

*Università degli Studi di Padova*

*Dipartimento di Tecnica e Gestione dei sistemi industriali*

*Tesi di laurea magistrale in ingegneria gestionale*



**ANALISI SPERIMENTALE DEL FENOMENO  
“ISOLA DI CALORE”  
NELLA CITTA’ DI PADOVA**

*Relatore: Ch.mo Prof. Renato Lazzarin*

*Correlatori: Ing. Marco Noro e Ing. Filippo Busato*

*Laureando: Matteo Sottana*

*Anno accademico 2011/2012*



# Indice

<b>INTRODUZIONE</b> .....	<b>4</b>
<b>CAPITOLO 1 - L'ISOLA DI CALORE URBANA</b> .....	<b>6</b>
1.1.IL FENOMENO .....	6
1.2.CLASSIFICAZIONE .....	8
1.2.1.Isola di calore di superficie.....	10
1.2.1.1 Misurazione delle SUHI.....	11
1.2.2.Isola di calore del sottosuolo .....	14
1.2.3.Isola di calore dello strato della copertura urbana .....	15
1.2.4.Isola di calore dello strato limite urbano .....	16
1.2.4.1.Struttura dello strato limite planetario (PBL).....	16
1.2.4.2.Stabilità atmosferica .....	18
<b>CAPITOLO 2 - LE CAUSE DELL'UHI</b> .....	<b>21</b>
2.1.I FATTORI CHE INFLUENZANO L'EFFETTO ISOLA DI CALORE .....	21
2.2.IL BILANCIO ENERGETICO.....	23
2.3.LE VARIABILI CONTROLLABILI .....	26
2.3.1.Vegatazione ed aree verdi.....	26
2.3.2.Caratteristiche radiative dei materiali e inquinamento .....	27
2.3.3.Geometria e canyon urbani.....	29
2.3.4.Elementi di rugosità.....	32
2.3.5.Caratteristiche termiche dei materiali .....	34
2.3.6.Il calore antropogenico .....	35
2.3.7.Sintesi .....	37
<b>CAPITOLO 3 - LE TECNICHE DI MITIGAZIONE</b> .....	<b>38</b>
3.1.COOL ROOFS .....	41
3.2.COOL PAVEMENTS .....	44
3.3.AREE VERDI E VEGETAZIONE .....	46
3.4.GREEN ROOFS .....	47
<b>CAPITOLO 4 - SERIE STORICHE DI PADOVA E LEGNARO</b> .....	<b>49</b>
4.1.IL CLIMA DEL VENETO E DI PADOVA .....	49
4.2.IL COMUNE DI PADOVA .....	51
4.3.MODALITÀ DI ACQUISIZIONE DEI DATI .....	53
4.4.DATI ARPAV .....	54
4.4.1.Analisi generale .....	56
4.4.2.Analisi annuale .....	58
4.4.3.Analisi mensile .....	60
4.4.4.Analisi oraria .....	61
4.4.5.Intensità massime .....	63
<b>CAPITOLO 5 - STRUMENTI E SISTEMA DI ACQUISIZIONE</b> .....	<b>66</b>
5.1.GLI STRUMENTI DI MISURA.....	66
5.1.1.Termoigrometro.....	66
5.1.1.2 Termoresistenza.....	68
5.1.1.2 Igrometro .....	70
5.1.2.Anemometro .....	70
5.1.3.Piranometro .....	72

5.1.4.Radiometro Netto .....	73
5.1.5.Globotermometro .....	75
5.2.IL SISTEMA DI ACQUISIZIONE .....	76
5.2.1.Configurazione dell'acquisitore .....	77
5.2.2.Connessione elettrica delle sonde.....	78
5.2.3.Opzioni di salvataggio dei dati .....	79
<b>CAPITOLO 6 - MISURAZIONI MOBILI NEL TERRITORIO PADOVANO .....</b>	<b>81</b>
6.1.IL PERCORSO DI MISURA.....	81
6.2.LA STAZIONE MOBILE .....	84
6.3.LE SESSIONI DI MISURA .....	84
6.3.1.Sessione notturna del 26/07/2012.....	85
6.3.2.Sessione notturna del 27/07/2012.....	87
6.3.3.Sessione notturna del 30/07/2012.....	89
6.3.4.Sessione notturna del 31/07/2012.....	91
6.3.5.Sessione giornaliera del 02/08/2012.....	93
6.3.6.Sessione notturna del 02/08/2012.....	97
6.3.7.Sessione giornaliera del 09/08/2012.....	97
6.3.8.Sessione notturna del 09/08/2012.....	99
6.4.GLI ESITI DELLE MISURAZIONI .....	101
<b>CAPITOLO 7 - ANALISI DI SITI CARATTERISTICI .....</b>	<b>103</b>
7.1.RAYMAN 1.2 .....	103
7.1.1.Inserimento delle caratteristiche del sito .....	104
7.1.2.Output ottenibili .....	106
7.2. MISURAZIONI.....	108
7.2.1. Via Rinaldi .....	108
7.2.2. Via Pindemonte .....	111
7.2.3. Via San Basilio.....	113
7.2.4. Via Roma .....	115
7.2.5. Prato della Valle .....	117
7.2.6. Via Vittorio Veneto.....	120
7.3.SIMULAZIONI .....	122
<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>128</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>130</b>

# Introduzione

Il termine “Isola di calore urbana” (Urban Heat Island - UHI) denota la differenza positiva di temperatura esistente tra le città e le circostanti zone rurali. Nonostante il fenomeno sia noto almeno dal XIX secolo, solamente negli ultimi decenni ha suscitato l’interesse del mondo scientifico: metropoli situate in ogni regione climatica sono state infatti oggetto di numerosi studi per comprendere le caratteristiche, le cause, gli impatti e per individuare possibili tecniche di mitigazione dell’alterazione termica. L’attenzione dei ricercatori è stata tuttavia limitata verso gli agglomerati urbani di medie dimensioni.

In questo elaborato si intende indagare l’eventuale presenza del fenomeno nella città di Padova, caratterizzata da dimensioni significativamente inferiori rispetto alle grandi metropoli esaminate in letteratura. Nel caso in cui l’effetto UHI fosse presente, l’obiettivo è di individuarne le dinamiche temporali, di quantificarne l’intensità e di indicare alcuni possibili interventi di mitigazione.

Per ottenere tali risultati è necessario innanzitutto analizzare i dati ambientali ottenuti dalle stazioni meteorologiche esistenti; l’intervallo temporale osservabile è molto ampio, tuttavia le posizioni delle stazioni possono non essere sufficientemente rappresentative del territorio e la variabilità spaziale dei parametri microclimatici non viene esaminata. Effettuando successivamente dei rilevamenti con una stazione mobile è possibile ottenere una maggiore conoscenza dell’isola di calore: vengono infatti investigati diversi ambiti territoriali le cui caratteristiche determinano intensità differenti del fenomeno.

La tesi si divide in due parti principali: nella prima sono esposte le nozioni teoriche sull’argomento, nella seconda i metodi e i risultati sperimentali dello studio.

Nel primo capitolo vengono definite e classificate le differenti tipologie del fenomeno, importanti da distinguere precedentemente all’analisi poiché differiscono tra loro per origine, tecniche di misurazione e andamenti temporali.

Il secondo capitolo si occupa di presentare i molteplici e correlati fattori responsabili dell'effetto UHI. L'interesse è rivolto principalmente verso le variabili controllabili, legate ovvero alle attività umane e alle caratteristiche delle strutture urbane.

Al terzo capitolo è affidata la presentazione delle strategie di mitigazione possibili; in grado di procurare benefici a singoli edifici e, se adottati diffusamente, ad un'intera città.

Nel quarto capitolo, successivamente alla caratterizzazione del territorio, viene effettuata una valutazione preliminare dell'isola di calore della città del Santo, utilizzando i dati ambientali rilevati dalle stazioni ARPAV di Legnaro e dell'Orto Botanico di Padova negli ultimi 20 anni.

Nel quinto capitolo sono esposti i principi di funzionamento e i parametri tecnici degli strumenti utilizzati nelle misurazioni effettuate nel territorio padovano.

Il sesto capitolo descrive il percorso di misura individuato, presenta i dati ottenuti dalla stazione mobile nei rilevamenti effettuati "in transetto", esamina la variabilità spaziale e l'intensità dell'effetto isola di calore durante alcune calde giornate di luglio e agosto.

Nel settimo ed ultimo capitolo sono presentati i dati acquisiti in alcuni siti prescelti, caratteristici di diversi ambiti territoriali. Rispetto alle misurazioni mobili è stato possibile rilevare informazioni ambientali aggiuntive, che hanno consentito di calcolare e confrontare il livello di comfort termico percepibile nelle diverse postazioni. Attraverso un software di simulazione vengono infine stimati i cambiamenti dello stato di benessere al variare delle caratteristiche degli edifici.

# Capitolo 1

## L'isola di calore urbana

### 1.1. Il fenomeno

Negli ultimi secoli la crescita demografica mondiale e il processo di urbanizzazione hanno determinato una considerevole modifica del territorio da parte dell'uomo. Uno degli effetti provocati da questa trasformazione è il cambiamento del microclima nei luoghi in cui l'ambiente ha subito alterazioni più profonde: le aree urbane.

Il termine *isola di calore urbana* (Urban Heat Island - UHI) è utilizzato per indicare il fenomeno che determina temperature maggiori nelle aree cittadine rispetto alle circostanti zone periferiche e rurali, utilizzate come riferimento.

Nonostante l'effetto sia stato osservato per la prima volta nel 1818 a Londra dal meteorologo Luke Howard, il nome *isola di calore* compare in letteratura solamente nel 1958 in un articolo di Gordon Manley nel *Quarterly Journal of the Royal Meteorology Society*. Il vocabolo "isola" viene utilizzato a causa di una similitudine (Figura 1.1); se le temperature dell'aria vengono mappate attraverso delle isoterme, la città appare come un'isola nel "mare" delle zone rurali circostanti, caratterizzate da temperatura inferiore.

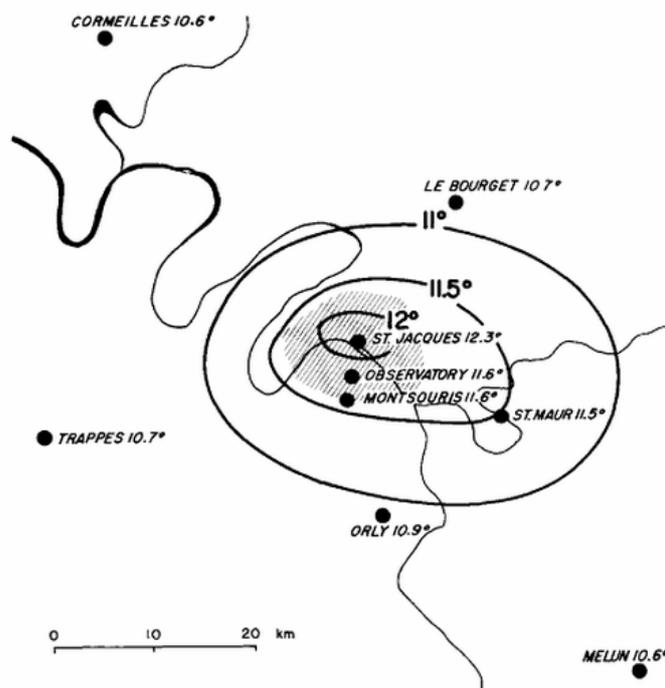
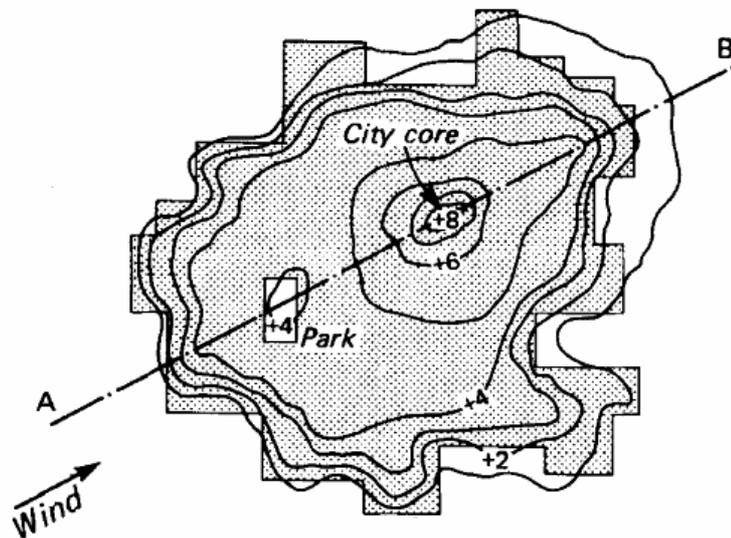


Figura 1.1. Isotherme annue nell'area di Parigi (Landsberg 1981)

Comprensibilmente non tutta la zona cittadina presenta la stessa alterazione termica; l'indicatore utilizzato per quantificare questo scostamento è l'intensità dell'isola di calore (UHI *intensity* – UHI), definita come differenza tra la temperatura urbana e quella rurale. Secondo Oke (1982) le zone cittadine caratterizzate da maggiore intensità sono probabilmente le aree ad alta densità edilizia, che rappresentano le “cime” dell'isola nella mappatura tramite isoterme. Le superfici idriche o coperte da vegetazione, come parchi e laghi, dovrebbero al contrario essere caratterizzate da intensità inferiori (Figura 1.2).



**Figura 1.2.** Mappa concettuale di un'isola di calore (Oke 1982)

L'entità del fenomeno presenta significative differenze anche tra città aventi una popolazione comparabile (Landsberg 1981), inoltre varia notevolmente con le condizioni atmosferiche, la stagione e l'ora del giorno. Per comprendere l'entità dell'alterazione possiamo considerare una grande città con una popolazione di un milione di abitanti: essa può presentare una temperatura media annua di 1-3 °C maggiore rispetto alle zone rurali limitrofe e un'intensità massima dell'isola di calore pari a 12 °C in una notte estiva con condizioni di scarsa ventosità (Oke 1997).

L'effetto isola di calore, successivamente alla prima osservazione di Howard, è stato individuato in metropoli situate in ogni regione climatica ed è stato oggetto di numerosi studi per comprenderne le caratteristiche, le cause, gli impatti e per individuare possibili tecniche di mitigazione.

## 1.2. Classificazione

Le ricerche effettuate sull'argomento individuano tre tipologie di isole di calore (Oke 1995), che si differenziano per l'oggetto di misurazione della differenza di temperatura con il riferimento extra-urbano. Le differenti tipologie di UHI sono:

- Isola di calore atmosferica (*atmospheric UHI - AUHI*), ulteriormente distinta in :
  - *Boundary Layer Urban Heat Island (BLUHI)*, che interessa lo strato limite urbano (UBL), situato al di sopra dell'altezza media degli edifici
  - *Canopy Layer Urban Heat Island (CLUHI)*, che riguarda lo strato della copertura urbana (UCL), ubicato sotto l'altezza media degli edifici
- Isola di calore di superficie (*Surface UHI - SUHI*)
- Isola di calore del sottosuolo (*subsurface UHI*).

Questi diversi tipi di isola di calore sono ovviamente correlati ma è importante distinguerli in un'analisi del fenomeno, poiché differiscono per origine, tecniche di misurazione e dinamiche temporali. Senza questa valutazione non sarebbe possibile riconciliare l'osservazione che le isole di calore di superficie raggiungono la massima intensità durante il giorno, mentre quelle atmosferiche si manifestano in prevalenza di notte e possono al contrario essere negative di giorno (la temperatura dell'aria nelle zone rurali è quindi maggiore rispetto a quella delle zone urbane).

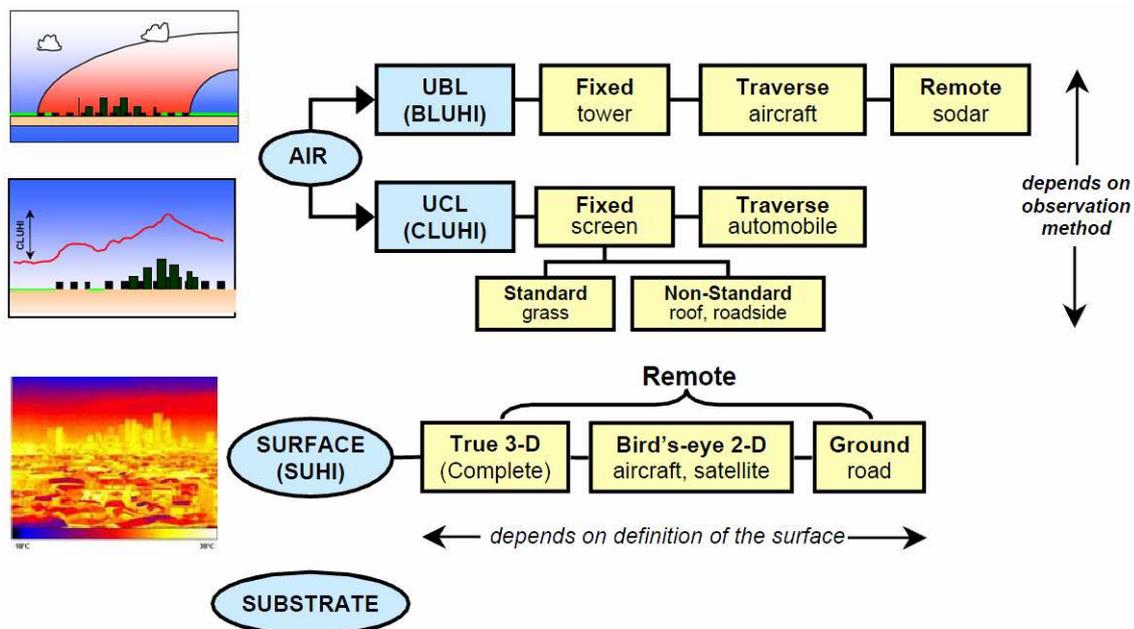


Figura 1.3. Diverse tipologie di UHI e diversi metodi di misurazione (Voogt 2006)

Un'altra importante classificazione riguarda le metodologie impiegate per l'ottenimento dei dati di temperatura. In Figura 1.3 è possibile osservare l'associazione tra differenti tipologie di UHI e dei relativi metodi di misurazione.

