u>Verticale</u> : intonaco chiaro
Milano, quartiere Bovisa	18/09/2020 11:20-17:15	<u>Orizzontale</u> : cemento battuto <u>Verticale</u> : lastre di gres porcellanato
Milano, Cascina Merlata	01/09/2020 11:30-17:10	<u>Orizzontale</u> : autobloccanti <u>Verticale</u> : intonaco azzurro
Milano, quartiere Bovisa	09/09/2020 10:40-17:15	<u>Orizzontale</u> : cemento battuto <u>Verticale</u> : lastre gres porcellanato/ parete verde
	<b>08/07/2021 9:00-15:05</b>	
Milano, quartiere Bovisa	17/09/2020 11:10-17:15	<u>Orizzontale</u> : autobloccanti <u>Verticale</u> : parete verde
	<b>07/07/2021 10:05-17:15</b>	
Milano, Via Bovisasca 57	06/10/2020 10:10-17:45	<u>Orizzontale</u> : sanpietrini <u>Verticale</u> : parete verde
Milano, quartiere Bovisa	<b>Dal 09/07/2021 10:00 Al 11/07/2021 21:15</b>	<u>Orizzontale</u> : cemento spazzolato <u>Verticale</u> : lamiera ondulata
<b>Campo aperto</b>		
Via Feltrinelli 16, Milano	<b>Dal 23/03/2021 11:20 Al 26/03/21 18:40</b>	<u>Orizzontale</u> : membrana ardesiata
Cascina Merlata, Milano	<b>23/07/2021 10:30-17:35</b>	<u>Orizzontale</u> : manto erboso
Via Sile 14, Milano	<b>Dal 14/07/2021 11:50 Al 16/07/2021 21:10</b>	<u>Orizzontale</u> : manto erboso-tetto verde
<b>Campo semi-aperto</b>		
Via G. Ponzio, Milano	<b>Dal 29/06/2021 11:00 Al 01/07/2021 21:15</b>	<u>Orizzontale</u> : manto erboso-tetto verde <u>Verticale</u> : piastrelle in ceramica
Quartiere Bovisa, Milano	<b>Dal 14/06/2021 9:40 Al 17/06/2021 14:55</b>	<u>Orizzontale</u> : cemento <u>Verticale</u> : lastre gres porcellanato/vetro



**Figura 4. Mappa dell'area metropolitana di Milano con immagine aerea dei siti di misura testati tra il 2020 e il 2021**

### 3.1.2 Set-up sperimentale

Come detto precedentemente, la strumentazione impiegata comprende tre radiometri netti, un globotermometro nero di rame standard ( $D=150\text{ mm}$ ), un globotermometro grigio di rame ( $D=50\text{ mm}$ ) e un sensore multiparametro, impiegato per la misura delle principali variabili meteorologiche. La *Tabella 4* riporta i parametri misurati durante la campagna sperimentale, l'accuratezza e la risoluzione di ciascun sensore adottato.

**Tabella 4. 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	$-40 \div +80\text{ °C}$	$\pm 0,3\text{ °C}$	$0,1\text{ °C}$
	Velocità del vento	$v_a$ m/s	Ultrasonico	$0 \div 60\text{ m/s}$	$\pm 0,3\text{ m/s}$	$0,01\text{ m/s}$
	Direzione del vento	$DIR_a$ °	Ultrasonico	$0 \div 360\text{ °}$	$\pm 3\text{ °}$	$0,1\text{ °}$
	Umidità relativa	RH %	Capacitivo	$0 \div 100\%$	$\pm 3\%$	$0,10\%$
	Pressione	$P_{atm}$ hPa	Piezoresistivo	$600 \div 1100\text{ hPa}$	$\pm 0,5\text{ hPa}$	$0,1\text{ hPa}$
	Irradianza solare globale	$I_{sol}$ $W/m^2$	Fotodiodo	$0 \div 2000\text{ W/m}^2$	$\pm 5\%$	$1\text{ W/m}^2$
Radiometri netti	Flussi radiativi a bassa lunghezza d'onda	$SW_i$ $W/m^2$	Piranometro	$0 \div 2000\text{ W/m}^2$	$\pm 5\%$	$1\text{ W/m}^2$
	Flussi radiativi a elevata lunghezza d'onda	$LW_i$ $W/m^2$	Pirgeometro	$-300 \div 300\text{ W/m}^2$	$\pm 5\%$	$1\text{ W/m}^2$
Globotermometro (grigio e nero)	Temperatura globotermometrica	$T_g$ °C	Resistenza PT100	$-40 \div +80\text{ °C}$	$\pm 0,15\text{ °C}$	$0,01\text{ °C}$

Durante l'intera campagna gli strumenti di misura sono stati posizionati secondo due specifiche configurazioni, una fissa e una mobile, illustrate in *Figura 5*, con l'ausilio di un'attrezzatura di supporto composta da un treppiede (*Figura 5a*) o un carrello (*Figura 5b*) e un palo di altezza regolabile. Infine, per ricevere e processare i dati si è scelto un Alpha Log datalogger della LSI-LASTEM [53].

La campagna sperimentale del 2020 è stata condotta utilizzando la configurazione fissa, mentre il carrello mobile è stato progettato e montato per essere utilizzato durante la campagna sperimentale condotta nel 2021 al fine di rendere più agevole e comodo il trasporto della strumentazione nei vari siti di misura e in prossimità di diverse superfici di involucro.

I tre radiometri netti sono stati montati su due aste di metallo, fissate ad un'altezza di 1,1 m e allineate lungo le tre direzioni spaziali. Se posizionati in street canyon, il radiometro identificato dal numero 2 (vedi *Figura 2*) è stato sempre orientato verso la superficie verticale più vicina, ad una distanza di 1 m da essa. Il modello di radiometro netto scelto per la campagna di misura è l'Hukseflux NR01 [54].

In entrambe le configurazioni, i due globotermometri sono stati assicurati al palo con l'impiego di due ulteriori supporti, in modo tale che il loro baricentro fosse ad un'altezza di 1,1 m. Entrambi i globotermometri scelti sono del modello LSI LASTEM EST131 [55]: il globo nero ha un diametro di 150 mm ed è dipinto con una vernice di tipo NEXTEL Velvet Coating 811-21 Optic Black [56], il globo grigio ha un diametro di 50 mm ed è rivestito con la vernice NEXTEL Suede Coating 3101 [57] nel colore S774 Light Grey. Il sensore multiparametro "All-in-one" tipo compatto della LSI LASTEM [58] consente di misurare i restanti parametri meteorologici richiesti per le analisi del microclima in ambiente urbano ( $T_a$ ,  $v_a$ , direzione del vento,  $RH$ ,  $R_{GL}$  e pressione atmosferica  $p_{atm}$ ). Questo strumento è stato posizionato sulla sommità del palo di supporto, per evitare ogni possibile interferenza con gli altri sensori, e direzionato verso Nord, come descritto dal produttore per consentire una corretta caratterizzazione della direzione del vento.

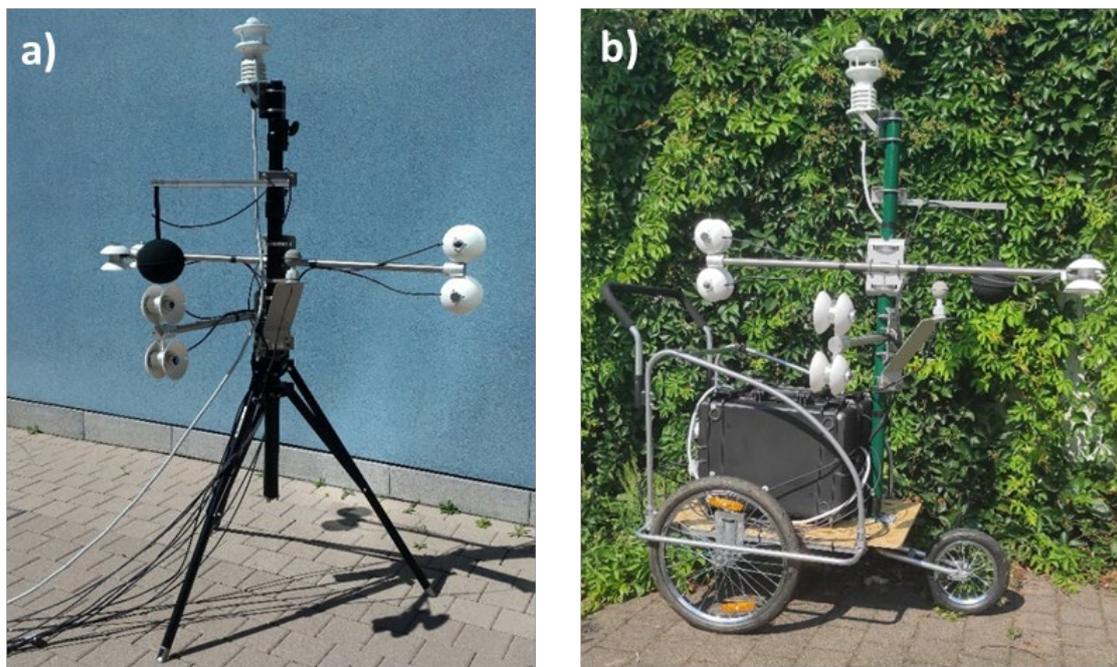


Figura 5. Set-up sperimentale, con treppiede (a) e con carrello sviluppato durante il 2021 (b)

Il calcolo della  $T_{mr}$  tramite globotermometri richiede la conoscenza dell'emissività e del globo stesso (*Equazione 6*): la norma ISO 7726 [49] propone il valore standard di  $\epsilon_g = 0,95$  in caso di vernice nera opaca, ma durante questa ricerca si è scelto di effettuare una dettagliata caratterizzazione delle vernici (nera e grigia) impiegate, al fine di massimizzare l'accuratezza dei risultati. L'analisi è stata svolta presso il laboratorio ThermaLab [59] del Politecnico di Milano e i risultati sono riassunti in Tabella 5.

**Tabella 5. 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 [60]**

Provino vernice	$\rho_{Glo}$ [%]	$\alpha_{Glo}$ [%]	$\rho_{IR}$ [%]	$\alpha_{IR}$ [%]	$\epsilon_{IR}$ [%]
Grigio	24,4	75,6	7,1	92,9	92,9
Nero	2,9	97,1	3,7	96,3	96,3

### 3.2 Ipotesi introdotte

La campagna sperimentale ha permesso l'acquisizione di un esteso database, corrispondente a circa 95 ore di misura distribuite in 12 differenti giorni nel caso di campo urbano complesso, circa 85 ore di misurazione, effettuate in 8 giornate differenti per il campo aperto e circa 94 ore di misurazione, svolte in 7 giornate differenti per il campo semi-aperto. Il database è stato ottenuto escludendo le misure effettuate durante le ore notturne e i dati acquisiti in condizioni di ombreggiamento parziale della strumentazione (ovvero la presenza simultanea di sensori direttamente esposti alla radiazione solare e di sensori in ombra).

La scelta di impiegare le sole rilevazioni diurne è basata sui risultati di precedenti studi [4,13], che identificano la  $R_{GL}$  come una delle variabili maggiormente influenti sul valore della  $T_{mr}$  in ambiente esterno. Poiché durante la notte la radiazione globale tende ad essere nulla, la differenza tra la  $T_{mr}$  stimata a partire misure dei globotermometri e la  $T_{mr}$  di riferimento si riduce notevolmente. Inoltre, gli output rilevati durante condizioni di ombreggiamento parziale non risultano consistenti ai fini di un confronto diretto tra le diverse tecniche di misura. I parametri misurati includono:

- $SW_{UP,i}$ ,  $SW_{DOWN,i}$ ,  $LW_{UP,ir}$ ,  $LW_{DOWN}$ , ovvero i flussi radiativi a bassa lunghezza d'onda ( $SW$ ) e ad elevata lunghezza d'onda ( $LW$ ) lungo le tre direzioni spaziali;
- $T_{g,Black}$ , la temperatura di globo rilevata dal globotermometro nero;
- $T_{g,Grey}$ , la temperatura di globo rilevata dal globotermometro grigio;
- $T_a$ ,  $v_a$ ,  $RH$ ,  $R_{GL}$  sul piano orizzontale, ossia le principali variabili meteorologiche.

Partendo da questi dati è stato possibile calcolare la  $T_{mr}$  secondo le due metodologie descritte nei paragrafi 2.1.1-Radiometri netti e 2.1.2-Globotermometri. In particolare, è fondamentale notare che l'Equazione 6, introdotta dalla norma ISO 7726 [49] per la valutazione della  $T_{mr}$  tramite le misure dei globotermometri, è valida esclusivamente a due condizioni: la  $T_a$  deve variare tra 0°C e 40°C mentre  $Re$  deve essere compreso tra  $10^2$  e  $10^5$ .

Durante il presente studio la temperatura dell'aria si è mantenuta all'interno del range desiderato in tutte le giornate di prova, mentre il  $Re$  non ha soddisfatto la condizione richiesta solo nello 0,2% dei casi, per causa dell'assenza di vento ( $v_a=0$  m/s). Poiché questa percentuale rappresenta una minima frazione dell'intero dataset, l'Equazione 6 è stata considerata attendibile, e dunque adottata nelle analisi. La Tabella 6 riporta il campo di variazione di  $T_a$  e  $Re$  misurato durante la campagna sperimentale.

**Tabella 6. Verifica delle condizioni di validità dell'Equazione 6**

	$T_a$	$Re$ Globo Nero	$Re$ Globo Grigio
UdM	°C	-	-
Valor Medio	26,3	11373	3791
Dev.Std	5,9	6743	2248
Minimo	5,1	0	0
Massimo	37	69000	23000

Infine, poiché la campagna di misura è stata svolta presso vari siti della città di Milano, i risultati possono essere considerati attendibili esclusivamente per condizioni ambientali simili (ovvero climi di tipo *Cfa* [52]); questa e le altre ipotesi adottate sono riassunte nella Tabella 7.

Ciascun giorno della campagna è stato analizzato separatamente, così da poter valutare il comportamento della strumentazione sotto differenti condizioni al contorno: l'accuratezza di ciascun globotermometro è stata valutata tramite una dettagliata analisi dell'errore, inclusiva di un test di correlazione di Pearson tra

l'errore stesso e le principali variabili ambientali. Tale test intende indagare se e quale tipo di correlazione sussiste tra l'errore e  $T_a$ ,  $v_a$ ,  $RH$   $R_{GL}$ . Infine, è stato possibile ricavare delle semplici funzioni, tramite analisi di regressione lineare multipla, in grado di aumentare la corrispondenza tra la  $T_{mr}$  calcolata tramite globotermometri e la  $T_{mr}$  calcolata con i radiometri netti. Tali analisi sono state svolte considerando il database di misure in campo urbano complesso poiché rappresenta le tipiche condizioni morfologiche urbane, successivamente, il modello di regressione è stato esteso alle misure in campo aperto e semi-aperto.

**Tabella 7. Descrizione generale delle ipotesi adottate**

Attendibilità dei risultati	<p><b>I risultati sono attendibili per misurazioni effettuate in ambienti con climi di tipo Cfa</b></p> <p>Durante la campagna sperimentale le variabili meteorologiche registrate hanno assunto valori nei range:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>R_{GL} \in [0 ; 1263] W/m^2</math></li> <li>- <math>T_a \in [5,1 ; 37,0] ^\circ C</math></li> <li>- <math>RH \in [20,0 ; 84,2] \%</math></li> <li>- <math>v_a \in [0 ; 6,9] m/s</math></li> </ul>
$T_{mr}$ di riferimento	La $T_{mr}$ calcolata con l'impiego dei tre radiometri netti è stata assunta come riferimento
Caratteristiche dei siti di misura	<p><b>Ambiente urbano complesso</b></p> <p>La strumentazione è sempre stata circondata, su almeno tre lati, da edifici ad una distanza massima di 30 m</p>
Definizione dell'errore in termini di $T_{mr}$ (o <b>UTCI</b> )	<p><b>Deviazione dal valore di riferimento</b></p> <p>Differenza tra la <math>T_{mr}</math> (o lo <b>UTCI</b>) ottenuto con le misurazioni dei globotermometri e la <math>T_{mr}</math> (o lo <b>UTCI</b>) ottenuto tramite le misurazioni dei radiometri netti</p> <p>Errore positivo= sovrastima della <math>T_{mr}</math> (o dello <b>UTCI</b>)</p> <p>Errore negativo= sottostima della <math>T_{mr}</math> (o dello <b>UTCI</b>)</p>
$T_{mr}$ da radiometri netti	<p><b>La <math>T_{mr}</math> è stata calcolata secondo la metodologia introdotta dallo standard VDI 3787:</b></p> $T_{mr} = \left( \frac{F_i(\alpha_k(SW_{UP}+SW_{DOWN})+\epsilon_b(LW_{UP}+LW_{DOWN}))}{\sigma \cdot \epsilon_b} \right)^{0,25} 273,15 \quad [^\circ C]$ <p>Dove:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>\alpha_k = 0,7</math></li> <li>- <math>\epsilon_p = 0,22</math></li> <li>- <math>F_i = 0,06</math> per i flussi laterali</li> <li>- <math>F_i = 0,22</math> per i flussi verticali</li> </ul>
$T_{mr}$ da globotermometri	<p><b>La <math>T_{mr}</math> è stata calcolata secondo la metodologia introdotta dallo standard ISO 7726:</b></p> $T_{mr} = \sqrt[4]{(T_g + 273,15)^4 + \frac{h_{cg}}{\epsilon_g \sigma} \cdot (T_g - T_a) - 273,15} \quad [^\circ C]$ <p>Dove:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>\epsilon_g = 0,963</math> per il globo nero</li> <li>- <math>\epsilon_g = 0,929</math> per il globo grigio</li> <li>- <math>h_{cg} = \left( \frac{6,3 \cdot v_a^{0,6}}{D^{0,4}} \right)</math></li> <li>- <math>T_a \in [0;40] ^\circ C</math></li> <li>- <math>Re \in [10^2; 10^5]</math></li> </ul>

## 4 Risultati e discussioni

In questa sezione ciascun risultato viene indicato tramite un pedice, che fa riferimento alla tecnica di misura e calcolo con cui è stato ottenuto:

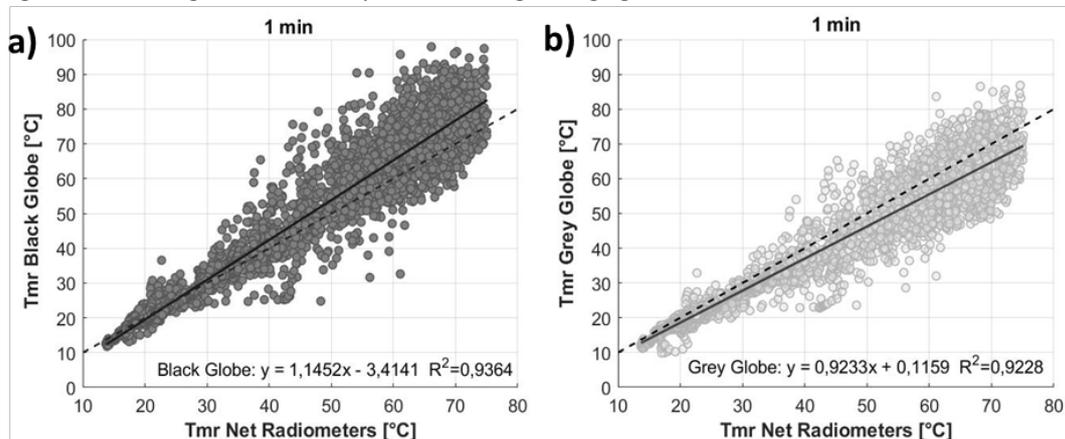
- “Net” si riferisce ai tre radiometri netti;
- “B15” si riferisce al globotermometro nero con diametro 150 mm;
- “G5” si riferisce al globotermometro grigio con diametro 50 mm.

### 4.1 Valutazione della Temperatura Media Radiante

#### 4.1.1 Andamento generale

Al fine di ottenere un adeguato confronto tra le diverse tecniche di misura è stata effettuata un’analisi di regressione lineare tra la  $T_{mr}$  ottenuta a partire dalle misure dei globotermometri e la  $T_{mr,Net}$ , assunta come riferimento, si riporta in *Figura 6* un esempio di tale analisi effettuata per un tempo di elaborazione di 1 minuto. Ciascun grafico mostra la retta di regressione (linea continua) ed il corrispondente indice  $R^2$ . Idealmente, nel caso di regressione perfetta, la retta di regressione coinciderebbe con la bisettrice del primo quadrante (linea tratteggiata in *Figura 6*) e il coefficiente di determinazione assumerebbe il valore  $R^2=1$ .

Questa prima analisi ha permesso di evidenziare la tendenza del globotermometro nero a sovrastimare la  $T_{mr}$  e quella del globotermometro grigio a sottostimarla: il grafico relativo al globo nero (*Figura 6a*) mostra infatti una retta di regressione con coefficiente angolare maggiore di 1, mentre il coefficiente angolare della retta di regressione in *Figura 6b*, corrispondente al globo grigio, risulta inferiore all’unità.



**Figura 6.**  $T_{mr,B15}$  in funzione di  $T_{mr,Net}$  (a) e  $T_{mr,G5}$ , in funzione di  $T_{mr,Net}$  (b)

Entrambi i grafici, inoltre, presentano una significativa dispersione dei dati, ad indicare un’elevata fluttuazione nei profili della  $T_{mr}$  stimata. Tale dispersione appare però attenuata per bassi valori della  $T_{mr}$  e, analizzando separatamente ciascun giorno della campagna, è stato possibile osservare come questa riduzione si verifici in condizione di radiazione globale scarsa o assente. Questo risultato è in accordo con quanto emerso da precedenti studi, ovvero: se i sensori si trovano in condizione di ombreggiamento (assenza di radiazione solare diretta) la differenza tra la  $T_{mr}$  stimata a partire dalle rilevazioni dei globotermometri e quella calcolata con le misure dei radiometri netti si assottiglia sensibilmente [4,13].

In *Figura 3.2*, viene mostrato un ottimo esempio dell’effetto appena illustrato. I grafici presentano i profili di  $T_{mr,B15}$ ,  $T_{mr,g5}$ ,  $T_{mr,Net}$  e  $R_{GL}$  calcolati a partire dai dati raccolti il 10 Luglio 2021 su un terrazzo del Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano (*Tabella 3*). In *Tabella 3.1* sono riportati i valori medio, minimo e massimo e la deviazione standard delle principali variabili meteorologiche, registrati durante la giornata di prova considerata.

Il 10 Luglio 2021 è stata una giornata calda e soleggiata, con valori medi registrati di temperatura dell'aria e velocità del vento pari, rispettivamente, a 29,2 °C e 0,6 m/s (Tabella 8). Il cielo è rimasto terso fino alle 16:00, per poi rannuvolarsi: il passaggio di nubi ha influenzato il campo radiativo (Figura 7b), determinando una serie di fluttuazioni nel profilo della  $T_{mr,Net}$  (Figura 7a).

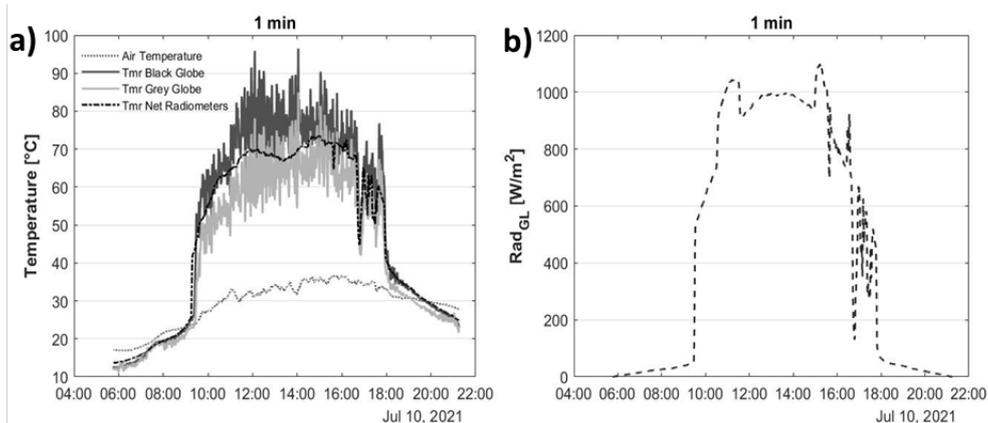


Figura 7. Andamenti di  $T_{mr,Net}$ ,  $T_{mr,B15}$ ,  $T_{mr,G5}$  e  $T_a$  (a) e della radiazione solare globale (b) rilevati il 10 Luglio 2021 sul terrazzo del Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano (Bovisa, MI)

Tabella 8. Range di variazione delle principali variabili meteorologiche, registrate il 10 Luglio 2021 sul terrazzo del Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano (Bovisa, MI)

	$R_{GL}$	$T_a$	$v_a$	RH
UdM	$W/m^2$	°C	m/s	%
Valore Medio	463,6	29,2	0,6	41,1
Dev. Std.	436,7	5,8	0,3	16,7
Minimo	0	16,9	0	24,8
Massimo	1099	36,7	2,1	82,4

Tutte e tre le stime della  $T_{mr}$  (ovvero  $T_{mr,B15}$ ,  $T_{mr,G5}$  e  $T_{mr,Net}$ ) seguono il profilo della radiazione globale: durante le prime e le ultime ore della giornata, quando l'irraggiamento diretto è moderato, la  $T_{mr}$  assume valori bassi ed è minima la differenza tra le diverse tecniche di misura; al contrario, per elevati valori di  $R_{GL}$  i valori assunti da  $T_{mr,B15}$ ,  $T_{mr,G5}$  e  $T_{mr,Net}$  si discostano notevolmente tra loro. Indipendentemente dall'apparato di misura impiegato per la sua valutazione, la  $T_{mr}$  tende a seguire l'andamento della radiazione solare globale, tuttavia, i profili  $T_{mr,B15}$  e  $T_{mr,G5}$  presentano un andamento significativamente meno stabile di quello della  $T_{mr,Net}$  e per comprendere questo effetto si è analizzata l'influenza del tempo di elaborazione dei dati e della variazione delle condizioni meteorologiche sulla risposta dei globotermometri.

#### 4.1.2 Influenza del tempo di elaborazione

In un ambiente esterno le variabili climatiche, ed in particolare  $R_{GL}$  e  $v_a$ , sono soggette a repentine variazioni. Come esempio, la Tabella 9 riporta l'analisi della variazione percentuale delle principali variabili meteorologiche tra una misurazione e la successiva, nel caso di un tempo di elaborazione di 1 minuto.

Tabella 9. Tempo di elaborazione di 1-min: analisi della variazione percentuale delle principali variabili meteorologiche tra una misurazione e la successiva

	$R_{GL}$	$T_a$	$v_a$	RH
Valore Medio	0%	0%	13%	0%
Dev. Std.	11,3	0,4	59,3	1,3
Minimo	-54%	-2%	-82%	-5%
Massimo	88%	1%	421%	5%

Mentre i radiometri basano il calcolo della  $T_{mr}$  solo sulle misure di flussi radiativi (e di ipotesi geometriche, ovvero i fattori di vista), la valutazione di tale indice da parte dei globotermometri si basa sulla rilevazione di una temperatura ambientale dipendente sia da scambi radiativi che da scambi convettivi. Per dare luogo ad una misura accurata, un globotermometro dovrebbe raggiungere una condizione di stabilità, dettata anche dal tempo di risposta, più o meno lungo, di questi strumenti. In generale, il tempo di risposta di un globotermometro varia a seconda della dimensione dello strumento e del materiale con cui esso viene realizzato: il globo standard di Vernon [46] presenta un tempo di risposta di circa 20 min [4,17,48,49], mentre numerosi studi riportano un tempo di risposta più rapido (circa 5-10 min) per globi con diametro uguale o inferiore a 50 mm [10,13]. Dunque, confrontando i tempi di risposta tipici di questi strumenti con la variazione cui sono soggette le variabili climatiche in un ambiente esterno in un minuto (*Tabella 9*), si evince come né il globo grigio e né il globo nero siano in grado di raggiungere condizioni di equilibrio termico.

Introdurre contemporaneamente nell'*Equazione 6* un valore di  $T_g$  misurato in condizioni di disequilibrio e la misura istantanea di  $v_a$  determina una stima incerta ed altalenante della  $T_{mr}$  da parte dei globotermometri. Come mostrato in *Figura 6*, e in accordo con precedenti studi [4,10,13,28], questo effetto comporta una forte dispersione dei valori della  $T_{mr}$  calcolata con l'utilizzo di entrambi i globotermometri (ed in particolare con quello nero).

Per studiare l'effetto del tempo di risposta dei globi sulla stima della  $T_{mr}$ , si è scelto di analizzare i dati considerando cinque diversi tempi di elaborazione: 1-min, 5-min, 10-min, 15-min e 20-min. In *Figura 8* sono mostrati i risultati dell'analisi di regressione tra la  $T_{mr}$  ottenuta con le rilevazioni dei globotermometri e la  $T_{mr,Net}$ : la colonna sinistra fa riferimento al globo nero, la colonna destra al globo grigio, e ciascuna riga corrisponde ad un diverso tempo di elaborazione.

Il progressivo aumento del tempo di elaborazione attenua l'effetto della rapida variazione dei flussi radiativi e della velocità del vento con conseguente riduzione della dispersione della  $T_{mr}$  risultante da entrambi i globi.

L'utilizzo di tempi pari a 5-min (*Figura 8c* e *Figura 8d*) riduce significativamente la divergenza tra i risultati ottenuti con le diverse tecniche di misura mentre un ulteriore incremento del tempo di elaborazione (10-min o più) riduce, solo in maniera minima, la dispersione e le differenze (*Figura 8e-j*). Inoltre, un eccessivo incremento del tempo di elaborazione può determinare una perdita di informazione, specialmente in giornate caratterizzate da passaggi nuvolosi frequenti. Un esempio di questa situazione può essere osservato meglio analizzando i profili di temperatura ( $T_{mr,Net}$ ,  $T_{mr,B15}$ ,  $T_{mr,G5}$ ) relativi alle misurazioni il 18 Settembre 2020 in Via Lambruschini, Milano (*Figura 9*).

Nella giornata del 18 Settembre 2020 sono state registrate una temperatura media dell'aria di 31,3 °C e una velocità media del vento pari a 0,8 m/s (*Tabella 10*). Il cielo si è mantenuto sereno fino circa le 14:00, quando la comparsa di episodi nuvolosi ha iniziato ad influenzare il campo radiativo, con conseguente fluttuazione del profilo della  $T_{mr,Net}$ . Dalle 16:30 in poi, la strumentazione è rimasta in ombra.

Confrontando i risultati ottenuti per un tempo di elaborazione di 1-min (*Figura 9a*) con quelli ottenuti per tempi più lunghi (*Figura 9b-e*) è possibile evidenziare una progressiva riduzione delle oscillazioni nei profili delle  $T_{mr}$  calcolate: considerando i valori medi su 20-min la fluttuazione del profilo della  $T_{mr,Net}$  tra le 14:00 e le 16:00 è quasi completamente scomparsa.

Dunque, la scelta del tempo di elaborazione dei dati presuppone un compromesso tra accuratezza dei risultati e una possibile perdita di informazione. Inoltre, tale scelta dovrebbe essere basata sulla conoscenza esatta del tempo di risposta degli strumenti impiegati (stimabile solo tramite analisi in laboratorio).

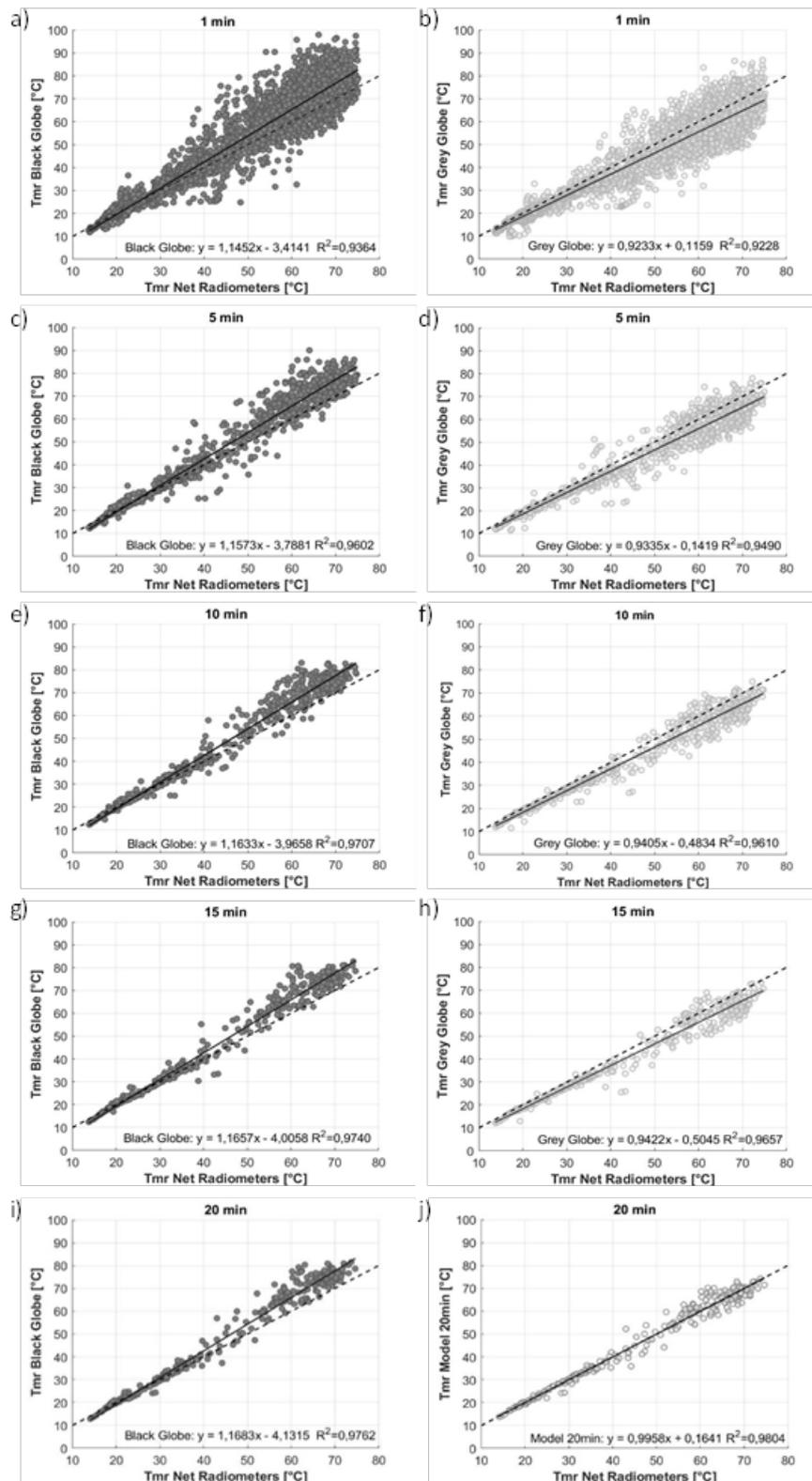


Figura 8. T<sub>mr</sub> dai globotermometri in funzione di T<sub>mr,Net</sub>. Ciascuna riga corrisponde ad un diverso tempo di elaborazione, rispettivamente 1-min, 5-min, 10-min, 15-min e 20-min

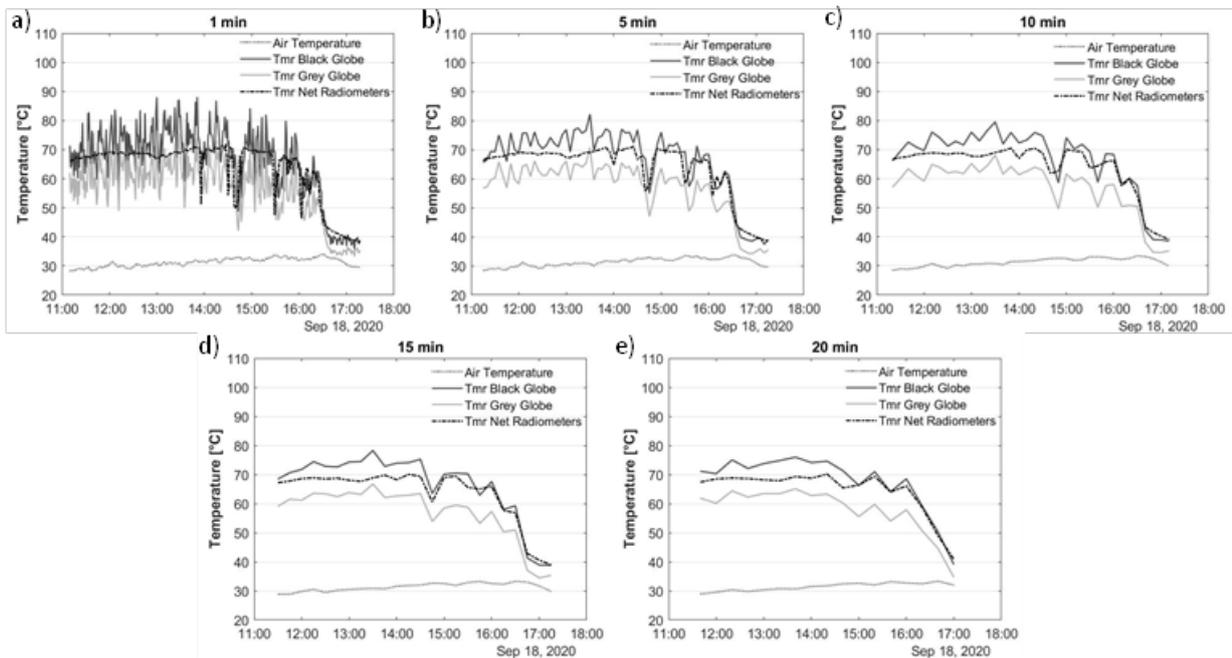


Figura 9. Andamento di  $T_{mr,Net}$ ,  $T_{mr,B15}$ ,  $T_{mr,G5}$  e  $T_a$  il 18 Settembre 2020 in Via Lambruschini (MI). Ciascun grafico corrisponde ad un diverso tempo di elaborazione: 1-min (a), 5-min (b), 10-min (c), 15-min (d) e 20-min (e)

Tabella 10. Valore medio, minimo, massimo e deviazione standard delle principali variabili meteorologiche, registrati il 18 Settembre 2020 in Via Lambruschini (MI)

	$R_{GL}$	$T_a$	$v_a$	$RH$
<i>UdM</i>	$W/m^2$	$^{\circ}C$	m/s	%
<i>Valore Medio</i>	599,7	31,3	0,8	39,7
<i>Dev. Std.</i>	238,9	1,4	0,4	3,5
<i>Minimo</i>	84	28,3	0,1	34,4
<i>Massimo</i>	824	34	1,9	48,3

Per motivi di spazio e chiarezza espositiva si rimanda all'Appendice A per i grafici relativi agli andamenti delle temperature in ciascuna giornata di prova della campagna sperimentale svolta e per i dettagli sui campi di variazione delle principali variabili meteorologiche registrate. Per completezza, nell'Appendice A è presente anche un'immagine relativa al sito in cui sono state svolte le misurazioni.

#### 4.1.3 Influenza delle variabili meteorologiche

Per comprendere al meglio il comportamento dei globotermometri è stato scelto di realizzare un test di correlazione di Pearson tra l'errore, inteso come deviazione della  $T_{mr}$  calcolata con le misure dei globi dalla  $T_{mr,Net}$ , e le principali variabili meteorologiche ( $T_a$ ,  $v_a$ ,  $RH$ ,  $R_{GL}$ ). Tale analisi è stata svolta con l'obiettivo di verificare se (e nel caso quale) correlazione esista tra questi parametri. I risultati sono presentati in Tabella 11.

Per un tempo di elaborazione pari ad 1-min:

- Il globotermometro nero standard mostra una forte correlazione positiva tra l'errore e la velocità del vento ( $p=0,533$ ) e tra l'errore e la radiazione solare sul piano orizzontale ( $p=0,478$ ): all'aumentare di  $v_a$  e di  $R_{GL}$  aumenta la divergenza tra  $T_{mr,B15}$  e  $T_{mr,Net}$ .
- Tra l'errore e  $T_a$  è presente una correlazione moderata e positiva ( $p=0,284$ ) mentre la correlazione che si determina tra errore e  $RH$  è debole e negativa ( $p=-0,233$ );

- Il globotermometro grigio mostra una correlazione moderata positiva tra l’errore e  $v_a$  ( $p= 0,395$ ) mentre la correlazione tra errore e  $R_{GL}$  si mostra come debole e negativa ( $p= -0,209$ ). La tendenza negativa si verifica per effetto della sottostima della  $T_{mr}$  da parte di questo strumento: in termini di valore assoluto, l’errore aumenta all’aumentare di  $R_{GL}$ ,  $T_a$  e  $RH$  non mostrano significative correlazioni con l’errore introdotto dal globo grigio.

L’incremento del tempo di elaborazione riduce progressivamente l’influenza di  $v_a$  sulla stima della  $T_{mr}$  da parte dei globotermometri. Allo stesso tempo, però, la correlazione tra errori e  $R_{GL}$  si intensifica. Questo effetto è dovuto alle condizioni climatiche tipiche di Milano nelle quali  $v_a$  è caratterizzata da piccole variazioni istantanee attorno ad un valor medio. Di conseguenza, analizzare i dati considerando il valor medio dei parametri su un intervallo di tempo più lungo, riduce le fluttuazioni di  $v_a$  aumentando l’influenza relativa della  $R_{GL}$  sulla stima della  $T_{mr}$ .

**Tabella 11. Risultati del test di correlazione di Pearson effettuato tra l’errore, in termini di  $T_{mr}$ , e le principali variabili meteorologiche**

Pearson Correlations Results		$R_{GL}$	$T_a$	$v_a$	$RH$
1min	$T_{mr,B15} - T_{mr,Net}$	0,478	0,284	0,533	-0,223
	$T_{mr,G5} - T_{mr,Net}$	-0,209	-0,104	0,395	0,123
5min	$T_{mr,B15} - T_{mr,Net}$	0,614	0,34	0,436	-0,276
	$T_{mr,G5} - T_{mr,Net}$	-0,191	-0,111	0,259	0,137
10min	$T_{mr,B15} - T_{mr,Net}$	0,694	0,37	0,422	-0,296
	$T_{mr,G5} - T_{mr,Net}$	-0,202	-0,136	0,237	0,161
15min	$T_{mr,B15} - T_{mr,Net}$	0,727	0,387	0,447	-0,314
	$T_{mr,G5} - T_{mr,Net}$	-0,201	-0,148	0,24	0,173
20min	$T_{mr,B15} - T_{mr,Net}$	0,741	0,388	0,446	-0,306
	$T_{mr,G5} - T_{mr,Net}$	-0,213	-0,163	0,246	0,186

#### 4.1.4 Analisi dell’errore

Nel corso della campagna sperimentale, la strumentazione è stata installata in diverse aree, tutte densamente costruite. Poiché la presenza di superfici caratterizzate da diverse proprietà termiche influisce fortemente sulla distribuzione dei flussi radiativi, e dunque, sulla stima della  $T_{mr}$ , nel corso del presente studio, la complessità dell’ambiente urbano e la sua influenza sugli scambi termici radiativi non hanno permesso la definizione di un andamento dei profili di  $T_{mr,B15}$  e  $T_{mr,G5}$  ricorrente in ciascun sito testato. Tuttavia, osservando la *Figura 6*, è possibile evidenziare una sistematica differenza tra la  $T_{mr}$  stimata a partire dalle misure dei globotermometri e il valore di riferimento  $T_{mr,Net}$ , ottenuto tramite i radiometri netti. In particolare, il globotermometro nero tende a sovrastimare la  $T_{mr}$ , mentre, in media, il globo grigio la sottostima. La leggera tendenza del globotermometro grigio a sottostimare il valore della  $T_{mr}$ , rispetto a quello calcolato attraverso i radiometri netti, è stata evidenziata anche nello studio di Thorsson et al. [13] ed imputata all’albedo del globo: in un contesto urbano complesso un’albedo leggermente inferiore (ovvero un colore leggermente più scuro) potrebbe portare a risultati più accurati.

La *Tabella 12* mostra per tutti i tempi di elaborazione considerati i risultati dell’analisi dell’errore, in termini di  $T_{mr}$ , introdotto da ciascun globotermometro. Sia il globo nero che il globo grigio introducono un errore medio compreso, in valore assoluto, tra 3 °C e 4 °C. Nonostante l’errore medio sia relativamente contenuto, i valori massimi e minimi dell’errore non sono trascurabili: considerando il tempo di elaborazione pari a 1-

-min, gli errori massimo e minimo introdotti dal globotermometro nero sono rispettivamente 36,6 °C e -28,5 °C, mentre quelli introdotti dal globotermometro grigio risultano pari a 22,5 °C e -29,1 °C.

Per entrambi i globi la deviazione standard dell'errore è ben distante da 1 (ovvero il valore assunto dalla deviazione standard di una distribuzione normale) a conferma dell'ampia dispersione dei risultati evidenziata in *Figura 6*. Aumentando il tempo di elaborazione la dispersione dell'errore si riduce, così come i valori minimi ed i massimi registrati: per un tempo pari a 20-min l'intervallo dei valori assunti dall'errore è pressoché dimezzato rispetto a quello registrato per un tempo pari a 1-min.

**Tabella 12. Caratteristiche dell'errore**

	<i>Err_ T<sub>mr,B15</sub></i>					<i>Err_ T<sub>mr,G5</sub></i>				
	1min	5min	10min	15min	20min	1min	5min	10min	15min	20min
<i>Media</i>	3,3	3,6	3,7	3,8	3,8	-3,5	-3,3	-3,3	-3,2	-3,3
<i>Dev. Std.</i>	6,2	5,2	4,8	4,6	4,5	5,2	4,2	3,7	3,4	3,3
<i>Asimmetria</i>	1,0	0,7	0,7	0,7	0,7	-0,3	-0,3	-0,6	-0,7	-0,5
<i>Curtosi</i>	2,2	1,3	0,3	0,5	0,0	1,7	1,7	1,1	1,5	0,5
<i>Minimo</i>	-28,5	-15,0	-8,3	-9,8	-6,9	-29,1	-19,6	-17,6	-17,4	-12,8
<i>Massimo</i>	36,3	26,0	20,8	20,3	17,5	22,5	14,9	7,9	7,2	6,4

La *Tabella 13* presenta la percentuale di casi in cui l'errore introdotto da ciascun globo rientra nell'intervallo  $\pm 5$  °C. Tale intervallo viene assunto come accettabile per l'errore in termini di  $T_{mr}$  in quanto ha dimostrato determinare un errore in termini di *UTCI* compreso tra  $\pm 2$  °C (si veda l'*Appendice B* per ulteriori dettagli).

Per un tempo di elaborazione pari ad 1-min l'errore relativo a ciascun globotermometro cade al di fuori del range  $\pm 5$  °C nel 33% dei casi. Per il globo grigio aumentare il tempo di elaborazione determina un aumento della confidenza dei risultati, sebbene la percentuale di casi in cui l'errore è significativo resti alta (tra il 25% ed il 30%). Al contrario, l'impiego di lunghi tempi di elaborazione (15-min o 20-min) aumenta fino al 40% la percentuale di casi in cui l'errore introdotto dal globo nero non rientra nell'intervallo considerato accettabile.

**Tabella 13. Percentuale dei casi in cui l'errore rientra nell'intervallo  $\pm 5$  °C**

	<i>Err_ T<sub>mr,B15</sub></i>	<i>Err_ T<sub>mr,G5</sub></i>
<i>1min</i>	67%	67%
<i>5min</i>	64%	70%
<i>10min</i>	62%	73%
<i>15min</i>	60%	76%
<i>20min</i>	60%	75%

Sulla base di questi risultati, in ambienti urbani complessi né il globotermometro nero standard da 150 mm, né il globotermometro grigio da 50 mm, rappresentano una valida alternativa ai radiometri netti per la stima della  $T_{mr}$ .

#### 4.2 Analisi di regressione lineare multipla

Per migliorare la corrispondenza tra la  $T_{mr}$  calcolata con impiego dei globotermometri e il valore della  $T_{mr}$  calcolato tramite i radiometri netti, si è scelto di definire, tramite un'analisi di regressione lineare multipla, delle equazioni empiriche correttive. L'analisi è stata condotta tra  $T_{mr,B15}$ ,  $T_{mr,G5}$ ,  $v_a$ ,  $R_{GL}$  e  $T_a$ , (variabili predittive) e  $T_{mr,Net}$  (variabile dipendente) per ciascun tempo di elaborazione, portando alla definizione di cinque differenti equazioni di  $T_{mr,x-min}$  per i diversi tempi di elaborazione dei dati. I dati impiegati per la costruzione dei modelli di regressione comprendono il 75% delle misurazioni dell'intero database in campo urbano complesso, il restante 25% è stato impiegato per la validazione di tali modelli.

La scelta di introdurre  $v_a$ ,  $R_{GL}$  e  $T_a$  tra gli input dell'analisi deriva dall'influenza che questi parametri esercitano sul valore della  $T_{mr}$  stimata tramite i globotermometri (4.1.3-Influenza delle variabili

meteorologiche). L'umidità relativa  $RH$ , è stata invece esclusa dalla trattazione poiché dipendente dalla  $T_a$ . L'effettiva presenza di una variabile predittiva all'interno del modello è stata stabilita sulla base del  $p$ -value risultante dal t-test dell'ipotesi che il coefficiente relativo al parametro considerato sia uguale a zero. Per valori di  $p$ -value superiori a 0,05, la presenza all'interno del modello del parametro analizzato non risulta essere statisticamente significativa ed è dunque possibile escluderlo. In questo modo, il modello costruito conserva la significatività di ciascuna variabile predittiva ed un coefficiente di determinazione massimo. La **Tabella 14** riassume le funzioni di regressione definite ( $T_{mr,x-min}$ ).

Indipendentemente dal tempo di elaborazione, le funzioni regressive costruite considerando tra le variabili indipendenti  $T_{mr,G5}$  ma non  $T_{mr,B15}$  (modello presente nella terza riga della sezione relativa a ciascun tempo di elaborazione) presentano i valori più bassi di  $R^2$  adjusted e  $RMSE$ . Al contrario, considerare tra i regressori sia  $T_{mr,B15}$  che  $T_{mr,G5}$  o esclusivamente  $T_{mr,B15}$  consente di costruire modelli di bontà pressoché identica. Poiché installare un singolo globo, anziché due, minimizza i costi della strumentazione le funzioni proposte saranno unicamente quelle costruite considerando  $T_{mr,B15}$  (**Tabella 15**).

Tra i modelli selezionati solo  $T_{mr,20-min}$  non include  $v_a$  tra i parametri predittivi, a conferma delle considerazioni presentate in 4.1.2- *Influenza del tempo di elaborazione*: tempi di elaborazione più lunghi attenuano le variazioni della  $v_a$ , riducendone l'influenza sulla stima della  $T_{mr}$  per mezzo dei globotermometri.

**Tabella 14. Confronto tra funzioni di regressione costruite tra  $T_{mr,x-min}$  e  $T_{mr,B15}$ ,  $T_{mr,G5}$ ,  $v_a$ ,  $R_{GL}$  and  $T_a$  (variabili indipendenti)**

	Funzioni di regressione $T_{mr,x-min}$	$R^2$ adjusted	RMSE
1min	$T_{mr,1-min} = -1,705+0,861*T_{mr,B15} -0,432*T_{mr,G5} -1,972*v_a +0,013*R_{GL} +0,675*T_a$	0,978	2,73
	$T_{mr,1-min} = -0,647+0,532*T_{mr,B15} -2,163*v_a +0,013*R_{GL} +0,565*T_a$	0,976	2,9
	$T_{mr,1-min} = -0,064+0,497*T_{mr,G5} -1,307*v_a +0,020*R_{GL} +0,059*T_a$	0,967	3,36
5min	$T_{mr,5-min} = -1,498+0,830*T_{mr,B15}-0,248*T_{mr,G5}-1,423*v_a+0,008*R_{GL}+0,510*T_a$	0,984	2,34
	$T_{mr,5-min} = -0,885+0,669*T_{mr,B15}-1,689*v_a+0,008*R_{GL}+0,423*T_a$	0,982	2,46
	$T_{mr,5-min} = -0,235+0,642*T_{mr,G5}-0,732*v_a+0,015*R_{GL}+0,450*T_a$	0,973	3,04
10min	$T_{mr,10-min} = -1,847+0,824*T_{mr,B15}-0,230*T_{mr,G5}-1,557*v_a+0,007*R_{GL}+0,516*T_a$	0,986	2,19
	$T_{mr,10-min} = -1,246+0,675*T_{mr,B15}-1,726*v_a+0,006*R_{GL}+0,431*T_a$	0,985	2,26
	$T_{mr,10-min} = -0,103+0,698*T_{mr,G5}-1,082*v_a+0,012*R_{GL}+0,404*T_a$	0,975	2,95
15min	$T_{mr,15-min} = -1,190+0,892*T_{mr,B15}-0,217*T_{mr,G5}-1,958*v_a+0,004*R_{GL}+0,422*T_a$	0,987	2,14
	$T_{mr,15-min} = -0,655+0,747*T_{mr,B15}-1,780*v_a+0,003*R_{GL}+0,337*T_a$	0,987	2,15
	$T_{mr,15-min} = 0,375+0,763*T_{mr,G5}-1,885*v_a+0,010*R_{GL}+0,343*T_a$	0,975	2,94
20min	$T_{mr,20-min} = -1,508+0,917*T_{mr,B15}-0,266*T_{mr,G5}+0,005*R_{GL}+0,401*T_a$	0,989	1,97
	$T_{mr,20-min} = -1,056+0,745*T_{mr,B15}+0,003*R_{GL}+0,306*T_a$	0,989	1,92
	$T_{mr,20-min} = -0,789+0,745*T_{mr,G5}+0,010*R_{GL}+0,358*T_a$	0,978	2,69

**Tabella 15. Funzioni di regressione proposte per ciascun tempo di elaborazione**

	Funzione proposta	$R^2$ adjusted
Model_1min	$T_{mr,1-min} = -0,647+0,532*T_{mr,B15} -2,163*v_a +0,013*R_{GL} +0,565*T_a$	0,976
Model_5min	$T_{mr,5-min} = -0,885+0,669*T_{mr,B15} -1,689*v_a +0,007*R_{GL} +0,423*T_a$	0,982
Model_10min	$T_{mr,10-min} = -1,246+0,675*T_{mr,B15} -1,726*v_a +0,006*R_{GL} +0,431*T_a$	0,985
Model_15min	$T_{mr,15-min} = -0,655+0,747*T_{mr,B15} -1,780*v_a +0,003*R_{GL} +0,337*T_a$	0,987
Model_20min	$T_{mr,20-min} = -1,056+0,745*T_{mr,B15} +0,003*R_{GL} +0,306*T_a$	0,989

Per discutere l'efficacia di ciascun modello, la **Figura 10** mostra i grafici di dispersione della  $T_{mr,B15}$  (**Figura 10**, prima colonna), della  $T_{mr,G5}$  (**Figura 10**, seconda colonna) e della  $T_{mr,x-min}$  stimata con l'utilizzo delle

funzioni di regressione proposte (Figura 10, terza colonna) in funzione della  $T_{mr}$  di riferimento, calcolata tramite i radiometri netti ( $T_{mr,Net}$ ). La Figura 3.6 riporta invece la frequenza di distribuzione degli errori e la percentuale di casi in cui gli stessi ricadono nell'intervallo  $\pm 5^\circ\text{C}$ .

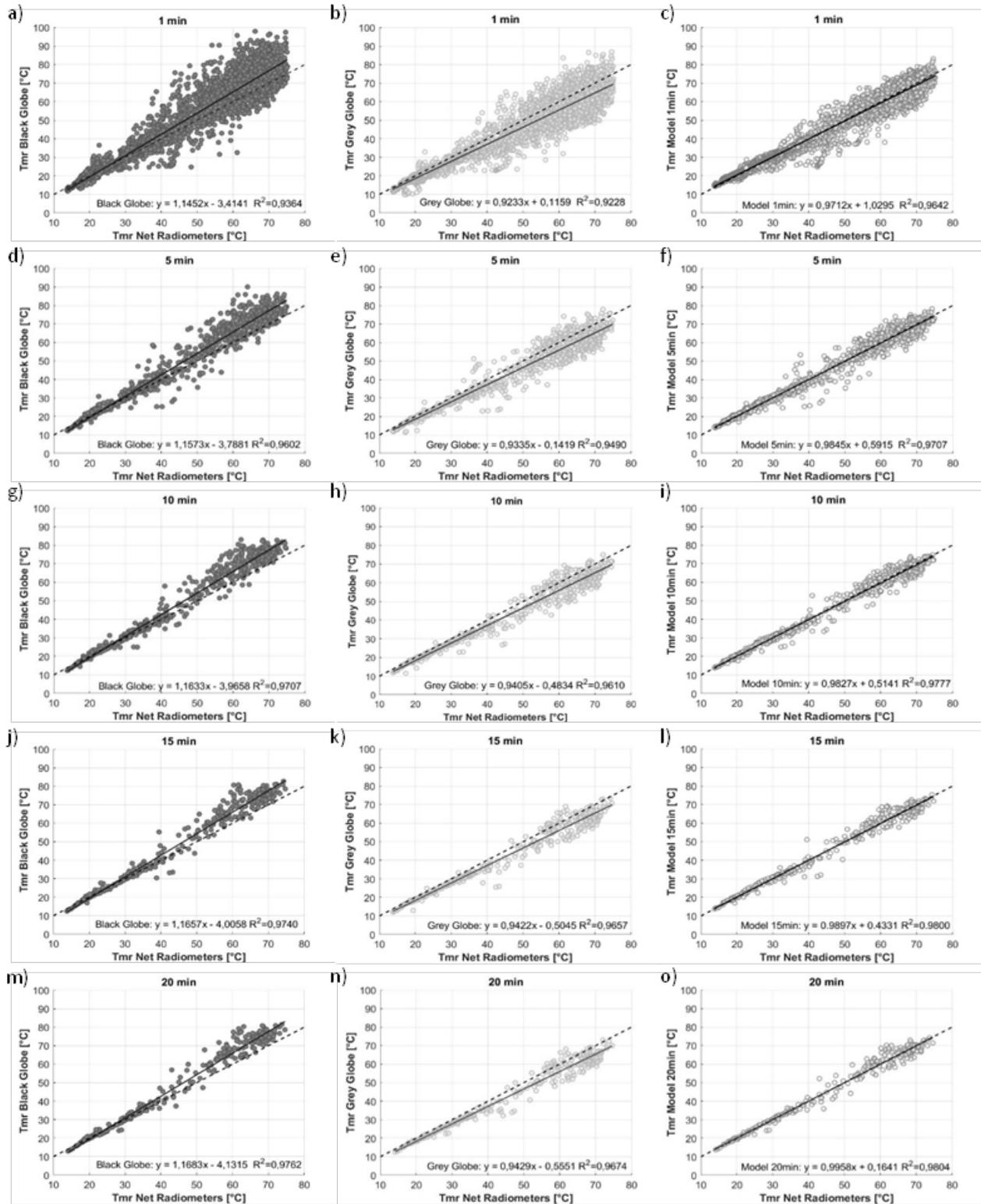
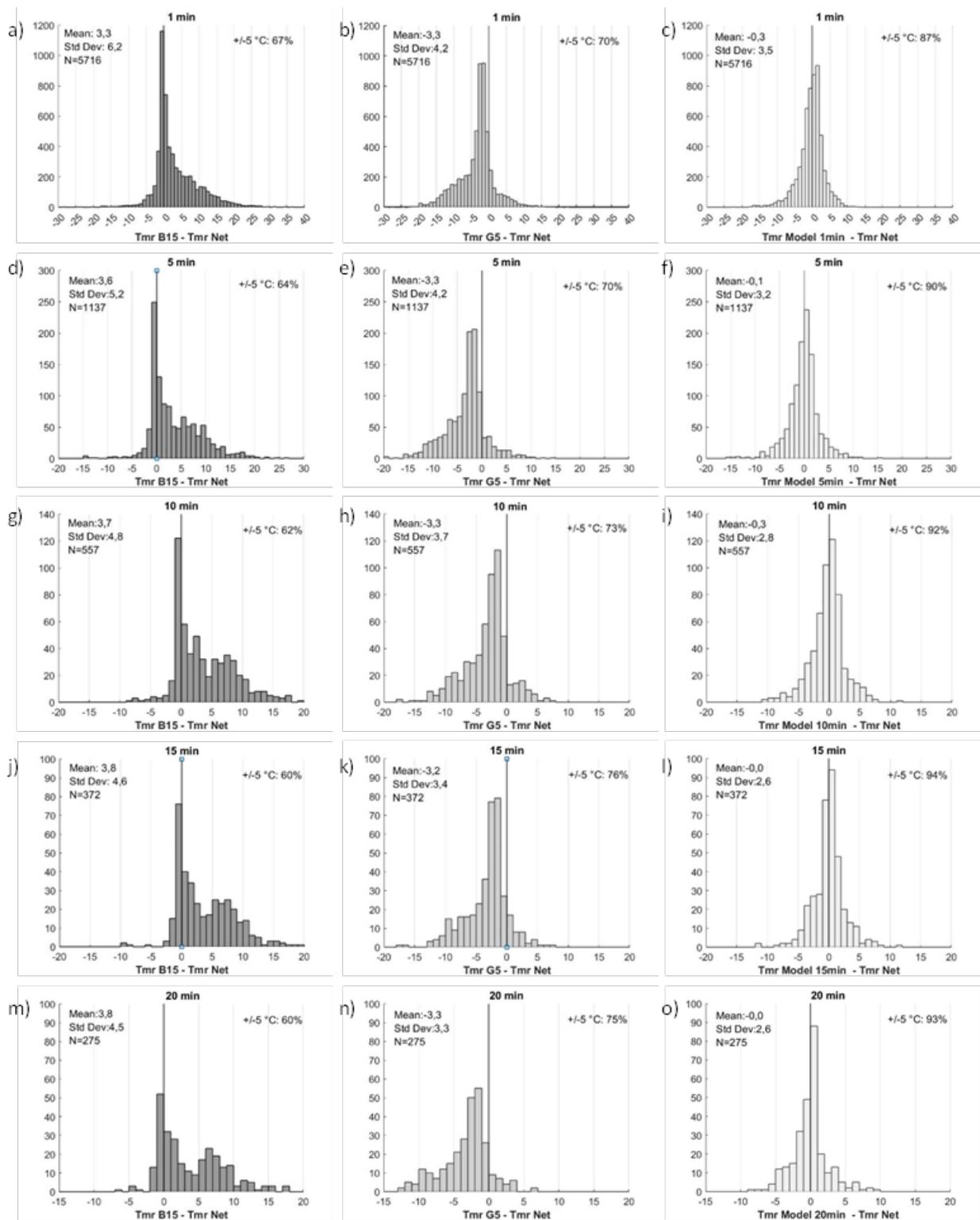


Figura 10.  $T_{mr,B15}$  (prima colonna),  $T_{mr,G5}$  (seconda colonna) e  $T_{mr}$  stimata con l'utilizzo delle funzioni di regressione proposte (terza colonna) in funzione di  $T_{mr,Net}$ . Ciascuna riga corrisponde ad un diverso tempo di campionamento, dall'alto verso il basso: 1-min, 5-min, 10-min, 15-min e 20-min.



**Figura 11. Frequenza di distribuzione degli errori. Ciascuna riga corrisponde ad un diverso tempo di elaborazione. Ciascuna colonna ad una diversa tecnica di misura e calcolo della  $T_{mr}$ : da destra verso sinistra: globotermometro nero, globotermometro grigio e globotermometro nero con successiva introduzione delle funzioni di regressione.**

Analizzando grafici proposti in *Figura 10* è possibile evidenziare un significativo miglioramento della corrispondenza tra la  $T_{mr,x-min}$  calcolata tramite le funzioni di regressione proposte e la  $T_{mr}$  di riferimento, rispetto a quanto è invece possibile osservare per la  $T_{mr,B15}$  e la  $T_{mr,G5}$ . Per un tempo di elaborazione pari ad 1-min, l'impiego della funzione  $T_{mr,1-min}$  (*Model\_1min*) consente di stimare la  $T_{mr}$  con un errore compreso tra  $\pm 5$  °C nel 78% dei casi. Inoltre, la distribuzione dell'errore risulta centrata attorno allo zero (*Figura 11c*), con

una deviazione standard quasi dimezzata rispetto a quella dell'errore introdotto originariamente dal globo nero.

Considerando tempi di elaborazione pari o superiori a 5-min, i modelli di regressione proposti consentono di ridurre sotto al 10% la percentuale di casi in cui l'errore non rientra nel range ritenuto accettabile (*Figura 10 f, i, n e q*).

Sulla base di questi risultati, l'utilizzo di un globotermometro nero standard e la successiva applicazione delle funzioni proposte in *Tabella 15*, appare come l'alternativa più valida ai radiometri netti per la valutazione della  $T_{mr}$  in ambienti urbani complessi. Tuttavia, la validità di tali funzioni di regressione è limitata all'applicazione a misurazioni eseguite con un globotermometro nero standard di rame (diametro 150 mm, spessore 0,4 mm ed emissività 0,963) in ambienti caratterizzati da condizioni climatiche di tipo *Cfa* (o da variabili meteorologiche negli intervalli espressi in *Tabella 2*).

Si è scelto infine di valutare l'applicabilità di tutte e cinque le funzioni di regressione proposte a tempi di elaborazione differenti da quelli per cui sono state ottenute, con l'obiettivo di identificare un'unica equazione in grado di fornire risultati sufficientemente accurati indipendentemente dal tempo considerato. Analogamente alle analisi svolte in precedenza, i tempi qui considerati sono: 1-min, 5-min, 10-min, 15-min e 20-min. Indipendentemente dal tempo di elaborazione tutte e cinque le funzioni in *Tabella 15* consentono di ottenere stime accurate della  $T_{mr}$ , migliorando la prestazione del globotermometro nero. In particolare, *Model\_5min* emerge tra le alternative come la soluzione in grado di fornire in media il valore della  $T_{mr}$  più prossimo a quello di riferimento. Quindi, anziché considerare un'equazione diversa per ogni tempo di elaborazione, nelle seguenti analisi verrà introdotta esclusivamente *Model\_5min* (*Equazione 7*), chiamata da questo punto in poi  $T_{mr,Model}$ .

$$T_{mr,Model} = -0,885 + 0,669 \cdot T_{mr,B15} - 1,689 \cdot v_a + 0,007 \cdot R_{GL} + 0,423 \cdot T_a \quad (7)$$

La *Tabella 16* mostra, per ciascun tempo di elaborazione, la percentuale di casi in cui la differenza tra la  $T_{mr,Model}$  calcolata tramite l'*Equazione 7* e la  $T_{mr,Net}$  rientra nell'intervallo  $\pm 5$  °C. Per ulteriori dettagli si rimanda all'*Appendice C*, che include i risultati dell'analisi dell'errore svolta per ogni tempo e per ciascuna metodologia di misura e calcolo della  $T_{mr}$  considerata in questo studio (ovvero globotermometro nero, globotermometro grigio e funzioni di regressione).

**Tabella 16. Percentuale di casi in cui l'errore, relativo al calcolo della  $T_{mr}$  tramite la funzione *Model\_5min*, rientra nel range  $\pm 5$  °C**

Model_5min	
1min	85%
5min	89%
10min	91%
15min	94%
20min	93%

### 4.3 Valutazione dell'indice UTCI

Per poter comprendere al meglio le implicazioni relative alla valutazione del microclima urbano, il confronto tra le diverse metodologie di misura e calcolo della  $T_{mr}$  è stato esteso al loro effetto sulla stima dello **UTCI**. Si è scelto inoltre di includere in questa analisi anche la  $T_{mr}$  calcolata con la funzione di regressione proposta in precedenza (*Equazione 7*), al fine di validarne ulteriormente l'applicabilità. In questa sezione la  $T_{mr}$  calcolata applicando l'*Equazione 7* viene indicata con il pedice "*Model*" ( $T_{mr,Model}$ ); di conseguenza **UTCI<sub>Model</sub>** fa riferimento all'indice calcolato considerando una temperatura media radiante pari a  $T_{mr,Model}$ . Infine, **UTCI<sub>Net</sub>** viene assunto come valore di riferimento nel confronto.

In *Figura 12* vengono presentati, per ciascun tempo di elaborazione, i grafici di dispersione di **UTCI<sub>B15</sub>** (*Figura 12*, prima colonna), **UTCI<sub>GS</sub>** (*Figura 3.7*, seconda colonna) e **UTCI<sub>Model</sub>** (*Figura 12*, terza colonna) in funzione di **UTCI<sub>Net</sub>**. La  $T_{mr}$  calcolata con il globotermometro nero, senza la successiva applicazione

dell'Equazione 7, porta a sovrastimare leggermente lo  $UTCI$ ; al contrario, il valore di  $UTCI_{G5}$  risulta essere leggermente inferiore rispetto a quello calcolato tramite i radiometri netti. I valori di  $UTCI_{Model}$  tendono invece ad essere prossimi a quelli di riferimento e presentano una retta di regressione quasi perfettamente coincidente alla bisettrice del primo quadrante, indipendentemente dal tempo di elaborazione. Infine, a differenza di quanto osservato per la  $T_{mr}$ , la dispersione dei dati relativi allo  $UTCI$  è limitata, e l'utilizzo di un tempo di elaborazione pari a 5-min consente di ridurla quasi completamente.

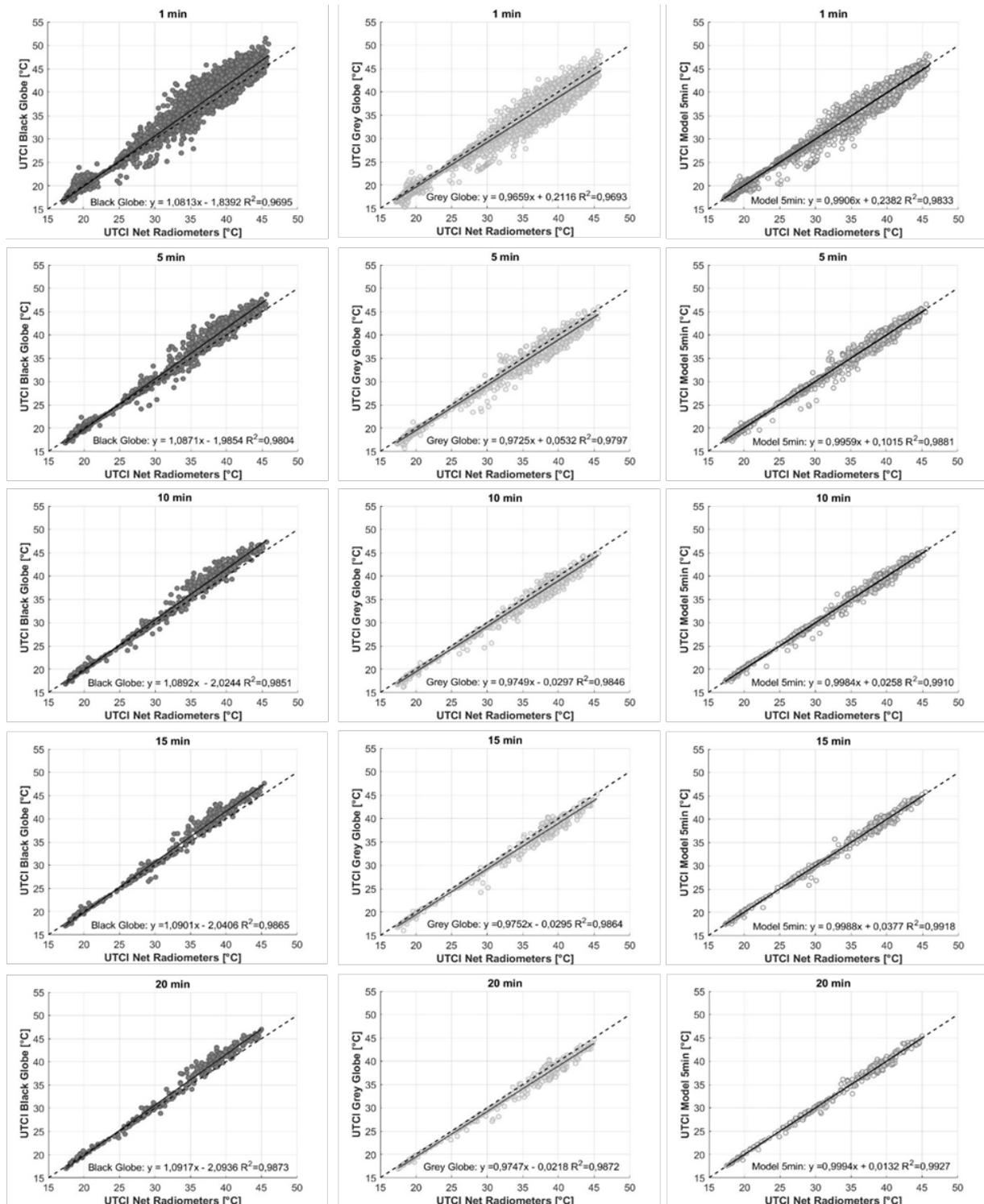


Figura 12.  $UTCI_{B15}$  (prima colonna),  $UTCI_{G5}$  (seconda colonna) e  $UTCI_{Model}$  (terza colonna) in funzione di  $UTCI_{Net}$ . Ciascuna riga corrisponde ad un diverso tempo di elaborazione, dall'alto verso il basso: 1-min, 5-min, 10-min, 15-min e 20-min.

La *Tabella 17* riporta i risultati dell'analisi dell'errore, inteso come deviazione dal valore di riferimento (ovvero  $UTCI_{Net}$ ) dello  $UTCI$  calcolato considerando i tre valori diversi di  $T_{mr}$  proposti ( $T_{mr,B15}$ ,  $T_{mr,G5}$  e  $T_{mr,Model}$ ). Tutte le metodologie alternative all'uso dei radiometri netti analizzate introducono un errore medio, in termini di  $UTCI$ , inferiore all'unità. Tuttavia, è la differenza tra  $UTCI_{Model}$  e  $UTCI_{Net}$  a presentare le più piccole variazioni.

In generale, dunque, lo  $UTCI$  segue gli andamenti generali osservati per la  $T_{mr}$ , seppure le divergenze tra metodologie di misura e calcolo della  $T_{mr}$  siano attenuate. Infatti, la  $T_{mr}$  rappresenta solo uno dei parametri che, insieme a  $T_a$ ,  $v_a$ , e  $RH$ , che concorre al calcolo dello  $UTCI$ , e dunque il suo effetto complessivo sul valore assunto dall'indice è mitigato.

I risultati di questo confronto mostrano come l'utilizzo dell'*Equazione 7* consenta di ricavare stime più accurate non solo della  $T_{mr}$  ma anche dello  $UTCI$ , rispetto a quanto si è in grado di ottenere con le sole misure dei globotermometri.

Pertanto, l'impiego di un globotermometro nero standard e la successiva introduzione della funzione di regressione proposta (*Equazione 7*) si confermano come l'alternativa migliore ai radiometri netti per la valutazione della  $T_{mr}$  in ambienti urbani complessi.

**Tabella 17. Analisi dell'errore, in termini di  $UTCI$ , in ambiente urbano**

<b>Err_ <math>UTCI_{B15}</math></b>						<b>Err_ <math>UTCI_{G5}</math></b>					
	1min	5min	10min	15min	20min		1min	5min	10min	15min	20min
<i>Media</i>	0,8	0,9	0,9	0,9	1,0	<i>Media</i>	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9
<i>Dev. Std.</i>	1,6	1,3	1,2	1,2	1,1	<i>Dev. Std.</i>	1,3	1,1	0,9	0,9	0,9
<i>Asimmetria</i>	0,9	0,6	0,6	0,6	0,6	<i>Asimmetria</i>	-0,3	-0,3	-0,6	-0,8	-0,6
<i>Curtosi</i>	2,2	1,4	0,2	0,5	-0,1	<i>Curtosi</i>	1,9	2,1	1,6	2,3	0,8
<i>Minimo</i>	-7,5	-4,3	-2,5	-2,7	-1,9	<i>Minimo</i>	-7,6	-5,6	-5,0	-4,9	-3,6
<i>Massimo</i>	8,9	6,4	5,2	5,0	4,4	<i>Massimo</i>	5,5	3,8	1,9	1,8	1,6

<b>Err_ <math>UTCI_{Model}</math></b>					
	1min	5min	10min	15min	20min
<i>Media</i>	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>Dev. Std.</i>	1,0	0,8	0,7	0,7	0,6
<i>Asimmetria</i>	-0,6	-0,6	-0,4	-0,6	-0,1
<i>Curtosi</i>	3,9	4,2	2,3	3,8	1,2
<i>Minimo</i>	-6,9	-4,5	-3,0	-3,3	-2,2
<i>Massimo</i>	4,5	4,0	3,1	3,0	2,3

#### 4.4 Estensione dell'uso del modello di regressione a misure effettuate in campo aperto e semi-aperto

Alla luce di risultati positivi ottenuti in ambienti urbani complessi, si è scelto di estendere il confronto tra metodologie di misura e calcolo della  $T_{mr}$  (inclusa quella con impiego dell'*Equazione 7*) a rilevazioni effettuate in diverse tipologie di ambiente esterno. In particolare, si è scelto di analizzare il comportamento della strumentazione in:

- “*campo aperto*”, ovvero ambienti esterni caratterizzati da un orizzonte libero su tutti i lati;
- “*campo semi-aperto*”, ovvero ambienti esterni con caratteristiche intermedie tra quelle di un campo aperto e un contesto urbano complesso.

La strumentazione impiegata in queste analisi comprende i sensori descritti in *3.1.2-Set-up sperimentale*. Inoltre, tutte le ipotesi introdotte in *3.2-Ipotesi introdotte* sono da considerarsi valide.

#### 4.4.1 Campo aperto

Il database raccolto in campo aperto fa riferimento a circa 85 ore di misurazione, effettuate in 8 giornate differenti e tre diversi siti. In particolare, la strumentazione è stata installata in un parco presso Cascina Merlata (MI) e sul tetto di due diversi edifici della città di Milano, uno in Via Feltrinelli e uno in Via Sile (Tabella 18). Tutti e tre questi siti possono essere definiti “campo aperto” in quanto presentano un orizzonte pressoché libero.

**Tabella 18. Descrizione generale delle misure effettuate in campo aperto**

Sito	Data e ora delle misurazioni	Involucro edilizio delle superfici prossime alla strumentazione
Via Feltrinelli 16, Milano	Dal 23/03/2021 11:20 Al 26/03/21 18:40	<u>Orizzontale</u> : membrana ardesiata
Cascina Merlata, Milano	23/07/2021 10:30-17:35	<u>Orizzontale</u> : manto erboso
Via Sile 14, Milano	Dal 14/07/2021 11:50 Al 16/07/2021 21:10	<u>Orizzontale</u> : manto erboso-tetto verde

La Figura 13 mostra i risultati dell’analisi di regressione svolta tra la  $T_{mr}$  calcolata tramite i radiometri netti e la  $T_{mr}$  calcolata tramite i globotermometri e tramite l’Equazione 7. In ciascun grafico vengono evidenziate la retta di regressione (linea continua), con il rispettivo coefficiente di determinazione  $R^2$ , e la bisettrice del primo quadrante (linea tratteggiata).

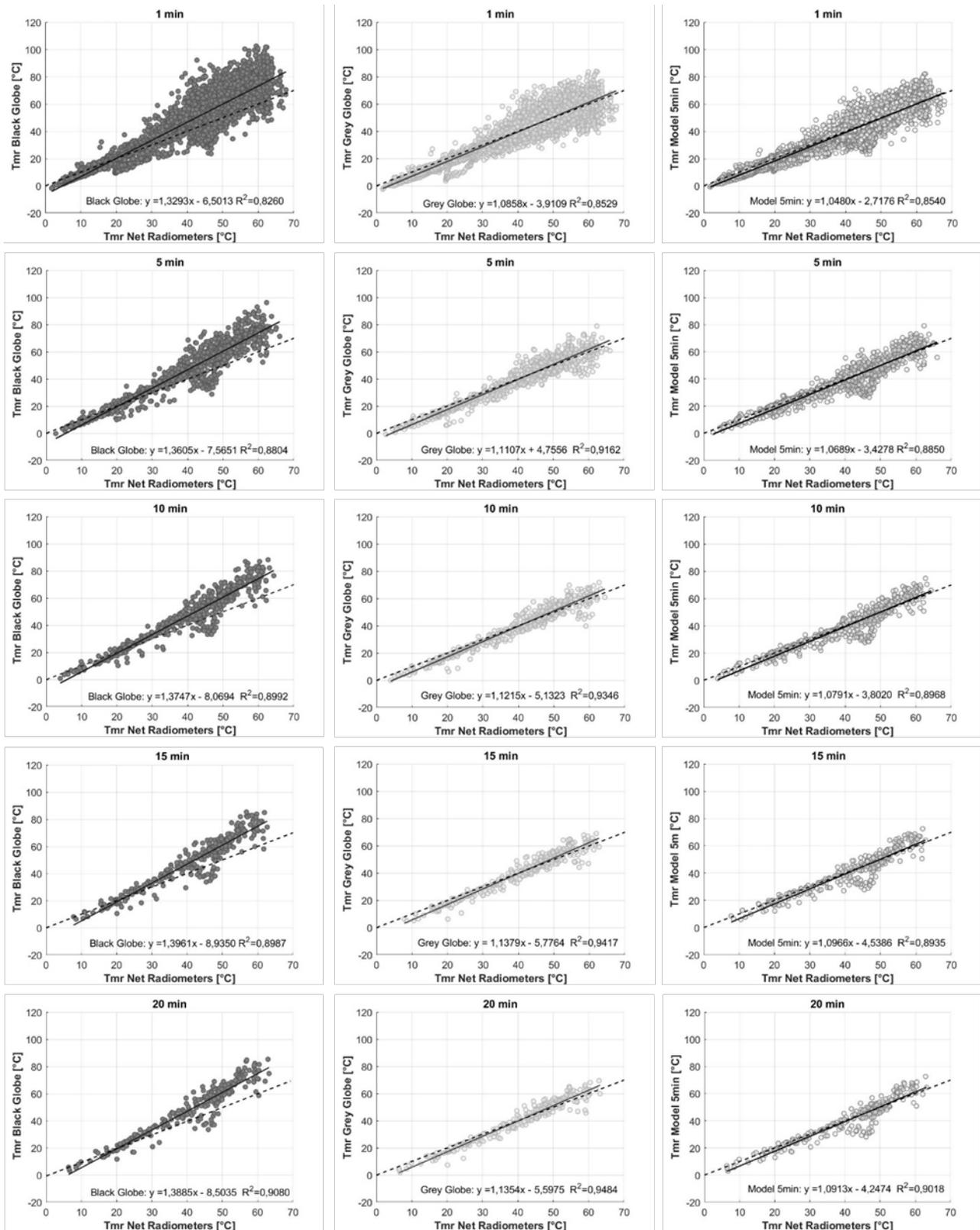
Dalle misure del globotermometro nero, senza la successiva applicazione dell’Equazione 7, si ottengono valori della  $T_{mr}$  notevolmente sovrastimati rispetto a quelli assunti dalla  $T_{mr,Net}$  (Figura 13, prima colonna). Il globo grigio invece, consente di ottenere una stima della  $T_{mr}$  prossima ai valori di riferimento ( $T_{mr,Net}$ ). Infatti, i grafici relativi a questo strumento (Figura 13, seconda colonna) presentano delle rette di regressione quasi coincidenti alla bisettrice del primo quadrante, con la sola eccezione di bassi valori di  $T_{mr}$  dove  $T_{mr,G5}$  appare sottostimata. Il calcolo  $T_{mr}$  della tramite l’Equazione 7 ( $T_{mr,Model}$ ) riduce notevolmente l’errore di sovrastima presente nei valori originali di  $T_{mr,B15}$ : dai grafici nella terza colonna della Figura 13 è possibile osservare come la retta di regressione sia in prossimità della bisettrice del primo quadrante. Inoltre, mentre i valori di  $T_{mr,B15}$  appaiono significativamente dispersi, l’utilizzo delle misure del globotermometro grigio o dell’Equazione 7 consente di ridurre notevolmente la fluttuazione nella stima della  $T_{mr}$ . Infine, come già osservato analizzando le misurazioni effettuate in contesti urbani complessi, anche in campo aperto l’aumento del tempo di elaborazione dei dati riduce l’incertezza nella stima della  $T_{mr}$  calcolata tramite i globotermometri e dovuta alla variazione repentina delle variabili ambientali.