L'isola di calore atmosferica viene misurata utilizzando dei termometri tradizionali a postazione fissa (su torri, palloni sonda e in prossimità del suolo) o a postazione mobile (su aerei e automobili). Tuttavia l'investigazione del *Urban Boundary Layer* (UBL) è possibile anche in maniera indiretta sfruttando le proprietà delle onde, impiegando ad esempio un Sodar: uno strumento meteorologico in grado di valutare il profilo di temperatura verticale tramite l'utilizzo di onde sonore.

In base alla metodologia della rilevazione i dati ottenuti dovranno essere valutati in maniera diversa; i risultati di un campionamento tramite autovettura nell'*Urban Canopy Layer* (UCL) forniranno una rappresentazione "scheletrica" della situazione e limitata alla temperatura dell'aria al di sopra della superficie stradale, diversamente una rete di sensori posizionati in maniera omogenea nell'area cittadina, anche all'interno dei parchi, potrebbe rendere disponibili una maggiore quantità di informazioni.

Diversamente dall'isola di calore atmosferica, la misurazione dell'UHI di superficie avviene tramite il telerilevamento, utilizzando quindi dei sensori in grado di interagire a distanza con le superfici di interesse e di rilevarne la radiazione infrarossa emessa. A causa della complessità della superficie reale urbana si considera spesso una superficie semplificata, che approssima quella effettiva. La superficie studiata è funzione del posizionamento dei sensori, poiché i rilevamenti effettuati da piattaforme satellitari, o eseguiti al livello del suolo consentono di "vedere" superfici differenti.

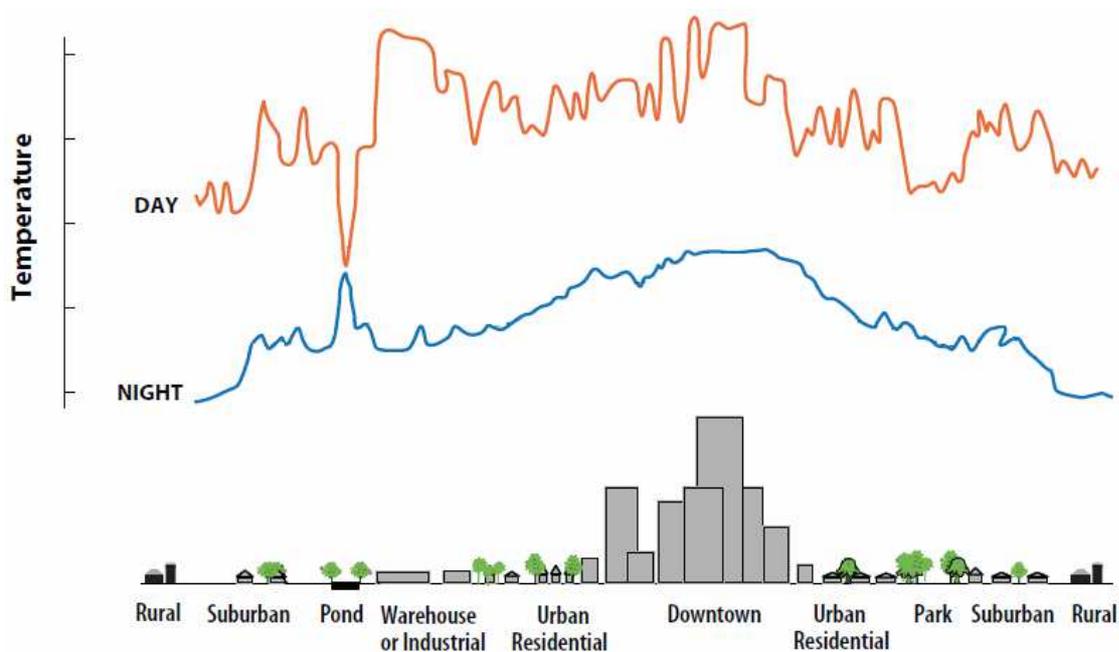
Le modalità di misurazione e le diverse tipologie di superfici considerabili verranno analizzate con maggiore dettaglio nei paragrafi seguenti. Questa classificazione iniziale si pone come obiettivo l'evidenziazione delle differenze tra le diverse tipologie di isole di calore e i differenti metodi di investigazione per evitare un'erronea interpretazione dei dati o confronti tra risultati non comparabili.

Alla luce delle differenti isole di calore esistenti comprendiamo la necessità di specificare la tipologia presa in considerazione al momento dell'analisi, al fine di evitare equivoci. Tuttavia, quando non ben precisato, è comune riferirsi all'isola di calore dello strato limite urbano (CLUHI); nei paragrafi precedenti all'attuale, quando una precisione maggiore non era ancora possibile, le alterazioni considerate riguardavano quindi l'aria vicina al suolo.

### 1.2.1. Isola di calore di superficie

Le superficie urbana durante le calda giornate estive possono raggiungere temperature fino a 50 °C superiori rispetto a quelle dell'aria sovrastante. Una copertura realizzata in asfalto nero può infatti arrivare ad un temperatura epidermica di 85 °C. Tale valore non deve essere considerato rappresentativo di ogni superficie urbana, poiché le temperature raggiunte variano in base al grado di esposizione solare, all'inclinazione, alle condizioni atmosferiche e alle proprietà dei diversi materiali. Se invece consideriamo una superficie ombreggiata o caratterizzata da una maggiore umidità come un prato, superficie tipica di un'area rurale, le temperature rilevabili non si discostano in maniera significativa da quella dell'aria. Il termine isola di calore di superficie (*Surface UHI – SUHI*) denota questa differenza di temperatura epidermica tra area urbana e aree rurali: il valore numerico della differenza assume il nome di intensità ed è utilizzato per quantificare il fenomeno.

In città si osservano generalmente temperature maggiori delle superfici sia di giorno che di notte, tuttavia l'intensità del SUHI non è costante durante la giornata e si modifica al variare della radiazione solare: in media è di 10-15 °C durante le ore diurne, mentre assume valori di circa 5-10 °C durante quelle notturne (Figura 1.4).

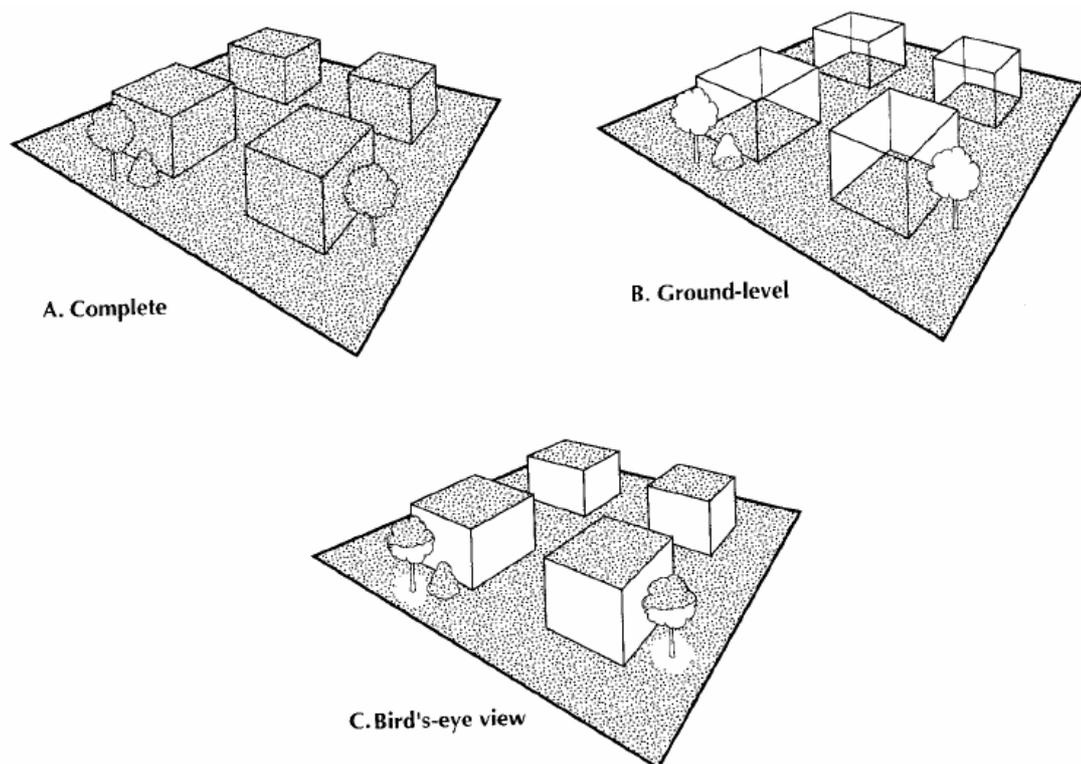


**Figura 1.4.** Temperature epidermiche diurne e notturne in aree con diverso utilizzo del suolo (Voogt 2000a)

### 1.2.1.1 Misurazione delle SUHI

Per identificare le isole di calore urbane, gli scienziati utilizzano metodi diretti e indiretti, modellazione numeriche e stime basate su modelli empirici.

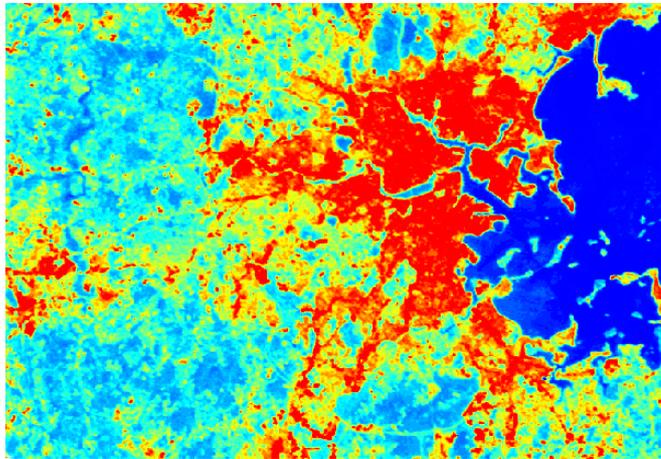
La misurazione delle *Surface* UHIs con tecniche dirette, utilizzando cioè termocoppie o termoresistenze, vengono utilizzate per investigare aree urbane limitate: le numerose variazioni di microscala causate dalle differenti proprietà termiche e radiative dei materiali, dal disuguale ombreggiamento e dalle diverse inclinazione delle superfici condurrebbero in caso contrario a un numero elevato di sensori. Per l'analisi di zone più ampie vengono spesso utilizzate le tecniche di telerilevamento, delle modalità di misurazione indiretta, che stimano la temperatura delle superficie attraverso le radiazioni infrarosse; i dati possono essere rilevati da satelliti, da aerei o da postazioni in prossimità del suolo. Alcuni ricercatori (Chapman et al. 2001) hanno inoltre sviluppato dei modelli numerici in grado di fornire in output la temperatura superficiale di un sito opportunamente mappato in termini di geometria e caratteristiche dei materiali.



**Figura 1.5.** Differenti definizioni di superficie urbana (Voogt e Oke 1987)

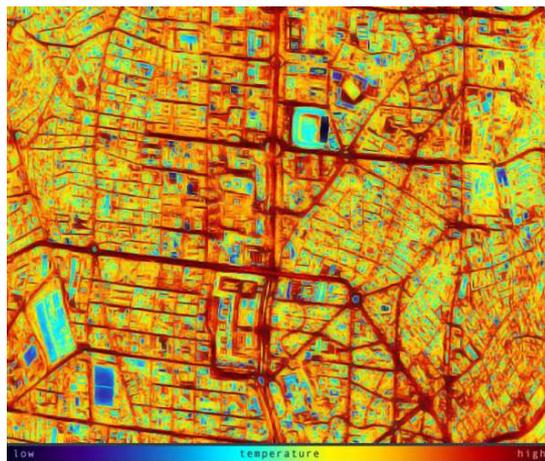
La definizione di superficie tuttavia non è univoca (Voogt e Oke 1987, Oke 1995) a causa della complessità delle superfici reali e delle differenti modalità di misurazione possibili: se i dati provengono da sensori posizionati a terra il piano esaminato è

solamente il suolo (Figura 1.5.B), se vengono utilizzate tecniche di telerilevamento satellitare o aereo non tutte le superfici presenti sono osservabili (Figura 1.5.C).



**Figura 1.6.** Immagine termica satellitare

A discapito dell'esattezza della superficie considerata, i metodi di rilevazione indiretta mettono a disposizione dati relativi ad ampie zone, rappresentabili tramite immagini termiche. Quando le informazioni provengono da una piattaforma satellitare le immagini rivelano l'alterazione delle città rispetto alle zone circostanti (Figura 1.6), mentre quando provengono da una ricognizione aerea illustrano il comportamento dei diversi elementi urbani (Figura 1.7); il differente posizionamento degli strumenti comporta chiaramente una diversa risoluzione spaziale delle immagini ricavate.



**Figura 1.7.** Immagine termica rilevata da un aereo

La significativa distanza che separa il sensore dal territorio da analizzare permette un'ampia copertura spaziale ma introduce nel segnale delle inevitabili distorsioni. I due

principali effetti che modificano la radiazione infrarossa ricevuta sono l'influenza dell'atmosfera, nel percorso dal suolo al sensore, e la riflessione della radiazione atmosferica da parte della superficie (Voogt 2000b). Un segnale  $L$ , ottenuto da un sensore posto ad altezza  $h$  e con angolo di vista  $\theta$  rispetto alla normale al suolo, è quindi esprimibile, in prima approssimazione, come sommatoria di tre componenti:

$$L(h,\theta) = \tau(h,\theta) \varepsilon L_0 + \tau(h,\theta) (1-\varepsilon)L_{sky} + L_a \quad (1.1)$$

- la radiazione emessa dalla superficie considerata  $\varepsilon L_0$ , ridotta a causa dell'intercettazione atmosferica dal fattore  $\tau(h,\theta)$ ;
- la quota della radiazione atmosferica riflessa  $(1-\varepsilon)L_{sky}$ , anch'essa ridotta dal fattore  $\tau(h,\theta)$ ;
- la radiazione  $L_a$  emessa dall'atmosfera nel percorso dal suolo al sensore.

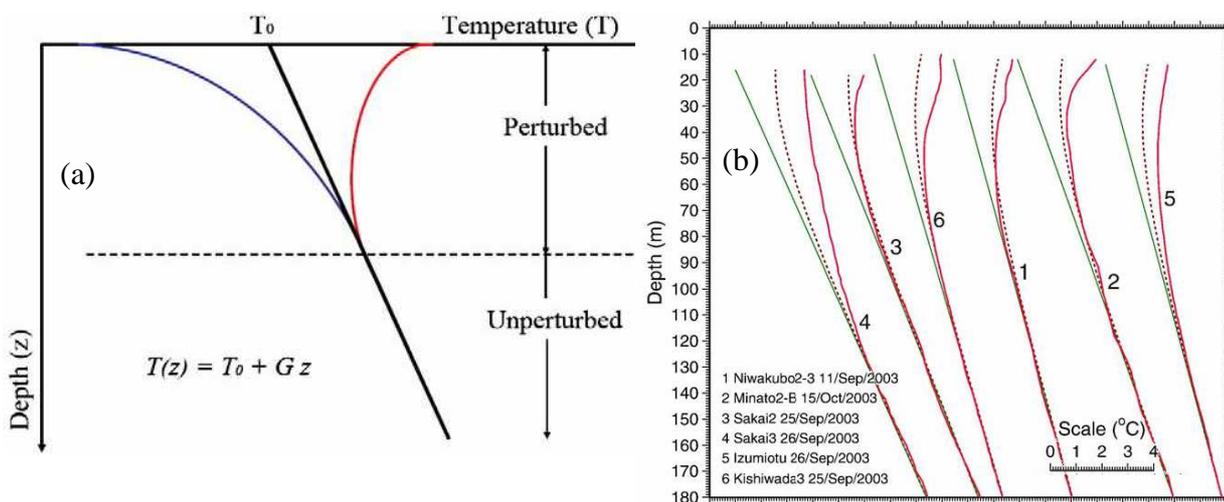
In funzione del posizionamento del sensore, delle temperature e delle condizioni atmosferiche è possibile ricavare dall'equazione (1.1) la radiazione  $L_0$  emessa dalla superficie e quindi la temperatura radiometrica direzionale della stessa. Tuttavia questa è approssimabile alla vera temperatura "cinetica" solo per superfici piane omogenee. Il segnale proveniente dalle aree urbane necessita invece di un'ulteriore correzione, poiché la complessa geometria provoca una dipendenza del rilevamento dalla posizione (emissione termica anisotropa), che può indurre una distorsione dello stesso ordine di grandezza dell'influenza atmosferica (Voogt 2000b).

Le limitazioni delle singole tecniche di telerilevamento hanno spinto dei ricercatori (Voogt e Oke 1997) a sviluppare un metodo per esaminare anche le superfici verticali, considerando quindi la completa superficie urbana (Figura 1.5.A). Tale obiettivo è stato raggiunto combinando i dati provenienti da diverse piattaforme di telerilevamento (terrestri e aeree) con le informazioni strutturali degli specifici edifici urbani (dimensioni ed emissività).

La disponibilità di temperature relative alla superficie completa può consentire ai ricercatori di perfezionare lo studio della climatologia urbana, poiché le temperature epidermiche ne sono un'importante condizione al contorno e sono impiegabili per l'investigazione di molteplici tematiche. Voogt e Oke (2003) hanno esaminato le ricerche nelle quali i dati del telerilevamento urbano vengono utilizzati, individuando tre temi principali: il rapporto tra temperature e caratteristiche delle superfici, la relazione tra isole di calore di superficie e atmosferiche e il bilancio energetico delle superfici urbane.

### 1.2.2. Isola di calore del sottosuolo

Le anomalie nella temperatura epidermica delle aree urbane si propagano inevitabilmente sia nell'atmosfera che nel sottosuolo. Molte delle ricerche effettuate si concentrano sul fenomeno delle isole di calore atmosferiche, mentre gli effetti sul sottosuolo del fenomeno sono stati investigati finora in maniera limitata. Alcuni studi presenti in letteratura cercano di quantificare l'alterazione termica presente; a tal fine Huang et al. (2008) confrontano la serie storica delle temperature dell'aria di Osaka con il profilo di temperatura del sottosuolo. La forma del profilo è controllata sia dal flusso di calore endogeno che dallo storico delle temperature superficiali: un profilo a linea retta è presente se la temperatura superficiale non cambia nel tempo, mentre un riscaldamento epidermico modifica il profilo verso valori di temperatura crescenti (linea rossa Figura 1.8.a); similmente a quanto osservato nel sottosuolo di Osaka (linee rosse continue Figura 1.8.b). Il profilo misurato è stato confrontato con quello calcolato in base allo storico delle temperature superficiali (linea rossa discontinua Figura 1.8.b). Secondo i ricercatori questa differenza è imputabile al fenomeno dell'isola di calore, il cui effetto potrebbe essere sottostimato dalle sole rilevazioni atmosferiche. La variabilità osservata nei sei diversi siti di Osaka è giustificabile dallo studio di Ferguson e Woodbury (2004), i quali affermano che l'aumento di temperatura dipende dall'età, dalla densità degli edifici e dalla distanza del punto di misurazione dagli edifici stessi.

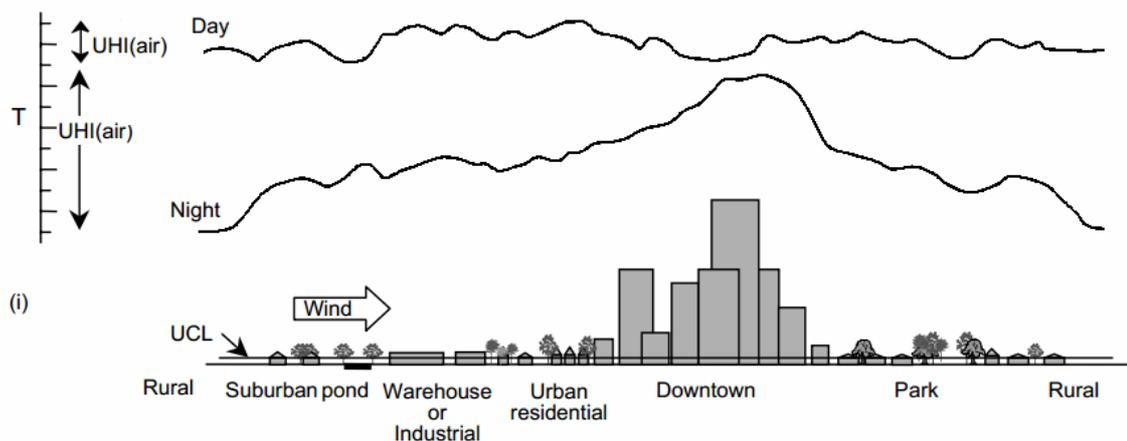


**Figura 1.8.** (a) modellazione delle tre tipologie di profili di temperatura del sottosuolo possibili: temperatura superficiale stabile (linea nera), in crescita (linea rossa), in diminuzione (linea blu) (b) profili del sottosuolo misurati in sei siti di Osaka (linea rossa continua) confrontati con i profili calcolati (linea rossa tratteggiata) utilizzando lo storico della temperatura dell'aria.

### 1.2.3. Isola di calore dello strato della copertura urbana

Utilizzando il generico termine isola di calore ci si riferisce alla maggior temperatura dell'aria in prossimità del suolo, che caratterizza le zone cittadine rispetto alle campagne circostanti (Voogt 2000a). Come in precedenza rivelato, la tipologia di UHI che si considera in assenza di precisazioni è quella relativa allo strato della copertura urbana (*Urban Canopy Layer - UCL*), definito come lo strato atmosferico al di sotto dell'altezza media degli edifici. L'influenza diretta che la temperatura dell'aria ha verso il comfort termico è il motivo della maggiore attenzione riservata a questa tipologia.

L'alterazione media annuale tipica dell'UCL di una grande città è di 1-3 °C, ma in presenza di condizioni favorevoli può raggiungere un'intensità di 12 °C (Oke 1997). La stagione estiva, l'assenza di vento e di nubi sono le condizioni definite in letteratura "ideali" (Oke 1982), che contribuiscono a massimizzare l'effetto durante il periodo notturno (Figura 1.9), contrariamente a quanto avviene per le *surface* UHI.



**Figura 1.9.** Temperatura e intensità dell'isola di calore dello strato della copertura urbana (CLUHI) in condizioni "ideali" durante il giorno e la notte (Voogt 2000a)

Tuttavia alcune delle città esaminate in letteratura non rispettano le dinamiche temporali "classiche" appena presentate; citiamo come esempi Atene, che presenta intensità del fenomeno maggiori di giorno, (Santamouris et al. 2001) e Seul, caratterizzata da maggiori differenze termiche rispetto alle zone rurali durante il periodo invernale (Kim et al. 2002). Queste diversità osservate permettono di affermare che il fenomeno isola di calore, seppur presenti dei caratteri prevalenti, non presenta le stesse caratteristiche in qualsiasi area urbana ed è invece influenzato in maniera significativa dalle particolarità delle differenti città.

#### 1.2.4. Isola di calore dello strato limite urbano

Il riscaldamento anomalo della superficie urbana non limita la sua influenza solamente all'UCL, ma provoca delle modifiche anche agli strati superiori dell'atmosfera. Le numerose alterazioni climatiche di microscala prodotte dalle singole superfici, se osservate da un punto di vista più ampio, producono infatti un effetto di mesoscala: la formazione dello strato limite urbano (*Urban Boundary Layer* – UBL). Definito come porzione dello strato limite planetario (*Planetary Boundary Layer* – PBL) influenzato dalla città, l'UBL sarebbe caratterizzato da una forma a cupola se le condizioni precedentemente definite come “ideali” fossero verificate. Nella realtà tuttavia l'intensità dei venti determina una configurazione tipica della zona termicamente alterata simile a quella rappresentata in Figura 1.10; sottovento l'alterazione può propagarsi per decine di chilometri oltre la città, in seguito alla formazione del pennacchio urbano (*urban plume*).

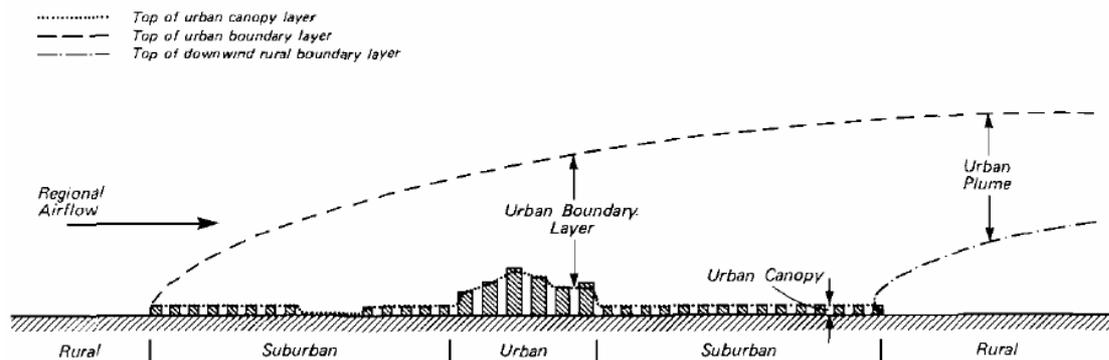


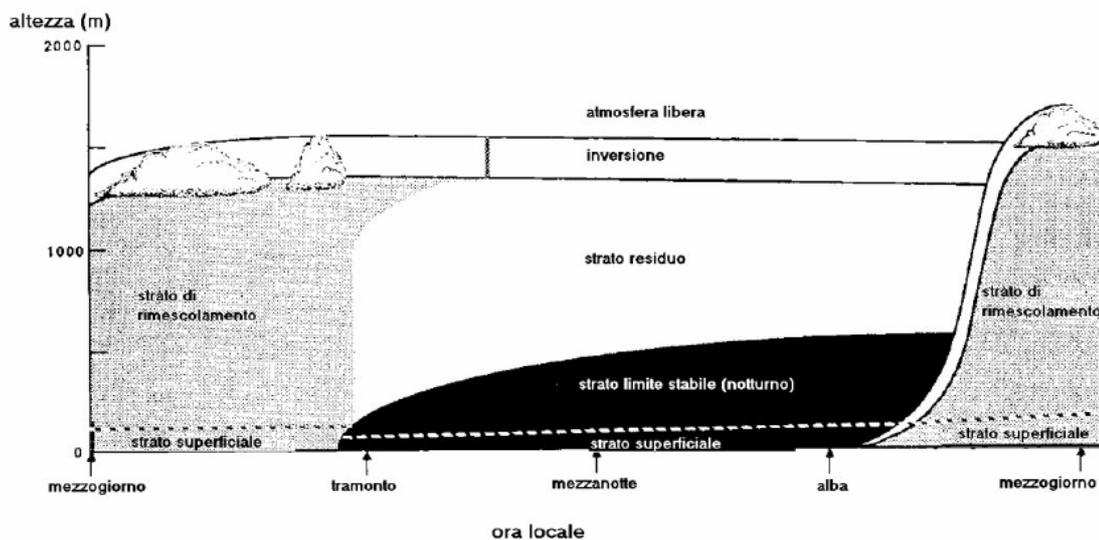
Figura 1.10. Rappresentazione dell'Urban Boundary Layer (Oke 1976)

Se l'estensione orizzontale dell'alterazione dipende dalla presenza del vento, l'estensione verticale dell'UBL dipende dall'ora del giorno e dal riscaldamento della superficie urbana. Al fine di comprendere l'evoluzione dello strato limite urbano e individuarne le differenze rispetto alle zone rurali, si ritiene opportuno descrivere brevemente la struttura del PBL (strato limite planetario) e introdurre il concetto di stabilità atmosferica.

##### 1.2.4.1. Struttura dello strato limite planetario (PBL)

Lo strato limite planetario o *Planetary Boundary Layer* (PBL) è quella porzione di Troposfera a diretto contatto con la superficie terrestre. Essa può anche essere definita come quella *porzione di Troposfera direttamente influenzata dalla superficie, che*

risponde all'immissione di energia da essa proveniente con scale temporali dell'ordine dell'ora (Stull 1989). L'attrito subito dalle masse d'aria in movimento, le distorsioni indotte al loro flusso dall'orografia, l'evapotraspirazione, il trasferimento di calore dal suolo all'aria e l'emissione di inquinanti in prossimità del suolo causata dalle attività umane o dai fenomeni naturali (ad esempio delle eruzioni vulcaniche) rappresenta nel complesso l'influenza determinata dalla superficie terrestre sul PBL. Tra questi fattori particolarmente importante in ogni area è il trasferimento di calore dal suolo, che è conseguenza del riscaldamento delle superfici per radiazione; l'alternanza del giorno e della notte determinano infatti una ciclicità giornaliera anche nella struttura del PBL.



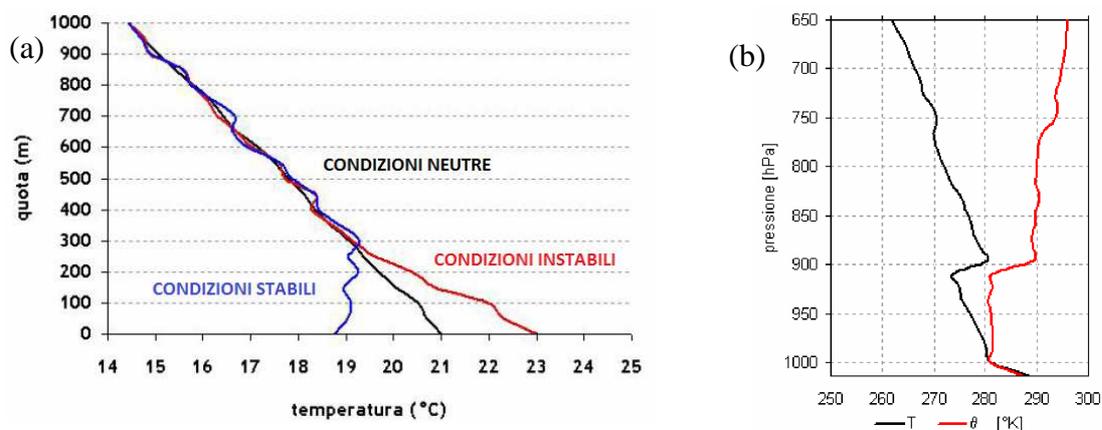
**Figura 1.11.** Evoluzione diurna della struttura dello strato limite planetario (Bonafè 2006)

In condizioni di alta pressione e considerando una superficie priva di rilievi, le componenti e l'evoluzione tipica dello strato limite planetario sono osservabili in Figura 1.11. Successivamente al sorgere del sole, il calore fornito al suolo viene ceduto all'aria atmosferica e avviene la formazione dello strato di rimescolamento (*Mixed Layer*), caratterizzato da turbolenza termica e moti convettivi. Tale strato giornaliero si sviluppa nel corso della mattinata e raggiunge la massima altezza nel pomeriggio mentre al tramonto si trasforma nello strato residuo (*Residual Layer*), quando l'irraggiamento solare termina e i moti convettivi si attenuano. Tuttavia lo strato residuo è presente solamente in quota, poiché il processo di raffreddamento del suolo genera un ulteriore strato in prossimità del terreno: lo strato limite stabile notturno (*Stable Boundary Layer*).

### 1.2.4.2. Stabilità atmosferica

La stabilità atmosferica è un fattore meteorologico utilizzato come indicatore della turbolenza e dei moti verticali dell'aria; la determinazione del grado di stabilità avviene dal confronto tra il gradiente termico effettivo dell'atmosfera e il gradiente di temperatura adiabatico. Quest'ultimo gradiente non dipende dalle condizioni atmosferiche ed esprime la diminuzione della temperatura in assenza di scambio termico di una particella che risalendo si espande per adattarsi alla diminuzione di pressione. Il comportamento dell'ipotetica particella in seguito all'espansione adiabatica dipende dalla temperatura dell'aria circostante:

- se l'aria adiacente è più calda, il gradiente termico dell'atmosfera è quindi maggiore di quello adiabatico, la particella tenderà a scendere a causa della forza di galleggiamento e i moti verticali verranno per questo smorzati. Tali condizioni atmosferiche si definiscono stabili (linea blu Figura 1.12.a). Una particolare condizione di stabilità si verifica quando il gradiente di temperatura effettivo è negativo: è il fenomeno dell'inversione termica che impedisce il rimescolamento verticale.
- se l'aria circostante è più fredda, il gradiente termico atmosferico è minore di quello adiabatico e il movimento ascensionale della particella è favorito. Queste condizioni atmosferiche sono definite instabili (linea rossa Figura 1.12.a), poiché i moti verticali sono amplificati sia verso l'alto sia verso il basso.
- se l'aria circostante è alla stessa temperatura i due gradienti hanno lo stesso valore. Le condizioni si definiscono neutre (linea nera Figura 1.12.a) poiché si ha una situazione di equilibrio per tutti gli spostamenti della particella.