La Tabella 19 riporta le caratteristiche degli errori relativi a ciascuna metodologia di misura e a ciascun tempo di elaborazione. La differenza tra  $T_{mr}$  la calcolata con il globotermometro nero e quella ottenuta tramite i radiometri netti è notevole, con un valore medio di circa 7 °C. Al contrario, il globotermometro grigio fornisce mediamente una stima della  $T_{mr}$  nell’intorno di  $T_{mr,Net}$ , infatti a questo strumento è associato un errore medio, in termini di  $T_{mr}$ , prossimo a 0 °C. Il diverso comportamento dei due strumenti è legato alle differenti proprietà termiche del loro rivestimento esterno: la vernice nera tende a sovrastimare l’assorbimento della radiazione a bassa lunghezza d’onda, rispetto all’assorbimento tipico di una persona, mentre la vernice grigia approssima con maggiore accuratezza le proprietà radiative di cute e vestiti [29,49].

L’utilizzo dell’Equazione 7 riduce notevolmente l’errore presente nella stima della  $T_{mr}$  da parte del globotermometro nero: in valore assoluto la differenza media tra  $T_{mr,Model}$  e  $T_{mr,Net}$  è inferiore ad 1 °C. Tuttavia, gli errori massimi e minimi che si registrano per un tempo di elaborazione pari a 1-min, sono considerevoli.

La deviazione standard dell’errore relativo alle tre diverse tecniche, ovvero globotermometro nero, globotermometro grigio e funzione di regressione, è maggiore di 1 (la deviazione standard di una distribuzione normale), ma leggermente ridotta per il globo grigio. Aumentare il tempo di elaborazione

riduce progressivamente gli indici di dispersione, a conferma di quanto ampiamente discusso nel paragrafo 4.1.2-*Influenza del tempo di elaborazione*.  
 Infine, la *Tabella 20* riporta la percentuale di casi in cui l'errore ricade nell'intervallo  $\pm 5$  °C.



**Figura 13. Campo aperto,  $T_{mr,B15}$  (prima colonna),  $T_{mr,G5}$  (seconda colonna) e  $T_{mr,Model}$  (terza colonna) in funzione di  $T_{mr,Net}$ . Ciascuna riga corrisponde ad un diverso tempo di elaborazione, dall'alto verso il basso: 1-min, 5-min, 10-min, 15-min e 20-min.**

**Tabella 19. Analisi dell'errore in campo aperto**

<i>Err_ T<sub>mr,B15</sub></i>						<i>Err_ T<sub>mr,G5</sub></i>					
	1min	5min	10min	15min	20min		1min	5min	10min	15min	20min
<i>Media</i>	7,0	7,2	7,3	7,6	7,5	<i>Media</i>	-0,4	-0,2	-0,1	0,0	0,0
<i>Dev. Std.</i>	9,5	8,4	8,1	7,9	7,8	<i>Dev. Std.</i>	6,3	4,8	4,4	4,1	4,0
<i>Asimmetria</i>	0,6	0,2	0,0	-0,1	-0,1	<i>Asimmetria</i>	0,6	0,4	0,0	0,0	0,0
<i>Curtosi</i>	0,5	0,0	-0,3	-0,3	-0,4	<i>Curtosi</i>	1,5	1,2	1,4	0,8	0,8
<i>Minimo</i>	-23,2	-18,0	-13,5	-11,8	-12,5	<i>Minimo</i>	-23,6	-16,3	-19,2	-13,9	-13,4
<i>Massimo</i>	49,5	34,0	30,7	28,5	27,9	<i>Massimo</i>	29,8	18,1	15,5	11,6	10,7

<i>Err_ T<sub>mr,Model</sub></i>					
	1min	5min	10min	15min	20min
<i>Media</i>	-0,7	-0,6	-0,5	-0,5	-0,5
<i>Dev. Std.</i>	6,0	5,4	5,1	5,0	5,0
<i>Asimmetria</i>	0,0	-0,4	-0,6	-0,6	-0,7
<i>Curtosi</i>	1,4	1,4	1,3	1,3	1,5
<i>Minimo</i>	-23,3	-20,3	-18,3	-17,6	-17,9
<i>Massimo</i>	28,3	16,9	12,6	11,5	11,4

**Tabella 20. Percentuale di casi in cui l'errore rientra nel range  $\pm 5$  °C (campo aperto)**

	<i>Err_ T<sub>mr,B15</sub></i>	<i>Err_ T<sub>mr,G5</sub></i>	<i>Err_ T<sub>mr,Model</sub></i>
<i>1min</i>	42%	65%	68%
<i>5min</i>	37%	76%	72%
<i>10min</i>	35%	80%	75%
<i>15min</i>	33%	81%	74%
<i>20min</i>	34%	84%	76%

Sulla base dei risultati ottenuti, la migliore alternativa ai radiometri netti per la valutazione della  $T_{mr}$  in campo aperto è rappresentata dal globotermometro grigio di rame da 50 mm. Tuttavia, per un tempo di elaborazione pari a 1-min, la  $T_{mr,G5}$  mostra una notevole fluttuazione, risultante in un errore di stima non trascurabile (nel 35% dei casi l'errore non rientra nell'intervallo desiderato  $\pm 5$  °C, vedi *Err\_ T<sub>mr,G5</sub>* in *Tabella 20*); l'utilizzo di tempi di elaborazione più lunghi (10-min o più) riduce sensibilmente la dispersione dei risultati e l'errore, determinando una stima più accurata della  $T_{mr}$  (*Tabella 20*). Dunque, l'impiego di un globo grigio in campo aperto emerge come una valida alternativa ai radiometri netti per il calcolo della  $T_{mr}$  solo per tempi di elaborazione pari o superiori a 5-min, per tempi inferiori sarebbe opportuno definire delle funzioni correttive specifiche, come fatto nel caso di ambienti urbani complessi. Tuttavia, il database relativo al campo aperto fa riferimento a soli tre siti di misura e ad un numero limitato di rilevazioni, per migliorare la qualità dei risultati sarebbe opportuno svolgere ulteriori prove.

Il globotermometro nero standard da 150 mm fornisce stime della  $T_{mr}$  notevolmente diverse da quelle che è possibile ottenere tramite i radiometri netti, di conseguenza il suo impiego in campo aperto può condurre a risultati incoerenti. La  $T_{mr,B15}$  risulta sistematicamente maggiore della  $T_{mr,Net}$  e, per un tempo di elaborazione di 1-min, la loro differenza rientra nell'intervallo  $\pm 5$  °C solo nel 42% dei casi. Aumentare il tempo di elaborazione tende ad incrementare il valore medio dell'errore introdotto dal globo nero, riducendo ulteriormente l'affidabilità dei suoi risultati.

L'utilizzo dell'*Equazione 7* permette di incrementare la corrispondenza tra la  $T_{mr}$  stimata dal globo nero e la  $T_{mr,Net}$ , riducendo l'errore medio, minimo e massimo. Tuttavia, la percentuale di casi in cui l'errore non è trascurabile resta alta (25% o più). Di conseguenza, l'impiego dell'*Equazione 7* per la valutazione della  $T_{mr}$  in campo aperto può condurre a risultati non congruenti.

#### 4.4.2 Campo semi-aperto

Il database raccolto in campo semi-aperto include circa 94 ore di misurazione, svolte in 7 giornate differenti ed in due diversi siti. In particolare, la strumentazione è stata installata sulla copertura di due diversi edifici di proprietà del Politecnico di Milano (*Tabella 21*).

**Tabella 21. Descrizione generale delle misure effettuate in campo semi-aperto**

Sito	Data e ora delle misurazioni	Involucro edilizio delle superfici prossime alla strumentazione
Via G. Ponzio, Milano	Dal 29/06/2021 11:00 Al 01/07/2021 21:15	<u>Orizzontale</u> : manto erboso-tetto verde <u>Verticale</u> : piastrelle in ceramica
Quartiere Bovisa, Milano	Dal 14/06/2021 9:40 Al 17/06/2021 14:55	<u>Orizzontale</u> : cemento <u>Verticale</u> : lastre gres porcellanato/vetro

La *Figura 14* presenta, per ciascun tempo di elaborazione, i diagrammi di dispersione della  $T_{mr}$  calcolata tramite il globotermometro nero (*Figura 14*, prima colonna), il globotermometro grigio (*Figura 14*, seconda colonna) e l'*Equazione 7* (*Figura 14*, terza colonna) in funzione della di  $T_{mr}$  riferimento ( $T_{mr,Net}$ ).

In campo semi-aperto il globotermometro nero tende, per alti valori di  $T_{mr}$ , a sovrastimare la  $T_{mr}$  rispetto al valore calcolato tramite i radiometri netti. Al contrario, a bassi valori la  $T_{mr,B15}$  risulta essere sottostimata. Il globotermometro grigio sottostima lievemente la  $T_{mr}$ , sebbene la retta di regressione, per ciascun tempo di elaborazione, mostri la stessa inclinazione della bisettrice del primo quadrante (coefficiente angolare quasi pari ad 1). I grafici relativi ad entrambi i globotermometri (*Figura 14*, prima e seconda colonna) presentano un'ampia dispersione dei dati, ad indicare l'andamento fluttuante caratterizzante i profili di  $T_{mr,B15}$  e  $T_{mr,G5}$ . Aumentare il tempo di elaborazione contribuisce a ridurre tale dispersione, tuttavia, tende anche ad enfatizzare l'inclinazione delle rette di regressione, relative alla distribuzione della  $T_{mr}$  calcolata con ciascun globo, rispetto alla bisettrice del primo quadrante e dunque ad enfatizzare le divergenze tra le diverse metodologie analizzate. L'utilizzo dell'*Equazione 7* assicura una stima accurata della  $T_{mr}$ : per ciascun tempo, la distribuzione di  $T_{mr,Model}$  presenta una dispersione contenuta e una retta di regressione prossima a quella ideale.

La *Tabella 22* riassume le caratteristiche dell'errore, in termini di  $T_{mr}$ , introdotto da ciascun globo e dall'applicazione dell'*Equazione 7*. Il globotermometro nero tende a fornire una stima della  $T_{mr}$  notevolmente maggiore di quella ottenuta tramite i radiometri netti. In particolare, l'errore medio associato a questo strumento oscilla tra i 6 °C e i 7 °C. Inoltre, per tempi di elaborazione pari a 1-min o 5-min gli errori massimo e minimo registrati sono significativi. Al contrario, il globotermometro grigio tende a sottostimare la  $T_{mr}$ , in media la differenza tra  $T_{mr,G5}$  e  $T_{mr,Net}$  è di circa -2 °C. L'errore medio introdotto da questo strumento è minore a quello associato al globotermometro nero, tuttavia, i valori massimi e minimi registrati restano notevoli.

Infine, l'uso dell'*Equazione 7* consente di migliorare la corrispondenza tra  $T_{mr,B15}$  e  $T_{mr,Net}$ , diminuendo significativamente l'errore medio (inferiore ad 1 °C in valore assoluto) e riducendo i valori minimi e massimi dell'errore.

Osservando la prima riga dei grafici in *Figura 14*, è possibile evidenziare l'ampia dispersione dei dati relativi alla  $T_{mr}$  calcolata tramite il globotermometro nero standard. Questa caratteristica è confermata anche dall'elevato valore assunto dalla deviazione standard dell'errore, ovvero 7,5 °C per un tempo di elaborazione pari ad 1-min. Al contrario,  $T_{mr,G5}$  e  $T_{mr,Net}$  appaiono distribuite in prossimità della propria retta di regressione, la deviazione standard dell'errore relativo a queste due stime della  $T_{mr}$  è quasi dimezzata rispetto a quella del globo nero.

L'incremento del tempo di elaborazione determina, anche in campo semi-aperto, l'effetto ampiamente discusso nei paragrafi precedenti: si attenuano le variazioni di  $v_a$  e  $R_{GL}$ , con conseguente riduzione della dispersione delle stime della  $T_{mr}$ .

Infine, la *Tabella 23* presenta la percentuale di casi in cui l'errore relativo alle tre diverse stime di  $T_{mr}$  (ovvero  $T_{mr,B15}$ ,  $T_{mr,G5}$  e  $T_{mr,Model}$ ) rientra nell'intervallo  $\pm 5$  °C.

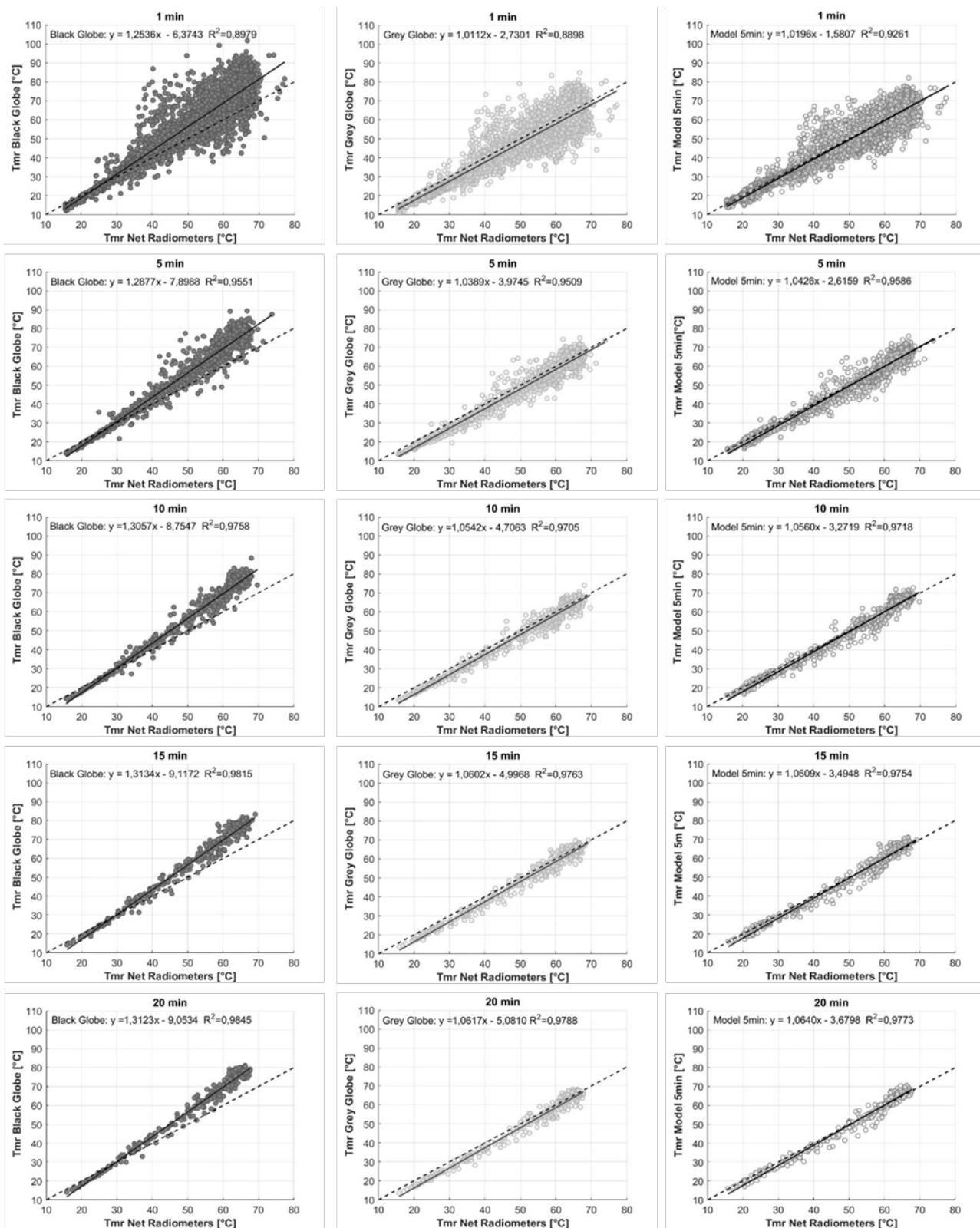


Figura 14. Campo semi-aperto,  $T_{mr,B15}$  (prima colonna),  $T_{mr,G5}$  (seconda colonna) e  $T_{mr,Model}$  (terza colonna) in funzione di  $T_{mr,Net}$ . Ciascuna riga corrisponde ad un diverso tempo di elaborazione, dall'alto verso il basso: 1-min, 5-min, 10-min, 15-min e 20-min.

**Tabella 22. Analisi dell'errore in campo semi-aperto**

<i>Err_ T<sub>mr,B15</sub></i>						<i>Err_ T<sub>mr,G5</sub></i>					
	1min	5min	10min	15min	20min		1min	5min	10min	15min	20min
<i>Media</i>	6,3	6,5	6,6	6,6	6,8	<i>Media</i>	-2,2	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0
<i>Dev. Std.</i>	7,5	6,1	5,5	5,4	5,2	<i>Dev. Std.</i>	5,4	3,6	2,9	2,6	2,5
<i>Asimmetria</i>	0,6	0,2	0,0	-0,1	-0,2	<i>Asimmetria</i>	0,6	0,5	0,2	0,1	0,1
<i>Curtosi</i>	0,7	-0,5	-1,0	-1,1	-1,1	<i>Curtosi</i>	2,9	2,1	0,8	0,2	0,1
<i>Minimo</i>	-22,6	-10,5	-6,8	-4,8	-4,2	<i>Minimo</i>	-27,3	-16,5	-11,0	-9,4	-9,0
<i>Massimo</i>	46,6	28,1	20,3	19,5	17,4	<i>Massimo</i>	33,2	15,3	9,0	6,1	4,5

<i>Err_ T<sub>mr,Model</sub></i>					
	1min	5min	10min	15min	20min
<i>Media</i>	-0,6	-0,5	-0,5	-0,4	-0,4
<i>Dev. Std.</i>	4,4	3,3	2,8	2,7	2,5
<i>Asimmetria</i>	0,4	0,2	-0,1	-0,2	-0,3
<i>Curtosi</i>	3,2	1,9	0,9	1,0	0,9
<i>Minimo</i>	-22,7	-15,0	-11,2	-9,4	-8,6
<i>Massimo</i>	26,8	15,2	8,7	9,0	5,8

**Tabella 23. Percentuale di casi in cui l'errore rientra nel range  $\pm 5$  °C (campo semi-aperto)**

	<i>Err_ T<sub>mr,B15</sub></i>	<i>Err_ T<sub>mr,G5</sub></i>	<i>Err_ T<sub>mr,Model</sub></i>
<i>1min</i>	47%	67%	80%
<i>5min</i>	42%	80%	87%
<i>10min</i>	40%	87%	92%
<i>15min</i>	40%	88%	92%
<i>20min</i>	39%	90%	94%

Analogamente a quanto osservato in campo aperto, l'impiego di un globotermometro nero standard, senza successiva applicazione della funzione di regressione proposta (*Equazione 7*), non consente di ottenere stime affidabili della  $T_{mr}$ . In siti caratterizzati da scarsa presenza di edifici o strutture che limitano l'influenza della radiazione solare diretta (ovvero campo aperto e campo semi-aperto), rivestire il globotermometro con una vernice nera porta a un'eccessiva sovrastima dell'assorbimento della radiazione a bassa lunghezza d'onda, rispetto al comportamento tipico della cute e degli indumenti.

Al contrario, sia il globotermometro grigio che l'impiego dell'*Equazione 7* emergono come alternative valide all'utilizzo dei radiometri netti per la stima della  $T_{mr}$  in campo semi-aperto. In particolare, il globotermometro grigio da 50 mm risulta accurato per tempi di elaborazione pari o superiori a 10-min, così da limitare al 13% (o meno) i casi in cui l'errore supera in valore assoluto i 5° C. L'impiego del globotermometro nero standard da 150 mm e la successiva applicazione dell'*Equazione 7* risultano invece validi anche per tempi di elaborazione pari a 5-min, determinando un errore compreso tra  $\pm 5$  °C in più del 90% dei casi.

In conclusione, per la valutazione della  $T_{mr}$  in ambiente urbano complesso e in campo semi aperto, l'utilizzo di un globotermometro nero standard (diametro 150 mm, spessore 0,4 mm e emissività 0,963) e l'applicazione dell'*Equazione 7* rappresentano un'alternativa migliore rispetto all'uso dei radiometri netti. Tuttavia, il database raccolto in campo aperto fa riferimento a misurazioni raccolte in soli due siti, durante il mese di giugno 2021, sarebbero necessarie, pertanto, ulteriori analisi (in luoghi e mesi differenti) per validare i risultati riportati in questo paragrafo.

## 4.5 Valutazione delle proprietà radiative delle superfici di involucro

Al fine di caratterizzare le condizioni dell'ambientali urbane ed i parametri che le influenzano è stato effettuato il calcolo delle proprietà radiative delle superfici circostanti l'ambiente testato in ciascuna delle prove sperimentali condotte. Le diverse proprietà termo-ottiche delle superfici presenti in un ambiente ne influenzano infatti il campo radiativo e, conseguentemente, il microclima, determinando una differente percezione termica da parte del soggetto che vi è immerso.

In particolare, per tutte le superfici verticali e orizzontali analizzate, sono state calcolate l'assorbanza  $\alpha$  e la riflettanza  $\rho$  nel campo della radiazione solare (globale) a partire da un bilancio radiativo delle superfici, realizzato attraverso le misure dei radiometri netti. I risultati ottenuti, seppure approssimativi in quanto influenzati dall'eventuale presenza di flussi radiativi provenienti dall'ambiente circostante la superficie che si vuole analizzare, risultano utili nel contesto attuale di assenza in letteratura di valori di riferimento. Una caratterizzazione sperimentale più precisa, ma allo stesso tempo costosa, richiederebbe una verifica in laboratorio da effettuarsi tramite uno spettrofotometro e da ripetersi con campioni invecchiati nel tempo, per tenere conto dello sporco del materiale.

### 4.5.1 Calcolo della riflettanza e dell'assorbanza solare di una superficie attraverso i radiometri netti

Nel corso dell'intera campagna sperimentale la strumentazione è stata installata secondo una ben precisa configurazione. In riferimento alla Figura 2, il radiometro 1 è sempre stato posizionato parallelamente alla superficie di pavimento ad un'altezza di 1,1 m, mentre il radiometro 2 è sempre stato disposto parallelamente alla superficie verticale di involucro più prossima alla strumentazione e ad una distanza di 1 m da essa. Conseguentemente, sulla base dei flussi radiativi rilevati da questi strumenti è stato possibile calcolare le proprietà radiative (riflettanza e assorbanza) delle superfici orizzontali e verticali nel campo della radiazione a bassa lunghezza d'onda (solare o globale). La procedura di calcolo è basata sull'applicazione delle seguenti equazioni (Equazione 8 e Equazione 9):

$$\rho_{Gl} = \frac{SW_{DOWN}}{SW_{UP}} \quad [-] \quad (8)$$

$$\alpha_{Gl} = 1 - \rho_{Gl} \quad [-] \quad (9)$$

Dove:

- $\rho_{Gl}$  è la riflettanza solare della superficie analizzata,
- $\alpha_{Gl}$  è l'assorbanza solare della superficie analizzata,
- $SW_{DOWN}$  rappresenta il flusso radiativo a bassa lunghezza d'onda misurato dal piranometro rivolto verso la superficie esaminata,
- $SW_{UP}$  rappresenta il flusso radiativo a bassa lunghezza d'onda misurato dal piranometro rivolto verso il resto dell'ambiente.

Va specificato che le Equazioni 8 e 9 sono valide per le seguenti assunzioni:

- la radiazione a bassa lunghezza d'onda incidente su una superficie orizzontale o verticale è uguale alla quantità di radiazione a bassa lunghezza d'onda che raggiunge il sensore rivolto verso il resto dell'ambiente,
- la radiazione a bassa lunghezza d'onda riflessa da una superficie orizzontale o verticale è uguale alla quantità di radiazione a bassa lunghezza d'onda misurata dal sensore rivolto verso la superficie stessa. 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.

I valori calcolati di riflettanza ed assorbanza medie solari, risultanti dalle analisi di tutte le superfici orizzontali e verticali testate nel corso delle prove sperimentali, sono riportati rispettivamente nella Tabella 24 e nella Tabella 25.

Tra superfici orizzontali analizzate (*Tabella 24*) la pavimentazione in sanpietrini, testata durante le prove del 06/10/2020, mostra il valore di assorbanza solare più alto (0,88) e, conseguentemente, il valore più basso di riflettanza solare (0,12). Alti valori di assorbanza solare (0,85) sono inoltre stati registrati per la copertura in membrana bituminosa ardesiata, sulla quale sono state effettuate le prove dal 23/03/2021 al 26/03/2021. Al contrario, la superficie orizzontale di involucro che ha registrato il più alto valore di riflettanza solare è la pavimentazione in cemento chiaro spazzolato, analizzata il 05/07/2021. La riflettanza di questa superficie nel campo della radiazione solare è pari a 0,34. La pavimentazione in cemento battuto ha registrato valori di assorbanza solari compresi tra 0,77 e 0,79, mentre quelle con autobloccanti tra 0,72 e 0,84. Infine, nel caso delle pavimentazioni verdi, il prato del parco di Cascina Merlata e il manto erboso in copertura all'edificio di Via Sile 14 (MI) mostrano valori di riflettanza solare simili tra loro e pari rispettivamente a 0,21 e 0,20. Valori di riflettanza simili si registrano inoltre anche per la copertura verde dell'edificio in Via Ponzio (MI): questa superficie mostra una riflettanza solare pari a 0,27 ed un'assorbanza solare pari a 0,73. Per quanto riguarda le superfici verticali (*Tabella 25*), il valore medio più basso di riflettanza solare è pari a 0,18 ed è stato registrato per la finitura in pittura chiara testata il 06/07/2021. Al contrario, la parete in intonaco con finitura in pittura chiara testata il 05/07/2021 mostra un valore medio di riflettanza solare nettamente superiore, e pari a 0,49. La differenza di questi risultati può essere imputata in parte al colore delle due superfici (leggermente più scuro per la prima) e alle diverse condizioni di prova, che hanno visto la parete testata nel corso del 06/07/2021 in ombra per tutta la durata delle misurazioni. Le due pareti verdi testate registrano valori di riflettanza solare (0,27 e 0,34) paragonabili a quelli del gres porcellanato e della parete con finitura azzurra (0,31). La superficie di involucro in lamiera ondulata mostra invece una riflettanza pari a 0,40 e, conseguentemente, un'assorbanza solare media di 0,60.

**Tabella 24. Riflettanza ed assorbanza solare (globale) delle superfici orizzontali testate tra il 2020 e il 2021**

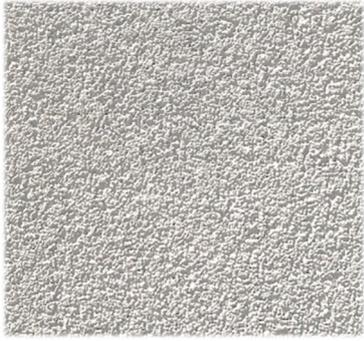
Identificazione test di misura	Involucro edilizio orizzontale	Foto	$\rho_{GI}$ [-]	$\alpha_{GI}$ [-]
Milano, Cascina Merlata (01/09/2020)	Autobloccanti		0,28	0,72
Milano, quartiere Bovisa (09/09/2020, 18/09/2020 e 08/07/2021)	Pavimentazione in cemento battuto		0,23	0,77

Identificazione test di misura	Involucro edilizio orizzontale	Foto	$\rho_{GI}$ [-]	$\alpha_{GI}$ [-]
Milano, quartiere Bovisa (17/09/2020 e 07/07/2021)	Autobloccanti		0,16	0,84
Milano, Via Bovisasca 57 (06/10/2020)	Sanpietrini		0,12	0,88
Milano, Via Feltrinelli 16 (dal 23/03/2021 al 26/03/2021)	Copertura piana con membrana ardesiata		0,15	0,85
Milano, quartiere Bovisa (dal 14/06/2021 al 17/06/2021)	Copertura piana con lastre in cemento chiaro		0,21	0,79
Milano, Via G. Ponzio (dal 29/06/2021 al 01/07/2021)	Manto erboso – tetto verde		0,27	0,73

Identificazione test di misura	Involucro edilizio orizzontale	Foto	$\rho_{GI}$ [-]	$\alpha_{GI}$ [-]
Milano, Via Lambruschini 4 (05/07/2021)	Pavimentazione in cemento chiaro spazzolato		0,34	0,66
Milano, Via Lambruschini 36 (06/07/2021)			0,14	0,86
Milano, quartiere Bovisa (dal 09/07/2021 al 11/07/2021)	Pavimentazione con lastre in cemento chiaro		0,25	0,75
Milano, Via Sile 14 (dal 14/07/2021 al 16/07/2021)	Manto erboso – tetto verde		0,20	0,80
Milano, Cascina Merlata (23/07/21)	Manto erboso		0,21	0,79

**Tabella 25. Riflettanza e assorbanza solare (globale) delle superfici verticali testate tra il 2020 e il 2021**

Identificazione test di misura	Involucro edilizio verticale	Foto	$\rho_{GI}$ [-]	$\alpha_{GI}$ [-]
Milano, Cascina Merlata (01/09/2020)	Finitura in intonaco e pittura celeste		0,31	0,69
Milano, quartiere Bovisa (09/09/2020, 18/09/2020 e 08/07/2021)	Lastre in gres porcellanato		0,22	0,78
Milano, quartiere Bovisa (17/09/2020 e 07/07/2021)	Parete verde - Vite americana		0,27	0,73
Milano, Via Bovisasca 57 (06/10/2020)	Parete verde - Vite americana		0,34	0,66

Identificazione test di misura	Involucro edilizio verticale	Foto	$\rho_{GI}$ [-]	$\alpha_{GI}$ [-]
Milano, Via Lambruschini 4 (05/07/2021)	Finitura in intonaco e pittura chiara		0,49	0,51
Milano, Via Lambruschini 36 (06/07/2021)	Finitura in intonaco e pittura chiara		0,18	0,82
Milano, quartiere Bovisa (dal 09/07/2021 al 11/07/2021)	Lamiera ondulata		0,40	0,60

#### 4.5.2 Calcolo proprietà radiative di una superficie attraverso un globotermometro

Come precedentemente illustrato, la strumentazione composta da un globotermometro nero standard ( $D=150$  mm e  $\epsilon_g=0,963$ ) ed un sensore multiparametro si è dimostrata, insieme all'utilizzo dell'equazione empirica ricavata tramite l'analisi di regressione (*Equazione 7*), una soluzione alternativa all'impiego dei tre radiometri netti per il calcolo della  $T_{mr}$  in ambiente urbano esterno.

Nel tentativo di estendere ulteriormente l'impiego di tale strumentazione, si è scelto di verificare la possibilità di valutare le proprietà termiche delle superfici tramite le misurazioni effettuate a mezzo del globotermometro. Tale verifica è basata sulla scrittura e l'analisi delle equazioni di bilancio relative allo scambio termico tra il globotermometro e l'ambiente circostante e a quello tra la parete in analisi e l'ambiente.

Per quanto riguarda il globotermometro, in condizioni stazionarie, l'equazione di bilancio assume la forma:

$$q_{c,g} + q_{r,g} = 0 \quad (10)$$

Dove i termini  $q_{c,g}$  e  $q_{r,g}$  (entrambi misurati in  $W/m^2$ ) rappresentano rispettivamente il flusso termico convettivo e quello radiativo tra lo strumento e l'ambiente. Tali flussi, in riferimento alla nomenclatura precedentemente introdotta, possono essere espressi come:

$$q_{c,g} = h_{cv}(T_a - T_g) \quad (11)$$

$$q_{r,g} = \varepsilon_g \sigma (T_{mr}^4 - T_g^4) \quad (12)$$

Consentendo di riscrivere l'Equazione 10 come:

$$h_{cv}(T_a - T_g) + \varepsilon_g \sigma (T_{mr}^4 - T_g^4) = 0 \quad (13)$$

L'output dello strumento è rappresentato da  $T_g$ , la temperatura di equilibrio tra gli scambi termici convettivi e radiativi cui è soggetto il globo stesso, e dunque l'unica incognita presente nell'equazione di bilancio e la  $T_{mr}$ . Un globotermometro consente dunque la stima della  $T_{mr}$ , ma non fornisce alcuna informazione circa i flussi radiativi scambiati tra lo strumento e le diverse superfici presenti nell'ambiente. Inoltre, trattandosi di uno strumento non direzionale, il globotermometro non consente di isolare il flusso termico scambiato direttamente con una specifica parete.

Per la superficie di involucro, assumendo la sua temperatura  $T_i$  uniforme, al fine di poter trascurare il termine conduttivo, l'equazione di bilancio in stato stazionario (Equazione 14) tra la parete e l'ambiente circostante può essere scritta come:

$$q_{c,i} + q_{solar,i} + q_{lwr,i} = 0 \quad (14)$$

Dove:

- $q_{c,i}$  è la componente di flusso relativa allo scambio termico convettivo tra superficie ed ambiente, misurata in  $W/m^2$ . Questo termine può essere espresso come  $q_{c,i} = h_{cv}(T_a - T_i)$ ,
- $q_{solar,i}$  rappresenta la quota, misurata in  $W/m^2$ , di radiazione solare (a bassa lunghezza d'onda) assorbita dalla superficie in analisi, ovvero la differenza tra la radiazione solare incidente sulla superficie e quella riflessa dalla stessa. Tale termine è esprimibile come  $q_{solar,i} = \alpha_{GL,i} \cdot I$ ,
- $q_{lwr,i}$  misurato in  $W/m^2$ , rappresenta lo scambio termico radiativo ad elevata lunghezza d'onda tra la superficie in analisi e ciascuna delle  $j$ -esime superfici che compongono la restante parte dell'ambiente. Tale termine può essere espresso come  $q_{lwr,i} = \sum_{j=1}^n \varepsilon_i \sigma F_{i-j} (T_j^4 - T_i^4)$ .

Sostituendo a ciascun termine la propria espressione, l'Equazione 14 può essere riscritta come:

$$h_{cv}(T_a - T_i) + \alpha_{GL,i} \cdot I + \sum_{j=1}^n \varepsilon_i \sigma F_{i-j} (T_j^4 - T_i^4) = 0 \quad (15)$$

Le Equazione 15 introduce il termine di assorbanza solare della superficie analizzata ( $\alpha_{GL,i}$ ), pur tuttavia non consentendone il calcolo. Infatti, le proprietà radiative della superficie non rappresentano le uniche incognite del problema: con una strumentazione costituita esclusivamente da un globotermometro ed un sensore multiparametro non è possibile ottenere alcuna informazione né circa la temperatura della parete d'involucro analizzata ( $T_i$ ) o la sua emissività ( $\varepsilon_i$ ), né circa la temperatura di tutte le altre superfici presenti in ambiente ( $T_j$ ) e dei diversi fattori di vista ( $F_{i-j}$ ). Naturalmente l'effetto complessivo dello scambio termico radiativo cui è soggetta la superficie in analisi può essere riassunto con l'introduzione della temperatura media radiante, tuttavia, tale parametro, poiché dipendente dalla posizione e dall'orientamento del corpo nello spazio, non corrisponderebbe alla  $T_{mr}$  calcolata attraverso le misure del globotermometro e ricavabile dall'Equazione 13.

Dunque, a causa di tutti questi motivi, un set-up sperimentale costituito solo da un globotermometro ed un sensore multiparametro non consente la valutazione delle proprietà radiative di una superficie.

## 5 Conclusioni

Nel corso del presente studio sono state applicate e confrontate due diverse metodologie per la misura ed il calcolo della temperatura media radiante in ambiente esterno. In particolare, i valori della  $T_{mr}$  sono stati ottenuti con le misure di tre radiometri netti e la metodologia di calcolo proposta dalla norma VDI 3787 [34] ( $T_{mr,Net}$ ), con l'uso di un globotermometro nero da 150 millimetri di diametro ( $T_{mr,B15}$ ) e con l'impiego di un globotermometro grigio da 50 millimetri di diametro ( $T_{mr,G5}$ ). Per la valutazione della  $T_{mr}$  tramite le misure dei globotermometri si è fatto riferimento alla procedura espressa dallo standard ISO 7726 [49].

Poiché dalla letteratura scientifica emerge che quella proposta dalla norma VDI 3787 [34] è la metodologia più accurata, la  $T_{mr}$  calcolata tramite i radiometri netti è stata assunta come valore di riferimento. Di conseguenza, l'errore è stato definito come deviazione dei valori di  $T_{mr,B15}$  e  $T_{mr,G5}$  da quelli di  $T_{mr,Net}$ .

Il confronto tra i valori di  $T_{mr}$  citati ha l'obiettivo di indagare l'accuratezza dei globotermometri quando impiegati in sostituzione dei radiometri netti e quali limitazioni siano da considerarsi nella presentazione dei risultati.

Il database sfruttato per le analisi è stato raccolto nel corso di un'estesa campagna sperimentale, svolta in diversi siti dell'area metropolitana di Milano tra il 2020 e il 2021. In particolare, nel 2021 sono state effettuate 21 giornate di misura, consentendo di ampliare notevolmente il database delle misure, e sono stati rielaborati anche i dati della precedente campagna sperimentale svolta nel 2020. Le rilevazioni sono state eseguite in contesti urbani complessi, caratterizzati dalla presenza di edifici e strutture, realizzati con un'ampia varietà di materiali e tecnologie edilizie, su almeno tre lati della strumentazione e ad una distanza massima da essa di 30 m. Successivamente sono stati analizzati anche i dati della campagna sperimentale svolta in campo aperto e semi-aperto nel 2021.

Da un confronto diretto tra la  $T_{mr}$  ottenuta tramite i globotermometri e la  $T_{mr}$  calcolata con i radiometri netti è stato possibile evidenziare, nelle condizioni climatiche considerate (ovvero clima umido subtropicale [53]) la tendenza del globo nero a sovrastimare la  $T_{mr}$  e quella del globo grigio a sottostimarla rispetto al valore che si ottiene con l'impiego dei radiometri netti. Inoltre, l'andamento di  $T_{mr,B15}$  e  $T_{mr,G5}$  appare significativamente meno stabile del profilo di  $T_{mr,Net}$ : la natura di questo fenomeno è stata indagata analizzando l'influenza del tempo di elaborazione dei dati e delle variabili meteorologiche sulla risposta dei globotermometri.