**Figura 1.12.** (a) profili di temperatura atmosferica in condizioni stabili con inversione termica al suolo (linea blu), in condizioni neutre (linea nera) e instabili (linea rossa)  
(b) trasformazione del profilo di temperatura effettivo (T) in potenziale ( $\theta$ )

Un parametro termodinamico, la temperatura potenziale, permettere di individuare il grado di stabilità dall'osservazione di un grafico senza dover confrontare i due gradienti. E' definita come *la temperatura  $\theta$  che assume una particella di aria secca, originariamente alla temperatura  $T$ , dopo essere stata spostata adiabaticamente da una quota cui corrisponde una pressione  $p$ , ad una quota di riferimento (il livello del mare) cui corrisponde una pressione  $p_0$  di 1000 hPa*. Per ottenere il profilo di temperatura potenziale (Figura 1.12.b) è quindi necessario tramutare il profilo effettivo utilizzando la formula (1.2) della trasformazione adiabatica di un gas ideale, in cui  $R$  è la costante dei gas specifica dell'aria e  $C_p$  è il calore specifico a pressione costante dell'aria.

$$\theta = T \left( \frac{p_0}{p} \right)^{\frac{R}{c_p}} \quad (1.2)$$

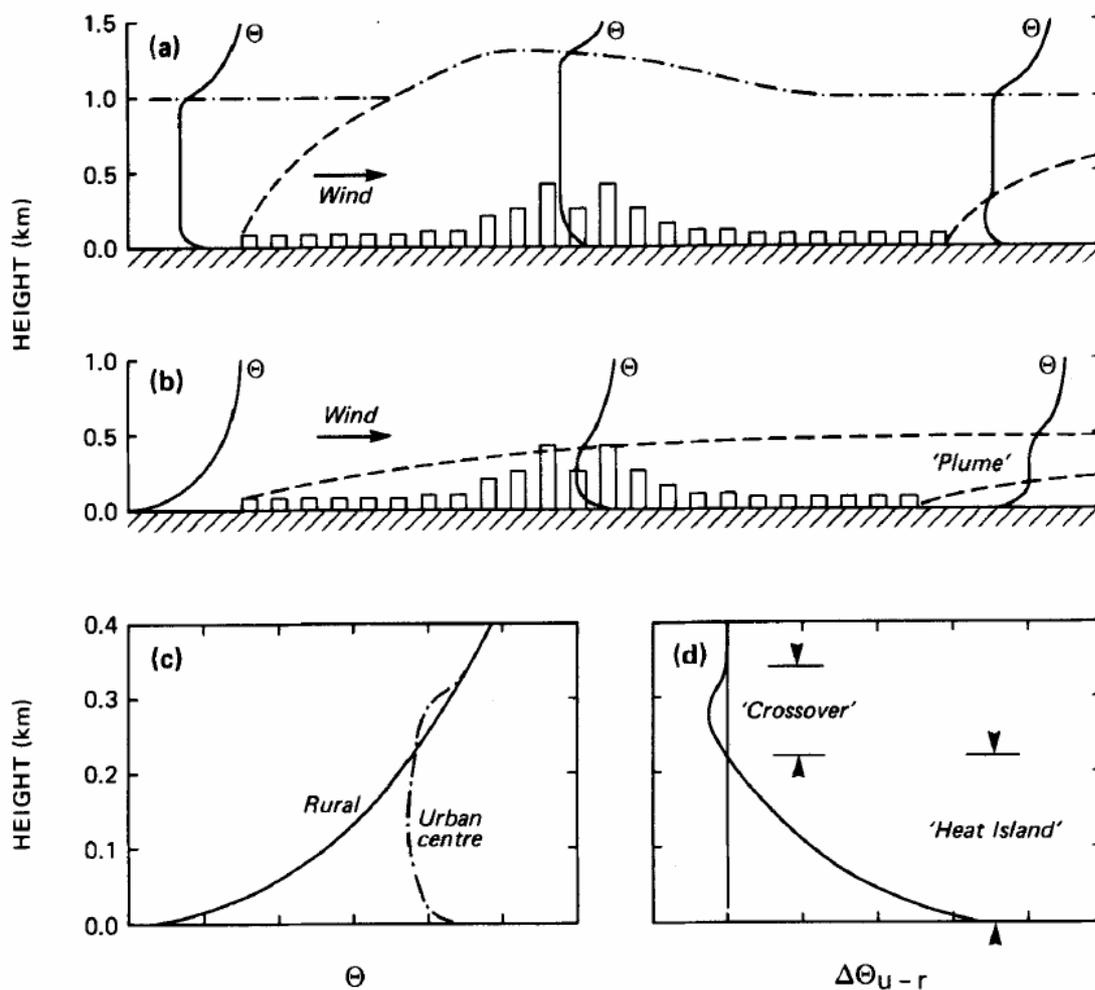
Osservando il profilo di temperatura potenziale è immediata l'identificazione del grado di stabilità: una temperatura costante con la quota individua delle condizioni neutre, un aumento della temperatura all'aumentare dell'altitudine indica condizioni instabili, mentre una diminuzione manifesta una condizione di stabilità.

La conoscenza della struttura dello strato limite planetario, del concetto di stabilità e della temperatura potenziale consente di affrontare con maggior dettaglio l'analisi dell'isola di calore dello strato limite urbano (BLUHI). A causa dei cambiamenti radicali esistenti nelle proprietà radiative, termodinamiche e aerodinamiche delle superfici urbane rispetto alle aree rurali, la struttura e l'evoluzione temporale del PBL non sono esattamente quelle descritte in precedenza.

Durante il periodo diurno la configurazione del UBL è simile a quella presente nelle aree extraurbane, ma lo strato convettivo di rimescolamento è caratterizzato da aria più calda, secca, inquinata e turbolenta a causa dell'elevata temperatura delle superfici. Il *mixed layer* urbano si differenzia anche relativamente all'altezza, maggiore di circa 0.25 km rispetto allo strato rurale (Oke 1982). In Figura 1.13.a è possibile osservare tale "cupola" che caratterizza lo strato turbolento urbano, contraddistinto da un'alterazione termica su di un'ampia zona ma di modesta intensità (Oke 1995).

Nel periodo notturno le diversità rispetto alle zone rurali sono spesso più marcate; il calore e gli elementi di rugosità della città mantengono uno strato limite convettivo superficiale, quando un strato stabile si è già sviluppato sulla campagna circostante. In altre parole il *mixed layer* può mantenersi in superficie durante la notte, a causa della

grande capacità di immagazzinare calore da parte delle superfici urbane e grazie alla minor velocità del vento; lo strato stabile notturno non è quindi situato al suolo ma ad un'altezza di 100-300 m (Figura 1.13.b). Al livello del terreno la differenza tra temperatura urbana e rurale è massima (isola di calore dello strato della copertura urbana – CLUHI), mentre l'intensità diminuisce all'aumentare della quota e assume valori negativi alla sommità del UBL, fenomeno denominato di crossover (Figura 1.13.c e 1.13.d).



**Figura 1.13.** Generalizzazione del profilo di temperatura potenziale di una grande città durante una serena giornata estiva (a) durante il periodo diurno e (b) notturno. Andamento della temperatura rurale e urbana al variare della quota (c) durante la notte e (d) intensità dell'isola di calore dello strato limite urbano risultante (Oke 1982)

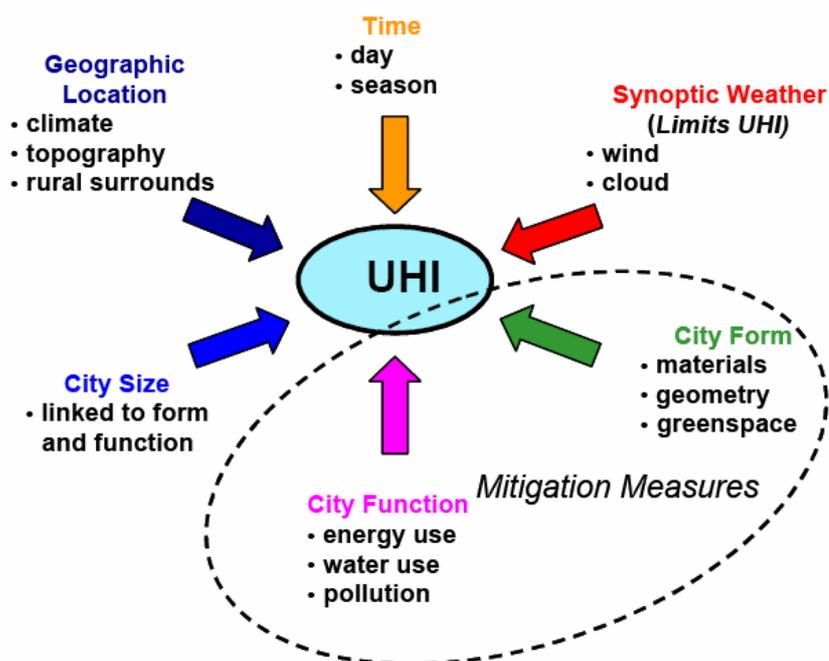
# Capitolo 2

## Le cause dell'UHI

### 2.1.1 fattori che influenzano l'effetto isola di calore

L'isola di calore urbana è un'anomalia termica provocata da molteplici fattori tra loro correlati. Nonostante gli elementi di influenza possano sembrare evidenti, il contributo all'effetto UHI di ciascuno di essi non è definibile in modo generale, poiché le specificità proprie di ogni città assumono un ruolo significativo.

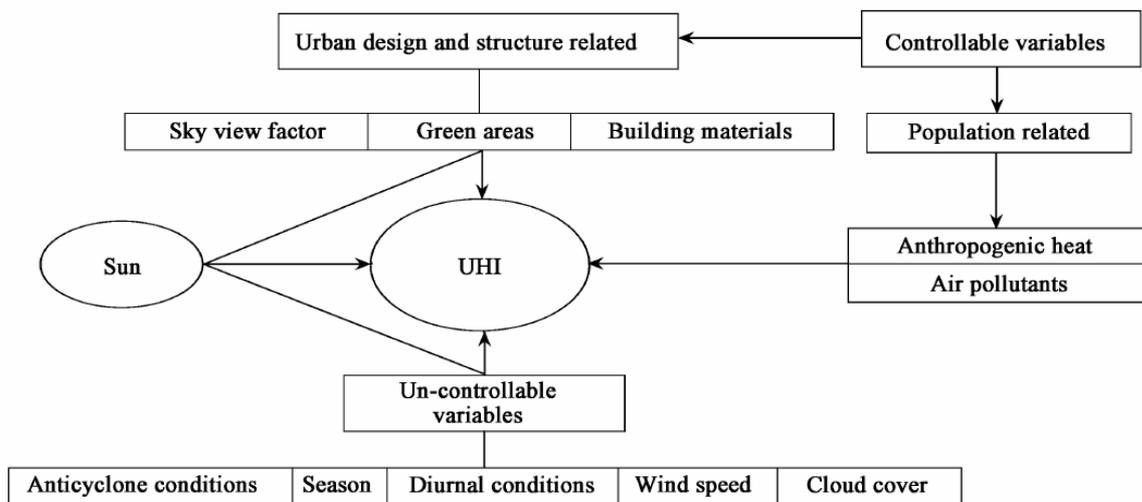
L'origine dell'effetto risiede nell'alterazione da parte dell'uomo delle caratteristiche superficiali cittadine; tuttavia l'intensità del fenomeno è influenzata dalla posizione geografica, dal momento temporale considerato e dalle condizioni meteorologiche (Figura 2.1). Le variabili meteorologiche che maggiormente controllano l'intensità sono la velocità del vento e la nuvolosità, poiché modificano rispettivamente la turbolenza atmosferica e l'irraggiamento solare (Oke 1982). La stagione estiva e il periodo notturno contribuiscono nella maggior parte delle città esaminate in letteratura a



**Figura 2.1.** Rappresentazione grafica dei fattori che influenzano l'effetto UHI (Voogt 2006)

massimizzare l'effetto UHI, mentre le caratteristiche topografiche e la presenza di corpi idrici possono modificare il regime dei venti locali (Akbari, Bell et al. 2008).

Le tipologie di fattori naturali finora esposte vengono definite da Rizwan et al. (2008) incontrollabili, mentre le cause strettamente legate alla modifica antropica del territorio ed oggetto di possibili interventi di mitigazione sono definite variabili controllabili (Figura 2.2). Tali cause dovute all'influenza umana sono collegate alla geometria urbana, alle proprietà termiche e radiative delle superfici, alla riduzione della vegetazione e ai processi energetici che soddisfano le necessità della popolazione.



**Figura 2.2.** Classificazione delle cause dell'effetto UHI (Rizwan et al. 2008)

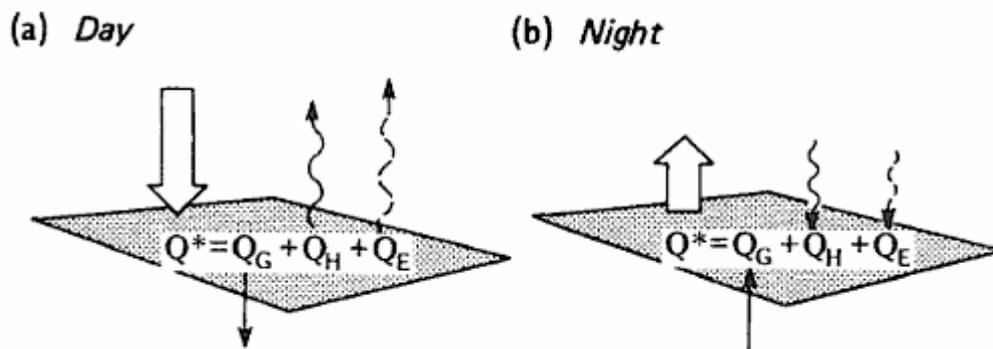
La diminuzione della vegetazione rispetto alle aree rurali e la presenza di superfici impermeabili comportano una riduzione dei processi di evaporazione e di traspirazione, che contribuisce alla maggiore temperatura epidermica. I materiali delle superfici urbane sono inoltre caratterizzati da una minore albedo (rapporto tra la quantità di luce riflessa da un corpo e la quantità di luce da esso ricevuta) rispetto ai terreni rurali e da un'elevata capacità di accumulare calore, che viene generalmente rilasciato durante le ore notturne. L'altezza e la vicinanza degli edifici causano delle riflessioni multiple della radiazione solare (incrementando quindi l'albedo effettiva del sistema), diminuiscono il fattore di vista verso il cielo (limitando il raffreddamento radiativo notturno) e riducono la velocità del vento assieme all'effetto di asportazione del calore. In aggiunta alle cause legate alla struttura urbana, il fenomeno isola di calore è causato dal calore antropogenico (proveniente da mezzi di trasporto, condizionatori e stabilimenti industriali) e dall'effetto serra urbano generato dall'inquinamento.

## 2.2. Il bilancio energetico

Le cause dell'effetto isola di calore determinano una differenza tra il bilancio energetico superficiale delle aree rurali e urbane; lo studio dei componenti dell'equazione che esprime il principio di conservazione dell'energia aiuta ad associare l'alterazione alle cause che la determinano (Rizwan et al. 2008) e permette agli studiosi di realizzare dei modelli per simulare l'andamento delle temperature. Una semplice espressione del bilancio energetico applicato ad una superficie è:

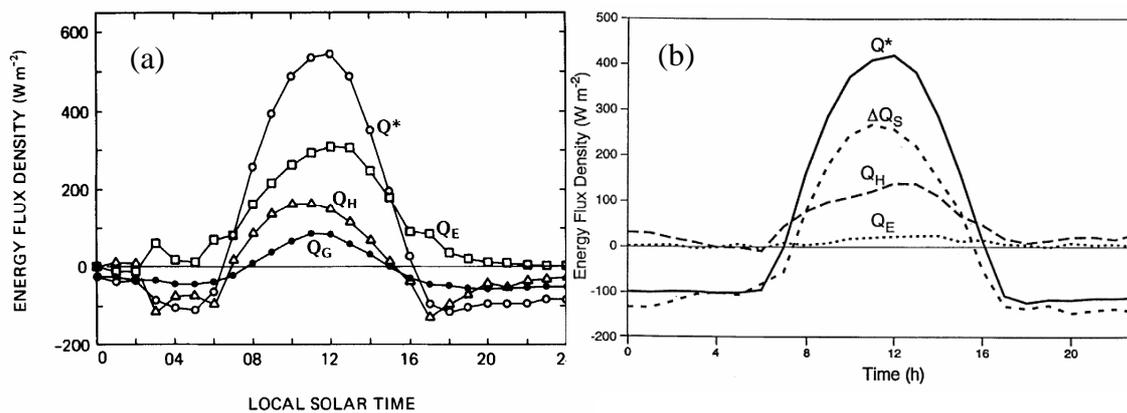
$$Q^* = Q_H + Q_E + Q_G \quad (2.1)$$

dove  $Q^*$  rappresenta la radiazione netta,  $Q_H$  e  $Q_E$  sono rispettivamente il flusso di calore turbolento sensibile e latente, mentre  $Q_G$  è il flusso di calore scambiato per conduzione con il suolo. Tali flussi hanno valori diversi tra il giorno e la notte, variano inoltre a seconda della stagione, delle condizioni meteorologiche, del contenuto d'acqua nel terreno e del tipo di suolo. Tuttavia la direzione tipica degli scambi energetici che si verifica in un generico sito rurale è quella riportata in Figura 2.3. Durante il periodo diurno l'energia solare genera una radiazione netta entrante; il surplus energetico risultante viene dissipato per conduzione con il suolo, per convezione sensibile e latente tramite evaporazione. Durante la notte la direzione dei flussi energetici si inverte: le radiazioni infrarosse emesse sono controbilanciate da un apporto di calore sensibile dal suolo, dall'aria e di calore latente tramite formazione di rugiada o brina. Al fine di esaminare la distribuzione di energia tra i flussi, possiamo considerare un terreno coperto da bassa vegetazione, che consideriamo rappresentativo delle aree rurali (Figura 2.4.a).



**Figura 2.3.** Direzione dei flussi energetici in una zona rurale di giorno e di notte (Oke 1987)

Diversamente la generalizzazione del comportamento delle superfici urbane risulta impossibile: la numerosità dei materiali con differenti proprietà e geometrie presenti nel contesto urbano producono molti bilanci energetici superficiali differenti. Secondo Oke (1982) tra le caratteristiche che maggiormente influenzano il comportamento dei materiali vi sono lo stato di umidità (la capacità di accumulo idrico e l'umidità superficiale) e la capacità di accumulare il calore. Se si considerano queste due proprietà è comunque possibile affermare in modo generale che molte delle superfici urbane differiscono significativamente da quelle rurali: le coperture cittadine sono infatti caratterizzate da maggiore inerzia termica, spesso sono impermeabili e impediscono quindi l'accumulo d'acqua. Per poter effettuare un confronto con il bilancio delle aree rurali, è possibile osservare il comportamento energetico del tetto piano di un edificio (Figura 2.4.b), con la consapevolezza che i flussi di altre superfici e geometrie urbane potrebbero differire in modo significativo. Dal confronto tra i due bilanci emergono

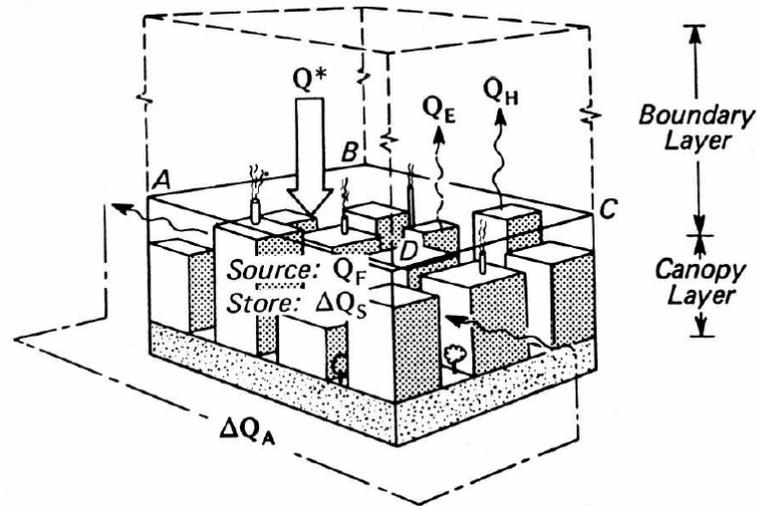


**Figura 2.4.** Variazione diurna del bilancio energetico (a) di un prato rurale (Oke 1982) e (b) del tetto piano di un edificio (Oke et al. 1999)

delle caratteristiche differenti esistenti nel comportamento urbano:

- durante il giorno la dispersione del calore per evaporazione ( $Q_E$ ) è quasi assente a causa dell'assenza di vegetazione e dell'impermeabilità dalle superficie;
- durante il giorno il calore viene accumulato nella struttura in maniera rilevante (il termine  $Q_G$  è sostituito da  $\Delta Q_S$  che rappresenta il calore immagazzinato);
- durante la notte la struttura dissipa il calore accumulato attraverso un flusso di calore sensibile ( $Q_H$ ), che può rimanere quindi positivo al contrario di quanto accade nelle aree rurali.