Svolgendo un test di correlazione di Pearson tra l'errore di stima della  $T_{mr}$  relativo ad entrambi i globi e le principali variabili meteorologiche ( $T_a$ ,  $v_a$ ,  $R_{GL}$  e  $RH$ ), è emersa la presenza di una forte correlazione tra gli errori e l'irradianza solare ( $R_{GL}$ ) e tra gli errori e la velocità del vento ( $v_a$ ). Le rapide variazioni dei flussi radiativi solari e della velocità del vento impediscono ai globotermometri di raggiungere la condizione di equilibrio termico richiesta per dare luogo ad una misura accurata. Conseguentemente, i valori della  $T_{mr}$  ottenuti tramite i globi risultano affetti da maggiore incertezza. L'aumento del tempo di elaborazione delle analisi consente di ridurre le fluttuazioni nel profilo di  $T_{mr,B15}$  e  $T_{mr,G5}$  dovute alle rapide variazioni delle variabili ambientali: incrementando il tempo di elaborazione da 1-min a 5-min le stime dei globotermometri acquisiscono un andamento notevolmente più stabile con conseguente riduzione degli errori massimi e minimi registrati.

Tuttavia, in ambienti urbani complessi, né il globo nero né il globo grigio rappresentano un'alternativa sufficientemente valida ai radiometri netti per la valutazione del microclima urbano: in media la stima di  $T_{mr,B15}$  differisce dai valori di riferimento di circa 3,6 °C, mentre la divergenza media tra  $T_{mr,G5}$  e  $T_{mr,Net}$  è pari circa a -3,3 °C. Inoltre, se si considera un tempo di elaborazione di 1-min, per ciascun globotermometro la percentuale di casi in cui l'errore può essere considerato accettabile (ovvero rientra nell'intervallo  $\pm 5$  °C) è piuttosto bassa ed è pari circa al 67%. Aumentare il tempo di elaborazione riduce la deviazione standard degli errori, tuttavia, le percentuali in cui questi non rientrano nell'intervallo  $\pm 5$  °C restano significative: tra il 25% ed il 30% per il globo grigio, e oltre il 40% per il globo nero.

Sulla base di questi risultati si è scelto, attraverso un'analisi di regressione lineare multipla, di definire delle equazioni in grado di migliorare la corrispondenza tra la  $T_{mr}$  ottenuta tramite le misure dei globotermometri e la  $T_{mr}$  calcolata per mezzo dei radiometri netti. Inizialmente sia  $T_{mr,B15}$  che  $T_{mr,G5}$  sono state incluse,

insieme ai parametri ambientali  $T_a$ ,  $v_a$  e  $R_{GL}$ , tra le variabili predittive del modello, tuttavia le analisi hanno mostrato come considerare tra i regressori entrambe le temperature  $T_{mr,B15}$  e  $T_{mr,G5}$  o esclusivamente  $T_{mr,B15}$  produca risultati simili. Dunque, i modelli di regressione proposti vedono la sola presenza di  $T_{mr,B15}$ , insieme con  $T_a$ ,  $v_a$  e  $R_{GL}$  (Tabella 15).

L'analisi di regressione ha quindi portato alla definizione di cinque diverse funzioni, ciascuna sviluppata per uno specifico tempo di elaborazione (1-min, 5-min, 10-min, 15-min e 20-min). L'applicazione di queste funzioni consente di migliorare le prestazioni del globotermometro nero nella stima della  $T_{mr}$ , per tutti i tempi, eccetto 1-min, la differenza tra la  $T_{mr}$  che si ottiene tramite le funzioni proposte in Tabella 15 e la  $T_{mr,Net}$  assume valori al di fuori del range  $\pm 5$  °C in meno del 10% dei casi. Ciononostante, per semplificare ulteriormente la metodologia di misura e calcolo della  $T_{mr}$ , ognuna delle cinque funzioni proposte è stata testata per ciascuno dei tempi di elaborazione considerati durante lo studio, per verificare se tra esse ve ne fosse una in grado di produrre risultati sufficientemente accurati indipendentemente dal tempo considerato. In questo contesto, l'Equazione 7, inizialmente sviluppata per un tempo di elaborazione di 5-min, ha mostrato ottimi risultati per tutti i tempi considerati e può dunque essere adottata per migliorare l'affidabilità della  $T_{mr}$  calcolata a partire dalle misure di un globotermometro nero standard da 150 mm di diametro, consentendo di fatto a questo strumento di essere impiegato in ambienti esterni in alternativa ai radiometri netti.

A questo punto, il confronto tra metodologie di misura e calcolo della  $T_{mr}$  si è spostato all'indagine dell'effetto che esse determinano sulla valutazione del microclima urbano. In particolare, per queste analisi, si è fatto uso dell'indice **UTCI**. Gli output relativi a questo indice hanno mostrato risultati simili a quelli relativi alla temperatura media radiante: il globotermometro nero tende a sovrastimare lo **UTCI** ed il grigio a sottostimarli. Tuttavia, poiché la  $T_{mr}$  rappresenta solo uno dei quattro parametri coinvolti nel calcolo dello **UTCI**, l'impatto finale delle diverse stime della  $T_{mr}$  sull'indice risulta mitigato.

In generale, lo **UTCI** calcolato a partire dalla  $T_{mr}$  risultante dall'Equazione 7 ( $UTCI_{Model}$ ) risulta essere quello maggiormente centrato attorno ai valori di riferimento, ovvero lo **UTCI** calcolato considerando una temperatura media radiante ottenuta tramite radiometri netti, pari a  $T_{mr,Net}$ . Questo risultato permette di estendere i vantaggi derivanti dall'uso dell'Equazione 7 per il calcolo della  $T_{mr}$ , anche per il calcolo dello **UTCI** in ambiente esterno urbano complesso.

Sulla base di queste considerazioni è dunque possibile affermare che la metodologia di calcolo della  $T_{mr}$  in ambienti urbani complessi basata su misurazioni effettuate tramite un globotermometro (ISO 7726) rappresenta una valida alternativa all'uso dei radiometri netti solo se successivamente corretta con l'impiego di una funzione di regressione, quale l'Equazione 7. In particolare, l'Equazione 7 è applicabile esclusivamente in combinazione ad un globotermometro nero di rame standard con diametro di 150 mm, spessore di 0,4 mm ed emissività pari a 0,963. Inoltre, le stime della  $T_{mr}$  che si ottengono tramite questa metodologia combinata di misura e calcolo possono ritenersi valide solo per rilevazioni effettuate in condizioni climatiche analoghe a quelle incontrate nel corso della campagna sperimentale (Tabella 2).

La Tabella 26 riassume i risultati dell'analisi dell'errore relativo alla stima della  $T_{mr}$  tramite la metodologia proposta (a seguito dell'applicazione del modello di regressione), mentre la Tabella 27 riporta la percentuale di casi in cui tale errore risulta compreso nell'intervallo  $\pm 5$  °C. Infine, la Tabella 28 mostra la percentuale di corrispondenza delle categorie di stress termico associate alla stima dello **UTCI** tramite la metodologia proposta e quelle definite dallo **UTCI** calcolato con impiego dei radiometri netti.

La possibilità di valutare la temperatura media radiante basandosi su misurazioni raccolte tramite un singolo globotermometro e un sensore multiparametro, anziché con l'impiego di tre radiometri netti, si traduce in un notevole risparmio economico: con lo stesso costo di tre radiometri netti risulta possibile acquistare cinque set-up sperimentali, ciascuno composto da un globotermometro ed un sensore multiparametro. Di conseguenza questa metodologia può essere adottata anche in campagne su larga scala, dove la riduzione dei costi rappresenta un driver fondamentale.

**Tabella 26. Analisi dell'errore relativo alla stima della  $T_{mr}$  tramite l'Equazione 7**

	<b>Err_ <math>T_{mr,Model}</math></b>				
	<b>1min</b>	<b>5min</b>	<b>10min</b>	<b>15min</b>	<b>20min</b>
<i>Average</i>	-0,3	-0,1	-0,1	0,0	0,0
<i>Std. Dev.</i>	3,8	3,2	2,8	2,6	2,5
<i>Skewness</i>	-0,4	-0,4	-0,3	-0,4	-0,1
<i>Kurtosis</i>	3,5	3,7	2,1	3,2	1,3
<i>Minimum</i>	-26,3	-15,7	-10,7	-11,7	-8,6
<i>Maximum</i>	18,1	15,7	12,1	11,8	9,0

**Tabella 27. Percentuale di casi in cui l'errore, relativo alla stima della  $T_{mr}$  tramite l'Equazione 7, è compreso nell'intervallo  $\pm 5$  °C**

	<b>Err_ <math>T_{mr,Model}</math></b>
<i>1min</i>	85%
<i>5min</i>	89%
<i>10min</i>	91%
<i>15min</i>	94%
<i>20min</i>	93%

**Tabella 28. Percentuale di corrispondenza tra le categorie di stress termico definite da  $UTCI_{Model}$  e  $UTCI_{Net}$**

	<b><math>UTCI_{Model}</math></b>
<i>1min</i>	90%
<i>5min</i>	92%
<i>10min</i>	92%
<i>15min</i>	94%
<i>20min</i>	94%

Poiché le analisi svolte in contesti urbani complessi hanno portato a risultati positivi, si è scelto di estendere anche ad altre tipologie di ambiente esterno il confronto tra le metodologie di misura e calcolo della  $T_{mr}$ , inclusa quella comprensiva dell'Equazione 7 (applicazione del modello di regressione lineare). In particolare, sono stati analizzati i dati raccolti in campo aperto, ovvero in siti caratterizzati da un orizzonte libero su tutti i lati, e in campo semi-aperto, ovvero siti con caratteristiche intermedie tra quelle di campo aperto e ambiente urbano complesso.

In campo aperto, il globotermometro nero, senza successive correzioni, tende a sovrastimare eccessivamente la  $T_{mr}$ , al contrario, il globo grigio è in grado di fornire stime della  $T_{mr}$  vicine ai valori ottenuti tramite i radiometri netti (assunti come riferimento). L'Equazione 7 consente di migliorare notevolmente la corrispondenza tra la  $T_{mr}$  ottenuta tramite il globotermometro nero e la  $T_{mr,Net}$ . Tuttavia, la percentuale di casi in cui l'errore assume valori al di fuori del range  $\pm 5$  °C resta significativa: 25% o più, a seconda del tempo di elaborazione scelto. Di conseguenza non risulta conveniente estendere l'utilizzo dell'Equazione 7 ad analisi effettuate in campo aperto, in quanto questa potrebbe condurre a stime inconsistenti della  $T_{mr}$ . Sarebbe invece opportuno definire delle funzioni correttive specifiche, come fatto nel caso di ambienti urbani complessi. Tuttavia, il database relativo al campo aperto fa riferimento a soli tre siti di misura e ad un numero limitato di rilevazioni, pertanto, per migliorare la qualità dei risultati sono necessarie ulteriori prove.

Sulla base di queste considerazioni è quindi la metodologia basata sulle misurazioni di un globotermometro grigio di rame dal diametro di 50 mm (spessore 0,4mm ed emissività 0,929) ad emergere come l'alternativa migliore ai radiometri netti per la stima della  $T_{mr}$  in campo aperto: in media la differenza tra  $T_{mr,G5}$  e  $T_{mr,Net}$  si assesta al di sotto di 0,5 °C, in valore assoluto. Ciononostante, per un tempo di elaborazione pari ad 1-min l'andamento di  $T_{mr,G5}$  si presenta poco stabile a causa delle repentine variazioni delle variabili

meteorologiche, e la percentuale di casi in cui l'errore risulta compreso tra  $\pm 5$  °C non supera il 65%. Scegliendo tempi di elaborazione più lunghi (dai 10-min in su) si attenuano notevolmente le oscillazioni della  $T_{mr}$  e la percentuale di casi in cui l'errore può ritenersi accettabile sale fino all'80-84%.

Analogamente a quanto accade in campo aperto, in campo semi-aperto il globotermometro nero fornisce valori della  $T_{mr}$  notevolmente maggiori rispetto a quelli calcolati tramite i radiometri netti. Il globotermometro grigio, invece, tende in media a sottostimare leggermente la  $T_{mr}$  ma per tempi di elaborazione pari o superiori a 10-min la differenza tra  $T_{mr,GS}$  e  $T_{mr,Net}$  si mantiene al di sotto di 5 °C in valore assoluto in più dell'87% dei casi. L'Equazione 7 consente di migliorare la corrispondenza tra i valori di  $T_{mr,B15}$  e  $T_{mr,Net}$  e, a differenza del globo grigio, fornisce risultati sufficientemente accurati anche per tempi di elaborazione pari a 5-min (13% di casi in cui l'errore non è compreso tra  $\pm 5$  °C). Se si incrementa il tempo di elaborazione a 10-min (o più) la percentuale di casi in cui l'errore è compreso tra  $\pm 5$  °C sale al 90%. Dunque, la correzione, tramite l'uso dell'Equazione 7, dei valori di  $T_{mr}$  calcolati a partire dalle misure di un globotermometro nero standard rappresenta la migliore alternativa ai radiometri netti per la valutazione sperimentale della temperatura media radiante sia in contesti urbani complessi che in campo semi-aperto.

Al fine di caratterizzare le condizioni degli ambienti studiati ed i parametri che li influenzano è stato effettuato il calcolo delle proprietà radiative nel campo solare delle superfici orizzontali e verticali circostanti gli ambienti in ciascuna delle prove sperimentali condotte, permettendo di chiarificare ulteriormente le diverse condizioni al contorno assunte per la campagna sperimentale. Tra le superfici orizzontali analizzate, le pavimentazioni più scure, caratterizzate da sanpietrini o membrana bituminosa ardesiata, mostrano i valori di assorbanza solare più alti, pari a 0,88 e 0,85. Al contrario le pavimentazioni di colori più chiari, come quelle in cemento chiaro o battuto, hanno registrato valori di assorbanza solari compresi tra 0,77 e 0,79, e le pavimentazioni verdi hanno registrato valori di riflettanza solare simili tra loro e pari rispettivamente a 0,21 e 0,20. Per quanto riguarda le superfici verticali, le due pareti verdi testate registrano valori di riflettanza solare (0,27 e 0,34) paragonabili a quelli del gres porcellanato e della parete con finitura azzurra (0,31), mentre la superficie di involucro in lamiera metallica ondulata mostra invece una riflettanza pari a 0,40.

Infine, nel tentativo di estendere ulteriormente l'impiego del globotermometro, si è cercato di verificare la possibilità di valutare le proprietà radiative delle superfici tramite le misurazioni effettuate a mezzo di questo strumento. Tale verifica si è basata sulla scrittura e l'analisi delle equazioni di bilancio relative allo scambio termico tra il globotermometro e l'ambiente circostante e a quello tra la parete in analisi e l'ambiente. Tuttavia, a causa delle numerose incognite presenti nel bilancio e per via della non direzionalità intrinseca del globotermometro, non è stato possibile isolare il flusso termico scambiato direttamente con una specifica parete. In conclusione, un set-up sperimentale costituito solo da un globotermometro ed un sensore multiparametro non consente la valutazione delle proprietà radiative di una superficie.

## 5.1 Possibili sviluppi futuri

La validità dei risultati presentati in questo studio è limitata a condizioni climatiche analoghe a quelle sperimentate (Tabella 2): per estendere ulteriormente i risultati è necessario svolgere delle prove in contesti climatici differenti. Inoltre, analizzare l'accuratezza dell'Equazione 5 e dell'Equazione 6 potrebbe migliorare ulteriormente le tecniche attualmente disponibili per la valutazione del microclima in ambiente esterno.

L'Equazione 5, proposta dalla norma tedesca VDI 3787 [34] e adottata nel presente studio per il calcolo della  $T_{mr}$  di riferimento ( $T_{mr,Net}$ ), include valori di origine empirica dei coefficienti di assorbimento ed emissività del corpo umano: studi futuri potrebbero includere l'analisi dei valori di  $\alpha_k$  e  $\epsilon_p$  che meglio sono in grado di rappresentare le proprietà radiative del corpo umano. In aggiunta, potrebbero essere incluse nello studio del microclima esterno diverse posizioni del corpo nello spazio, e dunque diversi valori dei fattori di vista. Nel corso di questa ricerca si è sempre ipotizzato il corpo in posizione eretta, ma potrebbe

essere utile estendere il calcolo della temperatura media radiante anche a persone sedute (ad esempio su panchine) o sdraiate (ad esempio su prati di parchi pubblici).

L'Equazione 6 viene invece introdotta dallo standard ISO 7726 per la valutazione della  $T_{mr}$  tramite le misure di un globotermometro. L'incertezza presente in questa formula deriva dal valore del coefficiente di scambio termico convettivo che si sceglie di adottare. Per ambienti caratterizzati da elevato stress termico lo standard suggerisce l'impiego di un coefficiente pari a  $h_{cg} = \frac{6,3 \cdot v_a^{0,6}}{D^{0,4}}$ . Tuttavia, in letteratura sono presenti studi [13,35] in cui l'utilizzo di differenti coefficienti di scambio termico convettivo, sviluppati per globi di specifici materiali e misure, ha consentito di aumentare l'accuratezza della  $T_{mr}$  stimata. Dunque, indagare l'adeguatezza di diversi valori di  $h_{cg}$  potrebbe ulteriormente migliorare le prestazioni dei globotermometri nella valutazione della  $T_{mr}$  in ambiente esterno.

Durante questo studio si è indagata l'influenza del tempo di elaborazione dei dati campionati sulla stima della  $T_{mr}$ , sebbene per un'analisi più accurata sarebbe necessario conoscere con esattezza il tempo di risposta della strumentazione. Questo parametro dovrebbe essere valutato tramite prove effettuate in laboratorio o in ambiente controllato, in quanto le condizioni ambientali esterne, sostanzialmente complesse e imprevedibili non ne consentono uno studio accurato. Una volta noto il tempo di risposta della strumentazione, è possibile definire il tempo di elaborazione più adatto a seconda del materiale e della taglia dei sensori e dell'obiettivo della ricerca.

Per quanto riguarda i risultati ottenuti per le rilevazioni effettuate in campo aperto e semi-aperto sono richieste ulteriori prove sperimentali per estendere il database disponibile per le analisi. In particolare, le misurazioni dovrebbero essere estese ad un maggior numero di aree, oltre che a diversi periodi dell'anno, così da identificare uno spettro sufficientemente ampio di condizioni al contorno per attuare un confronto attendibile tra le diverse metodologie di misura e calcolo della  $T_{mr}$ . Infine, andrebbero definite con maggiore precisione le caratteristiche di un "campo semi-aperto", ad esempio tramite l'analisi dell'indice **SVF** (Sky View Factor) relativo a ciascun sito testato.

## 6 Riferimenti bibliografici

- [1] U. Nations, D. of Economic, S. Affairs, P. Division, World Urbanization Prospects The 2018 Revision, 2018.
- [2] T. Maruani, I. Amit-Cohen, Open space planning models: A review of approaches and methods, *Landscape and Urban Planning*. 81 (2007) 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.01.003>.
- [3] L. Chen, E. Ng, Outdoor thermal comfort and outdoor activities: A review of research in the past decade, *Cities*. 29 (2012) 118–125. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2011.08.006>.
- [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, *Theoretical and Applied Climatology*. 121 (2015) 99–111. <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1211-2>.
- [5] A. Lai, M. Maing, E. Ng, Observational studies of mean radiant temperature across different outdoor spaces under shaded conditions in densely built environment, *Building and Environment*. 114 (2017) 397–409. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.034>.
- [6] Olesen S., Bassing J.J., P.O. Fanger, PHYSIOLOGICAL COMFORT CONDITIONS AT SIXTEEN COMBINATIONS OF ACTIVITY, CLOTHING, AIR VELOCITY AND AMBIENT TEMPERATURE, 1972. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0015490113&partnerID=40&md5=64326966f89c3a5028688fb05939ab4c>.
- [7] H. Mayer, Urban bioclimatology, n.d.
- [8] G. Jendritzky, W. Nübler, A model analysing the urban thermal environment in physiologically significant terms, *Archives for Meteorology, Geophysics, and Bioclimatology, Series B*. 29 (1981) 313–326. <https://doi.org/10.1007/BF02263308>.
- [9] W. Yang, N.H. Wong, S.K. Jusuf, Thermal comfort in outdoor urban spaces in Singapore, *Building and Environment*. 59 (2013) 426–435. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.09.008>.
- [10] E. Johansson, S. Thorsson, R. Emmanuel, E. Krüger, Instruments and methods in outdoor thermal comfort studies - The need for standardization, *Urban Climate*. 10 (2014) 346–366. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2013.12.002>.
- [11] M. Nikolopoulou, S. Lykoudis, Thermal comfort in outdoor urban spaces: Analysis across different European countries, *Building and Environment*. 41 (2006) 1455–1470. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.05.031>.
- [12] P. Höpfe, Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort, *Energy and Buildings*. 34 (2002) 661–665. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00017-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00017-8).
- [13] S. Thorsson, F. Lindberg, I. Eliasson, B. Holmer, Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting, in: *International Journal of Climatology*, 2007: pp. 1983–1993. <https://doi.org/10.1002/joc.1537>.
- [14] A. Matzarakis, F. Rutz, H. Mayer, Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: Basics of the RayMan model, *International Journal of Biometeorology*. 54 (2010) 131–139. <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0261-0>.
- [15] C. di Napoli, R.J. Hogan, F. Pappenberger, Mean radiant temperature from global-scale numerical weather prediction models, *International Journal of Biometeorology*. 64 (2020) 1233–1245. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01900-5>.
- [16] A. Atef, Z. Nouredine, 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>.
- [17] N. Kántor, J. Unger, The most problematic variable in the course of human-biometeorological comfort assessment - The mean radiant temperature, *Central European Journal of Geosciences*. 3 (2011) 90–100. <https://doi.org/10.2478/s13533-011-0010-x>.
- [18] International Organization for Standardization., “ISO 9060: Solar Energy - Specification and Classification of Instruments for Measuring Hemispherical Solar and Direct Solar Radiation.,” International Organization for Standardization. (2018).

- [19] International Organization for Standardization., “ISO 17713-1: Meteorology — Wind Measurements — Part 1: Wind Tunnel Test Methods for Rotating Anemometer Performance,” International Organization for Standardization. (2007).
- [20] 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,” International Organization for Standardization. (2007).
- [21] International Organization for Standardization., “ISO 19289: Air Quality - Meteorology - Siting Classifications for Surface Observing Stations on Land,” International Organization for Standardization. (2015).
- [22] International Organization for Standardization., “ISO 28902-2: Air Quality — Environmental Meteorology Part 2: Ground-Based Remote Sensing of Wind by Heterodyne Pulsed Doppler Lidar”., International Organization for Standardization. (2017).
- [23] International Organization for Standardization., “ISO 28902-1: Air Quality - Environmental Meteorology Part 1: Ground-Based Remote Sensing of Visual Range by Lidar”., International Organization for Standardization. (2012).
- [24] International Organization for Standardization., “ISO 28902-3: Air Quality — Environmental Meteorology Part 3: Ground-Based Remote Sensing of Wind by Continuous-Wave Doppler Lidar,” International Organization for Standardization. (2018).
- [25] International Organization for Standardization., “ISO 19926-1: Meteorology - Weather radar Part 1: System performance and operation,” International Organization for Standardization. (2019).
- [26] M. Aminipouri, D. Rayner, F. Lindberg, S. Thorsson, A.J. Knudby, K. Zickfeld, A. Middel, E.S. Krayenhoff, Urban tree planting to maintain outdoor thermal comfort under climate change: The case of Vancouver’s local climate zones, *Building and Environment*. 158 (2019) 226–236. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.05.022>.
- [27] H. Mayer, P. H6ppe, *Theoretical and Applied Climatology Thermal Comfort of Man in Different Urban Environments*, 1987.
- [28] N.G. Khrit, M.A. Alghoul, K. Sopian, A.A. Lahimer, O.K. Elayeb, Assessing the accuracy of globe thermometer method in predicting outdoor mean radiant temperature under Malaysia tropical microclimate, in: *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, 2017. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172301006>.
- [29] R. and A.C.E. *American Society of Heating, ASHRAE Handbook Fundamentals*, SI Edition, 2001.
- [30] A. Henrique, G. Tamás, 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>.
- [31] Applications-of-a-universal-thermal-index-Physiological-equivalent-temperature *International-Journal-of-Biometeorology*, (n.d.).
- [32] K. Błażejczyk, P. Broede, 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*, 2010.
- [33] G.M. Budd, Wet-bulb globe temperature (WBGT)—its history and its limitations, *Journal of Science and Medicine in Sport*. 11 (2008) 20–32. <https://doi.org/10.1016/J.JSAMS.2007.07.003>.
- [34] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE *Umweltmeteorologie Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt-und Regionalplanung Teil I: Klima Environmental meteorology Methods for the human biometeorological evaluation of climate and air quality for urban and regional planning at regional level Part I: Climate VDI 3787 Blatt 2 / Part 2*, 2008. [www.vdi-richtlinien.de](http://www.vdi-richtlinien.de).
- [35] C.L. Tan, N.H. Wong, S.K. Jusuf, Outdoor mean radiant temperature estimation in the tropical urban environment, *Building and Environment*. 64 (2013) 118–129. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.03.012>.
- [36] S. Thorsson, F. Lindberg, I. Eliasson, B. Holmer, *MEASUREMENTS OF MEAN RADIANT TEMPERATURE IN DIFFERENT URBAN STRUCTURES*, 2006.
- [37] 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, *Building and Environment*. 63 (2013) 79–88. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.01.026>.

- [38] T. Bedford, C.G. Warner, The globe thermometer in studies of heating and ventilation, *Journal of Hygiene*. 34 (1934) 458–473. <https://doi.org/10.1017/S0022172400043242>.
- [39] H. Guo, E. Teitelbaum, N. Houchois, M. Bozlar, F. Meggers, Revisiting the use of globe thermometers to estimate radiant temperature in studies of heating and ventilation, *Energy and Buildings*. 180 (2018) 83–94. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.029>.
- [40] F. Ali Toudert, *Berichte des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg Dependence of Outdoor Thermal Comfort on Street Design in Hot and Dry Climate*, 2005.
- [41] H. Guo, D. Aviv, M. Loyola, E. Teitelbaum, N. Houchois, F. Meggers, On the understanding of the mean radiant temperature within both the indoor and outdoor environment, a critical review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 117 (2020) 109207. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.014>.
- [42] J. Huang, J.G. Cedeño-Laurent, J.D. Spengler, CityComfort+: A simulation-based method for predicting mean radiant temperature in dense urban areas, *Building and Environment*. 80 (2014) 84–95. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.05.019>.
- [43] F. Ali-Toudert, H. Mayer, Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate, *Building and Environment*. 41 (2006) 94–108. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.01.013>.
- [44] P. Höpfe, Ein neues Verfahren zur Bestimmung der mittleren Strahlungstemperatur im Freien. *Wetter und Leben, Wetter Und Leben*. 44 (1992) 147–151.
- [45] L.A. Kuehn, R.A. Stubbs, R.S. Weaver, Theory of the globe thermometer, *Journal of Applied Physiology*. 29 (1970) 750–757. <https://doi.org/10.1152/jappl.1970.29.5.750>.
- [46] H. Vernon, The Measurement of Radiant Heat in Relation to Human Comfort., *Journal of Industrial Hygiene*. 14 (1932) 95–111.
- [47] M. Nikolopoulou, N. Baker, K. Steemers, Improvements to the Globe Thermometer for Outdoor Use, *Architectural Science Review*. 42 (1999) 27–34. <https://doi.org/10.1080/00038628.1999.9696845>.
- [48] S. Wang, Y. Li, Suitability of acrylic and copper globe thermometers for diurnal outdoor settings, *Building and Environment*. 89 (2015) 279–294. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.002>.
- [49] International Organization for Standardization, “EN ISO 7726: Ergonomics of the thermal environment - Instruments for measuring physical quantities,” International Organization for Standardization. (2001).
- [50] Andris. Auliciems, S.V. (Steven V. Szokolay, International PLEA Organisation., University of Queensland. Department of Architecture., Thermal comfort, PLEA in association with Dept. of Architecture, University of Queensland, 1997.
- [51] D. Fiala, G. Havenith, P. Bröde, B. Kampmann, G. Jendritzky, UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation, *International Journal of Biometeorology*. 56 (2012) 429–441. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0424-7>.
- [52] W.P. Köppen, *Klassifikation der Klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahreslauf.*, (1918).
- [53] LSI LASTEM, Alpha-Log Technical Datasheet, n.d. <https://www.lsi-lastem.com/PDF/MW9005/MW9005-ITA-01-Alpha-Log.pdf>.
- [54] info, huksefluxcom, NR01 RA01 (net) radiometer user manual, n.d. [www.hukseflux.com](http://www.hukseflux.com).
- [55] LSI LASTEM, Globotermometro per applicazioni indoor e outdoor, Technical Datasheet, n.d. [www.lsi-lastem.com](http://www.lsi-lastem.com).
- [56] NEXTEL, Velvet-Coating 811-21 Technical Datasheet, n.d. [https://www.nextel-coating.com/wp-93862-content/uploads/2021/03/811-21\\_EN.pdf](https://www.nextel-coating.com/wp-93862-content/uploads/2021/03/811-21_EN.pdf) (accessed August 25, 2021).
- [57] NEXTEL, Suede Coating 3101 Technical Datasheet, n.d. [https://www.nextel-coating.com/wp-93862-content/uploads/2021/03/428-04\\_EN.pdf](https://www.nextel-coating.com/wp-93862-content/uploads/2021/03/428-04_EN.pdf) (accessed August 25, 2021).
- [58] LSI LASTEM, Multiparameter “All-in-one” weather sensors, Technical Datasheet, (n.d.). <https://www.lsi-lastem.com/PDF/MW9000/MW9000-ITA-08-All-in-one.pdf> (accessed October 21, 2021).
- [59] Politecnico di Milano, thermalab.test.polimi.it, (n.d.). <http://www.thermalab.polimi.it/> (accessed September 29, 2021).
- [60] European Committee for Standardization, “EN 410 - Glass in building - Determination of luminous and solar characteristics of glazing,” European Committee for Standardization. (2011).

## Appendice A

Questa appendice raccoglie i grafici relativi agli andamenti delle temperature ( $T_a$ ,  $T_{mr,Net}$ ,  $T_{mr,B15}$ ,  $T_{mr,G5}$  e  $T_{mr,Model}$ ) in ciascuna giornata di prova della campagna sperimentale svolta in ambienti urbani complessi, aperti e semi-aperti. Per ciascuna giornata, inoltre, si riportano i campi di variazione delle principali variabili meteorologiche registrate e un'immagine relativa al sito in cui sono state svolte le misurazioni.

Si riportano dapprima i risultati delle analisi svolte per le giornate di misura effettuate nel 2021, successivamente quelli per le giornate di misura svolte nel 2020 per evidenziare la rielaborazione dei dati in base ai diversi tempi da 1-min a 20-min.

### Misurazioni in campo urbano: 05 Luglio 2021

Via Lambruschini 4, Milano

**Tabella A.6: Campo di variazione delle principali variabili meteorologiche, registrato nella giornata del 05/07/2021 (Via Lambruschini, MI)**

	$R_{GL}$	$T_a$	$v_a$	$RH$
<i>UdM</i>	W/m <sup>2</sup>	°C	m/s	%
<i>Valore Medio</i>	579,34	27,8	1,00	45,6
<i>Dev. Std.</i>	307,77	2,8	0,48	10,2
<i>Minimo</i>	58,00	22,5	0,20	31,8
<i>Massimo</i>	1122,00	31,5	2,60	64,1



**Figura A.11: 05/07/2021, Via Lambruschini MI. Superficie orizzontale: cemento spazzolato. Superficie verticale: intonaco chiaro**

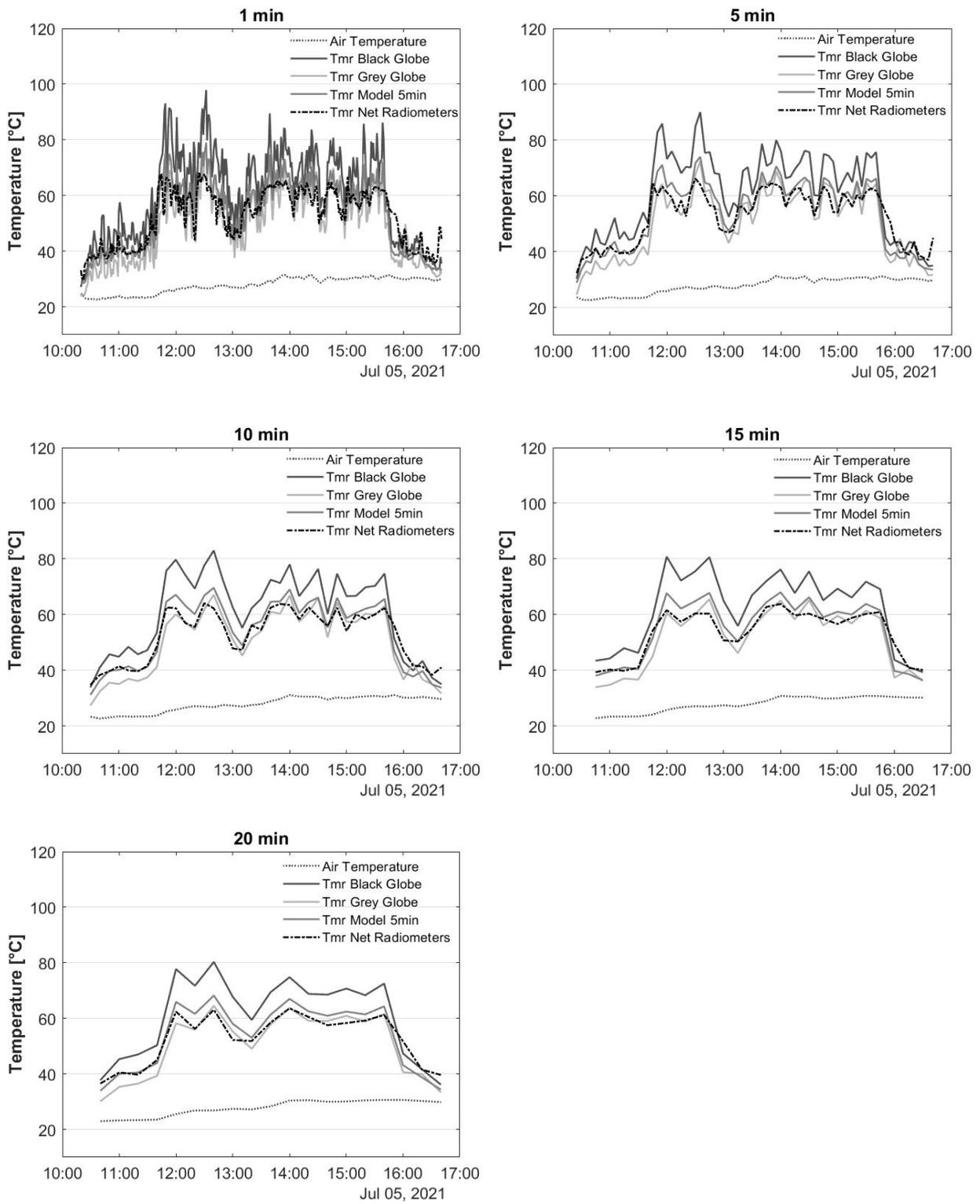


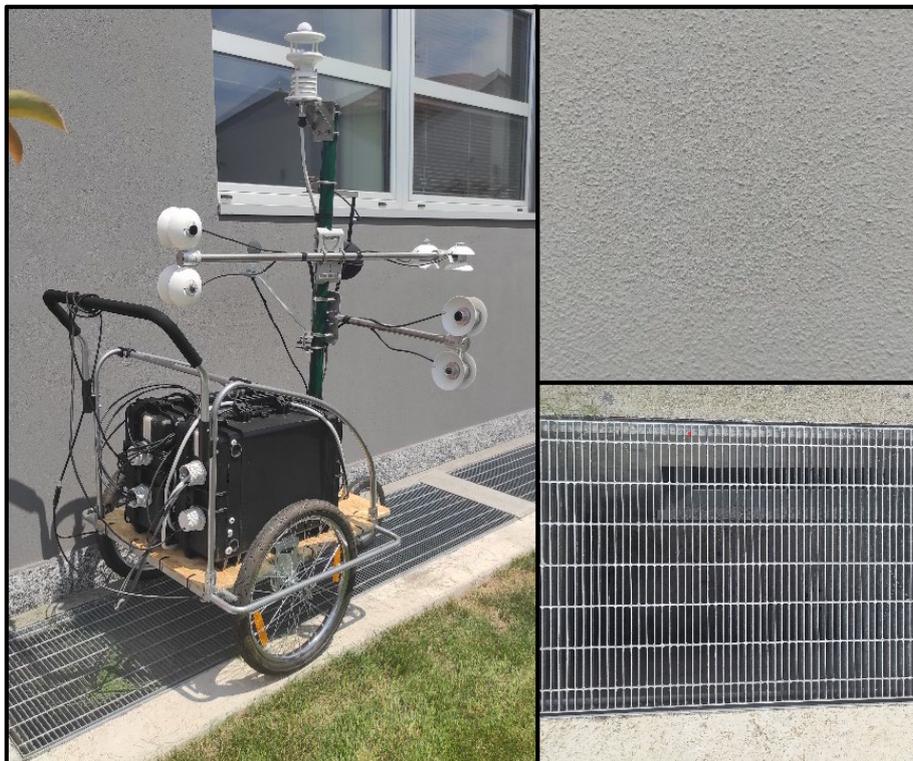
Figura A.12: Andamento di  $T_a$ ,  $T_{mr,Net}$ ,  $T_{mr,B15}$ ,  $T_{mr,GS}$  e  $T_{mr,Model}$  (05/07/2021, Via Lambruschini MI)

**06 Luglio 2021**

**Via Lambruschini 36, Milano**

**Tabella A.7: Campo di variazione delle principali variabili meteorologiche, registrato nella giornata del 06/07/2021 (Via Lambruschini 36, MI)**

	$R_{GL}$	$T_a$	$v_a$	$RH$
<i>UdM</i>	W/m <sup>2</sup>	°C	m/s	%
<i>Valore Medio</i>	546,0	34,1	0,5	33,8
<i>Dev. Std.</i>	312,5	1,4	0,2	2,7
<i>Minimo</i>	61,0	31,6	0,1	28,9
<i>Massimo</i>	993,0	36,6	1,3	41,6



**Figura A.13: 06/07/2021, Via Lambruschini 36 MI. Superficie orizzontale: superficie metallica grigliata. Superficie verticale: intonaco chiaro**

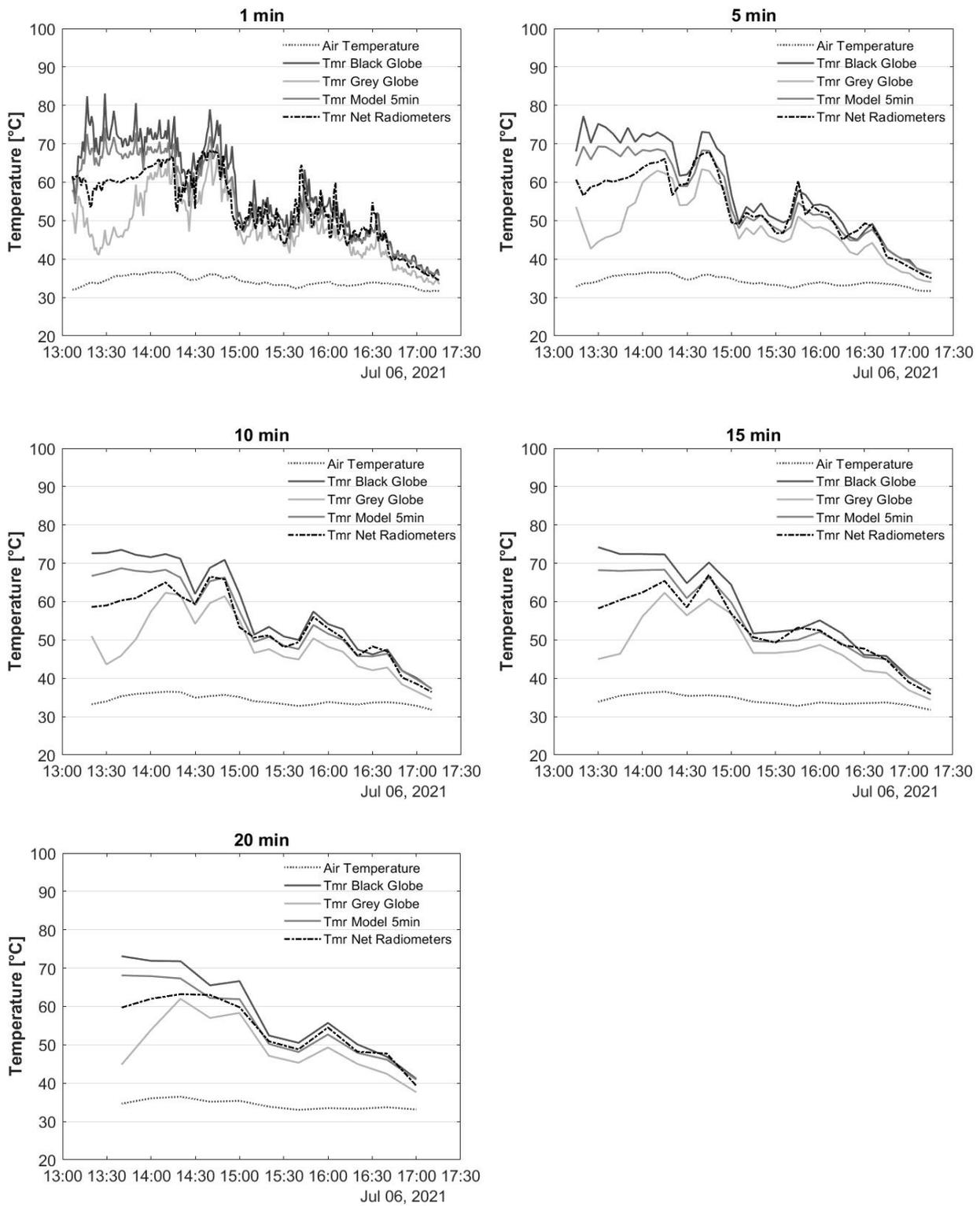


Figura A.12: Andamento di  $T_a$ ,  $T_{mr,Net}$ ,  $T_{mr,B15}$ ,  $T_{mr,G5}$  e  $T_{mr,Model}$  (06/07/2021, Via Lambruschini 36 MI)

**07 Luglio 2021**

**Quartiere Bovisa, MI**

**Tabella A.8: Campo di variazione delle principali variabili meteorologiche, registrato nella giornata del 07/07/2021 (Bovisa, MI)**

	$R_{GL}$	$T_a$	$v_a$	$RH$
<i>UdM</i>	W/m <sup>2</sup>	°C	m/s	%
<i>Valore Medio</i>	646,3	31,8	0,9	43,2
<i>Dev. Std.</i>	299,3	1,6	0,3	4,8
<i>Minimo</i>	5,0	23,6	0,1	36,1
<i>Massimo</i>	1009,0	34,3	2,0	66,4



**Figura A.15: 07/07/2021, Bovisa MI. Superficie orizzontale: autobloccanti. Superficie verticale: vite (parete verde)**

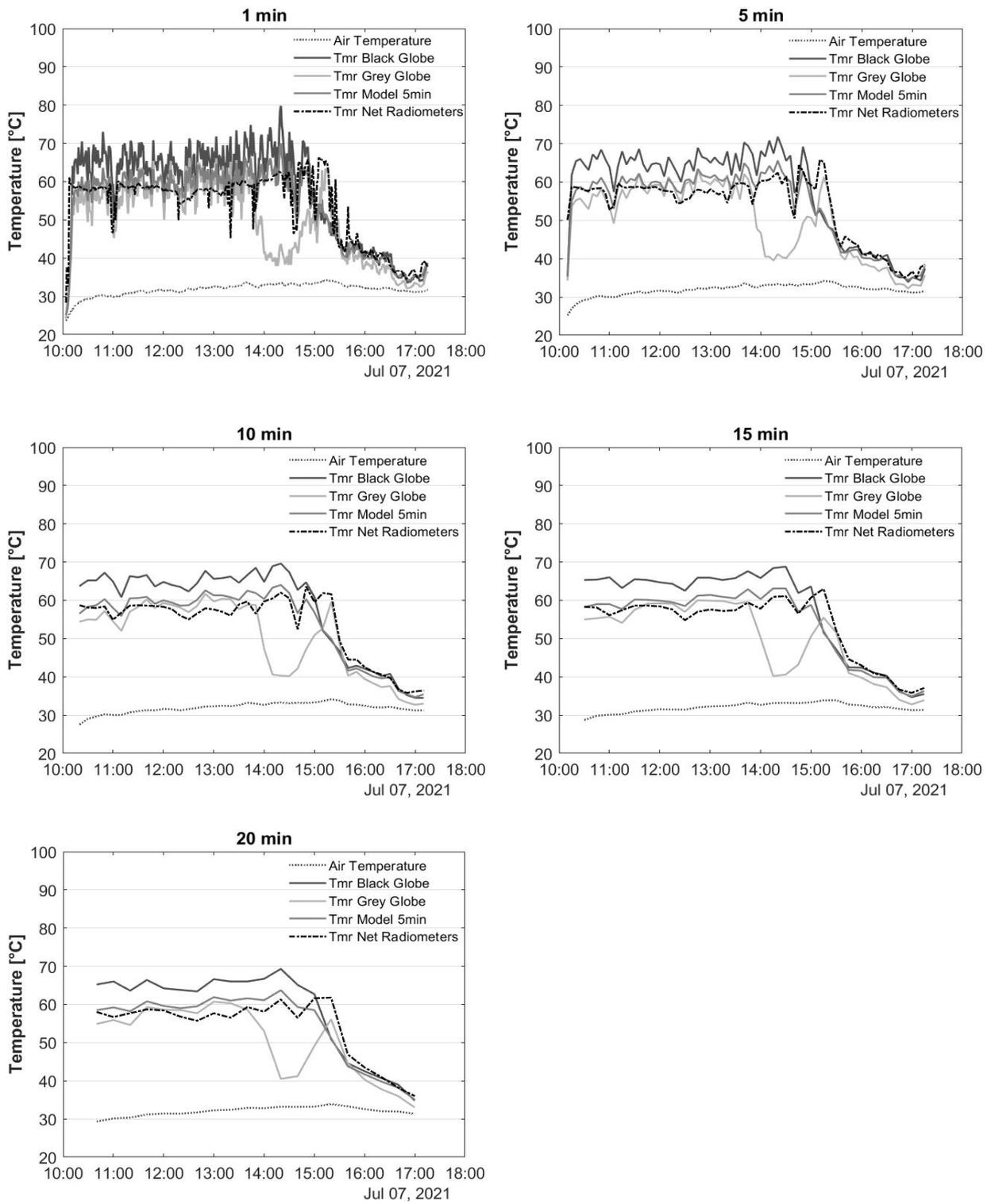


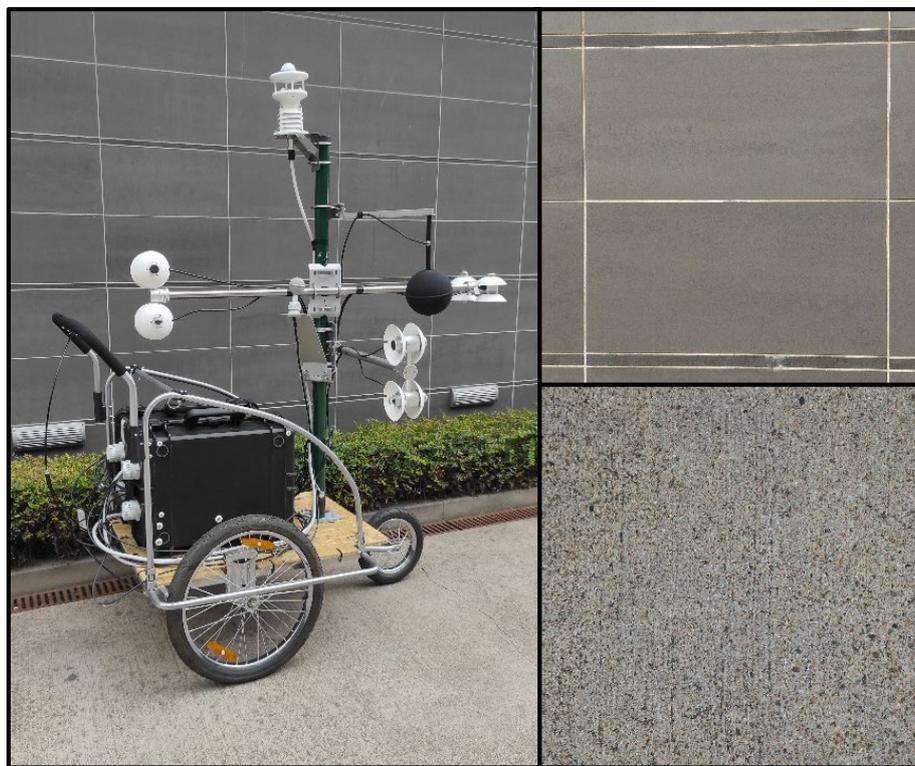
Figura A.16: Andamento di  $T_a$ ,  $T_{mr,Net}$ ,  $T_{mr,B15}$ ,  $T_{mr,G5}$  e  $T_{mr,Model}$  (07/07/2021, Bovisa MI)

**08 Luglio 2021**

**Quartiere Bovisa, Milano**

**Tabella A.9: Campo di variazione delle principali variabili meteorologiche, registrato nella giornata del 08/07/2021 (Bovisa, MI)**

	$R_{GL}$	$T_a$	$v_a$	$RH$
<i>UdM</i>	W/m <sup>2</sup>	°C	m/s	%
<i>Valore Medio</i>	430,8	28,7	1,1	55,7
<i>Dev. Std.</i>	348,0	2,1	0,6	6,2
<i>Minimo</i>	20,0	24,0	0,0	42,2
<i>Massimo</i>	950,0	32,3	3,0	67,9



**Figura A.17: 08/07/2021, Bovisa MI. Superficie orizzontale: cemento battuto. Superfici verticali: lastre gres porcellanato e vite (parete verde).**

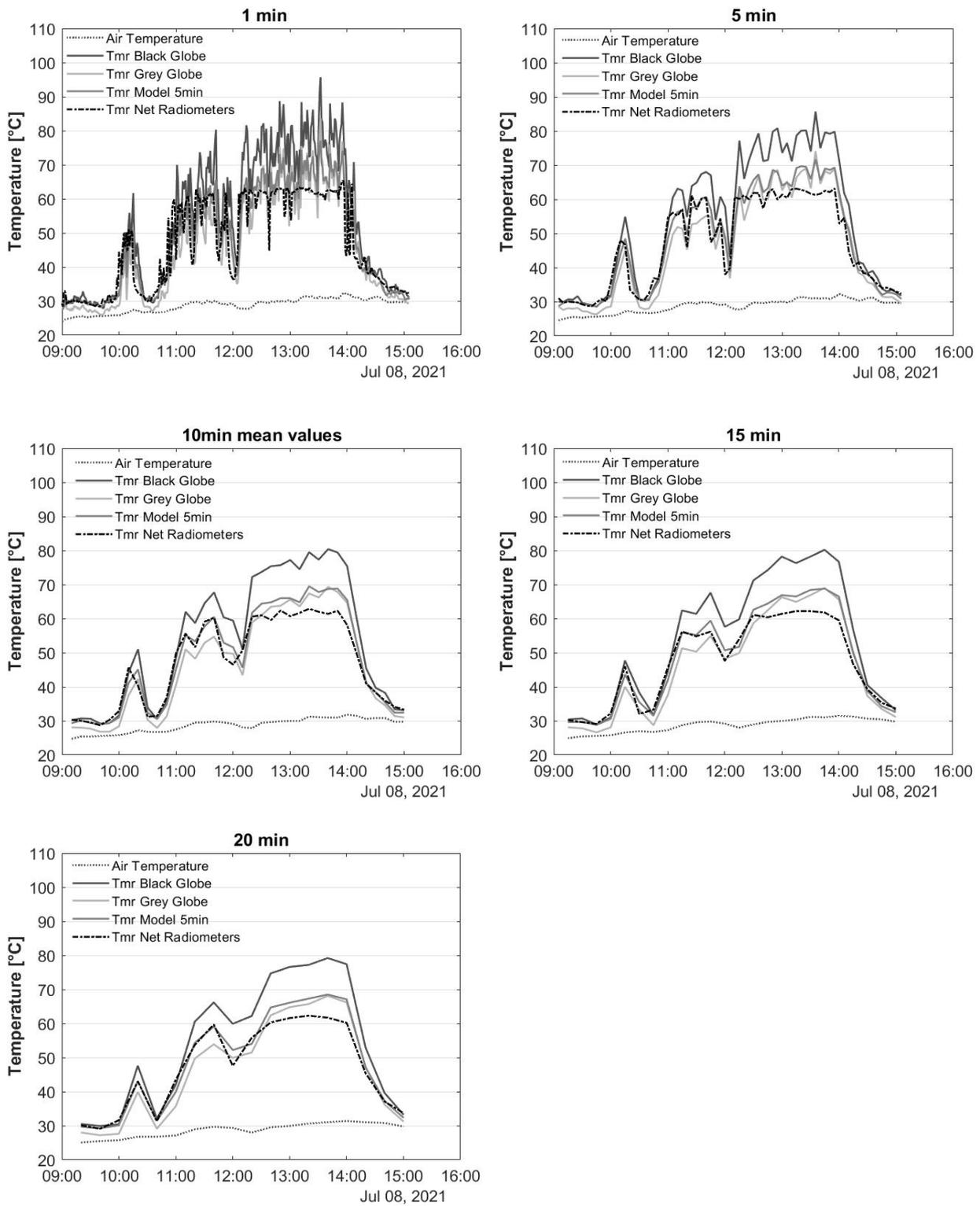


Figura A.18: Andamento di  $T_a$ ,  $T_{mr,Net}$ ,  $T_{mr,B15}$ ,  $T_{mr,G5}$  e  $T_{mr,Model}$  (08/07/2021, Bovisa MI)

**Campo aperto e semi-aperto:**

**Dal 09 Luglio 2021 al 11 Luglio 2021**

**Quartiere Bovisa, Milano**

**Tabella A.10: Campo di variazione delle principali variabili meteorologiche, registrato nella giornata del 09/07/2021 (Bovisa, MI)**

	$R_{GL}$	$T_a$	$v_a$	$RH$
<i>UdM</i>	W/m <sup>2</sup>	°C	m/s	%
<i>Valore Medio</i>	627,6	30,3	0,8	37,2
<i>Dev. Std.</i>	441,9	2,1	0,4	5,3
<i>Minimo</i>	0,0	25,4	0,0	26,1
<i>Massimo</i>	1182,0	33,7	2,4	52,6

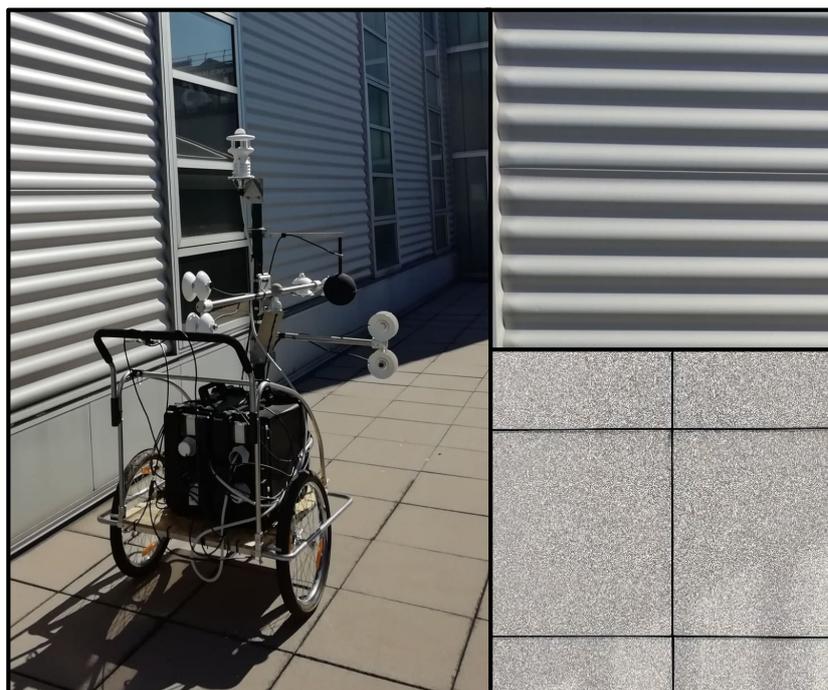
**Tabella A.11: Campo di variazione delle principali variabili meteorologiche, registrato nella giornata del 10/07/2021 (Bovisa, MI)**

	$R_{GL}$	$T_a$	$v_a$	$RH$
<i>UdM</i>	W/m <sup>2</sup>	°C	m/s	%
<i>Valore Medio</i>	463,6	29,2	0,6	41,1
<i>Dev. Std.</i>	436,7	5,8	0,3	16,7
<i>Minimo</i>	0,0	16,9	0,0	24,8
<i>Massimo</i>	1099,0	36,7	2,1	82,4

**Tabella A.12: Campo di variazione delle principali variabili meteorologiche, registrato nella giornata del 11/07/2021 (Bovisa, MI)**

	$R_{GL}$	$T_a$	$v_a$	$RH$
<i>UdM</i>	W/m <sup>2</sup>	°C	m/s	%
<i>Valore Medio</i>	446,7	29,6	0,5	43,6
<i>Dev. Std.</i>	446,5	5,6	0,3	18,4
<i>Minimo</i>	0,0	19,1	0,0	23,6
<i>Massimo</i>	1152,0	37,0	2,0	82,0

**Figura A.19: Dal 09/07/2021 al 11/07/2021, Bovisa MI: Superficie orizzontale: cemento. Superficie verticale: lamiera ondulata.**



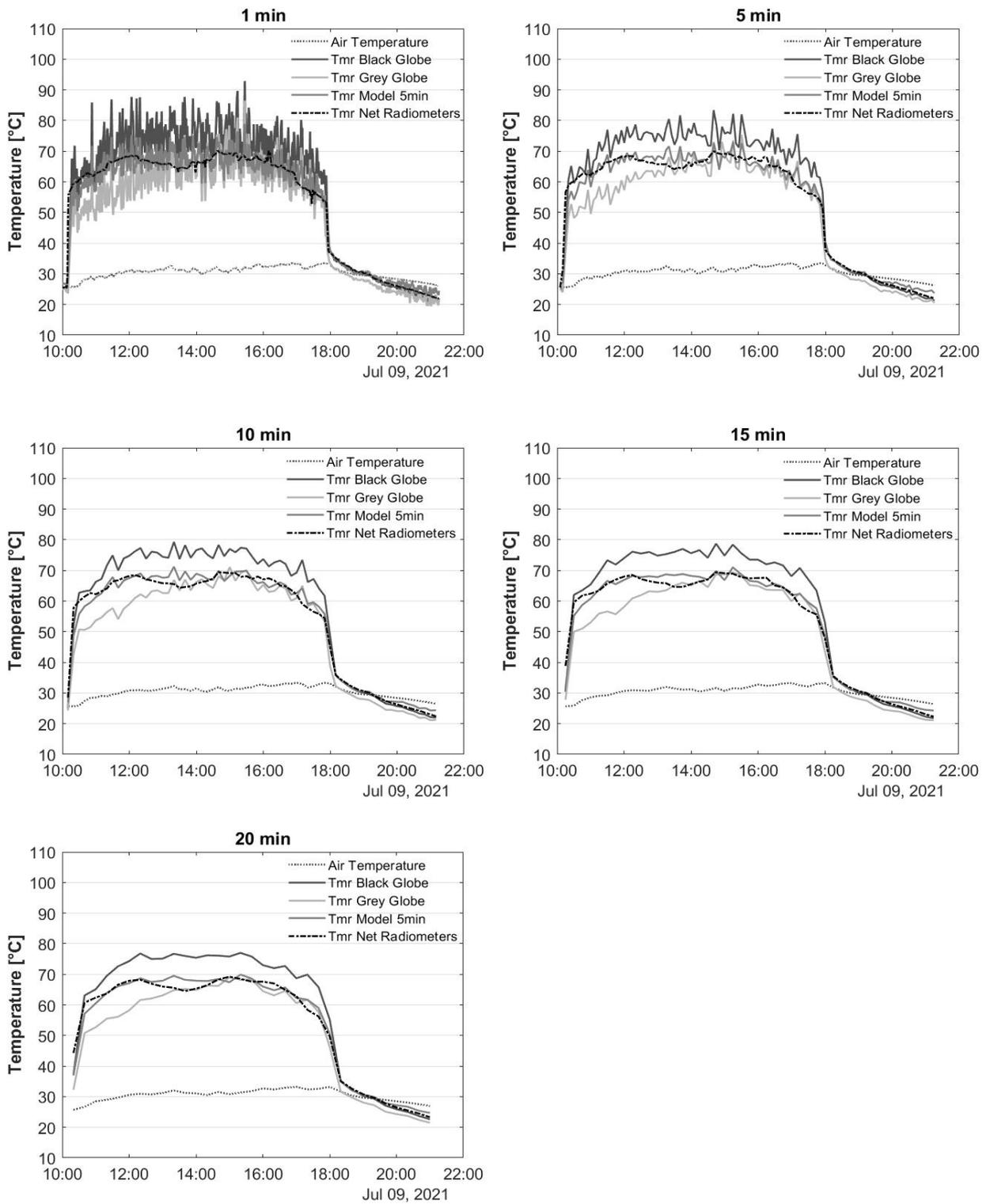


Figura A.20: Andamento di  $T_a$ ,  $T_{mr,Net}$ ,  $T_{mr,B15}$ ,  $T_{mr,G5}$  e  $T_{mr,Model}$  (09/07/2021, Bovisa MI)

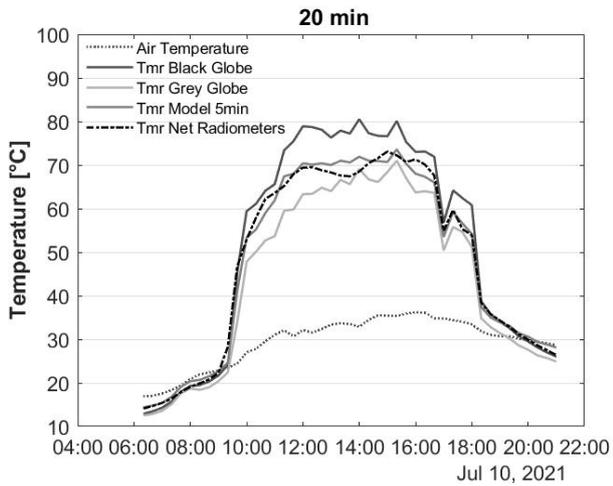
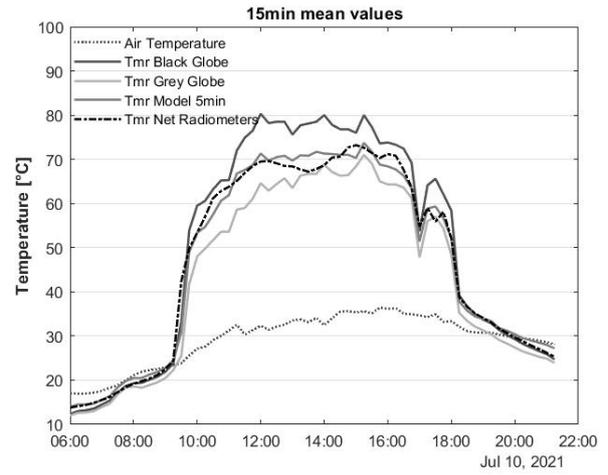
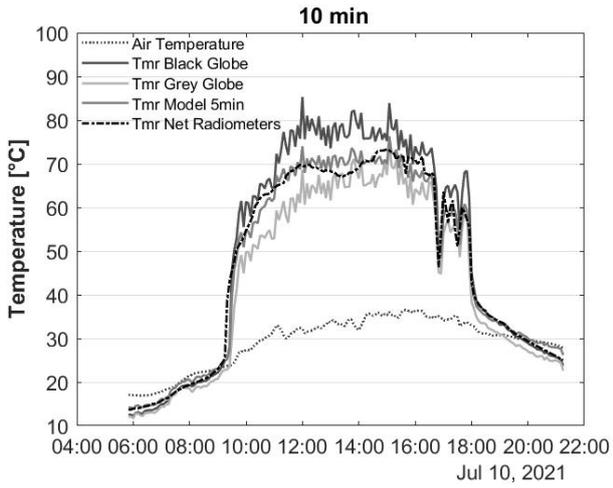
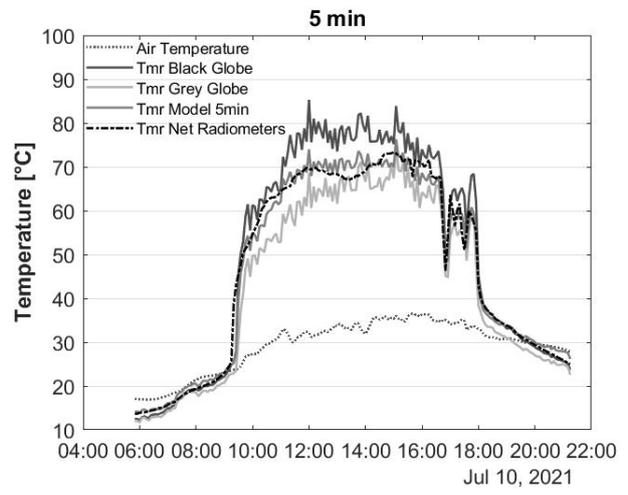
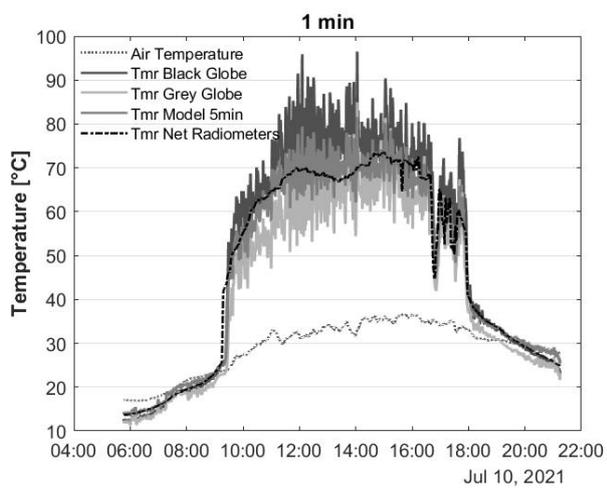


Figura A.21: Andamento di  $T_a$ ,  $T_{mr,Net}$ ,  $T_{mr,B15}$ ,  $T_{mr,GS}$  e  $T_{mr,Model}$  (10/07/2021, Bovisa MI)

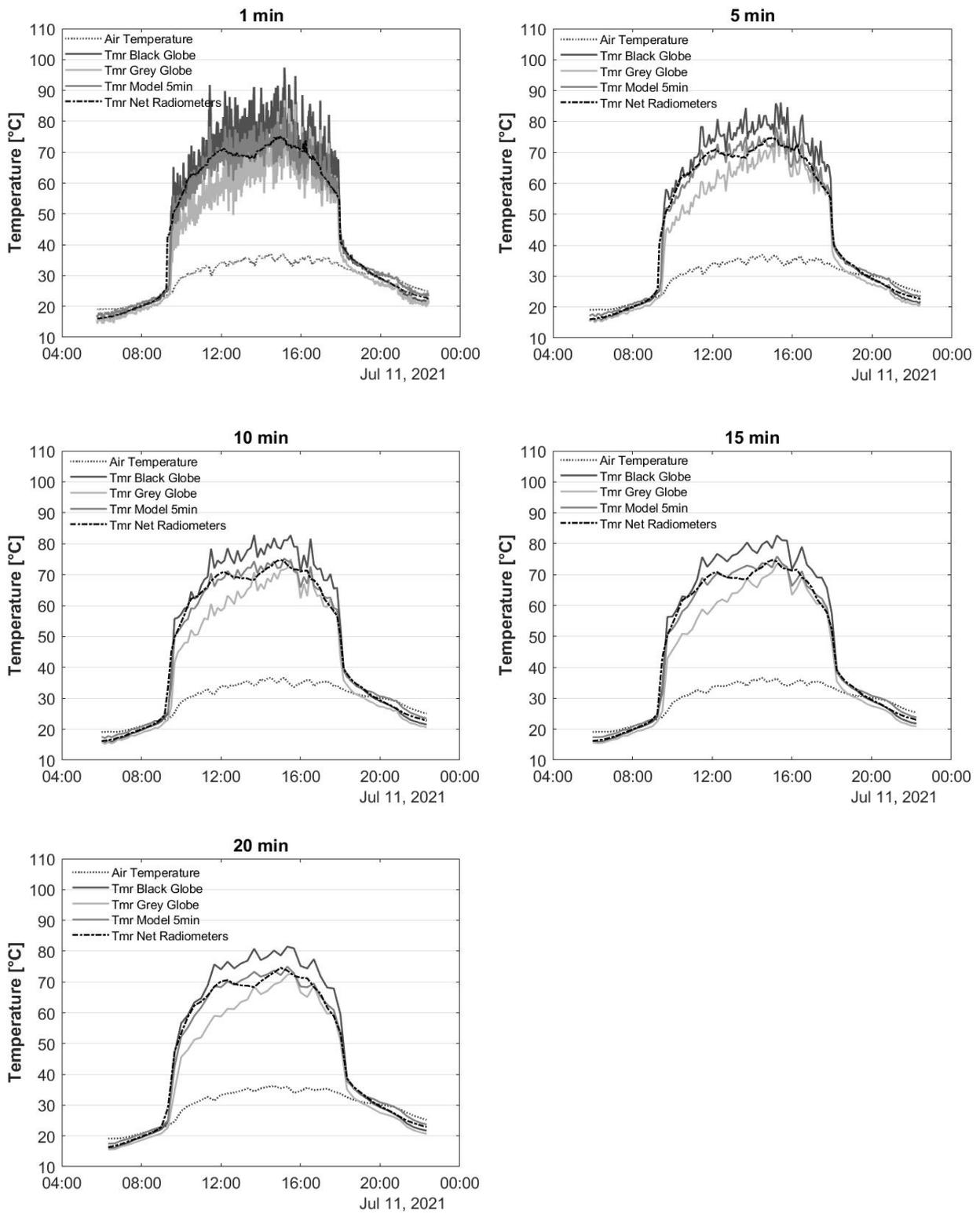


Figura A.22: Andamento di  $T_a$ ,  $T_{mr,Net}$ ,  $T_{mr,B15}$ ,  $T_{mr,G5}$  e  $T_{mr,Model}$  (11/07/2021, Bovisa MI)

**Dal 23 al 26 Marzo 2021**

**Via Feltrinelli 16, Milano**

**Tabella A.13: Campo di variazione delle principali variabili meteorologiche, registrato nella giornata del 23/03/2021 (Via Feltrinelli 16, MI)**

	<b><i>R<sub>GL</sub></i></b>	<b><i>T<sub>a</sub></i></b>	<b><i>v<sub>a</sub></i></b>	<b><i>RH</i></b>
<i>UdM</i>	W/m <sup>2</sup>	°C	m/s	%
<i>Valore Medio</i>	477,4	14,5	1,1	31,6
<i>Dev. Std.</i>	268,6	1,1	0,5	2,7
<i>Minimo</i>	1,0	12,1	0,2	27,2
<i>Massimo</i>	797,0	16,7	3,3	37,8

**Tabella A.14: Campo di variazione delle principali variabili meteorologiche, registrato nella giornata del 24/03/2021 (Via Feltrinelli 16, MI)**

	<b><i>R<sub>GL</sub></i></b>	<b><i>T<sub>a</sub></i></b>	<b><i>v<sub>a</sub></i></b>	<b><i>RH</i></b>
<i>UdM</i>	W/m <sup>2</sup>	°C	m/s	%
<i>Valore Medio</i>	443,6	14,7	1,2	44,3
<i>Dev. Std.</i>	249,5	3,9	0,7	9,7
<i>Minimo</i>	1,0	5,2	0,2	31,0
<i>Massimo</i>	793,0	19,6	4,2	64,8

**Tabella A.15: Campo di variazione delle principali variabili meteorologiche, registrato nella giornata del 25/03/2021 (Via Feltrinelli 16, MI)**

	<b><i>R<sub>GL</sub></i></b>	<b><i>T<sub>a</sub></i></b>	<b><i>v<sub>a</sub></i></b>	<b><i>RH</i></b>
<i>UdM</i>	W/m <sup>2</sup>	°C	m/s	%
<i>Valore Medio</i>	431,2	16,2	0,9	48,2
<i>Dev. Std.</i>	248,8	3,5	0,5	12,4
<i>Minimo</i>	1,0	7,7	0,0	32,2
<i>Massimo</i>	798,0	20,8	3,1	79,3

**Tabella A.16: Campo di variazione delle principali variabili meteorologiche, registrato nella giornata del 26/03/2021 (Via Feltrinelli 16, MI)**

	<b><i>R<sub>GL</sub></i></b>	<b><i>T<sub>a</sub></i></b>	<b><i>v<sub>a</sub></i></b>	<b><i>RH</i></b>
<i>UdM</i>	W/m <sup>2</sup>	°C	m/s	%
<i>Valore Medio</i>	502,0	14,3	0,9	58,7
<i>Dev. Std.</i>	243,6	3,4	0,5	12,5
<i>Minimo</i>	15,0	8,0	0,2	41,2
<i>Massimo</i>	770,0	19,3	3,4	83,4



Figura A.23: Dal 23/03/2021 al 26/03/2021, Via Feltrinelli 16, MI: Superficie orizzontale: membrana bituminosa ardesiata.

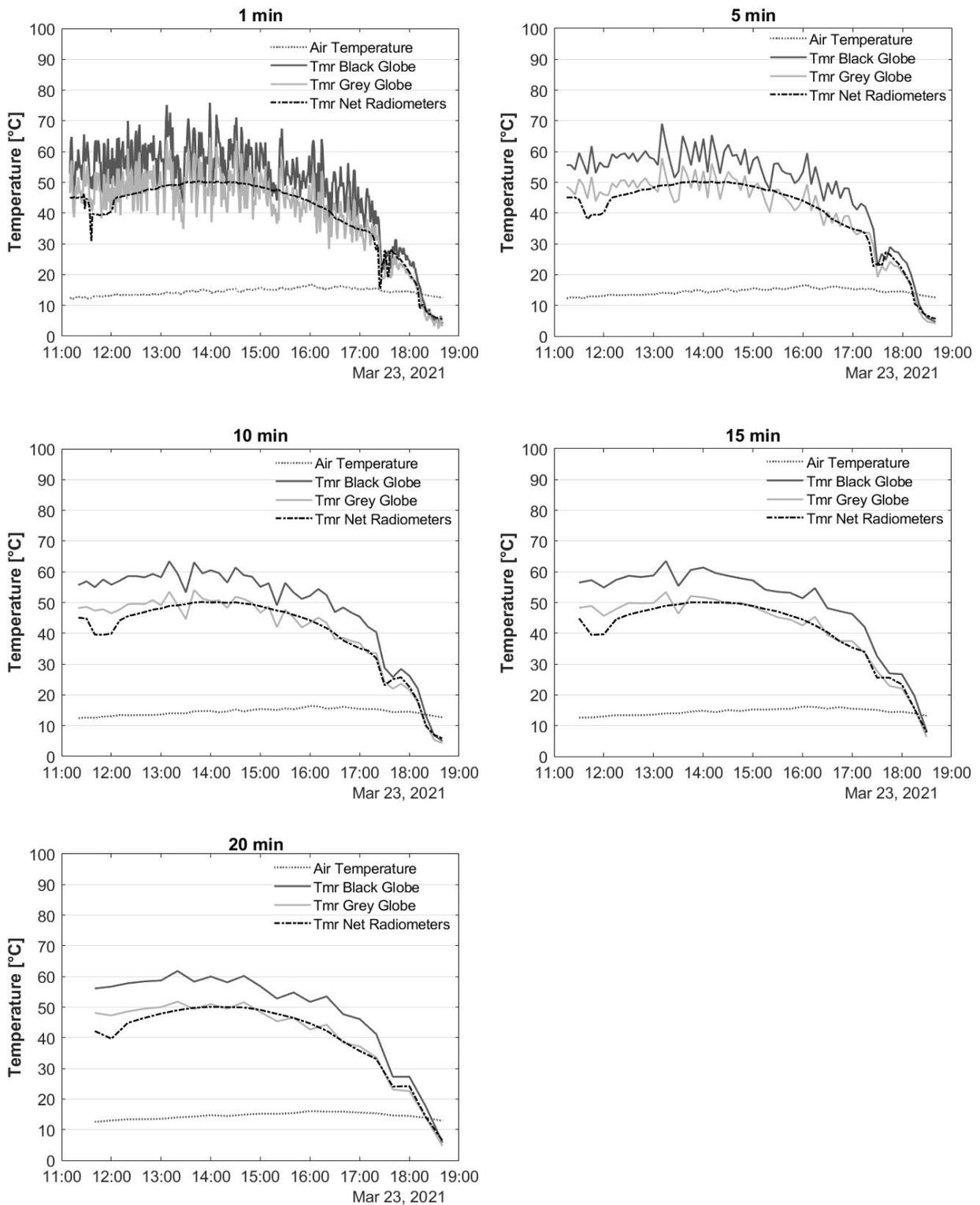


Figura A.24: Andamento di  $T_a$ ,  $T_{mr,Net}$ ,  $T_{mr,B15}$ ,  $T_{mr,G5}$  e (23/03/2021, Via Feltrinelli MI)

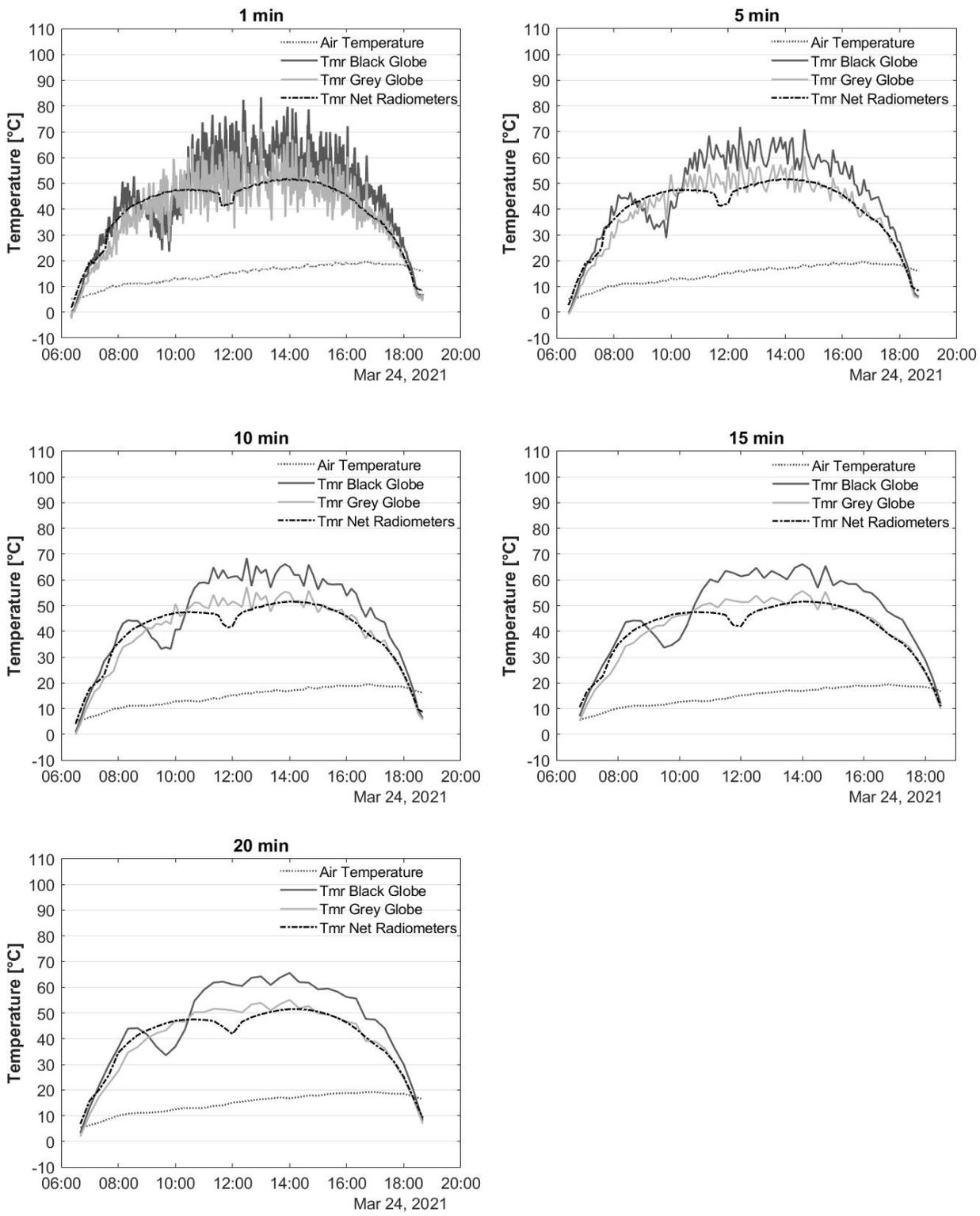
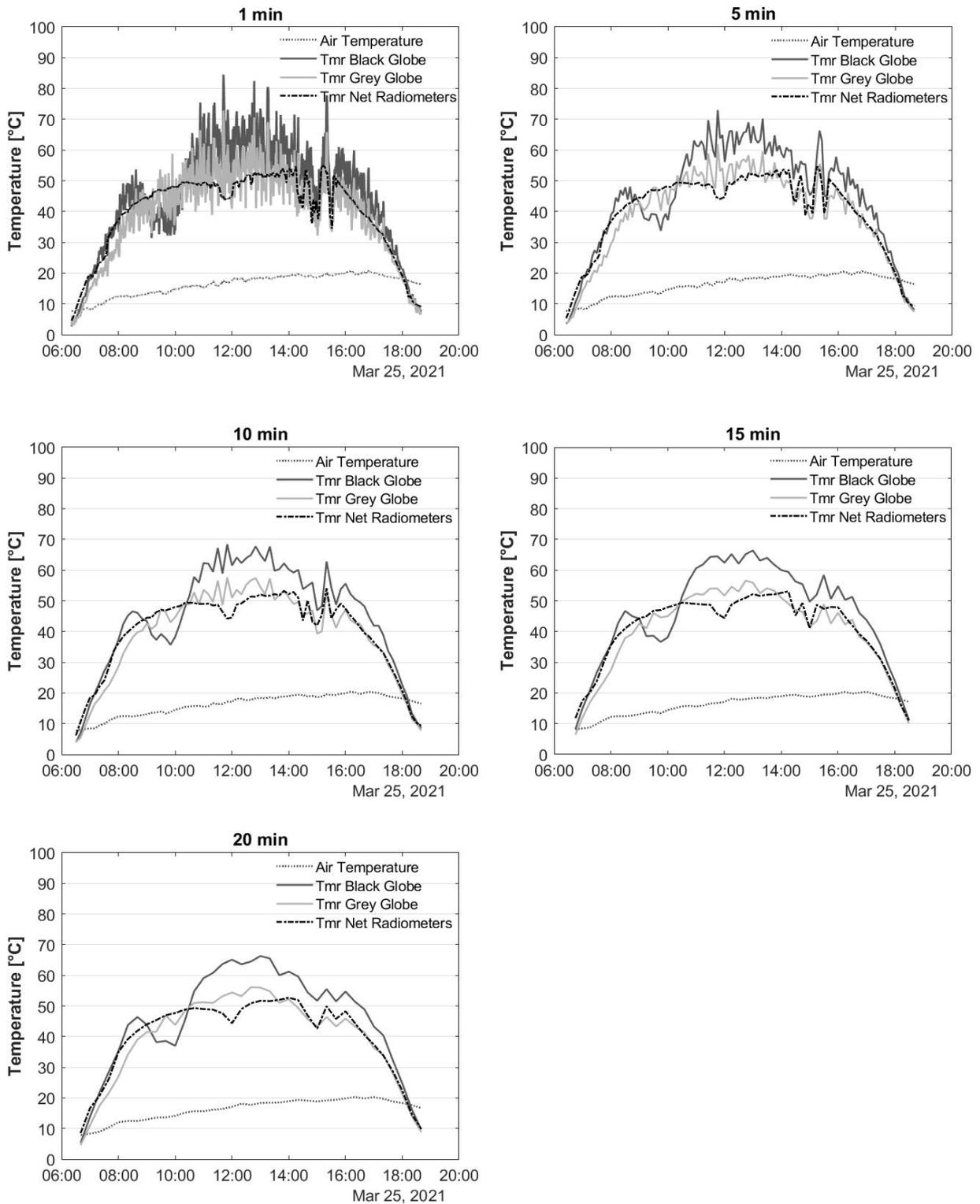