La diversità e la numerosità delle superfici rende impossibile la realizzazione del bilancio energetico per ognuna di esse. Per tale ragione spesso si considera il fenomeno UHI da un punto di vista più ampio e il principio di conservazione dell'energia viene applicato ad un volume di controllo, osservabile in Figura 2.5. L'equazione del bilancio



**Figura 2.5.** Rappresentazione schematica del volume di controllo considerato per la realizzazione del bilancio energetico (Oke 1987)

relativa ad un volume viene modificata rispetto alla formula (2.1) e risulta essere:

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A \quad (2.2)$$

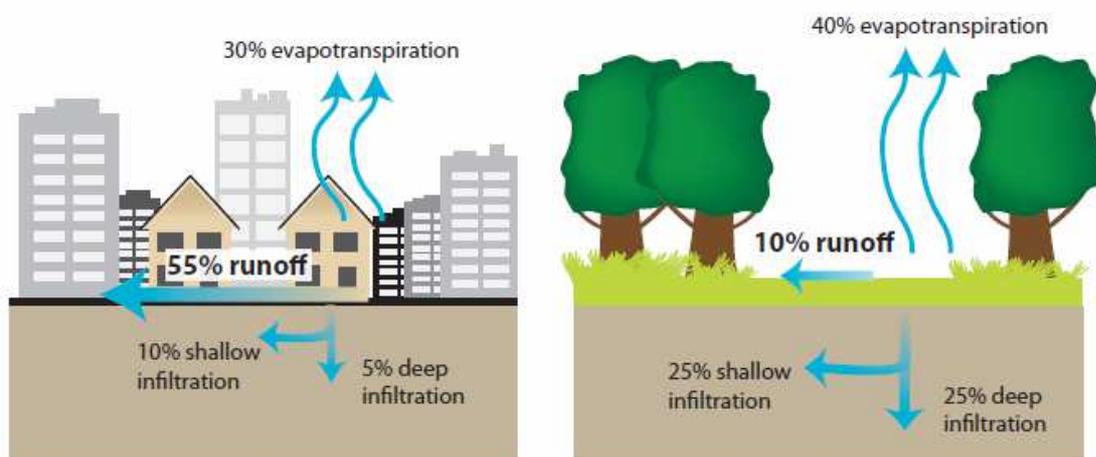
dove in aggiunta ai termini enunciati in precedenza (radiazione netta  $Q^*$ , flusso di calore turbolento sensibile  $Q_H$ , turbolento latente  $Q_E$  e calore immagazzinato  $\Delta Q_S$ ) compaiono il flusso di calore antropogenico  $Q_F$ , derivante da processi energetici realizzati dall'uomo, e l'avvezione netta attraverso le superfici laterali del volume di controllo  $\Delta Q_A$ . Con il termine avvezione in meteorologia ci si riferisce allo spostamento orizzontale di una massa d'aria con differenti caratteristiche di temperatura e umidità; nel bilancio il termine relativo ad essa può essere trascurato se si considera un'area urbana centrale caratterizzata da una densità uniforme di edifici mentre può essere rilevante nelle zone di confine con le aree rurali (Santamouris 2001). Diversamente dall'avvezione, il flusso di calore antropogenico non è trascurabile ed esiste una forte variabilità dello stesso tra differenti città. Mirzaei e Haghghat (2010) affermano inoltre che ogni termine dell'equazione è influenzato dalle caratteristiche e dalla posizione di ciascuna metropoli, generando quindi isole di calore con particolarità differenti.

## 2.3. Le variabili controllabili

Al fine di poter mitigare il fenomeno UHI è fondamentale conoscere quali siano le attività umane e le modifiche ambientali che condizionano il bilancio energetico urbano. Nei paragrafi successivi le cause controllabili elencate in precedenza verranno analizzate con maggior dettaglio.

### 2.3.1. Vegetazione ed aree verdi

La presenza di un terreno coperto da vegetazione potrebbe contribuire all'abbassamento della temperatura epidermica urbana grazie all'evapotraspirazione e, in caso di alberi ad alto fusto, all'ombreggiamento. Il termine evapotraspirazione indica simultaneamente due processi: l'evaporazione e la traspirazione vegetale. Mentre il primo processo esprime il passaggio allo stato gassoso dell'acqua presente su delle superfici, il secondo si riferisce al trasferimento nell'atmosfera attraverso gli stomi fogliari dell'acqua precedentemente assorbita dalle radici. La quasi assenza dell'evapotraspirazione è la causa principale dell'aumento delle temperature diurne nelle città, poiché la dispersione dell'energia viene effettuata principalmente tramite calore sensibile. Nelle aree urbane pertanto il rapporto di Bowen  $\beta$  (rapporto tra il flusso di calore sensibile e latente) può assumere valori elevati, vicini a 5, contrariamente a quanto accade nelle aree rurali, nelle quali 0.5 è un valore tipico (Taha 1997). Il valore di  $\beta$  tuttavia è molto variabile e dipende dalle precipitazioni; dopo qualche giorno senza pioggia l'impermeabilità delle superfici urbane assicura una bassa umidità (Figura 2.6) e quindi elevati valori di  $\beta$ .



**Figura 2.6.** L'impermeabilità della maggior parte delle superfici urbane determina una minor umidità disponibile per i processi di evapotraspirazione (Akbari, Bell et al. 2008)

### 2.3.2. Caratteristiche radiative dei materiali e inquinamento

La presenza di inquinamento nell'atmosfera cittadina e le differenti proprietà radiative dei materiali urbani rispetto alle zone rurali sono dei fattori che modificano i flussi radiativi superficiali. Per esaminare le modalità di influenza delle due variabili nella generazione dell'effetto isola di calore è opportuno scomporre la radiazione netta  $Q^*$ , termine presente nell'equazione del bilancio energetico (2.2), nelle sue componenti:

$$Q^* = K \uparrow + K \downarrow + L \uparrow + L \downarrow \quad (2.3)$$

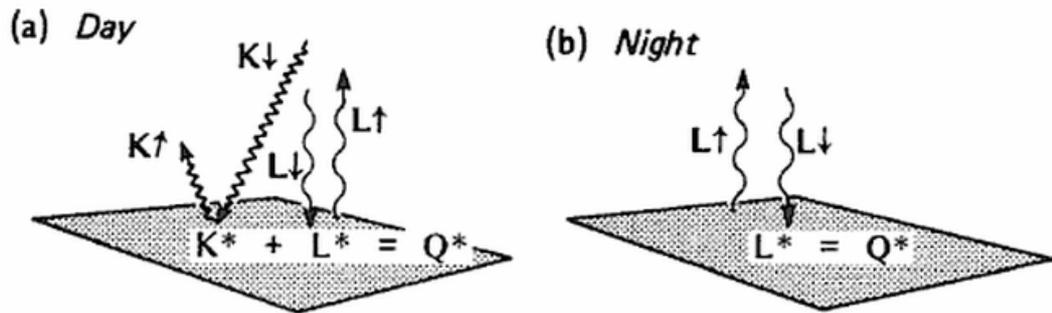


Figura 2.7. Direzione dei flussi radiativi di (a) giorno e di (b) notte (Oke 1987)

distinguendo, in base alla lunghezza d'onda, tra la radiazione solare (*ad onda corta*)  $K$  e la radiazione infrarossa (*ad onda lunga*)  $L$  e separando inoltre le componenti verso l'alto (dal suolo verso l'atmosfera) e le componenti verso il basso (dal sole e dall'atmosfera verso la superficie). Il significato dei simboli utilizzati risulta quindi (Figura 2.7):

$K \uparrow$  = radiazione solare riflessa dalla superficie

$K \downarrow$  = radiazione solare incidente (*diretta* dal sole e *diffusa* dall'atmosfera)

$L \uparrow$  = radiazione infrarossa uscente (*riflessa* ed *emessa* dalla superficie)

$L \downarrow$  = radiazione infrarossa diffusa (dall'atmosfera verso la superficie)

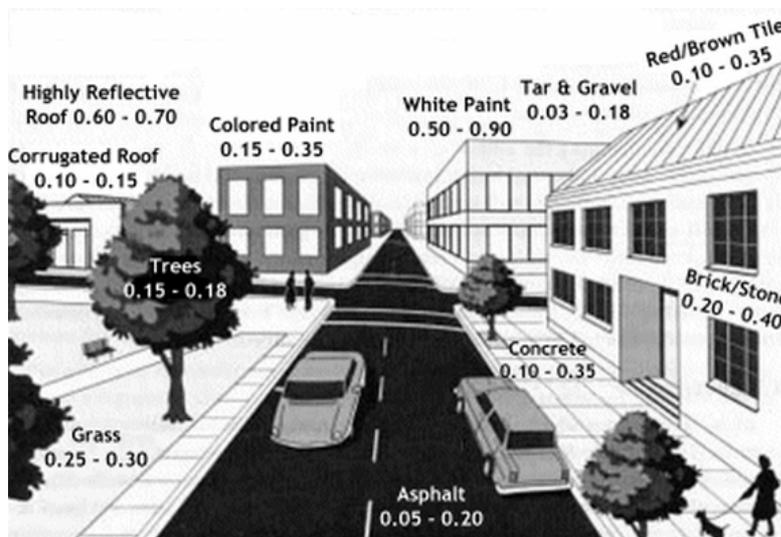
E' tuttavia possibile modificare l'equazione (2.3) introducendo il concetto di albedo, utilizzando la legge di Stefan-Boltzmann e la legge di Kirchoff. Il termine albedo  $a$  indica la frazione di radiazione incidente che viene riflessa da una superficie, la legge di Stefan-Boltzmann esprime la potenza emessa da un corpo con una temperatura  $T$  ed emissività  $\epsilon$ , mentre la legge di Kirchoff esprime l'uguaglianza tra emissività e coefficiente di assorbimento ad una data lunghezza d'onda. L'equazione (2.3) modificata diventa in seguito alle sostituzioni:

$$Q^* = -a K \downarrow + K \downarrow - \epsilon_{\text{IR}} \sigma T^4 - (1 - \epsilon_{\text{IR}}) L \downarrow + L \downarrow \quad (2.4)$$

$$Q^* = (1 - a) K \downarrow - \epsilon_{\text{IR}} \sigma T^4 + \epsilon_{\text{IR}} L \downarrow \quad (2.5)$$

Dove  $a$  rappresenta l'albedo,  $\epsilon_{\text{IR}}$  coefficiente di emissività nell'infrarosso,  $\sigma$  la costante di Stefan-Boltzmann e  $T$  la temperatura della superficie.

L'individuazione dei termini che costituiscono la radiazione netta  $Q^*$  rende ora possibile analizzare le variazioni in un contesto cittadino. La modifica al bilancio radiativo dipende innanzitutto dalle caratteristiche radiative delle superfici; i materiali presenti in città sono caratterizzati da un'albedo inferiore rispetto alle campagne e quindi da un coefficiente di assorbimento della radiazione solare maggiore, a volte anche del 50% (Lazzarin 2011). Infatti, nel caso di vegetazione spontanea o coltivata, l'albedo è dell'ordine del 0.25-0.3 mentre nelle città il valore è mediamente più basso e può raggiungere 0.05 nel caso di superfici asfaltate (Figura 2.8). La superficie urbana assorbe quindi più energia rispetto alle zone rurali e raggiunge temperature epidermiche superiori, che consentono una maggiore emissione di radiazione infrarossa  $L \uparrow$ .



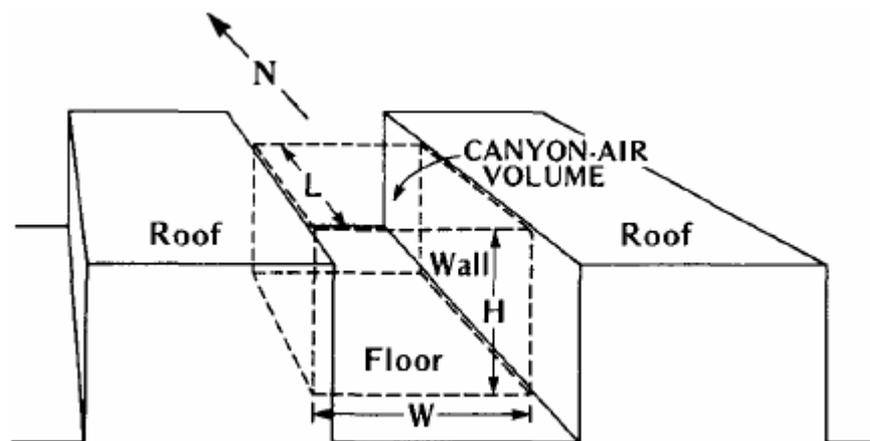
**Figura 2.8.** Valori di albedo tipici di alcuni materiali

Un ulteriore fattore che contribuisce all'alterazione del bilancio è la presenza nell'aria di inquinanti, responsabili di un "effetto serra urbano"; un maggior assorbimento da parte dell'atmosfera della radiazione infrarossa terrestre che viene successivamente re-irradiata (aumento di  $L \downarrow$ ). In aggiunta la presenza di aerosol riduce mediamente del 2-10% la radiazione solare incidente  $K \downarrow$ , nonostante la diminuzione osservata nella città di Hong Kong sia stata del 33% (Arnfield 2003).

In conclusione si osservano modifiche al bilancio radiativo per ogni termine dell'equazione (2.3), che tuttavia sembrano equilibrarsi. La diminuzione dell'albedo  $a$  delle superfici urbane è compensata dalla diminuzione della radiazione solare incidente  $K \downarrow$  provocata dagli inquinanti atmosferici, mentre l'aumento della radiazione infrarossa emessa dall'atmosfera  $L \downarrow$  viene bilanciata dall'aumento dell'emissione superficiale causata dalle maggiori temperature. Nella maggior parte dei casi per tali motivi la differenza di radiazione netta  $Q^*$  tra zone urbane e rurali non supera il 5% (Oke 1982).

### 2.3.3. Geometria e canyon urbani

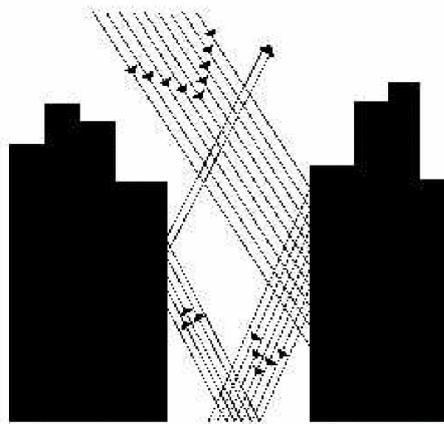
Il bilancio radiativo esaminato nel paragrafo precedente risulta valido se applicato ad una superficie piana, tuttavia tale condizione non è sempre verificata nell'ambiente urbano. Un ulteriore elemento che influenza la radiazione netta è quindi la disposizione geometrica degli edifici, che è in grado di modificare i percorsi della radiazione. Nonostante ogni città presenti un proprio assetto geometrico, è possibile individuare un'unità geometrica urbana presente in maniera diffusa: il *canyon* urbano. Il canyon consiste nella combinazione di due superfici verticali e di una orizzontale ed è formato tipicamente da due edifici adiacenti e da una strada situata tra di essi (Figura 2.9).



**Figura 2.9.** Rappresentazione schematica di un canyon urbano (Nunez e Oke 1977)

La geometria del canyon influenza il bilancio energetico urbano in vari modi: aumenta la superficie esposta ai processi di scambio, complica l'ingresso della radiazione solare, determina un'interazione tra le superfici che lo compongono, limita la capacità di dispersione della radiazione infrarossa ad onda lunga e limita la turbolenza dell'aria.

I canyon urbani catturano infatti una maggiore quantità di radiazione solare, intrappolata dalla numerose riflessioni multiple che i raggi solari subiscono da parte delle pareti dei palazzi e del fondo stradale (Figura 2.10). E' soprattutto a causa di tale fenomeno, noto appunto come *effetto canyon*, che l'isola di calore si conserva anche nelle ore notturne. Di notte il raffreddamento dell'aria che ristagna entro i canyon è molto più lento che nelle adiacenti aree rurali perché l'energia infrarossa irraggiata nell'ambiente dalle superfici che delimitano il corridoio stradale, anziché disperdersi liberamente nello spazio, viene in gran parte catturata e più volte riflessa dagli edifici che si fronteggiano ai lati opposti della strada.