Figura A.25: Andamento di  $T_a$ ,  $T_{mr,Net}$ ,  $T_{mr,B15}$ ,  $T_{mr,G5}$  (24/03/2021, Via Feltrinelli MI)



**Figura A.26: Andamento di  $T_a$ ,  $T_{mr,Net}$ ,  $T_{mr,B15}$ ,  $T_{mr,G5}$  (25/03/2021, Via Feltrinelli MI)**

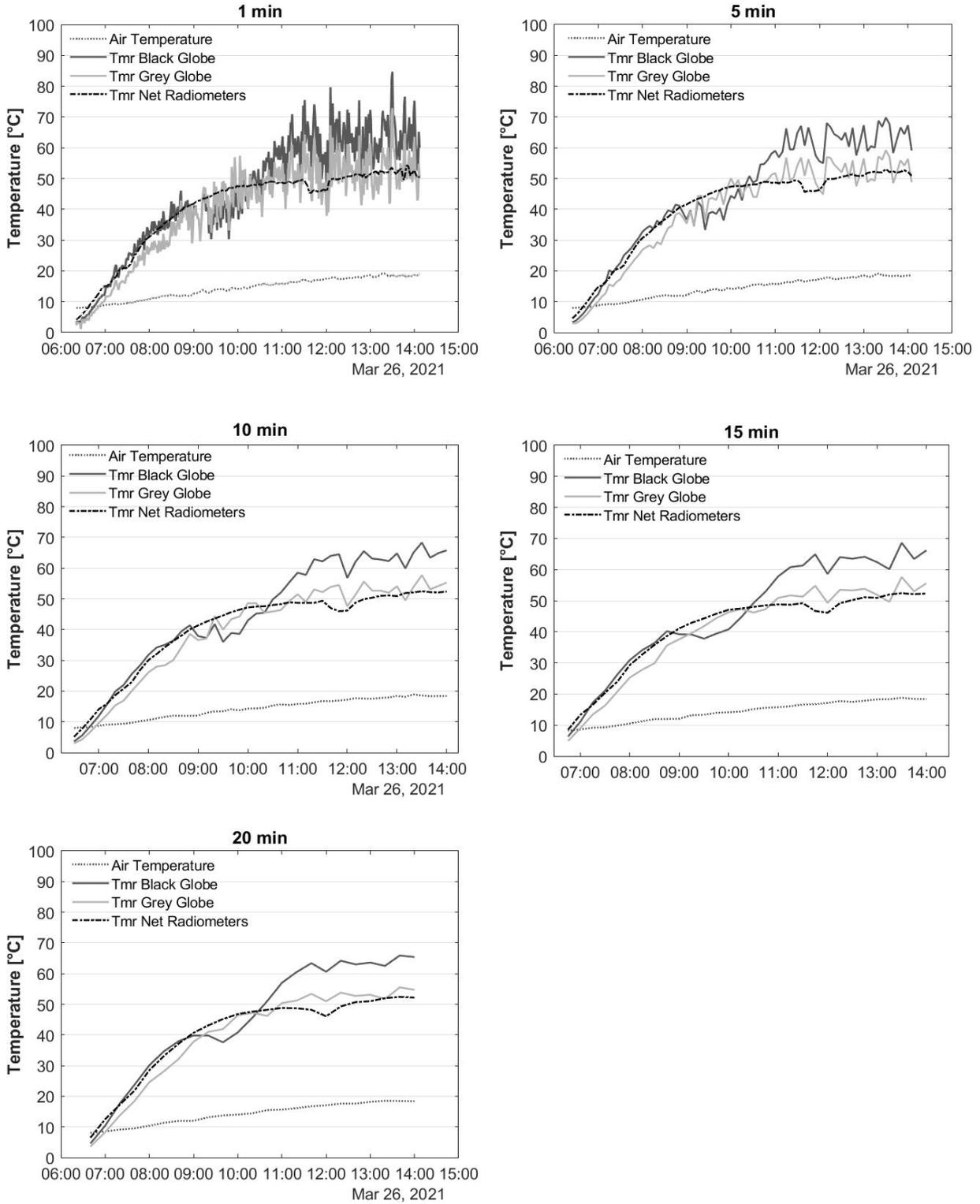


Figura A.27: Andamento di  $T_a$ ,  $T_{mr,Net}$ ,  $T_{mr,B15}$ ,  $T_{mr,G5}$  (26/03/2021, Via Feltrinelli MI)

**23 Luglio 2021**

**Parco Cascina Merlata, Milano**

**Tabella A.17: Campo di variazione delle principali variabili meteorologiche, registrato nella giornata del 23/07/2021 (Cascina Merlata MI)**

	$R_{GL}$	$T_a$	$v_a$	$RH$
<i>UdM</i>	W/m <sup>2</sup>	°C	m/s	%
<i>Valore Medio</i>	692,4	30,0	2,0	49,4
<i>Dev. Std.</i>	181,0	1,4	0,7	4,2
<i>Minimo</i>	219,0	26,2	0,3	42,8
<i>Massimo</i>	857,0	32,0	5,4	61,7



**Figura A.28: 23/07/2021 Cascina Merlata, MI: Superficie orizzontale: manto erboso.**

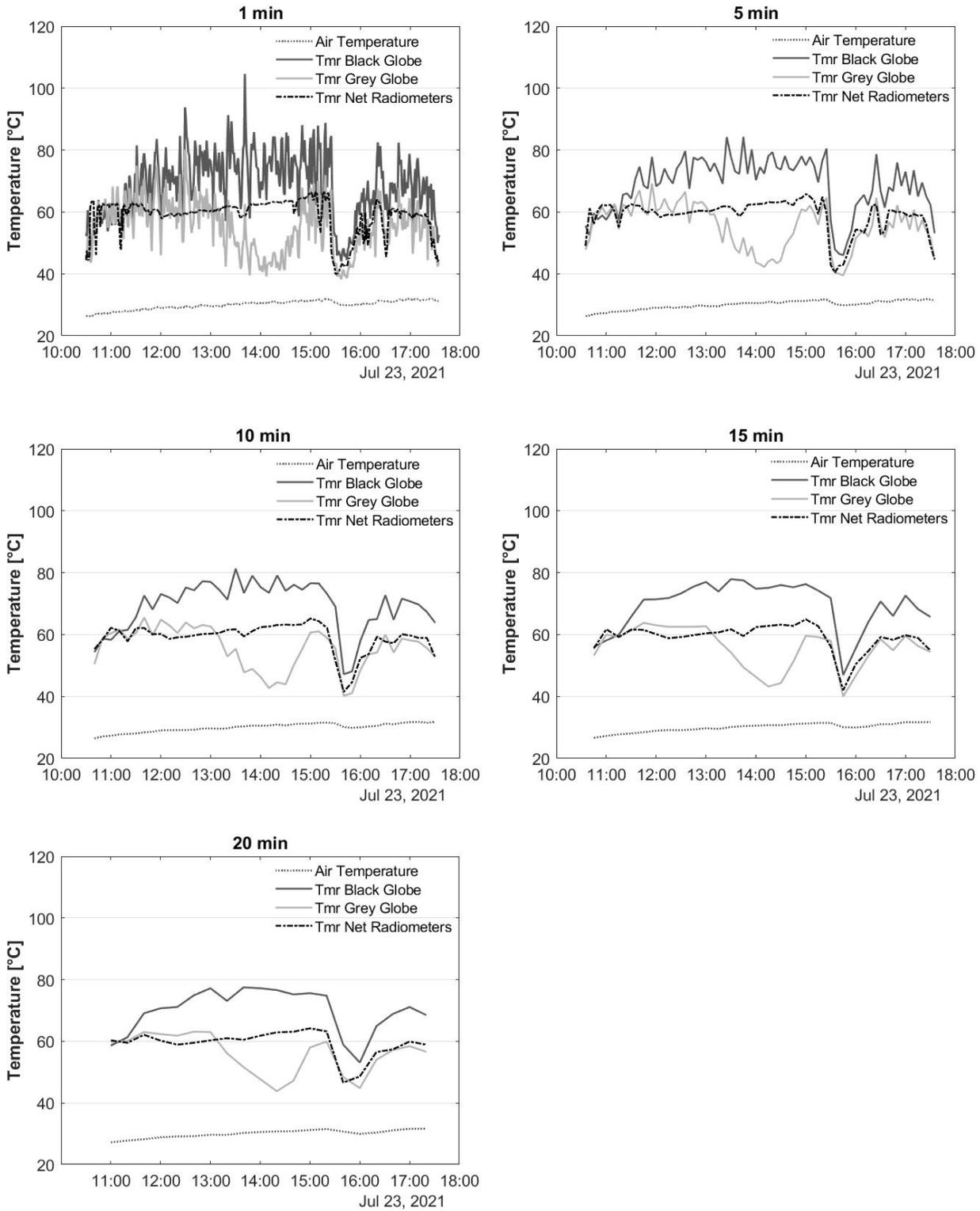


Figura A.29: Andamento di  $T_a$ ,  $T_{mr,Net}$ ,  $T_{mr,B15}$ ,  $T_{mr,GS}$  (23/07/2021, Cascina Merlata MI)

**Dal 14 al 16 Luglio 2021**

**Via Sile 14, Milano**

**Tabella A.18: Campo di variazione delle principali variabili meteorologiche, registrato nella giornata del 14/07/2021 (Via Sile 14, MI)**

	$R_{GL}$	$T_a$	$v_a$	$RH$
<i>UdM</i>	W/m <sup>2</sup>	°C	m/s	%
<i>Valore Medio</i>	404,3	23,1	1,7	56,3
<i>Dev. Std.</i>	351,1	1,7	0,7	10,2
<i>Minimo</i>	1,0	19,9	0,3	41,9
<i>Massimo</i>	1132,0	25,7	4,4	76,3

**Tabella A.19: Campo di variazione delle principali variabili meteorologiche, registrato nella giornata del 15/07/2021 (Via Sile 14, MI)**

	$R_{GL}$	$T_a$	$v_a$	$RH$
<i>UdM</i>	W/m <sup>2</sup>	°C	m/s	%
<i>Valore Medio</i>	295,1	23,4	1,4	58,9
<i>Dev. Std.</i>	217,5	2,0	0,7	6,7
<i>Minimo</i>	0,0	19,2	0,1	50,4
<i>Massimo</i>	1020,0	26,2	3,9	72,9

**Tabella A.20: Campo di variazione delle principali variabili meteorologiche, registrato nella giornata del 16/07/2021 (Via Sile 14, MI)**

	$R_{GL}$	$T_a$	$v_a$	$RH$
<i>UdM</i>	W/m <sup>2</sup>	°C	m/s	%
<i>Valore Medio</i>	998,4	24,4	1,6	55,9
<i>Dev. Std.</i>	0,5	2,7	1,0	9,4
<i>Minimo</i>	997,6	19,4	0,1	37,7
<i>Massimo</i>	1000,0	29,5	6,9	77,5



**Figura A.30: Dal 14/07/2021 al 16/07/2021 Via Sile 14, MI: Superficie orizzontale: manto erboso.**

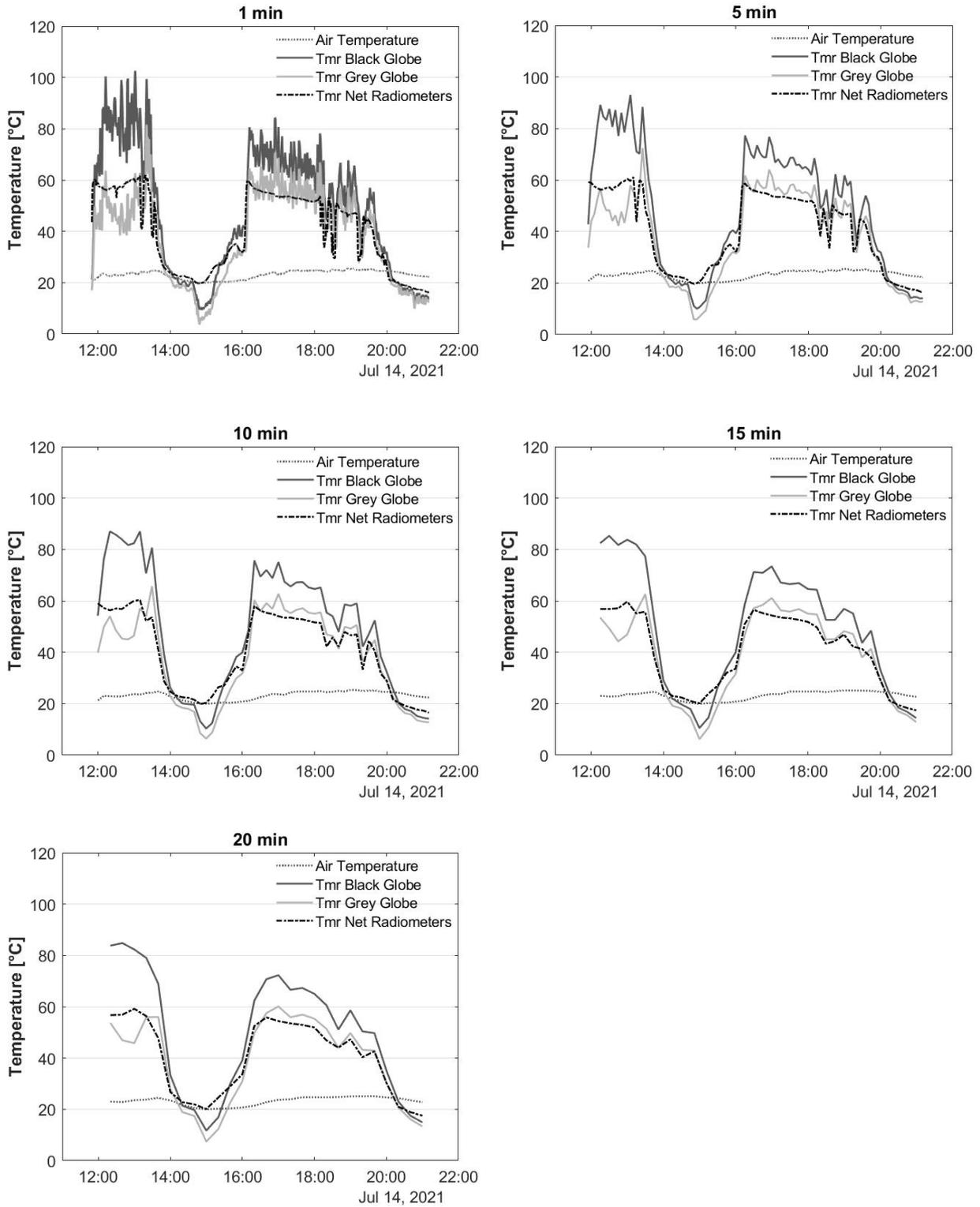
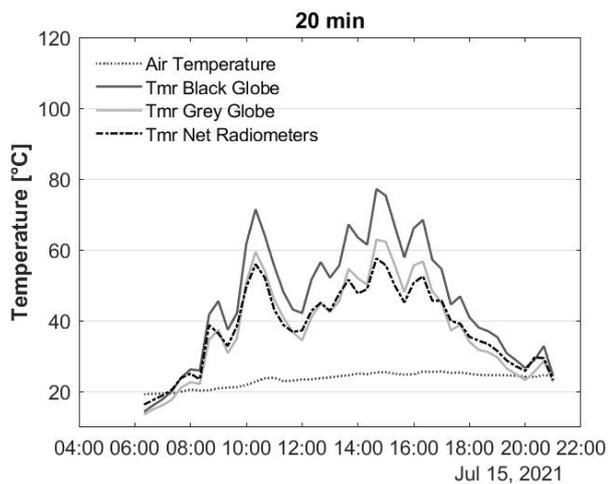
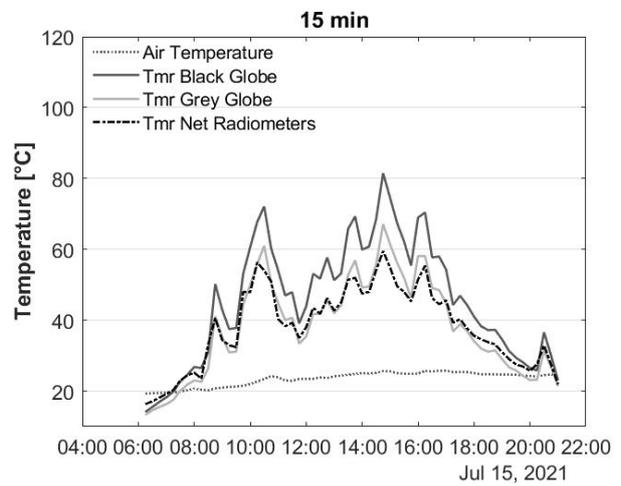
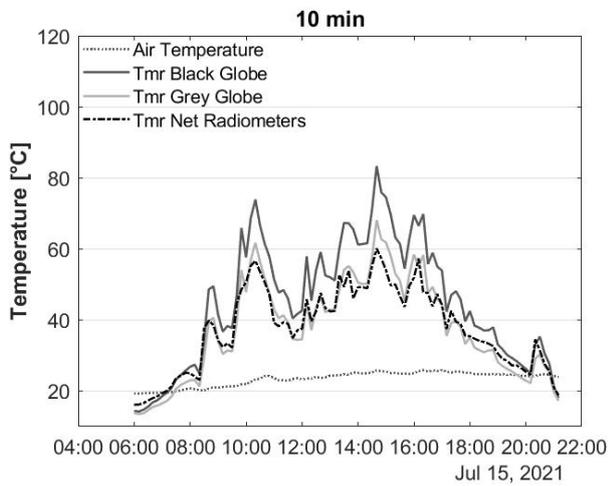
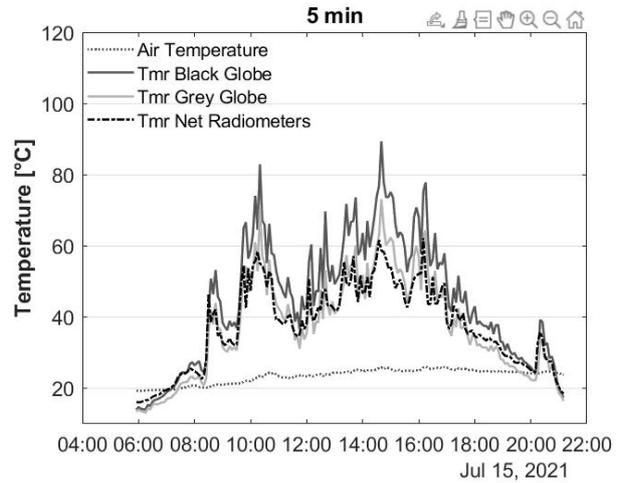
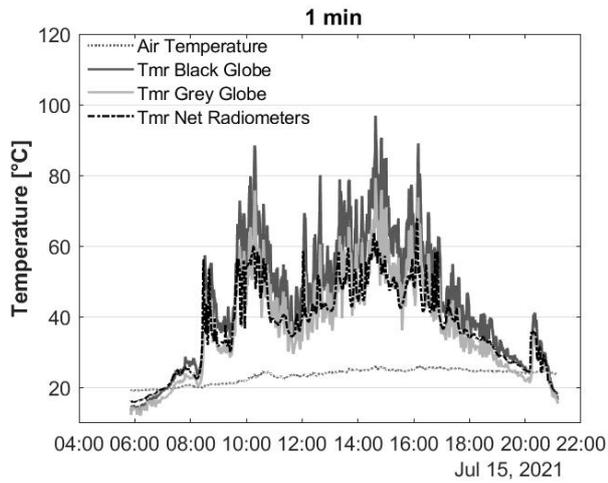


Figura A.31: Andamento di  $T_a$ ,  $T_{mr,Net}$ ,  $T_{mr,B15}$ ,  $T_{mr,G5}$  (14/07/2021, Via Sile MI)



**Figura A.32: Andamento di  $T_a$ ,  $T_{mr,Net}$ ,  $T_{mr,B15}$ ,  $T_{mr,G5}$  (15/07/2021, Via Sile MI)**

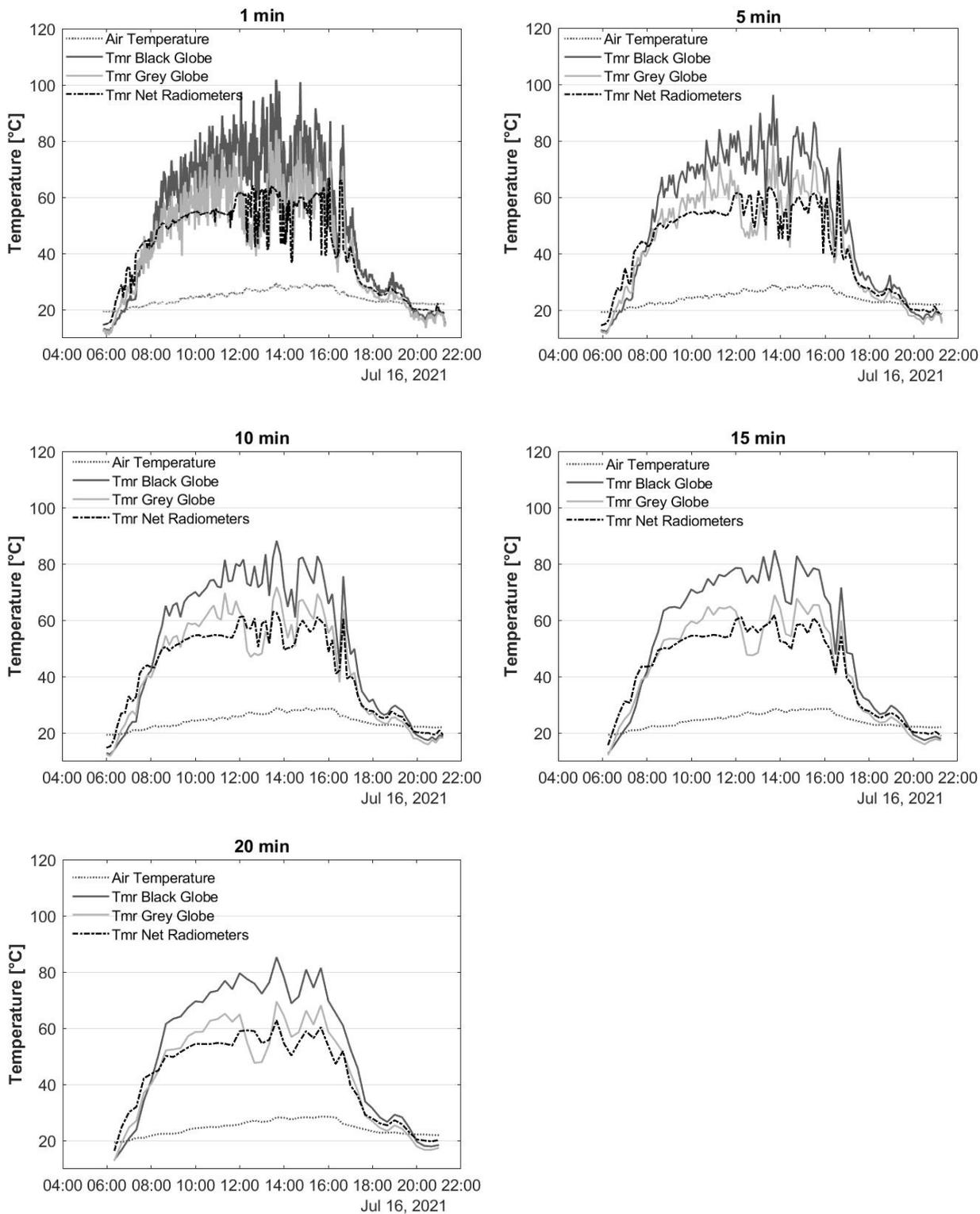


Figura A.33: Andamento di  $T_a$ ,  $T_{mr,Net}$ ,  $T_{mr,B15}$ ,  $T_{mr,G5}$  (16/07/2021, Via Sile MI)

**Dal 29 Giugno al 01 Luglio 2021**

**Via Ponzio, Milano**

**Tabella A.21: Campo di variazione delle principali variabili meteorologiche, registrato nella giornata del 29/06/2021 (Via Ponzio, MI)**

	$R_{GL}$	$T_a$	$v_a$	$RH$
<i>UdM</i>	W/m <sup>2</sup>	°C	m/s	%
<i>Valore Medio</i>	441,6	30,0	1,5	39,6
<i>Dev. Std.</i>	351,6	1,8	0,6	3,6
<i>Minimo</i>	0,0	26,0	0,4	33,7
<i>Massimo</i>	923,0	32,6	3,2	49,2

**Tabella A.22: Campo di variazione delle principali variabili meteorologiche, registrato nella giornata del 30/06/2021 (Via Ponzio, MI)**

	$R_{GL}$	$T_a$	$v_a$	$RH$
<i>UdM</i>	W/m <sup>2</sup>	°C	m/s	%
<i>Valore Medio</i>	422,3	26,8	1,3	50,7
<i>Dev. Std.</i>	314,7	3,1	0,6	12,2
<i>Minimo</i>	2,0	21,7	0,2	28,5
<i>Massimo</i>	1063,0	32,2	3,3	70,0

**Tabella A.23: Campo di variazione delle principali variabili meteorologiche, registrato nella giornata del 01/07/2021 (Via Ponzio, MI)**

	$R_{GL}$	$T_a$	$v_a$	$RH$
<i>UdM</i>	W/m <sup>2</sup>	°C	m/s	%
<i>Valore Medio</i>	474,6	28,8	1,2	39,0
<i>Dev. Std.</i>	326,8	4,0	0,5	15,1
<i>Minimo</i>	1,0	20,5	0,2	20,0
<i>Massimo</i>	941,0	34,3	3,3	69,5



**Figura A.34: Dal 29/06/2021 al 01/07/2021 Via Ponzio, MI: Superficie orizzontale: manto erboso.**

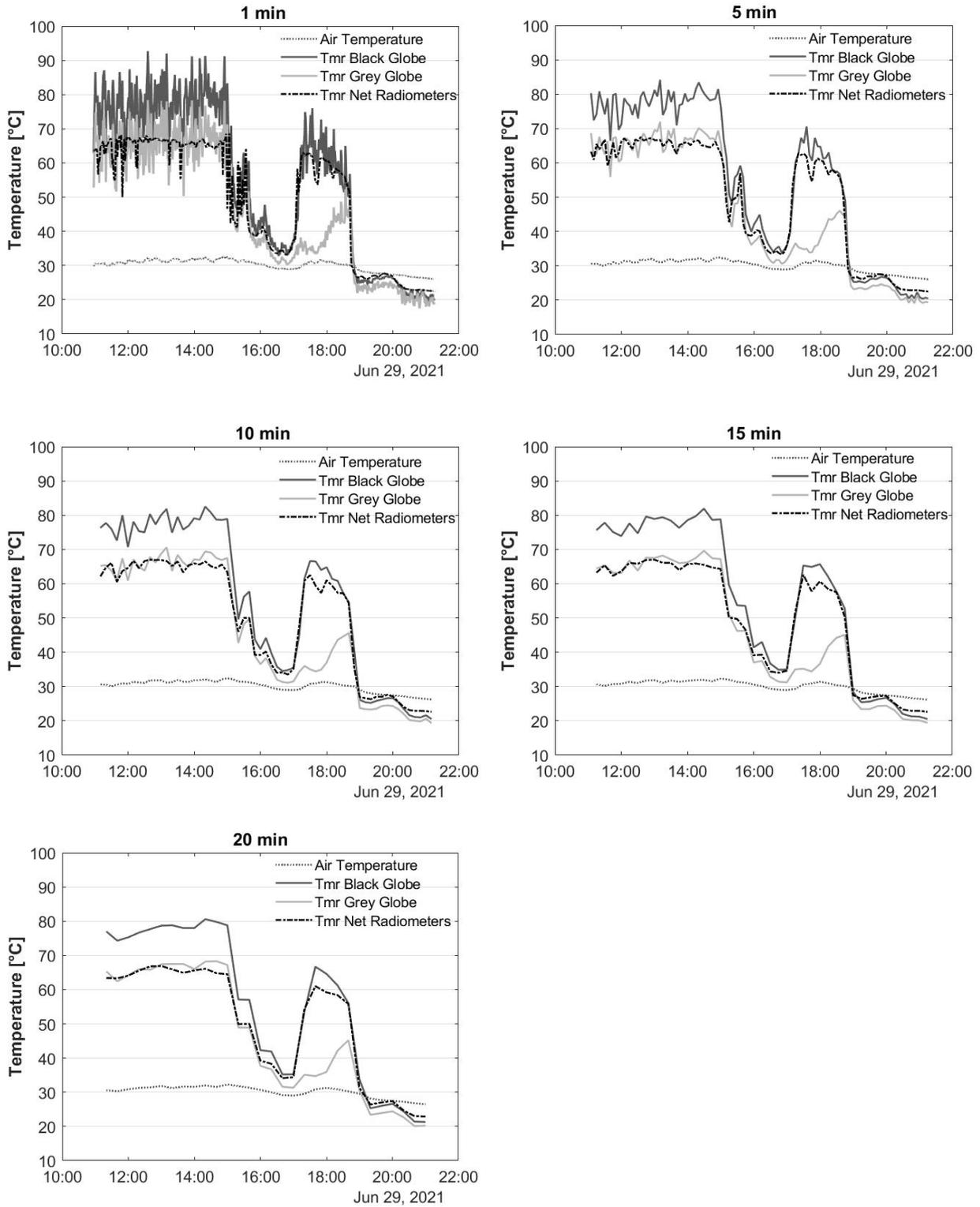
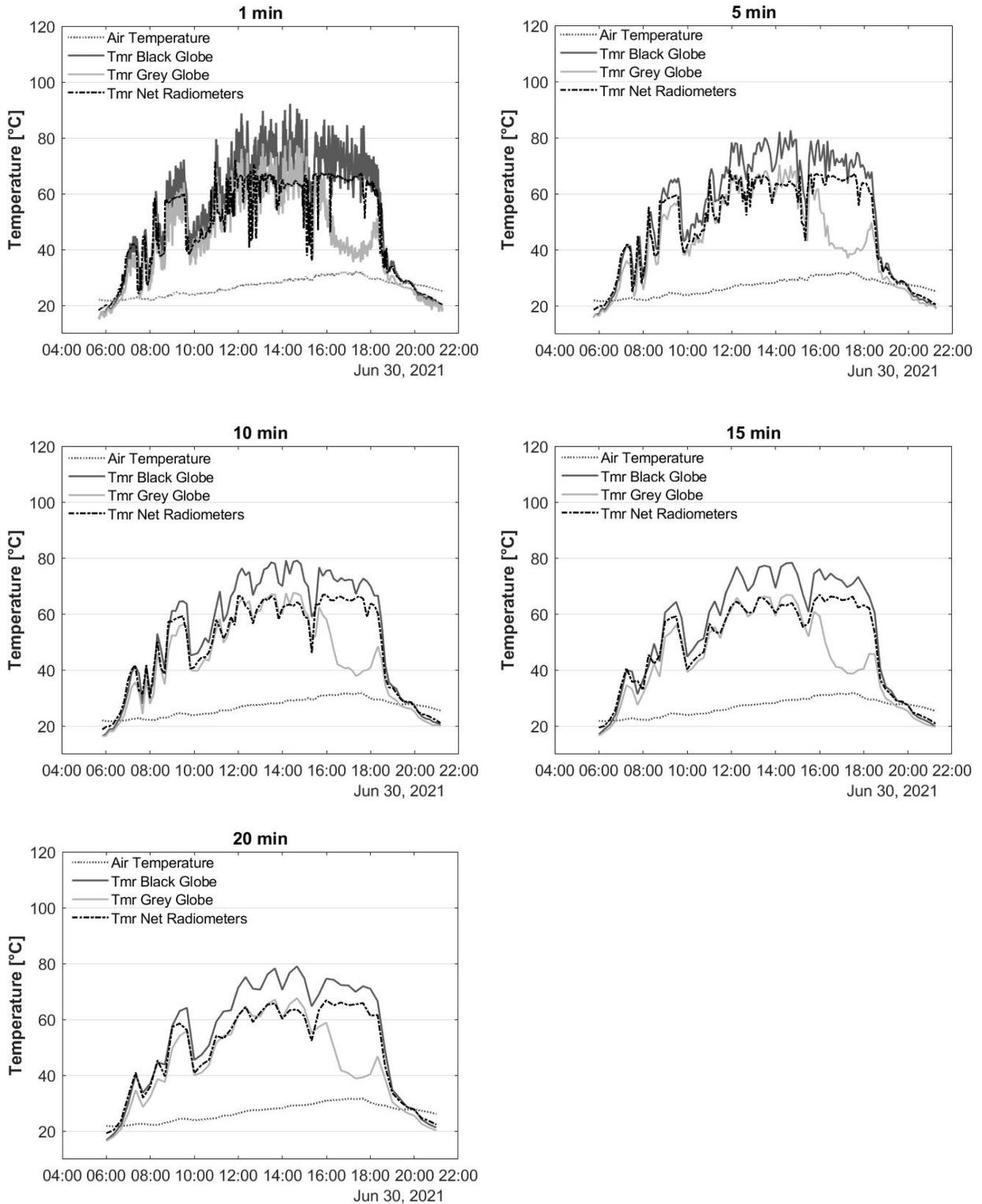


Figura A.35: Andamento di  $T_a$ ,  $T_{mr,Net}$ ,  $T_{mr,B15}$ ,  $T_{mr,G5}$  (29/06/2021, Via Ponzio MI)



**Figura A.36: Andamento di  $T_a$ ,  $T_{mr,Net}$ ,  $T_{mr,B15}$ ,  $T_{mr,G5}$  (30/06/2021, Via Ponzio MI)**

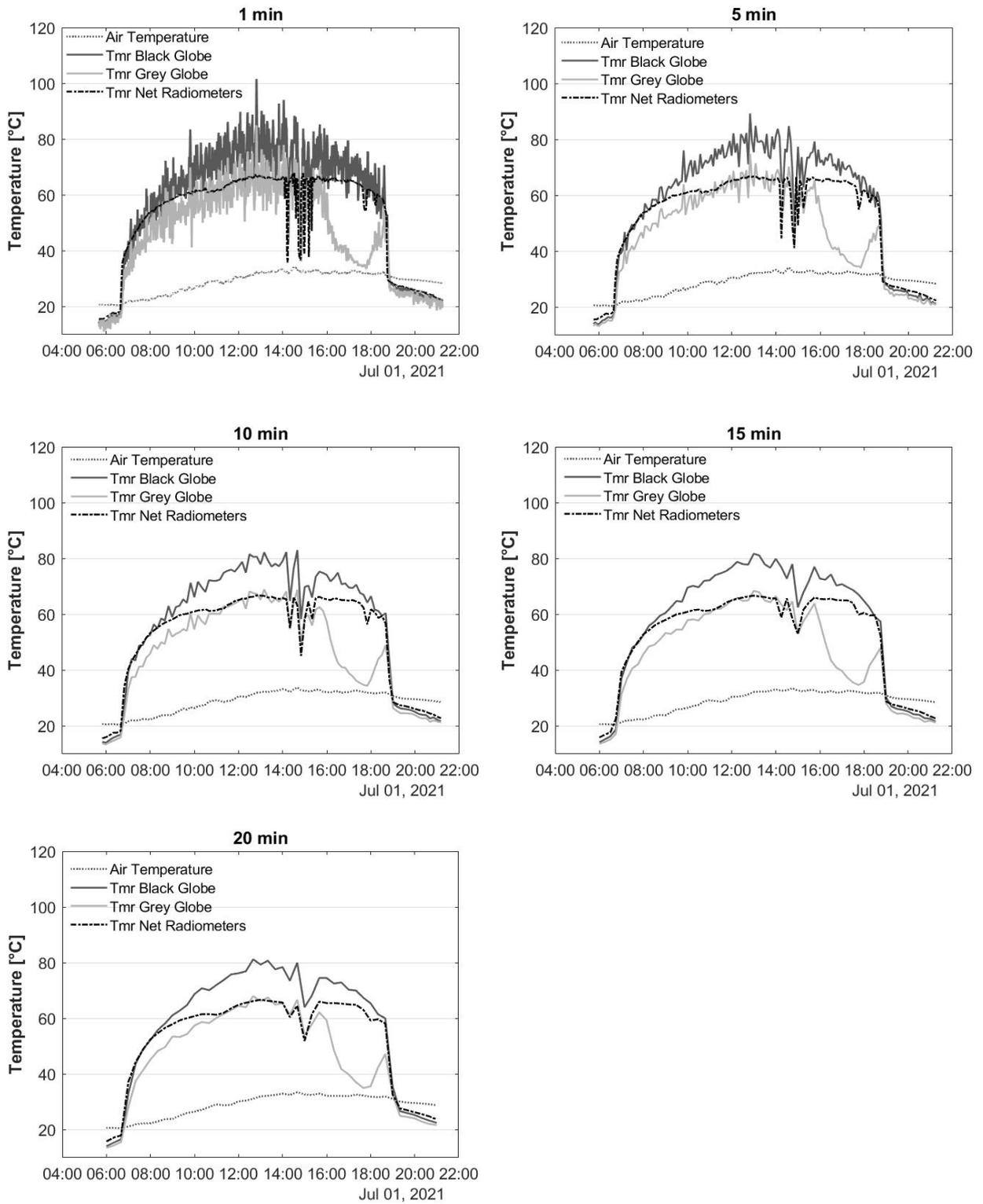


Figura A.37: Andamento di  $T_a$ ,  $T_{mr,Net}$ ,  $T_{mr,B15}$ ,  $T_{mr,G5}$  (01/07/2021, Via Ponzio MI)

**Dal 14 al 17 Giugno 2021**

**Quartiere Bovisa, Milano**

**Tabella A.24: Campo di variazione delle principali variabili meteorologiche, registrato nella giornata del 14/06/2021 (Bovisa, MI)**

	<b><i>R<sub>GL</sub></i></b>	<b><i>T<sub>a</sub></i></b>	<b><i>v<sub>a</sub></i></b>	<b><i>RH</i></b>
<i>UdM</i>	W/m <sup>2</sup>	°C	m/s	%
<i>Valore Medio</i>	579,3	30,1	1,6	43,2
<i>Dev. Std.</i>	319,0	1,8	0,6	3,4
<i>Minimo</i>	2,0	26,0	0,2	37,6
<i>Massimo</i>	927,0	32,9	3,8	50,8

**Tabella A.25: Campo di variazione delle principali variabili meteorologiche, registrato nella giornata del 15/06/2021 (Bovisa, MI)**

	<b><i>R<sub>GL</sub></i></b>	<b><i>T<sub>a</sub></i></b>	<b><i>v<sub>a</sub></i></b>	<b><i>RH</i></b>
<i>UdM</i>	W/m <sup>2</sup>	°C	m/s	%
<i>Valore Medio</i>	453,0	27,8	1,5	41,0
<i>Dev. Std.</i>	312,7	3,4	0,6	5,6
<i>Minimo</i>	0,0	22,2	0,3	33,7
<i>Massimo</i>	1263,0	32,7	4,2	51,6

**Tabella A.26: Campo di variazione delle principali variabili meteorologiche, registrato nella giornata del 16/07/2021 (Bovisa, MI)**

	<b><i>R<sub>GL</sub></i></b>	<b><i>T<sub>a</sub></i></b>	<b><i>v<sub>a</sub></i></b>	<b><i>RH</i></b>
<i>UdM</i>	W/m <sup>2</sup>	°C	m/s	%
<i>Valore Medio</i>	310,1	27,1	1,5	50,0
<i>Dev. Std.</i>	246,9	3,1	0,5	6,2
<i>Minimo</i>	2,0	22,0	0,2	39,2
<i>Massimo</i>	878,0	32,2	3,5	62,0

**Tabella A.27: Campo di variazione delle principali variabili meteorologiche, registrato nella giornata del 17/06/2021 (Bovisa, MI)**

	<b><i>R<sub>GL</sub></i></b>	<b><i>T<sub>a</sub></i></b>	<b><i>v<sub>a</sub></i></b>	<b><i>RH</i></b>
<i>UdM</i>	W/m <sup>2</sup>	°C	m/s	%
<i>Valore Medio</i>	471,7	28,1	1,0	53,1
<i>Dev. Std.</i>	293,6	3,0	0,4	8,1
<i>Minimo</i>	2,0	22,7	0,2	42,1
<i>Massimo</i>	941,0	32,6	2,8	69,3



Figura A.38: Dal 14/06/2021 al 17/06/2021 Bovisa, MI: Superficie orizzontale: piastrelle in cemento.

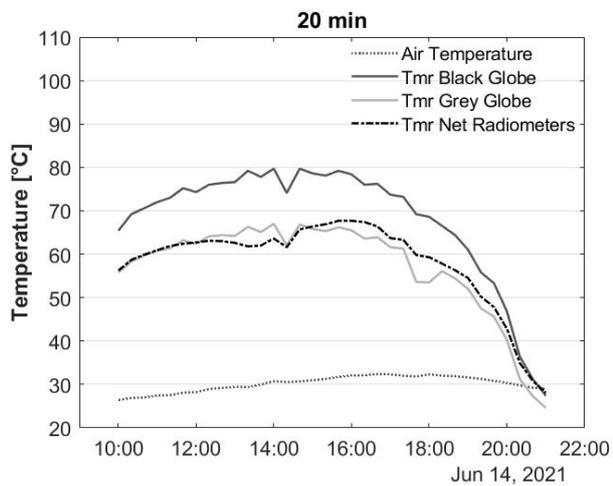
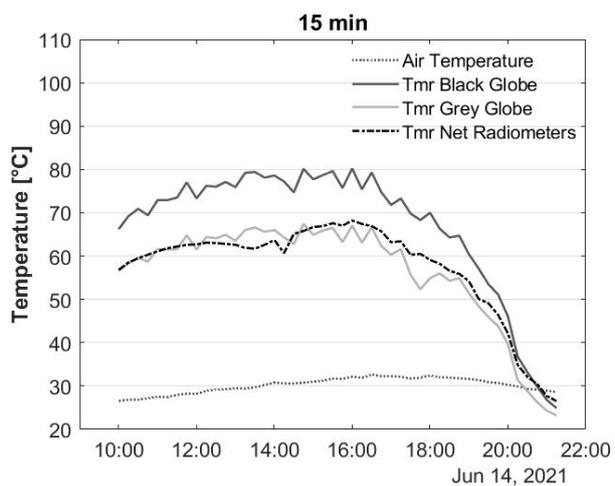
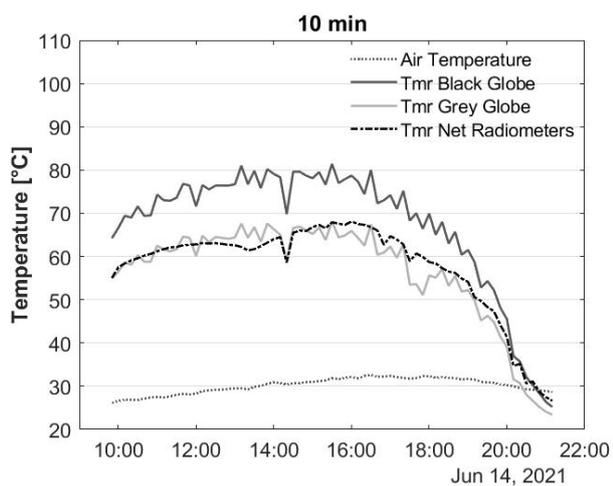
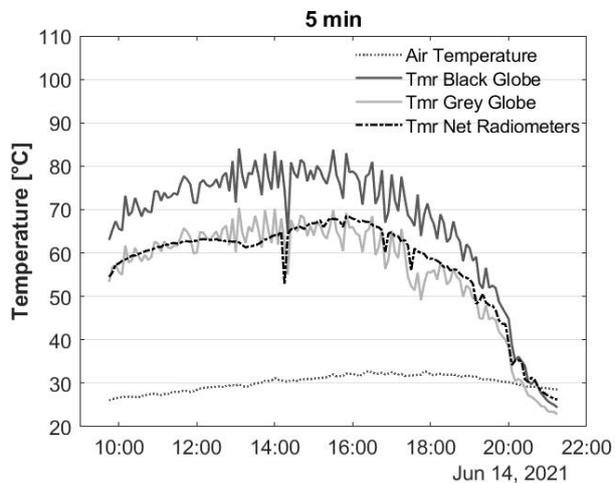
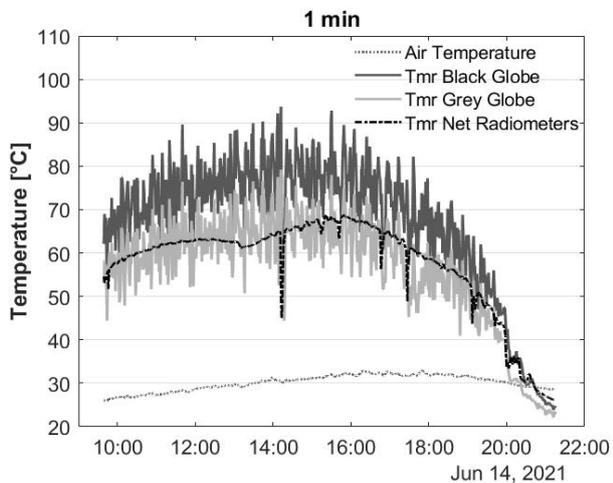
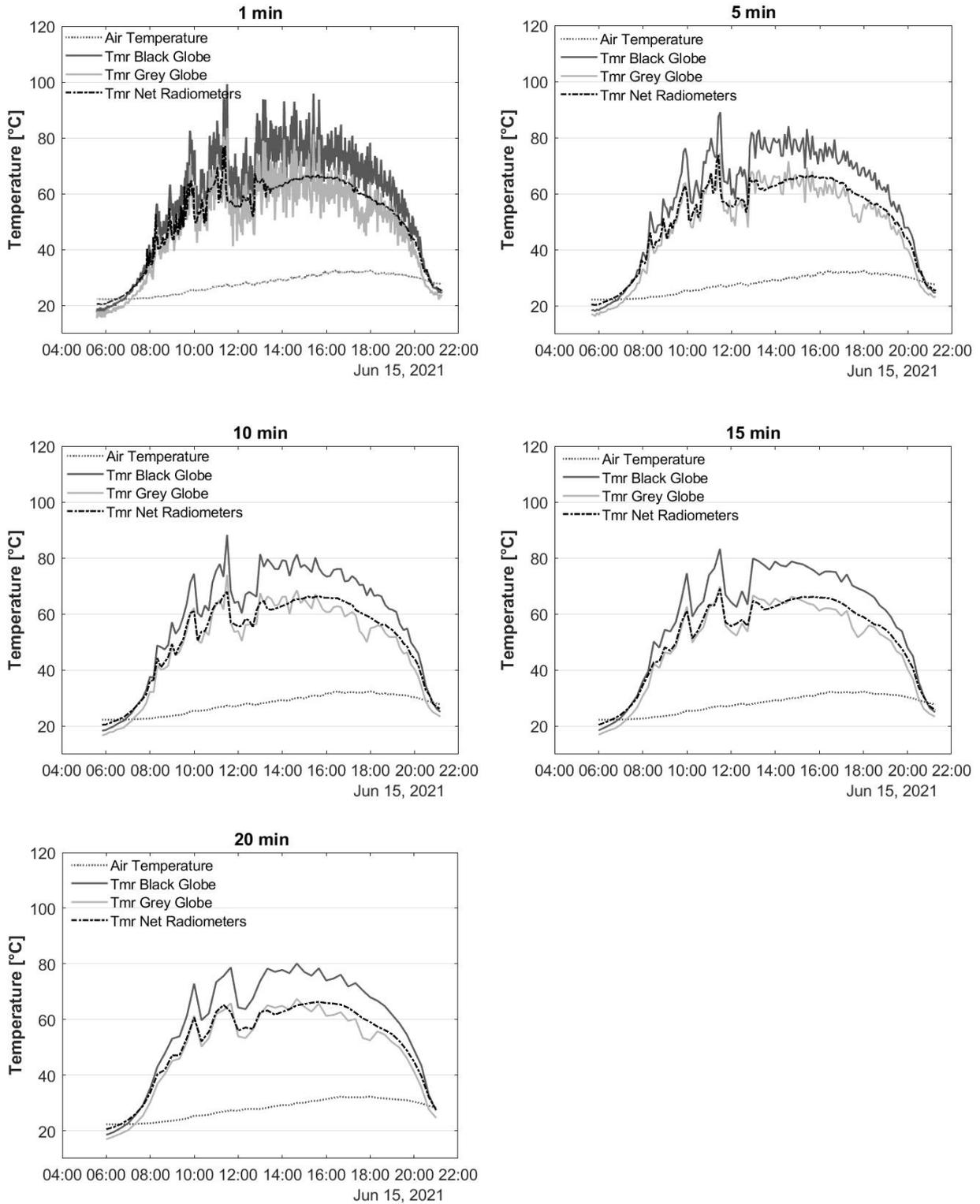
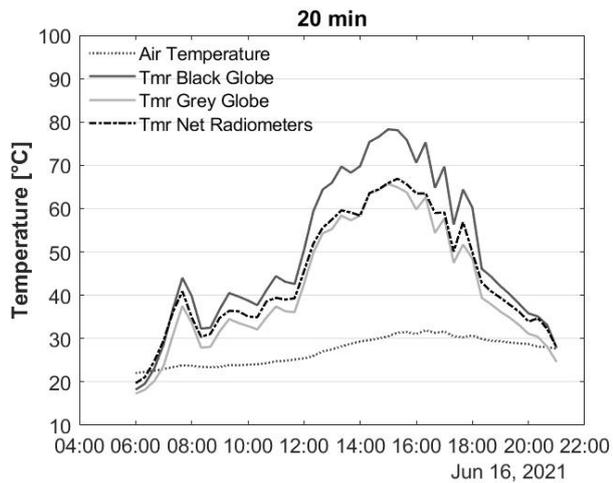
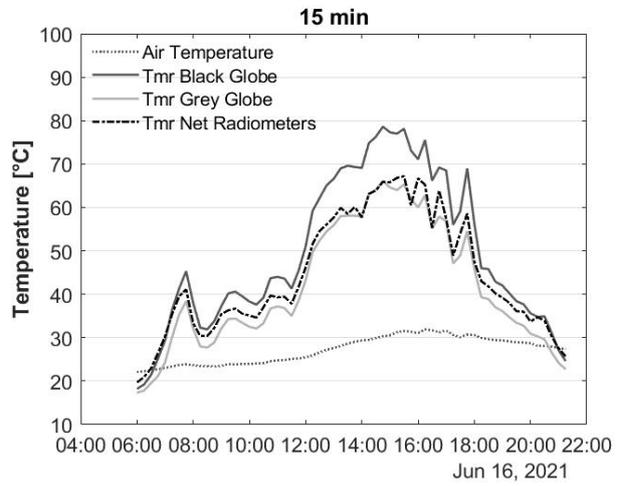
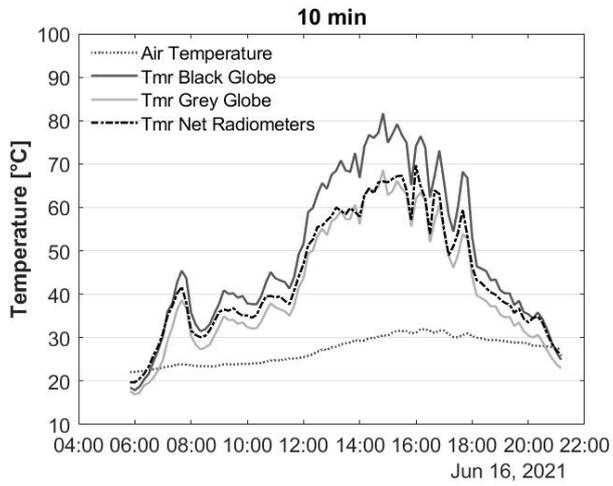
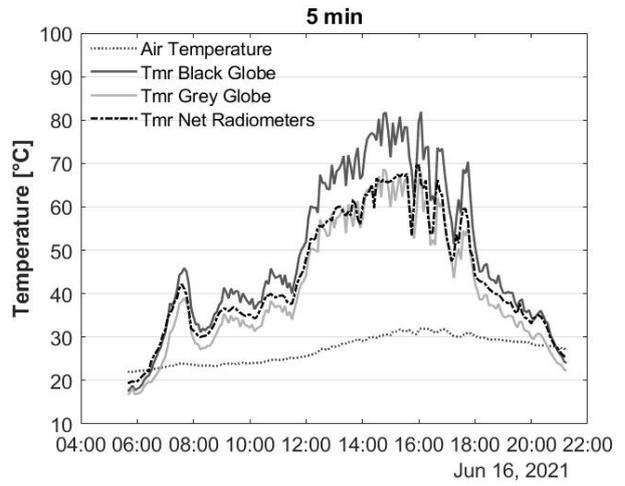
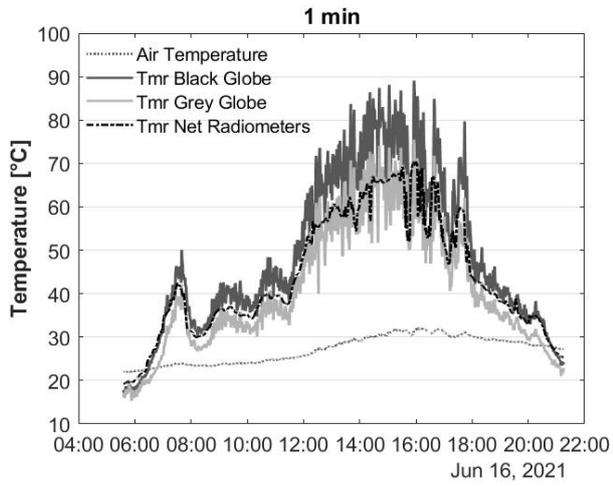


Figura A.39: Andamento di  $T_a$ ,  $T_{mr,Net}$ ,  $T_{mr,B15}$ ,  $T_{mr,G5}$  (14/06/2021, Bovisa MI)

Figura A.40: Andamento di  $T_a$ ,  $T_{mr,Net}$ ,  $T_{mr,B15}$ ,  $T_{mr,G5}$  (15/06/2021, Bovisa MI)





**Figura A.41: Andamento di  $T_a$ ,  $T_{mr,Net}$ ,  $T_{mr,B15}$ ,  $T_{mr,G5}$  (16/06/2021, Bovisa MI)**

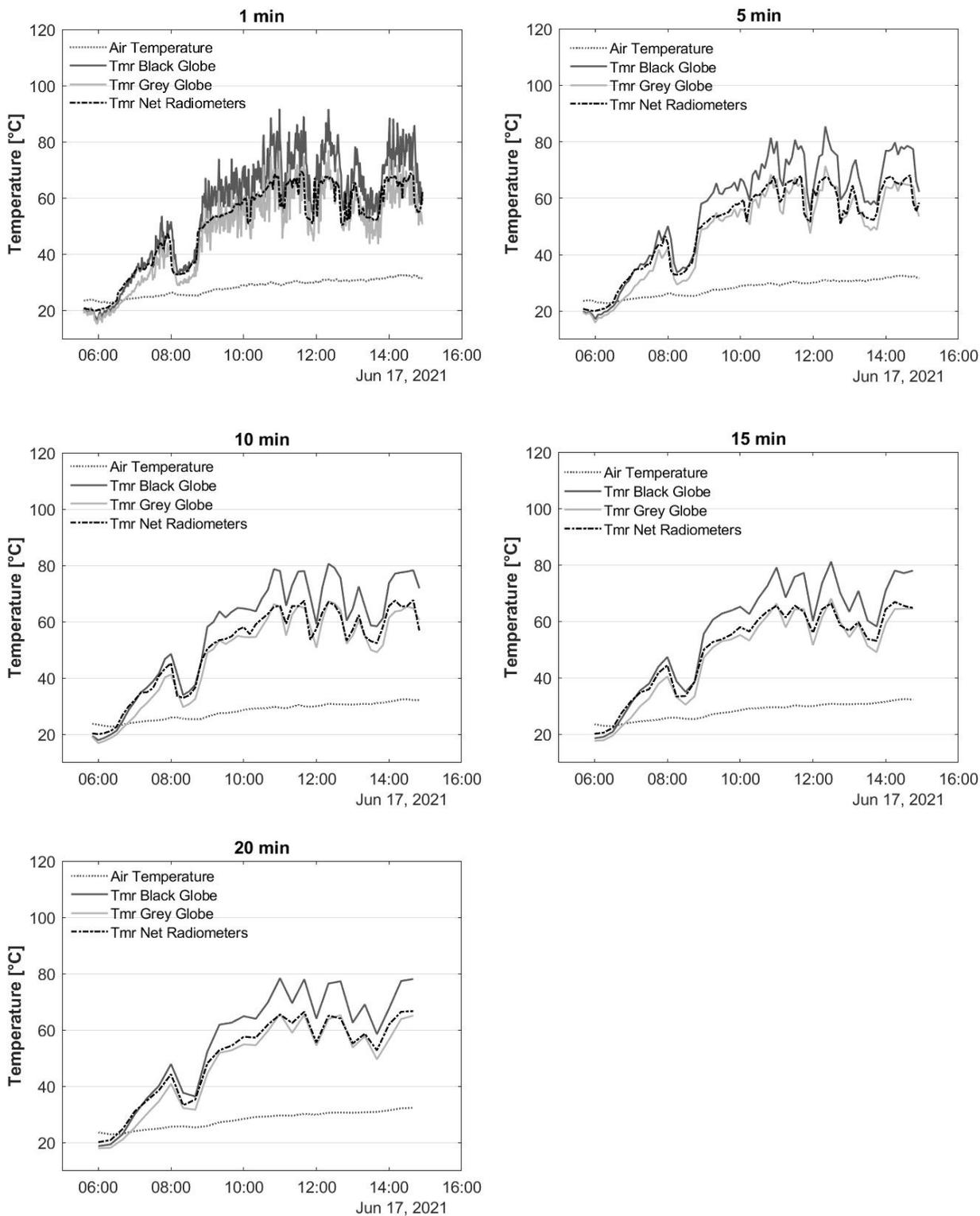


Figura A.42: Andamento di  $T_a$ ,  $T_{mr,Net}$ ,  $T_{mr,B15}$ ,  $T_{mr,G5}$  (17/06/2021, Bovisa MI)

**Rielaborazione dati campagna sperimentale 2020**

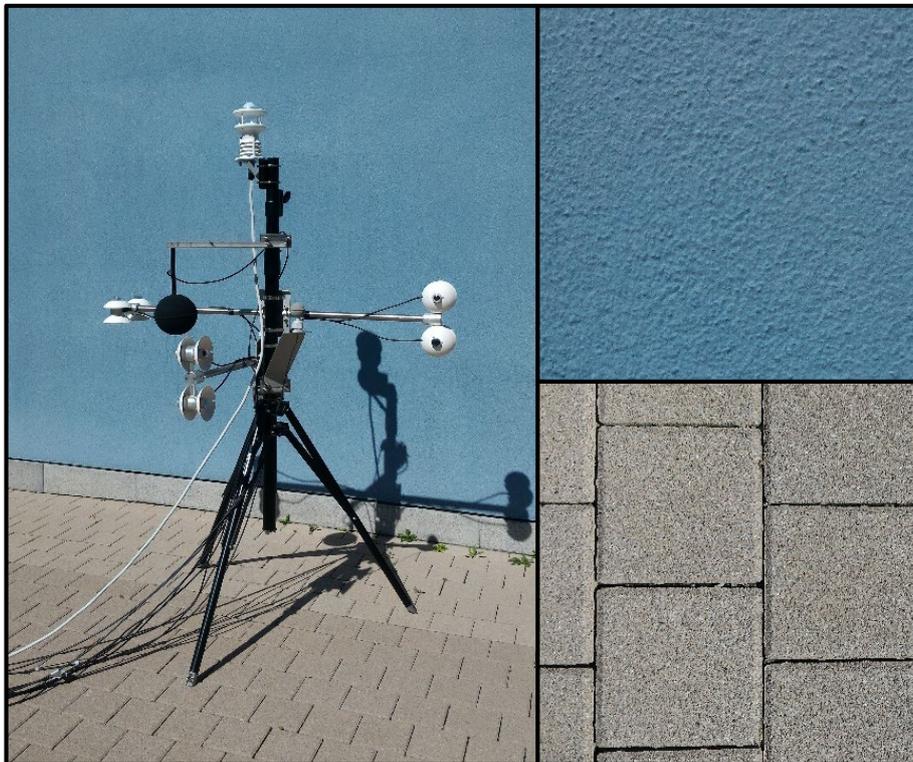
**01 Settembre 2020**

**Cascina Merlata, Milano**

**Tabella A.1: Campo di variazione delle principali variabili meteorologiche, registrato nella giornata del 01/09/2020 (Cascina Merlata, MI)**

	$R_{GL}$	$T_a$	$v_a$	$RH$
<i>UdM</i>	W/m <sup>2</sup>	°C	m/s	%
<i>Valore Medio</i>	545,4	27,4	1,0	39,1
<i>Dev. Std.</i>	384,0	1,5	0,4	5,3
<i>Minimo</i>	25,0	24,1	0,2	31,0
<i>Massimo</i>	934,0	30,9	2,5	52,3

**Figura A.1: 01/09/2020 Cascina Merlata, MI. Superficie orizzontale: autobloccanti. Superficie verticale: intonaco azzurro**



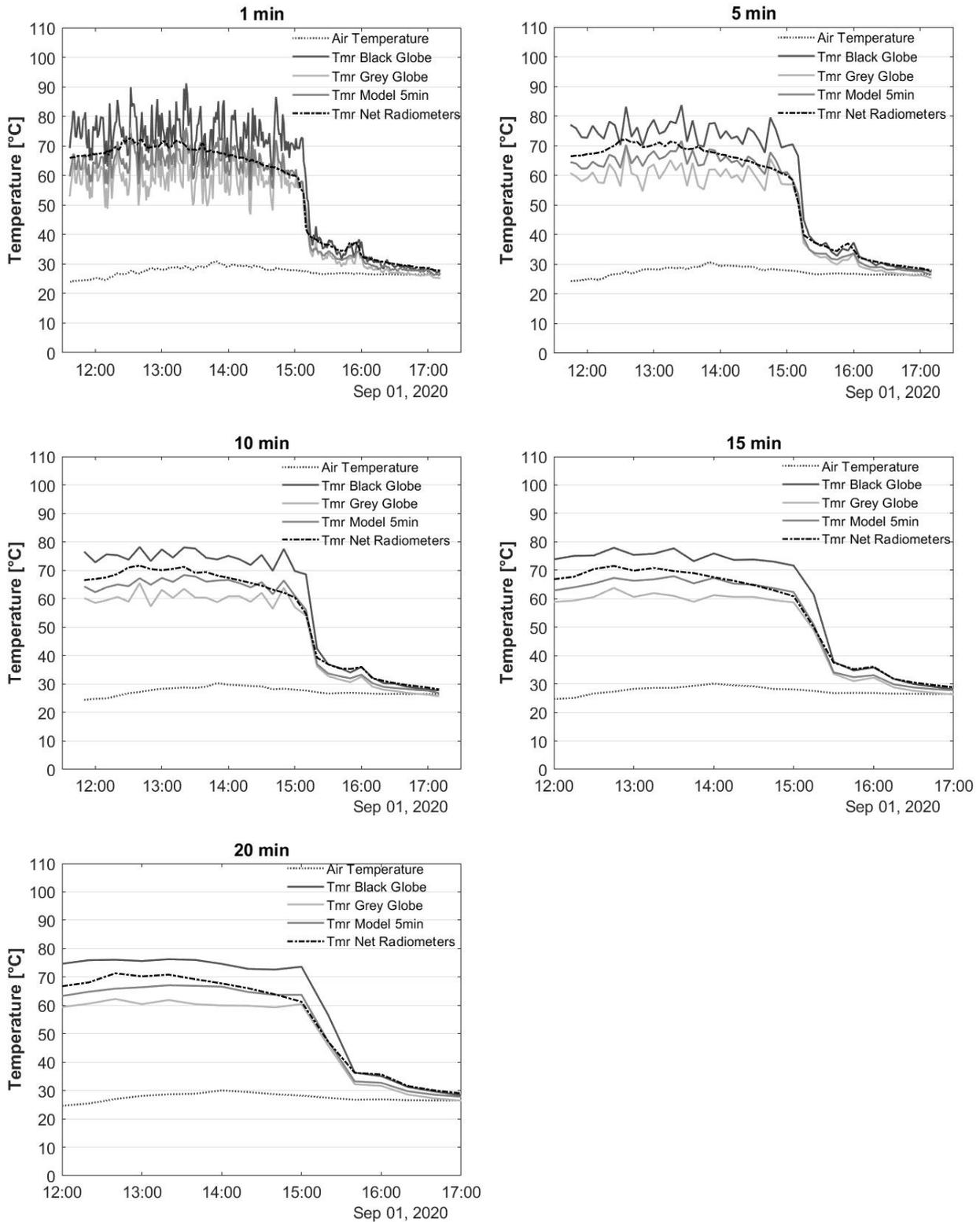


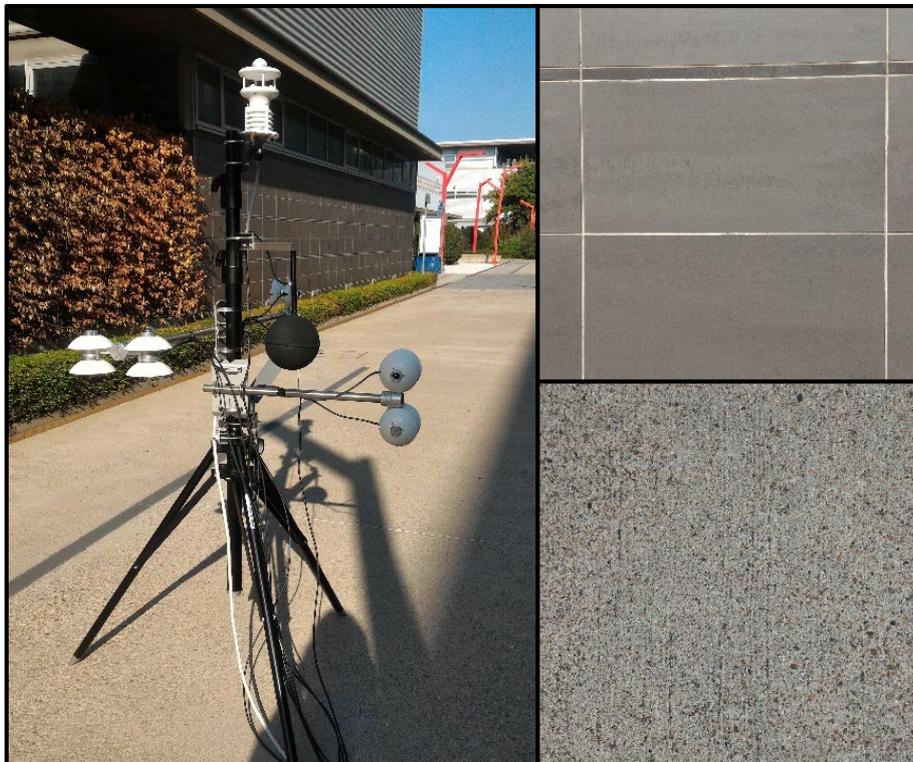
Figura A.2: Andamento di  $T_a$ ,  $T_{mr,Net}$ ,  $T_{mr,B15}$ ,  $T_{mr,G5}$  e  $T_{mr,Model}$  (01/09/2020, Cascina Merlata MI)

**9 Settembre 2020**

**Quartiere Bovisa, Milano**

**Tabella A.2: Campo di variazione delle principali variabili meteorologiche, registrato nella giornata del 09/09/2020 (Bovisa, MI)**

	$R_{GL}$	$T_a$	$v_a$	$RH$
<i>UdM</i>	W/m <sup>2</sup>	°C	m/s	%
<i>Valore Medio</i>	138,3	26,7	1,2	55,6
<i>Dev. Std.</i>	58,7	1,5	0,5	4,6
<i>Minimo</i>	81,0	23,8	0,1	45,6
<i>Massimo</i>	338,0	29,5	2,6	63,6



**Figura A.3: 09/09/2020, Bovisa MI. Superficie orizzontale: cemento battuto. Superfici verticali: lastre di gres porcellanato e vite (parete verde)**

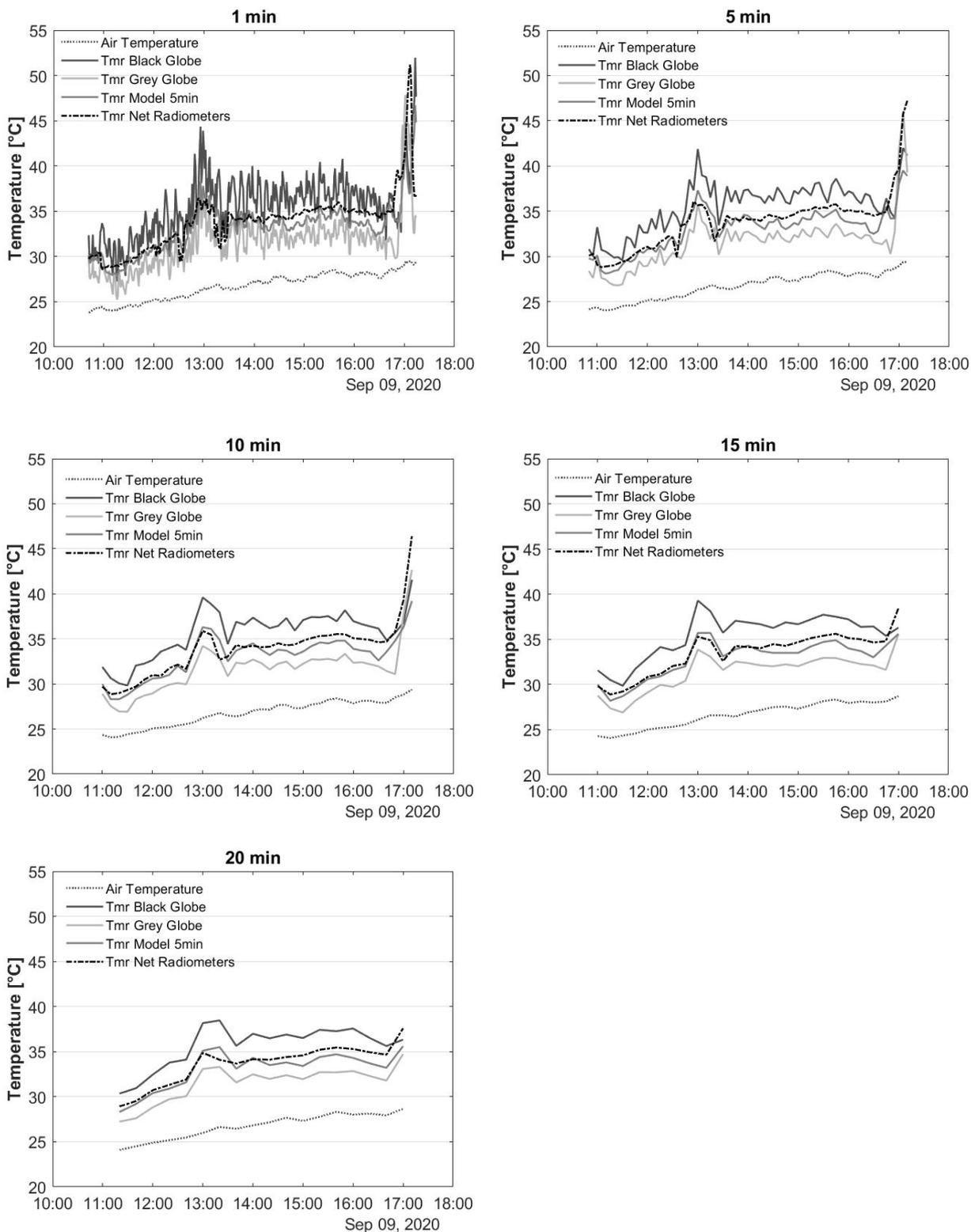


Figura A.4: Andamento di  $T_a$ ,  $T_{mr,Net}$ ,  $T_{mr,B15}$ ,  $T_{mr,G5}$  e  $T_{mr,Model}$  (09/09/2020, Bovisa MI)

**17 Settembre 2020**

**Quartiere Bovisa, Milano**

**Tabella A.3: Campo di variazione delle principali variabili meteorologiche, registrato nella giornata del 17/09/2020 (Bovisa, MI)**

	$R_{GL}$	$T_a$	$v_a$	$RH$
<i>UdM</i>	W/m <sup>2</sup>	°C	m/s	%
<i>Valore Medio</i>	255,3	30,0	0,6	44,8
<i>Dev. Std.</i>	232,3	0,6	0,3	2,6
<i>Minimo</i>	39,0	27,1	0,1	37,3
<i>Massimo</i>	578,0	31,3	1,6	52,7



**Figura A.5: 17/09/2020, Bovisa MI. Superficie orizzontale: autobloccanti. Superficie verticale: vite (parete verde).**

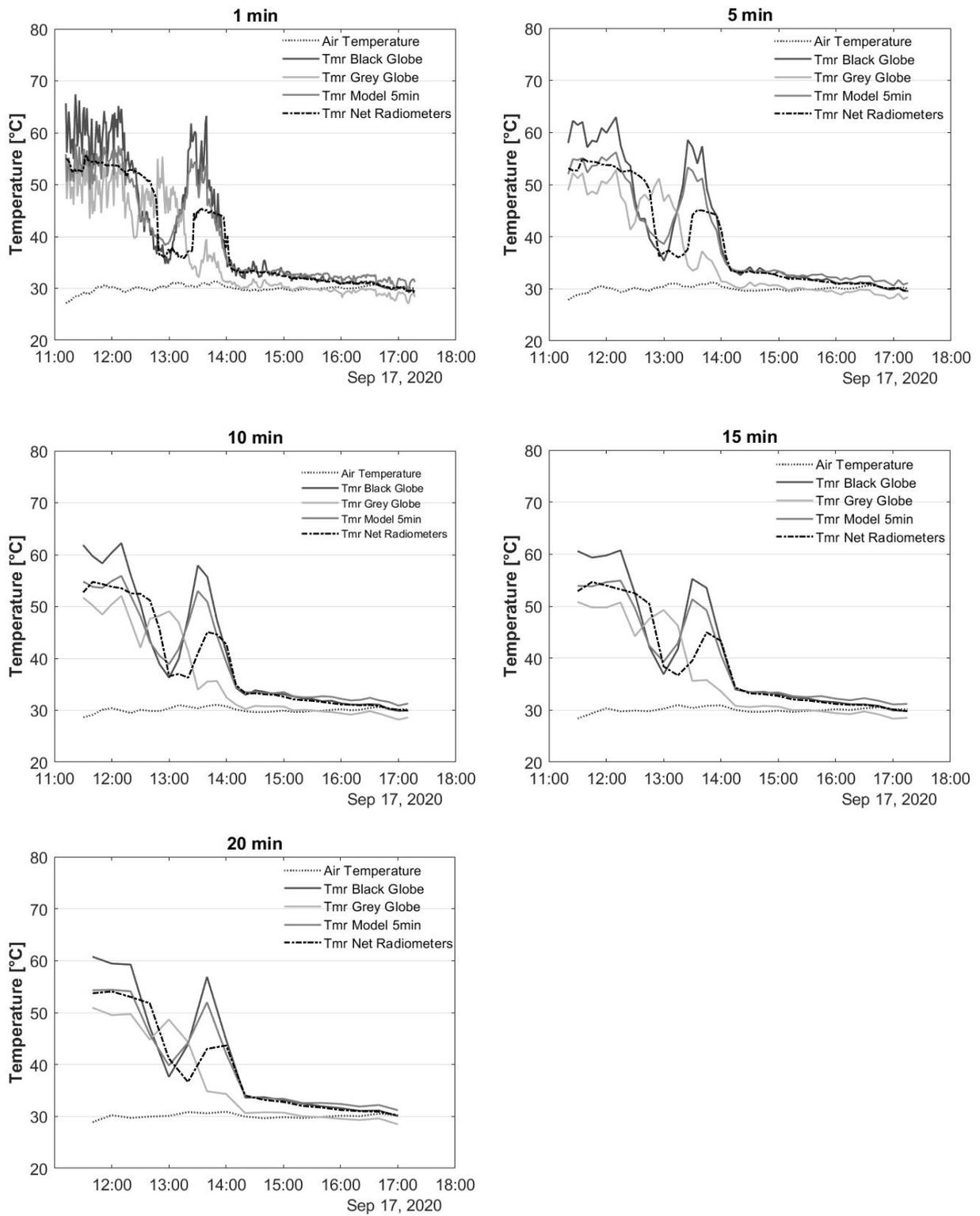


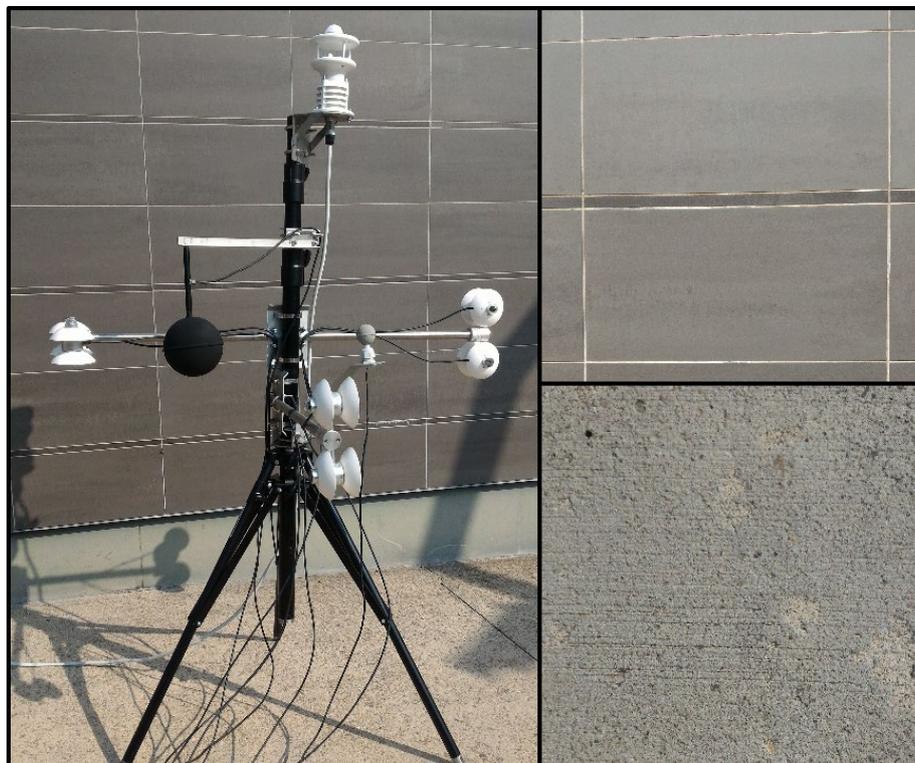
Figura A.6: Andamento di  $T_a$ ,  $T_{mr,Net}$ ,  $T_{mr,B15}$ ,  $T_{mr,G5}$  e  $T_{mr,Model}$  (17/09/2020, Bovisa MI)

**18 Settembre 2020**

**Quartiere Bovisa, Milano**

**Tabella A.4: Campo di variazione delle principali variabili meteorologiche, registrato nella giornata del 18/09/2020 (Bovisa, MI)**