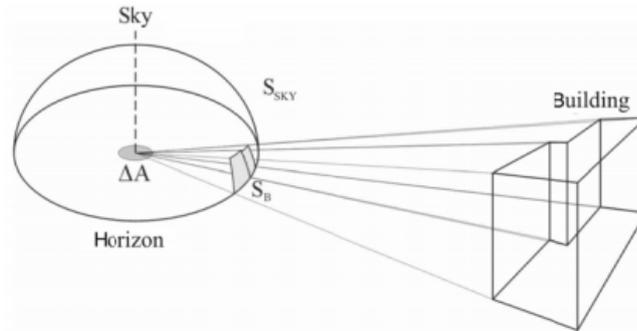
**Figura 2.10.** Le riflessioni e gli assorbimenti multipli in un canyon urbano incrementano l'albedo effettiva del sistema

Naturalmente non tutti i canyon urbani influenzano allo stesso modo gli scambi energetici e, di conseguenza, le temperature. I parametri più significativi per la caratterizzazione della geometria dei canyon sono:

- l'orientamento rispetto ai punti cardinali;
- il rapporto H/W tra l'altezza e la larghezza della struttura;
- i fattori di vista (un rapporto variabile tra 0 e 1 che esprime la quantità di radiazione intercettata da una superficie rispetto a quella emessa da un'altra).

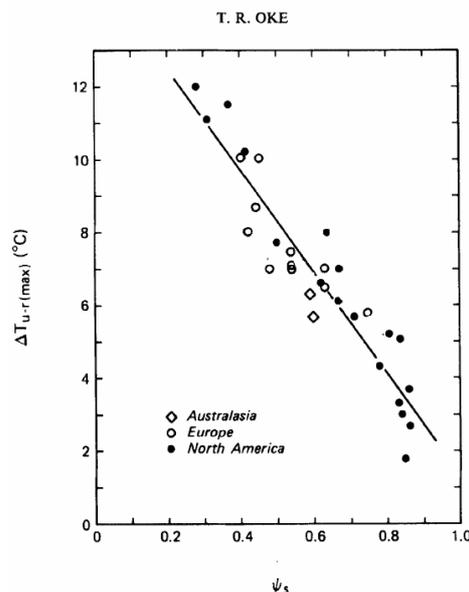
Il rapporto H/W descrive quanto gli edifici siano densamente spazati rispetto alla loro altezza: valori crescenti del rapporto indicano una diminuzione della porzione di cielo visibile dall'interno del canyon. Tale parametro tuttavia è inadatto per descrivere efficacemente la grande varietà delle situazioni urbane. Una misura più flessibile e più utilizzata per quantificare l'influenza della geometria sugli scambi radiativi è lo *sky view factor* (SVF o  $\psi_s$ ), definito come il rapporto, compreso tra zero e uno, tra la radiazione ricevuta (o emessa) da una superficie planare e la radiazione emessa (o

ricevuta) dall'intero ambiente emisferico. Lo SVF è quindi una caratteristica di uno specifico punto nello spazio ed esprime l'entità dello scambio radiativo con il cielo Unger (2009). Se consideriamo un punto della superficie urbana, la radiazione proveniente dal punto in parte raggiunge il cielo e in parte viene assorbita dalle superfici circostanti (edifici, alberi...). E' pertanto possibile calcolare lo SVF di un sito sottraendo da uno tutti i fattori di forma delle superfici "viste" dal punto (Figura 2.11).



**Figura 2.11.** Lo *Sky View Factor* di un elemento di superficie ( $\Delta A$ ) viene ridotto dagli edifici in modo proporzionale alla proiezione degli stessi nell'emisfero centrato in  $\Delta A$  (Unger 2009)

La riduzione dello SVF nei canyon urbani è considerata una delle principali causa delle UHI al di sotto dell'altezza media degli edifici, poiché comporta una diminuzione delle perdite radiative notturne in condizioni di vento debole e cielo sereno. Tale affermazione è supportata dalle osservazioni di Oke (1982) che ha riscontrato una correlazione tra SVF e intensità massima notturna dell'UHI in varie città (Figura 2.12).

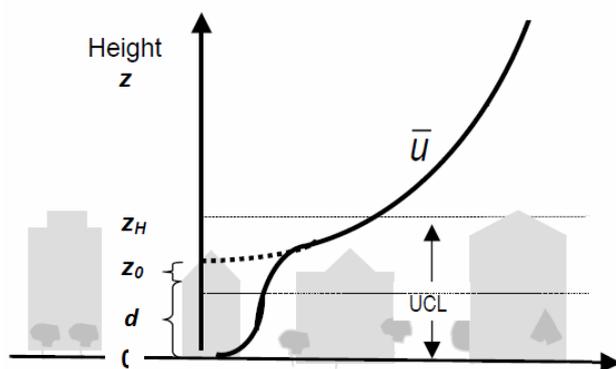


**Figura 2.12.** Relazione tra UHI e SVF osservata durante notti estive e senza nubi (Oke 1982)

### 2.3.4. Elementi di rugosità

La geometria degli edifici urbani, oltre a influenzare i percorsi della radiazione, modifica anche il profilo del vento. Le costruzioni sono infatti degli ostacoli aerodinamici, che riducono l'asportazione del calore quanto più sono di dimensioni rilevanti e sono posti a distanza ravvicinata. La presenza di elementi di rugosità con altezze considerevoli introduce un parametro aggiuntivo  $d$  nella formula utilizzata per stimare la velocità del vento nel 10% inferiore del PBL: l'altezza di spostamento.

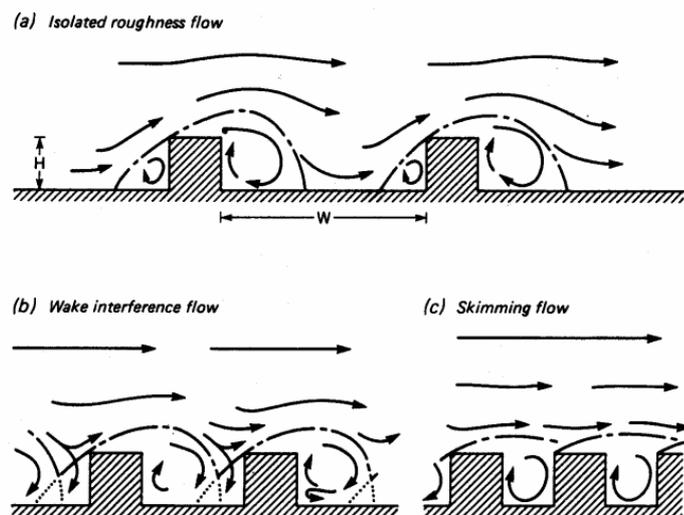
$$U(z) = \frac{u_*}{k} \left[ \ln \left( \frac{z-d}{z_0} \right) - \Psi_m(\zeta) \right] \quad (2.6)$$



**Figura 2.13.** Rappresentazione della velocità media orizzontale del vento  $\bar{U}$  in una zona urbana:  $d$  è l'altezza di spostamento,  $z_0$  la lunghezza di rugosità,  $z_H$  l'altezza degli edifici (Oke 2006)

Il nuovo termine si aggiunge a quelli già presenti nella legge logaritmica: la quota  $z$ , l'altezza media degli edifici  $z_H$ , la lunghezza di rugosità aerodinamica  $z_0$  (funzione della tipologia di suolo), la costante di von Karman  $k$  (pari a circa 0.4), la velocità d'attrito  $u_*$  che rappresenta l'effetto dovuto alle forze viscosse e infine la funzione  $\Psi_m$  che considera l'influenza della stabilità atmosferica. L'introduzione dell'altezza di spostamento è necessaria per quantificare la riduzione della velocità provocata in quota dagli edifici: il valore  $d$  dipende dalla loro altezza e densità, tuttavia una regola pratica per stimarlo è la seguente  $d=2/3z_H$  (Sozzi 2003) e nelle città europee i valori tipici di  $d$  sono compresi tra  $0.5z_H$  e  $0.9z_H$  (Bonafè 2006). Gli elementi di rugosità urbani provocano una traslazione del profilo logaritmico verso l'alto e limitano l'utilizzo della legge al di sopra della quota  $d+z_0$ . A tale altezza la reale velocità del vento non è nulla, diversamente dal risultato ottenibile dalla formula, e in realtà il profilo effettivo (linea continua Figura 2.13) si raccorda gradualmente con quello logaritmico (linea tratteggiata Figura 2.13) a

una quota superiore. Molto più complesso è analizzare le alterazioni prodotte al di sotto dell'altezza degli edifici, che per semplicità sono schematizzabili come parallelepipedi posti ad una distanza regolare. Se si considera un fabbricato isolato, sottovento rispetto ad esso si viene a creare inevitabilmente un vortice che costituisce una zona di stagnazione per il flusso di aria. Sfortunatamente in città i numerosi edifici ravvicinati formano la struttura del canyon urbano. Se il canyon è molto largo, come rappresentato in Figura 2.14.a, il vortice sottovento che si forma ha le stesse caratteristiche rispetto a quello di un edificio isolato; il regime fluidodinamico che si instaura mantiene questa configurazione se  $H/W < 0.4$ , dove  $H$  è l'altezza degli edifici e  $W$  la distanza tra di essi misurata lungo la direzione del vento. La situazione è differente quando il rapporto  $H/W$  aumenta fino a 0.7 perché gli edifici iniziano ad interferire gli uni con gli altri, provocando un debole disaccoppiamento tra l'aria che scorre al di sopra e l'aria che sta tra di essi, come è osservabile in Figura 2.14.b. Infine se  $H/W$  assume valori superiori a 0.7, si viene a creare un vero e proprio canyon urbano, cioè una porzione di aria confinata tra due file di edifici quasi completamente disaccoppiata dall'aria sovrastante, in cui si instaurano uno o due vortici, a volte permanenti ed a volte intermittenti, che scambiano aria con l'atmosfera sovrastante mediante un debole effetto di *entrainment* (Sozzi 2003). Questa è la classica situazione che si riscontra nelle maggiori città del mondo: l'eccessiva altezza e vicinanza degli edifici inducono una stagnazione dell'aria e limitano l'asportazione del calore per convezione.



**Figura 2.14.** Regimi fluidodinamici in ambiente urbano al variare del rapporto tra l'altezza  $H$  degli edifici e la distanza  $W$  rispetto alla direzione del vento (Oke 1987)

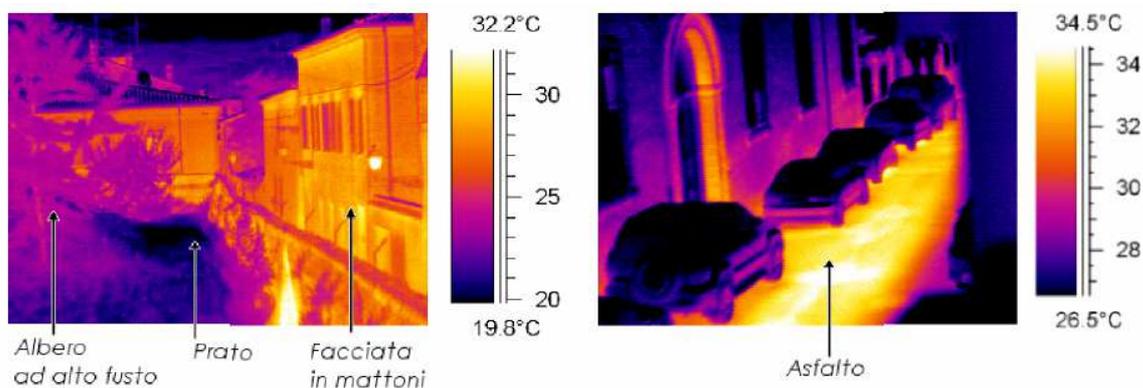
### 2.3.5. Caratteristiche termiche dei materiali

Le differenti proprietà termiche dei materiali presenti nelle zone urbane rispetto alle aree rurali contribuiscono alla formazione dell'effetto isola di calore. Le strutture presenti in città sono infatti caratterizzate da una maggiore conducibilità termica  $k$  e da una maggiore capacità termica  $C$ . Il parametro che combina queste due proprietà è denominato ammettenza termica o inerzia termica  $\mu$ :

$$\mu = \sqrt{kC} \quad (2.7)$$

Esso rappresenta una misura della risposta termica di una superficie ad un dato flusso di calore. Superfici contraddistinte da alti valori di ammettenza termica  $\mu$ , come quelle urbane, ricevono calore da immagazzinare (o lo emettono nell'ambiente circostante) con relativa facilità e subiscono moderate variazioni di temperatura superficiale (Oke 1982). L'elevato valore di  $\mu$  che caratterizza le aree metropolitane determina un'alterazione nel bilancio energetico superficiale poiché, come osservato nel paragrafo 2.2, la quota di energia immagazzinata  $\Delta Q_S$  è considerevolmente maggiore rispetto alle zone rurali (Figura 2.4). Nonostante la misurazione non sia effettuabile direttamente si stima infatti che il flusso  $\Delta Q_S$  sia almeno doppio nelle città (Akbari, Bell et al. 2008).

Le conseguenze dello stoccaggio di calore si osservano prevalentemente durante il periodo notturno quando l'energia viene rilasciata gradualmente dalle strutture, ma la riduzione dello Sky View Factor e la stagnazione dell'aria causata dai canyon impediscono un efficace raffreddamento delle superfici.



**Figura 2.15.** Le superfici urbane costituite da mattoni o asfalto sono da caratterizzate temperature maggiori rispetto alle superfici tipiche delle zone rurali.

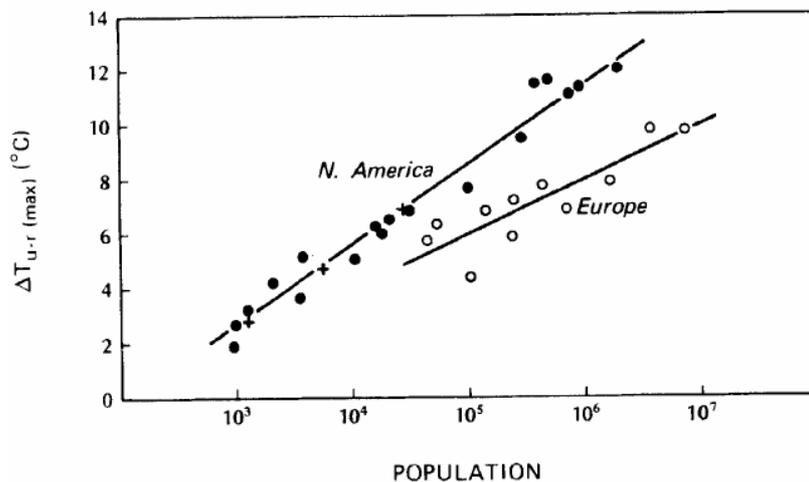
Le fotografie termiche riguardano la città di Ferrara nel luglio 2006 alle ore 22:00.

### 2.3.6. Il calore antropogenico

In aggiunta alle cause considerate finora, un ultimo fattore contribuisce alla differenza di temperature esistente tra città e campagna: il calore che deriva dalle attività umane e dai consumi energetici che esse comportano. Questo contributo supplementare di origine antropica ( $Q_F$ ) al bilancio energetico urbano (Formula 2.2) viene definito calore antropogenico ed è suddivisibile in tre componenti: calore generato dai mezzi di trasporto  $Q_{FV}$ , calore proveniente da fonti stazionarie come abitazioni o industrie  $Q_{FH}$  e infine calore generato dal metabolismo umano e animale  $Q_{FM}$  (Arnfield 2003).

$$Q_F = Q_{FV} + Q_{FH} + Q_{FM} \quad (2.8)$$

Sebbene teoricamente presente l'influenza dell'ultimo termine è tuttavia trascurabile (Grimmond C.S.B. 1992), dunque la correlazione tra intensità massima dell'isola di calore e popolazione delle città riscontrata da Oke (Figura 2.16) è imputabile ad effetti indiretti dell'aumento demografico urbano quali il maggior numero e densità di edifici, di autoveicoli o di stabilimenti produttivi (Rizwan et al. 2008). Inoltre la differenza presente tra intensità di città americane ed europee testimoniano la maggiore influenza di altri fattori rispetto al numero di abitanti.

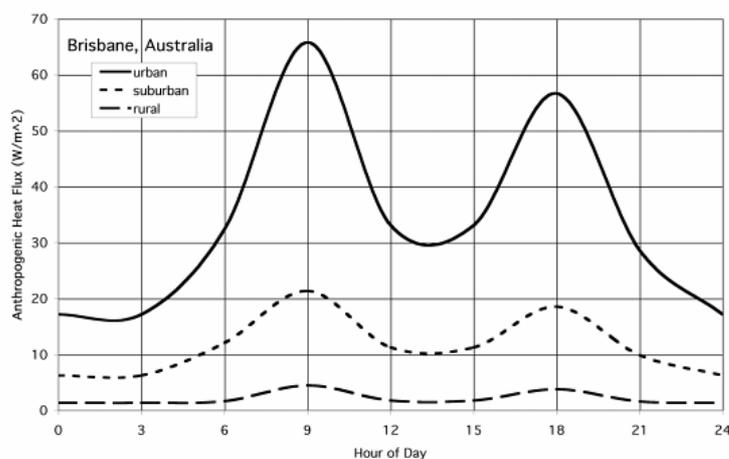


**Figura 2.16.** Correlazione tra intensità massima dell'effetto isola di calore (UHII) e le popolazioni di città europee ed americane (Oke 1982)

Il flusso di calore antropogenico  $Q_F$  assume valori più rilevanti durante il periodo invernale a causa del consumo energetico per il riscaldamento. Al contrario l'intensità massima dell'effetto isola di calore viene tipicamente osservata durante il periodo estivo. E' quindi possibile concludere che il calore antropogenico non sia la causa

principale del fenomeno (Oke 1982), sebbene possa avere un'influenza non irrilevante nei *core* urbani (Taha 1997). Nei canyon e nelle zone dove il fenomeno UHI è maggiore si verifica infatti un utilizzo massiccio degli impianti di climatizzazione, che provoca un aumento dei consumi energetici, del picco di potenza elettrica e contribuisce a incrementare la temperatura esterna. I condizionatori sono di conseguenza sottoposti a condizioni di funzionamento più gravose, poiché si sono innalzate le temperature di raffreddamento dei condensatori e si verifica una diminuzione del COP. L'utilizzo degli impianti di climatizzazione innesca quindi un circolo vizioso: l'aumento della capacità installata innalza la temperatura esterna e la necessità di servirsi degli impianti stessi.