	$R_{GL}$	$T_a$	$v_a$	$RH$
<i>UdM</i>	W/m <sup>2</sup>	°C	m/s	%
<i>Valore Medio</i>	599,7	31,3	0,8	39,7
<i>Dev. Std.</i>	238,9	1,4	0,4	3,5
<i>Minimo</i>	84,0	28,3	0,1	34,4
<i>Massimo</i>	824,0	34,0	1,9	48,3



**Figura A.7: 18/09/2020, Bovisa Milano. Superficie orizzontale: cemento spazzolato. Superficie verticale: lastre di gres porcellanato.**

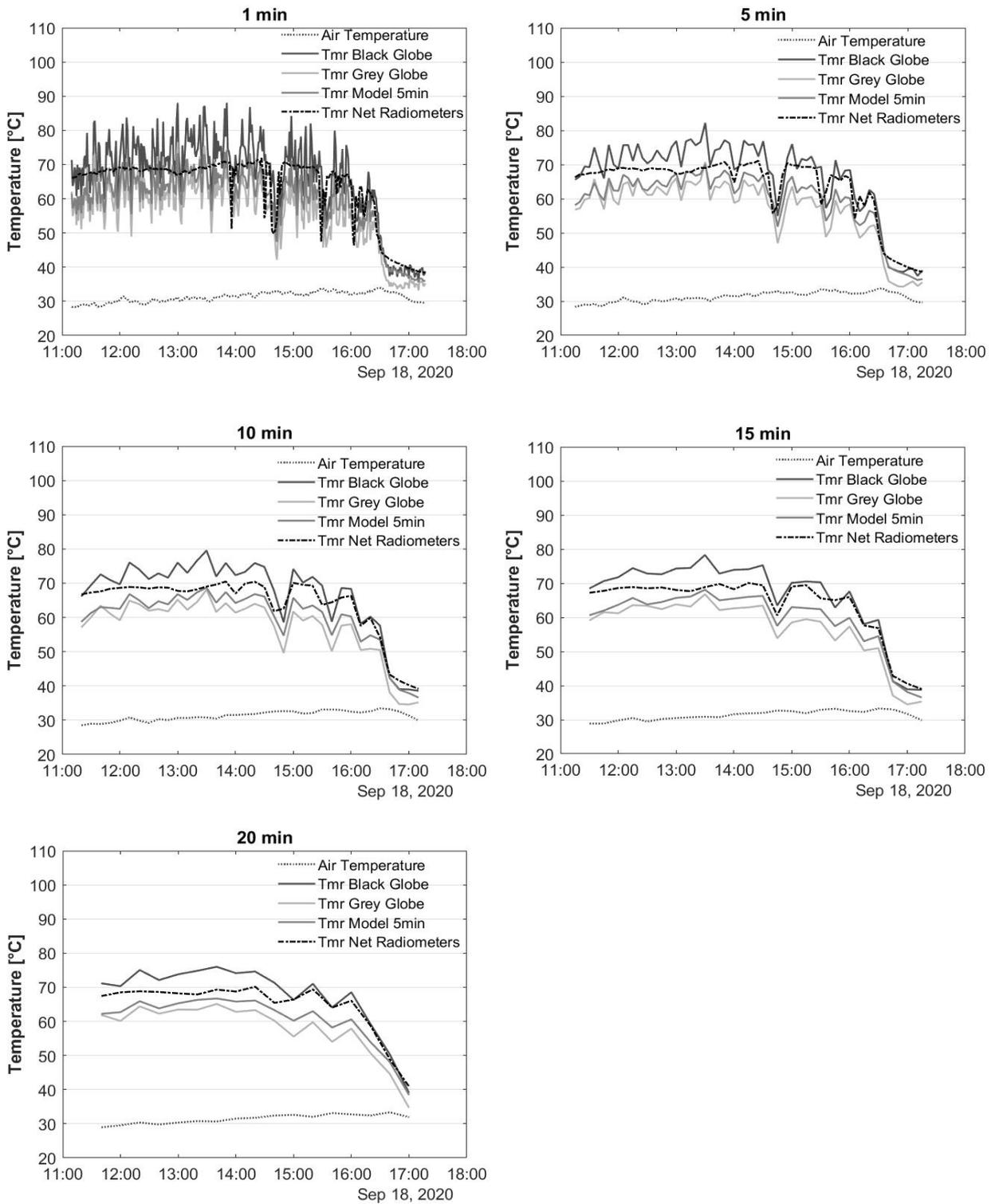


Figura A.8: Andamento di  $T_a$ ,  $T_{mr,Net}$ ,  $T_{mr,B15}$ ,  $T_{mr,G5}$  e  $T_{mr,Model}$  (18/09/2020, Bovisa MI)

**06 Ottobre 2020**

**Via Bovisasca 57, Milano**

**Tabella A.5: Campo di variazione delle principali variabili meteorologiche, registrato nella giornata del 06/10/2020 (Via Bovisasca 57, MI)**

	$R_{GL}$	$T_a$	$v_a$	$RH$
<i>UdM</i>	W/m <sup>2</sup>	°C	m/s	%
<i>Valore Medio</i>	103,0	17,2	0,4	66,9
<i>Dev. Std.</i>	66,8	0,7	0,2	3,6
<i>Minimo</i>	9,0	15,4	0,0	58,9
<i>Massimo</i>	431,0	18,8	1,0	74,8



**Figura A.9: 06/10/2020, Via Bovisasca 57 MI. Superficie orizzontale: sanpietrini. Superficie verticale: vite (parete verde).**

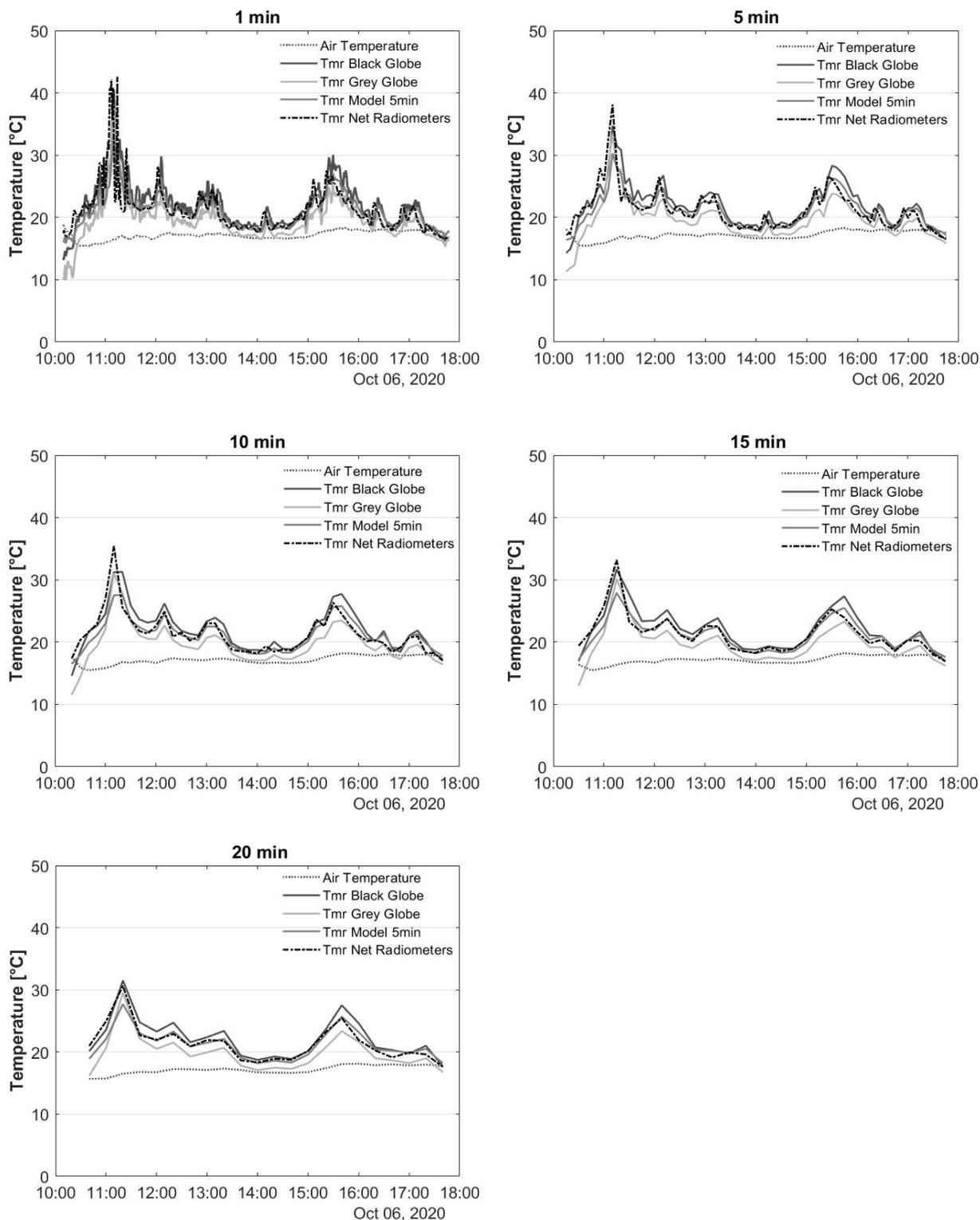
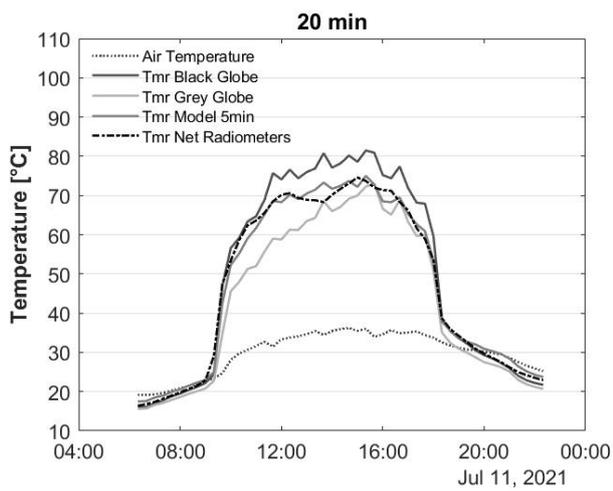
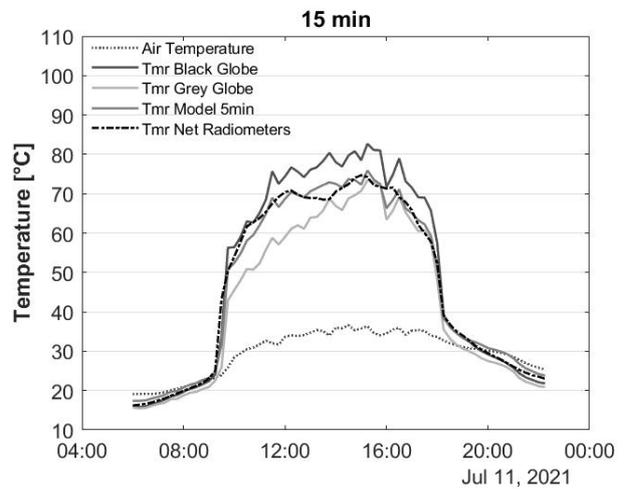
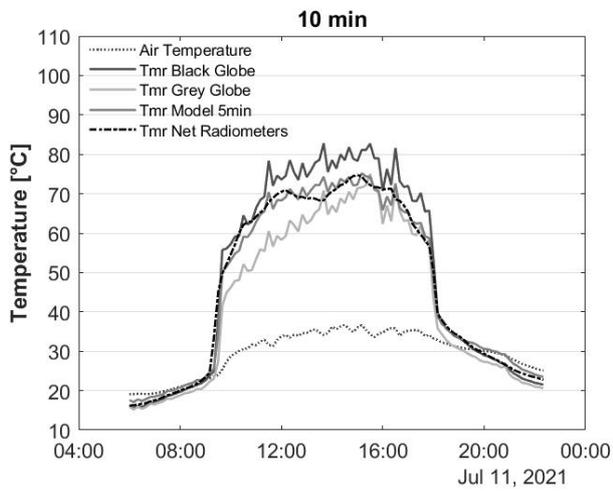
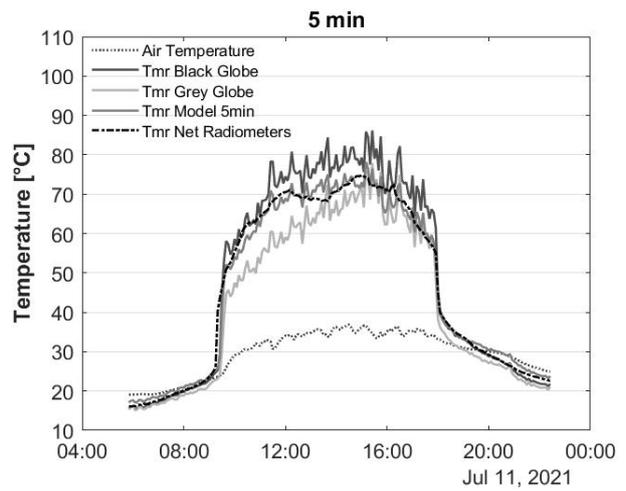
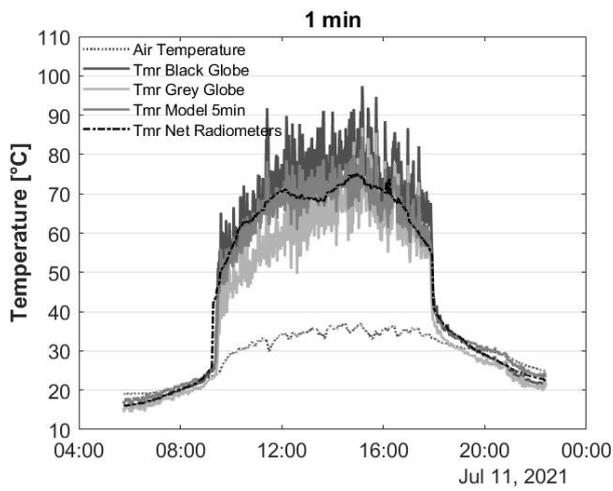


Figura A.10: Andamento di  $T_a$ ,  $T_{mr,Net}$ ,  $T_{mr,B15}$ ,  $T_{mr,G5}$  e  $T_{mr,Model}$  (06/10/2020, Via Bovisasca 57, MI)



**Figura A.11: Andamento di  $T_a$ ,  $T_{mr,Net}$ ,  $T_{mr,B15}$ ,  $T_{mr,G5}$  e  $T_{mr,Model}$  (11/07/2020, Via Bovisasca 57, MI)**

## Appendice B

L'Appendice B raccoglie i risultati dell'analisi di sensitività svolta sull'indice **UTCI**, con l'obiettivo di indagare l'errore, in termini di **UTCI**, determinato da un errore, in termini di  $T_{mr}$ , di 5 °C. Sono stati valutati tre diversi scenari, e per ciascuno di essi vengono riportati un grafico ed una tabella.

La **Tabella B.1** riporta i valori di **UTCI** ottenuti considerando:

- $v_a=3,5$  m/s,
- $T_a= 21$  °C,
- **RH** variabile nell'intervallo [20;90] %, con un passo del 10%,
- $T_{mr}$  variabile nell'intervallo [0;70] °C, con un passo di 5 °C.

I valori di  $v_a$  e  $T_a$  considerati rappresentano il valore medio delle misurazioni di ciascuna delle due variabili registrato durante la campagna sperimentale. Il campo di variabilità di **RH** e  $T_{mr}$  corrisponde a quello registrato durante la campagna. La **Figura B.1**, invece, mostra il grafico di dispersione dell'errore in termini di **UTCI**, causato da un errore in termini di  $T_{mr}$  di 5°C ( $UTCI(T_{mr} + 5\text{ °C}) - UTCI(T_{mr})$ ), relativo alle condizioni climatiche considerate in **Tabella B.1**.

La **Tabella B.2** riporta i valori di **UTCI** ottenuti considerando:

- $v_a=3,5$  m/s,
- $T_a$  variabile nell'intervallo [5; 37] °C, con passo di 2 °C,
- **RH**=55 %,
- $T_{mr}$  variabile nell'intervallo [0;70] °C, con un passo di 5 °C.

I valori di  $v_a$  e **RH** considerati rappresentano il valore medio delle misurazioni di ciascuna delle due variabili registrato durante la campagna sperimentale. Il campo di variabilità di  $T_a$  e  $T_{mr}$  corrisponde a quello registrato durante la campagna. La **Figura B.2**, invece, mostra il grafico di dispersione dell'errore in termini di **UTCI** ( $UTCI(T_{mr} + 5\text{ °C}) - UTCI(T_{mr})$ ), relativo alle condizioni climatiche considerate in **Tabella B.2**.

La **Tabella B.3** riporta i valori di **UTCI** ottenuti considerando:

- $v_a$  variabile nell'intervallo [0; 6,9] m/s, con passo di 0,3 m/s,
- $T_a=21$  °C,
- **RH**=55 %,
- $T_{mr}$  variabile nell'intervallo [0;70] °C, con un passo di 5 °C.

I valori di  $T_a$  e **RH** considerati rappresentano il valore medio delle misurazioni di ciascuna delle due variabili registrato durante la campagna sperimentale. Il campo di variabilità di  $v_a$  e  $T_{mr}$  corrisponde a quello registrato durante la campagna. La **Figura B.3**, invece, mostra il grafico di dispersione dell'errore in termini di **UTCI** ( $UTCI(T_{mr} + 5\text{ °C}) - UTCI(T_{mr})$ ), relativo alle condizioni climatiche considerate in **Tabella B.3**.

**Tabella B.1: UTCI calcolato assumendo  $T_{mr}$  nell'intervallo [0; 70]°C, RH nell'intervallo [20; 90]%,  $T_a=21$ °C e  $v_a=3,5$  m/s**

	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	$T_{mr}$ [°C]
20	9,3	10,8	12,2	13,7	15,3	16,8	18,3	19,8	21,3	22,9	24,3	25,8	27,3	28,7	30,1	
30	9,6	11,0	12,5	14,0	15,5	17,0	18,5	20,0	21,5	23,0	24,5	25,9	27,3	28,8	30,2	
40	9,9	11,4	12,9	14,4	15,9	17,4	18,8	20,3	21,8	23,3	24,7	26,1	27,5	28,9	30,3	
50	10,4	11,8	13,3	14,8	16,3	17,8	19,3	20,7	22,2	23,6	25,0	26,4	27,8	29,1	30,5	
60	10,9	12,4	13,8	15,3	16,8	18,3	19,7	21,2	22,6	24,0	25,4	26,8	28,1	29,5	30,8	
70	11,4	12,9	14,4	15,9	17,3	18,8	20,3	21,7	23,1	24,5	25,9	27,2	28,5	29,8	31,1	
80	12,0	13,5	15,0	16,4	17,9	19,4	20,8	22,2	23,6	25,0	26,3	27,7	29,0	30,2	31,5	
90	12,7	14,2	15,6	17,0	18,5	19,9	21,3	22,7	24,1	25,5	26,8	28,2	29,5	30,7	32,0	

RH [%]

Figura B.1: Errore UTCI causato da una variazione di 5 °C della  $T_{mr}$ , valutato assumendo  $T_{mr}$  nell'intervallo [0; 70] °C, RH nell'intervallo [20; 90] %,  $T_a=21^\circ\text{C}$  and  $v_a=3,5\text{ m/s}$

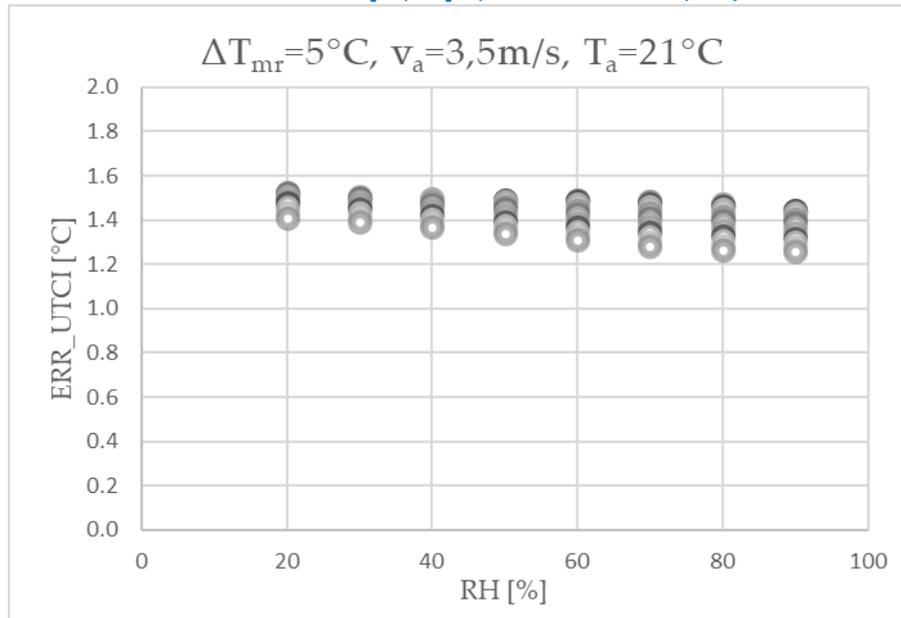


Tabella B.2: UTCI calcolato assumendo  $T_{mr}$  nell'intervallo [0; 70]°C,  $T_a$  nell'intervallo [5; 37] °C,  $v_a=3,5\text{ m/s}$  e RH=55 %

	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	$T_{mr}$ [°C]
5	-4,9	-3,2	-1,4	0,3	2,1	3,9	5,7	7,5	9,3	11,1	12,9	14,6	16,4	18,1	19,8	
7	-3,0	-1,3	0,4	2,2	4,0	5,7	7,5	9,3	11,0	12,8	14,5	16,2	17,9	19,6	21,2	
9	-1,1	0,6	2,3	4,0	5,8	7,5	9,2	11,0	12,7	14,4	16,1	17,8	19,4	21,0	22,6	
11	0,7	2,4	4,1	5,8	7,5	9,2	11,0	12,7	14,3	16,0	17,7	19,3	20,9	22,5	24,0	
13	2,6	4,3	5,9	7,6	9,3	11,0	12,6	14,3	15,9	17,6	19,2	20,7	22,3	23,8	25,3	
15	4,5	6,1	7,8	9,4	11,1	12,7	14,3	15,9	17,5	19,1	20,7	22,2	23,7	25,2	26,6	
17	6,5	8,1	9,6	11,2	12,8	14,4	16,0	17,6	19,1	20,6	22,1	23,6	25,1	26,5	27,9	
19	8,5	10,0	11,6	13,1	14,7	16,2	17,7	19,2	20,7	22,2	23,7	25,1	26,5	27,9	29,2	
21	10,6	12,1	13,6	15,1	16,6	18,0	19,5	21,0	22,4	23,8	25,2	26,6	28,0	29,3	30,6	
23	12,8	14,3	15,7	17,1	18,5	20,0	21,4	22,8	24,1	25,5	26,8	28,2	29,5	30,8	32,1	
25	15,2	16,5	17,9	19,3	20,6	22,0	23,3	24,6	26,0	27,3	28,6	29,8	31,1	32,4	33,6	
27	17,6	18,9	20,2	21,5	22,8	24,1	25,3	26,6	27,9	29,1	30,4	31,6	32,8	34,0	35,3	
29	20,2	21,4	22,6	23,9	25,1	26,3	27,5	28,7	29,9	31,1	32,3	33,5	34,6	35,8	37,0	
31	22,9	24,0	25,2	26,3	27,4	28,6	29,7	30,9	32,0	33,2	34,3	35,4	36,6	37,8	38,9	
33	25,7	26,8	27,8	28,9	29,9	31,0	32,1	33,2	34,3	35,3	36,4	37,6	38,7	39,8	41,0	
35	28,7	29,7	30,6	31,6	32,6	33,6	34,6	35,6	36,6	37,7	38,8	39,8	40,9	42,1	43,2	
37	32,0	32,8	33,7	34,5	35,4	36,4	37,3	38,3	39,3	40,3	41,3	42,3	43,4	44,5	45,7	

$T_a$  [°C]

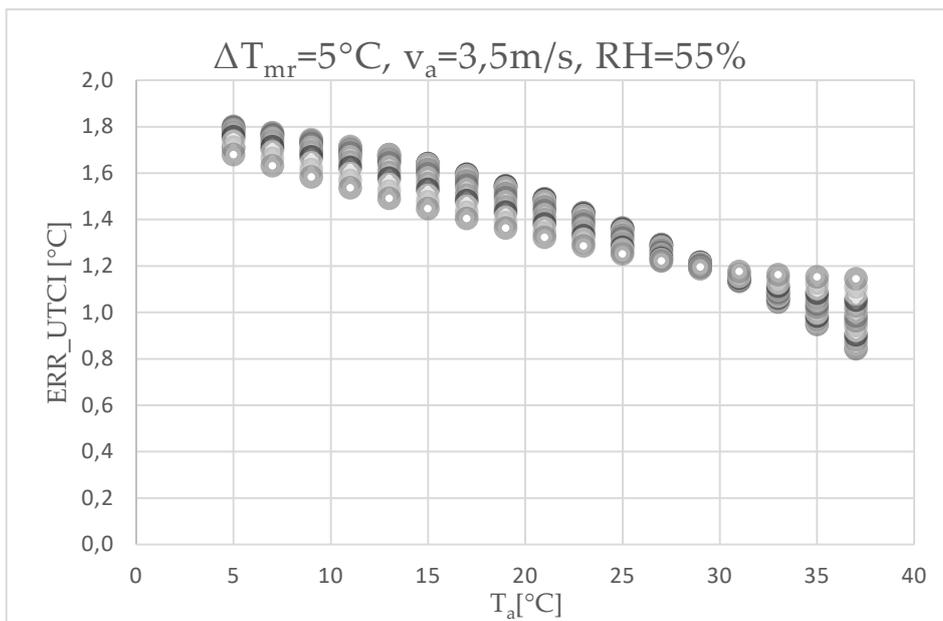
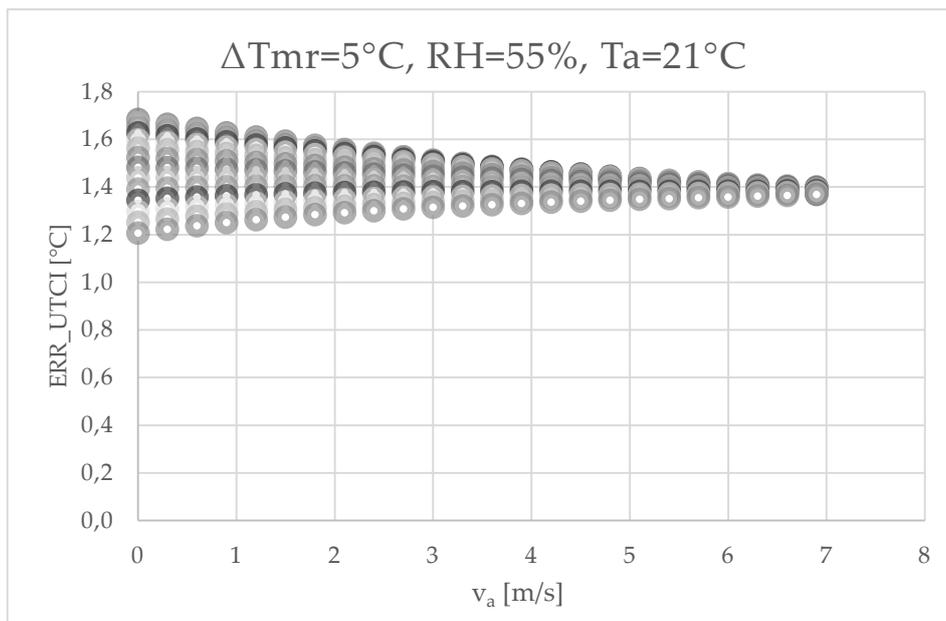


Figura B.2: Errore UTCI causato da una variazione di 5 °C della  $T_{mr}$ , valutato assumendo  $T_{mr}$  nell'intervallo [0; 70] °C,  $T_a$  nell'intervallo [5; 37] °C,  $v_a = 3,5$  m/s e  $\text{RH} = 55\%$

Tabella B.3: UTCI calcolato assumendo  $T_{mr}$  nell'intervallo [0; 70]°C,  $v_a$  nell'intervallo [0; 6,9] m/s,  $T_a = 21$  °C e  $\text{RH} = 55\%$

	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	$T_{mr}$ [°C]
0	14,2	15,9	17,6	19,2	20,8	22,4	24,0	25,5	27,0	28,5	29,8	31,2	32,5	33,7	34,9	
0,3	14,3	15,9	17,6	19,2	20,8	22,4	24,0	25,5	27,0	28,4	29,8	31,1	32,5	33,7	34,9	
0,6	14,2	15,8	17,5	19,1	20,7	22,3	23,8	25,3	26,8	28,2	29,6	31,0	32,3	33,6	34,8	
0,9	14,0	15,6	17,2	18,8	20,4	22,0	23,5	25,0	26,5	28,0	29,4	30,7	32,0	33,3	34,6	
1,2	13,7	15,3	16,9	18,5	20,1	21,7	23,2	24,7	26,2	27,6	29,0	30,4	31,7	33,0	34,3	
1,5	13,4	15,0	16,6	18,2	19,7	21,3	22,8	24,3	25,8	27,2	28,6	30,0	31,3	32,6	33,9	
1,8	13,0	14,6	16,2	17,8	19,3	20,8	22,4	23,8	25,3	26,7	28,1	29,5	30,9	32,2	33,5	
2,1	12,6	14,2	15,8	17,3	18,8	20,4	21,9	23,4	24,8	26,2	27,7	29,0	30,4	31,7	33,0	
2,4	12,2	13,8	15,3	16,8	18,4	19,9	21,4	22,8	24,3	25,7	27,1	28,5	29,9	31,2	32,5	
2,7	11,8	13,3	14,8	16,4	17,9	19,4	20,9	22,3	23,8	25,2	26,6	28,0	29,3	30,7	32,0	
3	11,3	12,8	14,4	15,9	17,4	18,9	20,3	21,8	23,3	24,7	26,1	27,5	28,8	30,2	31,5	
3,3	10,9	12,4	13,9	15,4	16,9	18,4	19,8	21,3	22,7	24,2	25,6	26,9	28,3	29,6	31,0	
3,6	10,5	11,9	13,4	14,9	16,4	17,9	19,3	20,8	22,2	23,6	25,0	26,4	27,8	29,1	30,5	
3,9	10,0	11,5	13,0	14,5	15,9	17,4	18,9	20,3	21,7	23,1	24,5	25,9	27,3	28,6	30,0	
4,2	9,6	11,1	12,6	14,0	15,5	16,9	18,4	19,8	21,3	22,7	24,1	25,4	26,8	28,2	29,5	
4,5	9,3	10,7	12,2	13,6	15,1	16,5	17,9	19,4	20,8	22,2	23,6	25,0	26,4	27,7	29,0	
4,8	8,9	10,3	11,8	13,2	14,7	16,1	17,5	19,0	20,4	21,8	23,2	24,6	25,9	27,3	28,6	
5,1	8,6	10,0	11,4	12,8	14,3	15,7	17,1	18,6	20,0	21,4	22,8	24,2	25,5	26,9	28,2	
5,4	8,2	9,7	11,1	12,5	13,9	15,3	16,8	18,2	19,6	21,0	22,4	23,8	25,1	26,5	27,9	
5,7	7,9	9,3	10,8	12,2	13,6	15,0	16,4	17,8	19,3	20,7	22,0	23,4	24,8	26,2	27,5	
6	7,7	9,1	10,5	11,9	13,3	14,7	16,1	17,5	18,9	20,3	21,7	23,1	24,5	25,8	27,2	
6,3	7,4	8,8	10,2	11,6	13,0	14,4	15,8	17,2	18,6	20,0	21,4	22,8	24,2	25,5	26,9	
6,6	7,2	8,6	9,9	11,3	12,7	14,1	15,5	17,0	18,3	19,7	21,1	22,5	23,9	25,3	26,6	
6,9	7,0	8,3	9,7	11,1	12,5	13,9	15,3	16,7	18,1	19,5	20,9	22,3	23,6	25,0	26,4	

$v_a$  [m/s]



**Figura B.3:** Errore UTCI causato da una variazione di 5 °C della  $T_{mr}$ , valutato assumendo  $T_{mr}$  nell'intervallo [0; 70] °C,  $v_a$  nell'intervallo [0; 6,9] m/s,  $T_a=21^{\circ}\text{C}$ , and  $RH=55\%$

L'analisi appena presentata è stata sviluppata per valutare le implicazioni sull'indice UTCI determinate da un errore di stima della  $T_{mr}$  di  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ . I risultati, validi per le condizioni climatiche considerate (*Tabella 2*), mostrano un errore in termini di **UTCI** sempre inferiore a 2 °C in valore assoluto.

## Appendice C

L'Appendice C riporta i risultati dell'analisi dell'errore, svolta per ciascun tempo di elaborazione, relativo alla stima della  $T_{mr}$  tramite le misure del globotermometro nero, le misure del globotermometro grigio, l'applicazione della funzione di regressione sviluppata per lo specifico tempo di elaborazione considerato e l'applicazione dell'Equazione 7 (*Model\_5min*). L'errore è stato qui definito come la deviazione della  $T_{mr}$  stimata dal valore calcolato tramite radiometri netti ( $T_{mr,Net}$ ). Inoltre, la *Figura C.1* riporta la frequenza di distribuzione dell'errore per ciascun tempo di elaborazione, relativo all'implementazione della sola funzione *Model\_5min*.

I risultati qui esposti fanno riferimento ai dati raccolti in ambienti urbani complessi.

### 1-min

**Tabella C.1: Analisi dell'errore svolta considerando il tempo di elaborazione pari a 5-min**

	$Err\_T_{mr,B15}$	$Err\_T_{mr,GS}$	$Err\_T_{mr,Model\_1min}$	$Err\_T_{mr,Model\_5m}$
Valore medio	3,3	-3,5	-0,3	-0,3
Dev. Std.	6,2	5,2	3,5	3,8
Asimmetria	1,0	-0,3	-0,9	-0,4
Curtosi	2,2	1,7	3,0	3,5
Minimo	-28,5	-29,1	-23,0	-26,3
Massimo	36,3	22,5	13,0	18,1

### 5-min

**Tabella C.2: Analisi dell'errore svolta considerando il tempo di elaborazione pari a 5-min**

	$Err\_T_{mr,B15}$	$Err\_T_{mr,GS}$	$Err\_T_{mr,Model\_5m}$
Valore medio	3,6	-3,3	-0,1
Dev. Std.	5,2	4,2	3,2
Asimmetria	0,7	-0,3	-0,4
Curtosi	1,3	1,7	3,7
Minimo	-15,0	-19,6	-15,7
Massimo	26,0	14,9	15,7

### 10-min

**Tabella C.3: Analisi dell'errore svolta considerando il tempo di elaborazione pari a 10-min**

	$Err\_T_{mr,B15}$	$Err\_T_{mr,GS}$	$Err\_T_{mr,Model\_5m}$	$Err\_T_{mr,Model\_10m}$
Valore medio	3,7	-3,3	-0,2	-0,1
Dev. Std.	4,8	3,7	2,9	2,8
Asimmetria	0,7	-0,6	-0,6	-0,3
Curtosi	0,3	1,1	1,7	2,1
Minimo	-8,3	-17,6	-11,9	-10,7
Massimo	20,8	7,9	11,9	12,1

### 15-min

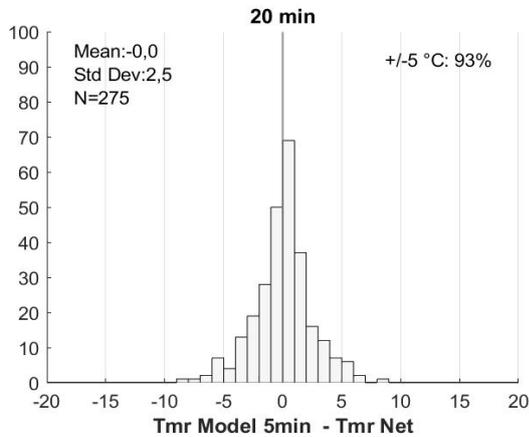
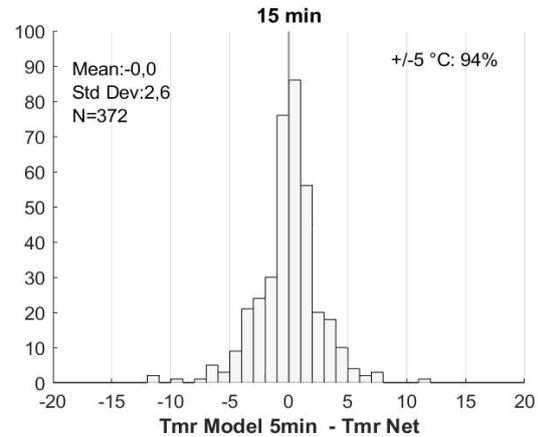
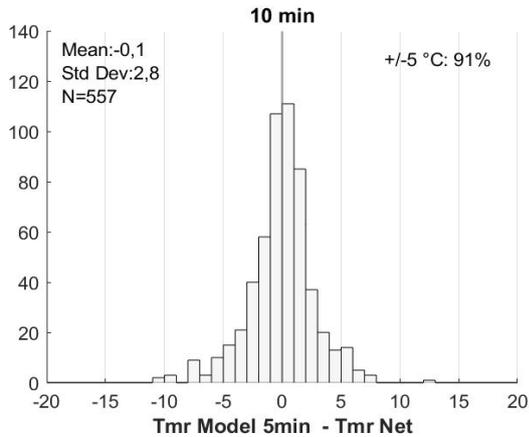
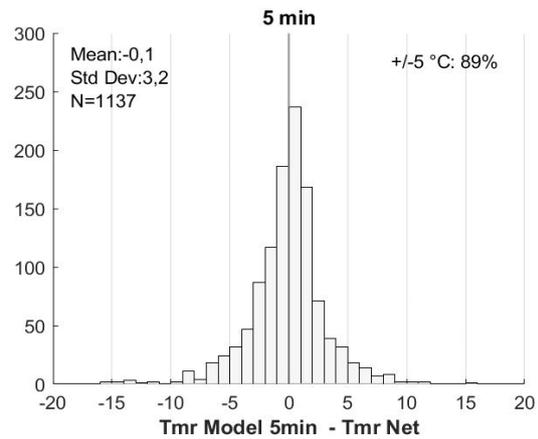
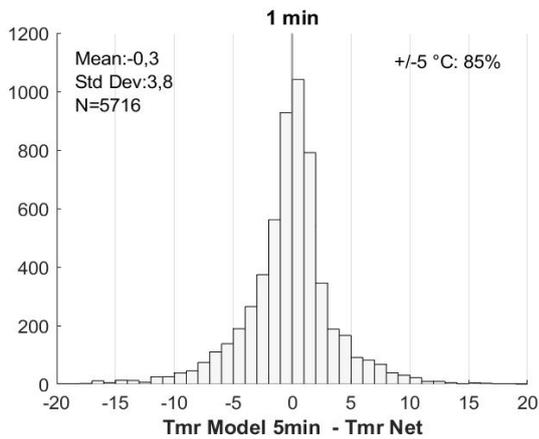
**Tabella C.4: Analisi dell'errore svolta considerando il tempo di elaborazione pari a 15-min**

	$Err\_T_{mr,B15}$	$Err\_T_{mr,GS}$	$Err\_T_{mr,Model\_5m}$	$Err\_T_{mr,Model\_15m}$
Valore medio	3,8	-3,2	-0,1	0,0
Dev. Std.	4,6	3,4	2,8	2,6
Asimmetria	0,7	-0,7	-0,7	-0,4
Curtosi	0,5	1,5	2,8	3,2
Minimo	-9,8	-17,4	-12,3	-11,7
Massimo	20,3	7,2	12,1	11,8

**20-min**

**Tabella C.5: Analisi dell'errore svolta considerando il tempo di elaborazione pari a 20-min**

	<i>Err_ T<sub>mr,815</sub></i>	<i>Err_ T<sub>mr,65</sub></i>	<i>Err_ T<sub>mr,Model_5m</sub></i>	<i>Err_ T<sub>mr,Model_20m</sub></i>
Valore medio	3,8	-3,3	-0,1	0,0
Dev. Std.	4,5	3,3	2,7	2,5
Asimmetria	0,7	-0,5	-0,4	-0,1
Curtosi	0,0	0,5	0,9	1,3
Minimo	-6,9	-12,8	-9,6	-8,6
Massimo	17,5	6,4	8,5	9,0



**Figura C.1: Frequenza di distribuzione dell'errore, per ciascun tempo di elaborazione, relativa alla stima della T<sub>mr</sub> tramite la funzione di regressione Model\_5min**

### **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 da Prof. Francesco Causone, Ing. Anita Tatti (dottoranda), Ing. Sibilla Ferroni (dottoranda), Ing. Martina Pelle (dottoranda), Ing. Alessia Banfi (dottoranda) e Ing. Martina Ferrando (assegnista), partecipa a diversi progetti di ricerca europei, nazionali e locali, affiancando all'attività di ricerca quella di trasferimento tecnologico sul territorio.