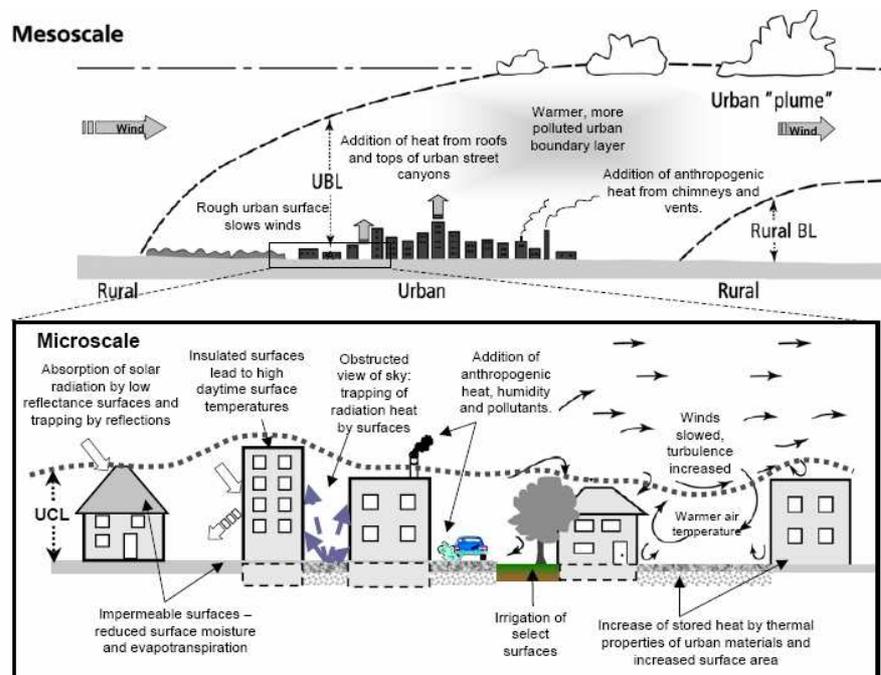
I valori riportati in letteratura di  $Q_F$  variano notevolmente tra differenti centri. Ad esempio Taha (1997) afferma che il flusso di calore antropogenico in alcune città americane sia di 20-40 W/m<sup>2</sup> durante l'estate e di 70-210 W/m<sup>2</sup> in inverno, mentre Ichinose et al. (1999) riportano valori estivi di 200 W/m<sup>2</sup> e invernali di 400 W/m<sup>2</sup> a Tokyo. Oke (1987) sostiene che la variabilità di  $Q_F$  può essere spiegata dalle differenti densità abitative e dai diversi consumi energetici pro capite caratteristici delle città. Tale correlazione viene ad esempio verificata da Sailor e Lu (2004), che misurano bassi flussi antropogenici in città americane con minor densità abitativa. Essi calcolano inoltre che la percentuale di  $Q_F$  dovuta al traffico veicolare in sei città statunitensi sia tra il 47% e il 62% durante il periodo estivo e che diminuisca (ma non in valore assoluto) durante l'inverno a causa dei consumi per il riscaldamento. Infine l'andamento giornaliero di  $Q_F$  che rilevano presenta due picchi con un'evoluzione simile a quella rappresentata in Figura 2.17.



**Figura 2.17.** Flusso antropogenico urbano,suburbano e rurale nelle diverse ore del giorno a Brisbane, Australia, in estate nel dicembre estate 2006 (Gartland 2008)

### 2.3.7.Sintesi

Le variabili controllabili che determinano l'isola di calore, analizzate nei precedenti paragrafi, vengono ora elencate per offrire una visione d'insieme del fenomeno.



**Figura 2.18.** Rappresentazione grafica delle cause controllabili dell'UHI (Voogt 2006)

- Riduzione della vegetazione e impermeabilizzazione delle superfici – la minor umidità disponibile riduce i processi di evapotraspirazione e determina un aumento della quota di calore sensibile;
- Differenti proprietà dei materiali – la minore albedo comporta un maggior assorbimento di energia solare, che viene immagazzinata a causa dell'elevata inerzia termica e rilasciata sotto forma di calore durante il periodo notturno;
- Geometria urbana – i canyon urbani diminuiscono l'albedo effettiva a causa delle riflessioni multiple, intrappolano la radiazione infrarossa impedendo il raffreddamento notturno e ostacolano l'asportazione del calore per convezione;
- Inquinamento atmosferico – il particolato provoca un maggior assorbimento atmosferico della radiazione infrarossa terrestre che viene poi re-irradiata;
- Calore antropogenico – maggior calore dovuto all'uso di fonti energetiche per la climatizzazione, per i trasporti e per i processi produttivi.

# Capitolo 3

## Le tecniche di mitigazione

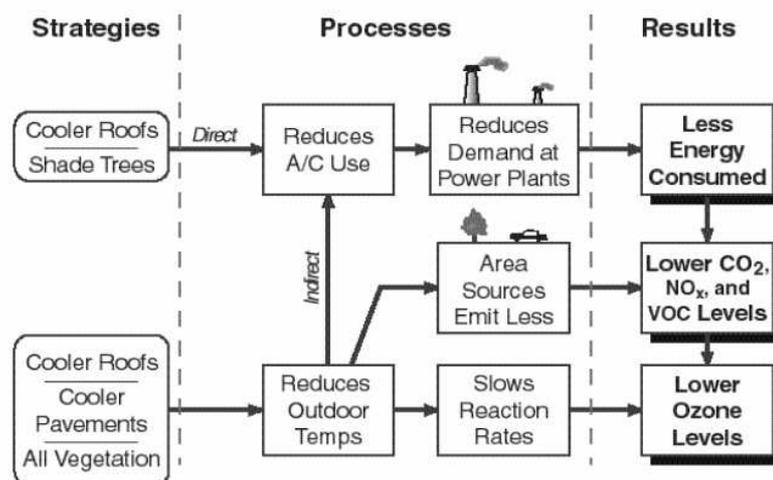
L'isola di calore è un fenomeno che condiziona inevitabilmente l'ambiente cittadino e la qualità della vita della popolazione urbana. Nonostante le maggiori temperature esistenti in città possano essere considerate un effetto positivo durante il periodo invernale, poiché riducono il carico di riscaldamento, le conseguenze negative dell'UHI sembrano superarne i benefici. E' durante la stagione estiva infatti che si verifica la massima richiesta annuale di potenza elettrica e l'effetto isola di calore contribuisce a incrementare l'entità della domanda. L'utilizzo massiccio degli impianti di condizionamento, oltre a provocare maggiori emissioni di calore antropogenico che aumentano ulteriormente la temperatura, determina maggiori emissioni di gas serra e di inquinanti, riducendo la qualità dell'aria. Entrambe questi effetti danneggiano la salute umana e contribuiscono a generare stati di malessere soprattutto nei soggetti più deboli, come bambini e anziani. Infine l'elevata temperatura delle superfici riscalda in maniera anomala l'acqua piovana che defluisce poi in ruscelli, fiumi stagni e laghi; tale inquinamento termico dell'ecosistema influisce negativamente sul metabolismo e la riproduzione di molte specie acquatiche (Akbari, Bell et al. 2008).

Il fenomeno isola di calore è da decenni oggetto di studio da parte dei ricercatori, mentre è più recente la preoccupazione della comunità verso le conseguenze negative sopra elencate. Questo interesse nei confronti dell'UHI ha contribuito a promuovere lo sviluppo di strategie per la riduzione dell'effetto; dal momento che l'origine dello squilibrio termico urbano è la modifica del bilancio energetico superficiale, le azioni di mitigazione devono influire sui termini del bilancio e avvicinarli ai valori rurali. In particolare gli interventi dovrebbero:

- ridurre il flusso di calore immagazzinato nella struttura urbana  $\Delta Q_s$ , tramite modifica della geometria urbana e attraverso l'utilizzo di materiali con minor ammettenza termica;
- ridurre la radiazione netta  $Q^*$ , aumentando l'albedo delle superfici e modificando la geometria degli edifici;

- ridurre il rapporto di Bowen  $\beta$ , cioè trasformare parte del flusso di calore sensibile  $Q_H$  in flusso di calore latente  $Q_E$ , aumentando la permeabilità delle superfici e la presenza di vegetazione;
- ridurre il flusso di calore antropogenico  $Q_F$ , limitando i consumi di energia elettrica, diminuendo il traffico veicolare e migliorando l'efficienza energetica.

Alcune di queste azioni non sono concretamente realizzabili in città esistenti, come ad esempio l'aumento dello *sky view factor* attraverso la modifica della geometria urbana, mentre sono sicuramente tutti elementi da prendere in considerazione durante la pianificazione urbana e la costruzione di nuovi edifici. Il miglioramento di una situazione esistente non deve essere tuttavia effettuato attraverso l'attuazione di tutti gli interventi possibili, poiché ogni isola di calore ha caratteristiche proprie ed è determinata da molteplici cause, che contribuiscono nelle diverse città in maniera differente all'effetto. Non esiste quindi una "ricetta" universale per la mitigazione dell'effetto UHI e alcune azioni si potrebbero rivelare inefficaci o addirittura controproducenti se applicate senza aver considerato le specificità locali (Bonafè 2006). Pur non dimenticando la precedente osservazione, è possibile affermare che tra le tecniche di mitigazione quelle che generalmente sembrano produrre risultati migliori sono l'aumento della vegetazione e l'utilizzo di materiali in grado di riflettere una maggior quota di radiazione solare. Ad esempio Akbari (2005) stima che la temperatura estiva massima di Los Angeles si abbasserebbe di 2-3 K se venissero piantati tre alberi per ogni casa e se i due terzi della superficie urbana incrementasse la propria albedo.



**Figura 3.1.** Le tecniche di mitigazione dell'effetto isola di calore urbana procurano benefici alle singole abitazioni (diretti) e all'intera città (indiretti), poiché possono ridurre la temperatura urbana, le emissioni di inquinanti e di gas serra (Akbari 2005).

Le strategie di mitigazione maggiormente adottate comportano quindi la modifica del bilancio energetico delle superfici urbane tramite incremento dell'albedo dei materiali e aumento dei processi di evapotraspirazione. Questi cambiamenti dell'ambiente urbano possono essere relativamente economici da ottenere e procurano due tipologie di benefici: diretti e indiretti. Gli effetti diretti riguardano gli edifici sui quali sono stati effettuati gli interventi; la minore temperatura delle superfici delle abitazioni consente di ridurre la necessità di energia elettrica per la climatizzazione e un conseguente risparmio economico. Ma se le azioni di mitigazione vengono effettuate da molte strutture, le numerose riduzioni di temperatura locale e la riduzione di emissioni di calore antropogenico provocano una diminuzione della temperatura di tutta la città: tale evento è un beneficio indiretto perché contribuisce al risparmio energetico di ogni singola abitazione. La riduzione dei consumi energetici ottenibile è un vantaggio per l'intera collettività poiché permette sia di limitare la potenza elettrica di picco sia di migliorare la qualità dell'aria (Figura 3.1). La minor domanda di energia provoca infatti una minor emissione di inquinanti e di gas serra, dal momento che gran parte dell'energia elettrica è prodotta da combustibili fossili. Le minori temperature cittadine diminuiscono poi la formazione di smog fotochimico, prodotto in seguito a reazioni che coinvolgono gli ossidi di azoto ( $\text{NO}_x$ ) e i composti organici volatili (VOC), emessi da molti processi naturali o antropici. Infine la presenza di vegetazione riduce in modo diretto l'anidride carbonica atmosferica attraverso il processo di fotosintesi, anche se si stima che la riduzione indiretta, dovuta al risparmio energetico, sia maggiormente significativa (Akbari 2005).

Nei paragrafi successivi verranno espone le tecniche di mitigazione considerate maggiormente efficaci nel contrastare il fenomeno dell'isola di calore urbana;

- Cool roofs;
- Cool pavements;
- Aree verdi;
- Green roofs.

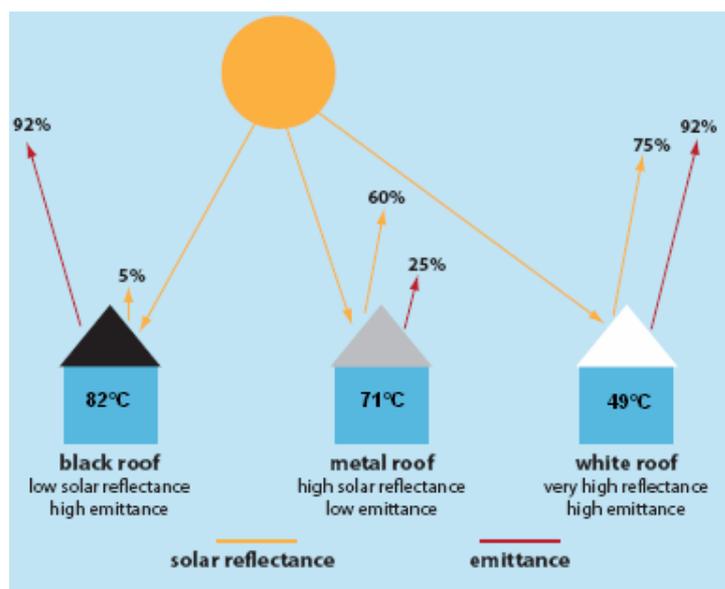
Le prime due tecniche utilizzano dei materiali o dei rivestimenti "freddi" in grado di riflettere gran parte della radiazione solare, mentre le ultime due ottengono una riduzione del calore sensibile tramite l'aumento del flusso di calore latente e grazie all'ombreggiamento prodotto dalle piante.

### 3.1.Cool Roofs

I materiali utilizzati nella costruzione di abitazioni e strutture nelle città influenzano in maniera significativa il bilancio energetico superficiale. Le superfici urbane assorbono infatti una maggiore quota della radiazione solare ed infrarossa; tale l'energia assorbita viene successivamente dissipata nell'ambiente attraverso i processi di raffreddamento radiativo e convettivo, incrementando la temperatura atmosferica. Una riduzione delle temperature epidermiche delle coperture urbane produrrebbe dei benefici diretti ai singoli edifici e indiretti all'intero territorio urbano, poiché i tetti occupano il 20-25% della superficie totale urbana, secondo una statistica relativa ad alcune città americane riportata da Chin et al. (2008). E' possibile raggiungere questo obiettivo promuovendo l'utilizzo nei tetti di materiali in grado di riflettere una quota maggiore di radiazione (maggiore albedo) rispetto a quelli tradizionali e caratterizzati da elevata emissività. Le coperture urbane con queste caratteristiche vengono definite *cool roofs*, dal momento che possono raggiungere temperature superficiali inferiori di 28-33 °C rispetto ai materiali abituali e superiori di solo 6-11 °C rispetto alla temperatura dell'aria.

Le leggi della fisica esprimono l'impossibilità di ottenere un'elevata emissività ed un'elevata riflessione alla stessa lunghezza d'onda. Un aumento di emissività determina infatti una diminuzione di riflettanza, poiché la radiazione che raggiunge una superficie non trasparente si suddivide tra quota riflessa ed assorbita e per una determinata lunghezza d'onda l'emissività è pari al coefficiente d'assorbimento (Legge di Kirchoff). La realizzazione di *cool roofs* è tuttavia possibile utilizzando materiali con un comportamento selettivo, caratterizzati da eccellenti proprietà di riflessione della radiazione visibile e da un'elevata emissività nell'infrarosso.

Come osservabile in Figura 3.2, una copertura tradizionale (*black roofs*), seppur dotata di emissività elevata, può raggiungere temperature prossime agli 85 °C durante una calda giornata estiva, poiché riflette solo il 5% della radiazione. La temperatura epidermica è leggermente inferiore nel caso di un tetto metallico, dotato di maggior albedo ma in grado di emettere solo il 25% della radiazione emessa da un corpo nero alla stessa temperatura. Al contrario godrà di una temperatura piuttosto inferiore un tetto avente elevati valori sia di albedo sia di emissività (*cool roofs*). Entrambe le proprietà influenzano quindi la temperatura di equilibrio di una superficie  $T_{\text{surface}}$ , che confrontata a parità di radiazione con quella di equilibrio di un materiale nero di riferimento  $T_{\text{black}}$  (albedo  $a=5\%$  ed emissività  $\varepsilon=90\%$ ) e con quella di un materiale bianco standard  $T_{\text{white}}$



**Figura 3.2.** Albedo, emissività e temperatura epidermica di equilibrio di differenti coperture urbane in una calda giornata estiva (Chin et al. 2008)

( $a=80\%$  ed  $\varepsilon=90\%$ ) può essere utilizzata per valutare la capacità del materiale di mantenersi “freddo” attraverso il Solar Reflectance Index (SRI), definito da Santamouris et al. (2001):

$$SRI = \frac{T_{black} - T_{surface}}{T_{black} - T_{white}} \cdot 100 \quad (3.1)$$

L’SRI ha il pregio di combinare in un unico parametro le proprietà radiative (albedo ed emissività); materiali con elevati valori di SRI sono in grado di raggiungere temperature di equilibrio inferiori rispetto a materiali aventi SRI minore.

E’ possibile suddividere le coperture degli edifici in due categorie, caratterizzate da materiali diversi e quindi oggetto di interventi differenti per la realizzazione di *cool roofs*: tetti a bassa inclinazione (inferiore a  $9.5^\circ$ ) e ad alta inclinazione.

Le coperture a bassa inclinazione sono presenti nella maggior parte degli edifici industriali, commerciali e dei condomini cittadini. La trasformazione di un tetto piano in un *cool roof* è possibile principalmente attraverso il rivestimento dello stesso con vernici o con speciali membrane. L’applicazione di uno strato spesso di pittura non metallica molto chiara, in grado di riflettere la radiazione solare visibile, è appropriato se la copertura esistente è in buone condizioni. Particolari additivi nelle vernici migliorano inoltre l’adesione, la durabilità e la capacità di auto-pulizia con l’acqua piovana; il deposito di polvere e sporco sulle superfici produce infatti una diminuzione dell’albedo. Se al contrario la copertura necessita di opere di manutenzione, è

consigliabile l'applicazione di speciali membrane caratterizzate da elevato SRI, che vengono incollate o fissate meccanicamente al tetto.

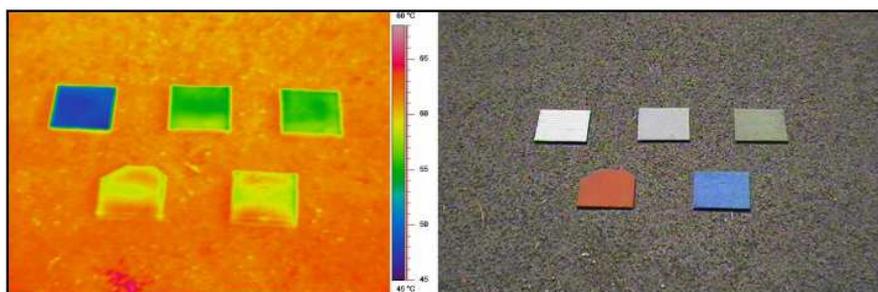
Il mercato dei tetti ad alta inclinazione, situati prevalentemente in edifici residenziali, offre prodotti differenti: la visibilità delle coperture impone infatti delle attenzioni di tipo estetico nella realizzazione dei *cool roofs* (Gartland 2008). I materiali utilizzati per questa tipologia di coperture non sono necessariamente di colore chiaro, sono invece presenti in un'ampia gamma di colorazioni. I ricercatori hanno sviluppato infatti i *cool colors*, che contengono dei pigmenti in grado di riflettere la radiazione solare nello spettro infrarosso. Tegole o tetti metallici *cool* non bianchi, posseggono generalmente un'albedo inferiore rispetto alle soluzioni utilizzate per i tetti a bassa inclinazione ma sono all'apparenza indistinguibili dai materiali tradizionali (Chin et al. 2008).

La presenza di un *cool roof* consente un minor trasferimento di calore dal tetto, rendendo più confortevole la temperatura interna in estate e limitando la necessità di energia per il raffrescamento. Molti studi sono stati eseguiti al fine di quantificarne i benefici diretti e indiretti, non bisogna tuttavia dimenticare che l'entità dei risparmi ottenibili varia in funzione del clima locale e dalle specifiche caratteristiche degli edifici (Chin et al. 2008). Haberl e Cho (2004) hanno considerato 27 articoli presenti in letteratura, riscontrando risparmi energetici per il condizionamento ottenuti con i materiali freddi variabili tra il 2% e il 44% con una media del 20%, mentre Santamouris et al. (2001) riportano riduzioni del 3-35% osservando valori maggiori in vecchi edifici poco isolati. L'utilizzazione su larga scala dei *cool roofs* potrebbe comportare come beneficio indiretto la riduzione della temperatura esterna e sebbene sia complesso da stimare alcuni ricercatori hanno effettuato delle simulazioni; Taha (1997) afferma che un incremento dell'albedo da 0.25 a 0.4 potrebbe abbassare la temperatura cittadina di 4 °C. Ulteriori effetti positivi della diffusione dei *cool roofs* sono la riduzione della potenza di picco e dello smog fotochimico. Akbari (2005) dichiara che gli Stati Uniti potrebbero godere di una diminuzione del 2.5% della potenza di picco (7 GW) e che lo smog a Los Angeles sarebbe inferiore del 10-20% se i materiali freddi venissero largamente utilizzati. Nonostante la presenza dei *cool roofs* porti benefici durante l'estate, è importante osservare che nel periodo invernale la maggior albedo comporta maggiori costi per il riscaldamento. Diversi studi dimostrano tuttavia che nei climi temperati e caldi i vantaggi superano gli svantaggi, poiché d'inverno vi sono meno ore di luce, maggior nuvolosità ed il sole è ad altezze inferiori (Santamouris et al. 2011).

### 3.2.Cool Pavements

Le superfici orizzontali cittadine sono quelle maggiormente influenzate dalla radiazione solare dal momento che possono raggiungere temperature epidermiche piuttosto elevate. Un ampio utilizzo di *cool roofs* permetterebbe di ottenere benefici significativi, tuttavia la maggior parte dell'area cittadina è coperta da un'altra tipologia di superfici: le pavimentazioni. Ferguson et al. (2008) stimano infatti che la superficie occupata in varie città americane da pavimentazioni (come ad esempio strade, parcheggi e marciapiedi) sia il 30-45% dell'area totale. Tali superfici durante il giorno assorbono ed accumulano energia solare, che viene smaltita nella notte attraverso i processi di raffreddamento radiativo e convettivo. La modifica delle proprietà delle pavimentazioni rappresenta per questo un importante intervento nella mitigazione dell'UHI.

Mentre il bilancio energetico dei tetti è condizionato principalmente da albedo ed emissività, le caratteristiche che influenzano il bilancio delle pavimentazioni sono più numerose; in aggiunta alle proprietà radiative infatti anche permeabilità, inerzia termica e convezione impattano sulla temperature epidermiche (Santamouris 2001). L'utilizzo di materiali con proprietà differenti rispetto a quelle di asfalto e calcestruzzo (i materiali tipicamente utilizzati) può garantire temperature superficiali inferiori e una minor quota di calore immagazzinato. Questi obiettivi possono essere raggiunti attraverso l'utilizzo di *cool pavements*, pavimentazioni che riflettono una maggior percentuale della radiazione solare e possono essere permeabili.



**Figura 3.3.** L'aggiunta di additivi coloranti all'asfalto permette di ottenere temperature superficiali inferiori di 15 °C (bianco), 7 °C (verde, grigio) e 3 °C (rosso, blu) rispetto ad un asfalto tradizionale nero (Fanchiotti e Carnielo 2011)

L'albedo, come per i *cool roofs*, sembra essere il maggior fattore di influenza delle temperature superficiali. La quota riflessa dei materiali tradizionali è del 5-40% ma attraverso l'aggiunta di additivi coloranti alle pavimentazioni (Figura 3.3), anche

durante interventi di manutenzione sullo strato superficiale, essa può essere elevata fino al 75% (Ferguson et al. 2008). La diffusione commerciale di questi pigmenti non si è verificata anche per possibili problemi di abbagliamento durante la guida e per l'inadeguatezza di un'elevata riflessione in luoghi di stazionamento delle persone. Per questo motivo vi è stato un impegno, similmente a quanto verificato per i *cool roofs*, nella realizzazione di materiali con elevata albedo ma bassa riflessione nel visibile; a tal proposito Santamouris (2001) riporta l'esistenza di un asfalto all'apparenza tradizionale ma con temperature epidermiche inferiori di 15 °C, grazie a una riflettività infrarossa del 86% e una visibile solamente del 23%.

Sebbene l'emissività sia una proprietà radiativa che influenza considerevolmente il bilancio energetico, non è una variabile modificata dai *cool pavements* poiché le pavimentazioni tradizionali posseggono una buona capacità di emettere radiazione.

Una proprietà di notevole importanza che i *cool pavements* possono modificare è invece l'impermeabilità delle superfici. Pavimentazioni permeabili sono in grado di permettere la discesa dell'acqua verso il terreno sottostante, beneficiando del raffreddamento evaporativo. Tuttavia superfici porose asciutte possono limitare il trasferimento di calore verso il sottosuolo a causa della loro struttura, portando a temperature superficiali maggiori ma un minor accumulo termico, maggior responsabile dell'UHI notturna. L'applicazione di pavimentazioni porose è ancora oggetto di ricerche e deve essere valutata nello specifico a seconda del campo di applicazione (Ferguson et al. 2008).

I benefici ottenibili dall'utilizzo dei *cool pavements* sono solamente indiretti, poiché contribuiscono all'abbassamento delle temperature esterne. Ferguson et al. (2008) affermano che un incremento dell'albedo di 0.1 ridurrebbe la temperatura epidermica di 4 °C, mentre Santamouris (2001) dichiara che aumentando la riflessività della città di Los Angeles dal 10% al 35% la temperatura dell'aria si abbasserebbe di 0.6 °C. Le minori temperature superficiali limiterebbero poi l'alterazione termica delle acque meteoriche, riducendo lo shock termico per l'ecosistema acquatico. Inoltre se superfici permeabili fossero largamente presenti in città, il deflusso dell'acqua piovana potrebbe diminuire fino al 90%, determinando inferiori costi di pompaggio. Migliorerebbe infine la qualità della vita urbana: minori temperature superficiali determinerebbero migliori condizioni microclimatiche, la permeabilità delle strade aumenterebbe la sicurezza alla guida e il rumore prodotto degli autoveicoli verrebbe ridotto (Ferguson et al. 2008).

### 3.3. Aree Verdi e Vegetazione

La mitigazione dell'isola di calore urbana può essere effettuata incrementando la presenza di parchi e piante. Molte aree urbane espandendosi hanno invece rinunciato ad alberi e spazi verdi, nonostante vi siano aree che possono essere utilizzate per ospitarli.

La diffusione di alberi e vegetazione può contribuire alla diminuzione delle temperature urbane grazie all'ombreggiamento e all'evapotraspirazione. La radiazione solare che oltrepassa una pianta è infatti ridotta del 10-80% d'estate e del 10-30% d'inverno, quando alcune piante non posseggono le foglie. Nelle vicinanze di un'area verde inoltre la quota di calore sensibile è inferiore, poiché parte della radiazione solare viene utilizzata per vaporizzare l'acqua invece di determinare un aumento di temperatura.

L'ombreggiamento di un'abitazione prodotto da alberi di alto fusto, in grado di adombrare anche il tetto, diminuisce la temperatura delle superfici anche di 25 °C; la conseguenza è un risparmio energetico per il raffrescamento del 7-47% ed è maggiore quando le piante sono posizionate ad ovest rispetto alla casa (Bell, Cole et al. 2008).

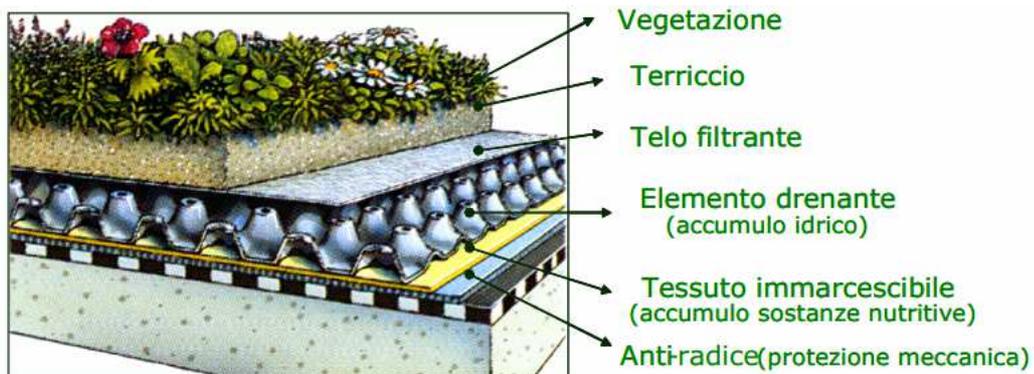
Se un numero elevato di alberi fosse posizionato nei parcheggi e ai lati delle strade tutta la comunità cittadina godrebbe di una diminuzione di temperatura esterna come beneficio indiretto. Non bisogna trascurare inoltre il possibile contributo di parchi, all'interno dei quali i processi di evapotraspirazione sono maggiori del 300% (Rizwan et al. 2008), le temperature massime dell'aria sono inferiori di 2.5 °C (Gomez, Gaj e Reing 1998) e i gradi giorno di raffrescamento annuo sono inferiori del 40% rispetto alle aree urbane (Santamouris et al. 2001). Alcuni studi dimostrano che l'effetto di raffrescamento può estendersi fino a 200-400 m dai parchi (Pauleit e Duhme 2000) e che dovrebbero essere quindi largamente diffusi per apportare benefici su ampie zone.

Tuttavia i vantaggi ottenibili dall'aumento della presenza di alberi nelle zone urbane non si limitano alla riduzione della temperatura ambientale. Bell, Cole et al. (2008) dichiarano infatti che la presenza di alberi incrementa il valore estetico ed economico di una proprietà, contribuisce alla stabilizzazione del suolo, attenua il rumore urbano e fornisce un habitat a molte specie animali. Infine anche la qualità dell'aria viene influenzata positivamente dalla vegetazione: molti inquinanti vengono assorbiti o aderiscono alle superfici vegetali, il processo di fotosintesi riduce l'anidride carbonica atmosferica e la diminuzione della domanda di energia elettrica per il raffrescamento riduce ulteriormente l'emissione di inquinanti e di gas serra.

### 3.4.Green Roofs

Nelle aree urbane, in cui gli edifici sono molti e ravvicinati, lo spazio per la realizzazione di parchi ed aree verdi potrebbe non essere disponibile. E' possibile comunque sfruttare l'ampia superficie urbana occupata dalle coperture delle costruzioni, che in diverse città americane Chin et al. (2008) stimano essere il 20-25%, per la realizzazione di *green roofs*: un tetto ricoperto da uno strato di vegetazione.

La diffusione dei tetti verdi negli edifici urbani è considerata una promettente tecnica di mitigazione dell'UHI; la riduzione dell'albedo e l'incremento dei processi di evapotraspirazione permettono infatti di limitare le temperature epidermiche delle superfici, quindi di ridurre il flusso di calore entrante e il riscaldamento dell'aria. Ad esempio Bell, Berghage et al. (2008) riportano che a Chicago mentre la temperatura di un tetto convenzionale era di 76 °C, quella di vicino un *green roof* variava tra 33 °C e 48 °C e consentiva una temperatura inferiore di 4 °C dell'aria sovrastante.



**Figura 3.4.** Differenti strati presenti in un green roof (Lazzarin, Castellotti e Busato 2004)

La realizzazione dei tetti verdi tuttavia è un intervento costoso rispetto ad altri azioni di mitigazione, poiché è necessaria una struttura composta da diversi strati in grado di offrire alla vegetazione condizioni di vita stabili ed evitare effetti negativi all'edificio. Ogni strato installato assolve una specifica funzione (Figura 3.4): una membrana impermeabile e una guaina antiradice impediscono il degrado dei materiali sottostanti, un elemento drenante riceve l'acqua in eccesso dal terriccio e uno strato filtrante trattiene il terreno di coltura mentre permette il passaggio dell'acqua piovana.

La tipologia di vegetazione che può essere accolta dal *green roof* è funzione dello spessore dello strato di terriccio, dei carichi sopportabili dal solaio e del grado di

manutenzione che si è disposti ad effettuare; sulla base di queste caratteristiche i tetti verdi vengono classificati in estensivi ed intensivi (Figura 3.5). Si definiscono estensivi i tetti verdi che richiedono limitata manutenzione: sono realizzabili anche su coperture con inclinazione di 30° ma la varietà di piante che ospitano non è elevata poiché la scelta avviene tra specie resistenti alla siccità e a sviluppo contenuto. Al contrario i *green roofs* intensivi sono simili a parchi e possono ospitare qualsiasi tipologia di piante. Per contro necessitano di maggiore manutenzione ed irrigazione, il costo di installazione è superiore e non possono essere realizzati con interventi di retrofitting poiché gli elevati carichi statici e dinamici richiedono un'apposita progettazione.



**Figura 3.5.** Le tipologie di green roofs: estensivo (sinistra) ed intensivo (destra)

Molti studi sono stati effettuati sull'effetto di raffrescamento che i tetti verdi sono in grado di produrre. Lazzarin, Castellotti e Busato (2004) hanno studiato i benefici procurati da un *green roof* realizzato nell'ospedale di Vicenza; durante l'estate in condizioni di terreno secco il carico termico entrante nell'edificio era inferiore fino al 60% rispetto a un tetto convenzionale, mentre in condizioni di suolo bagnato i processi di evapotraspirazione hanno addirittura provocato l'inversione della direzione del flusso termico. L'impatto dei tetti verdi può inoltre interessare un'intera città in caso di utilizzo diffuso. Bell, Berghage et al. (2008) riportano che se a Chicago il 50% dei tetti fosse trasformato la temperatura esterna diminuirebbe di 0.1 -0.8 °C e irrigandoli si potrebbe ottenere una diminuzione di temperatura fino a 2 °C.

I benefici derivanti dall'installazione di un *green roofs* non si limitano alla mitigazione dell'effetto UHI; i numerosi effetti positivi sono quelli esposti nel paragrafo precedente ottenibili dall'aumento della vegetazione, ma senza la limitazione di dover disporre necessariamente di suolo non impegnato da edifici.

# Capitolo 4

## Serie storiche di Padova e Legnaro

Nelle sezioni precedenti il fenomeno isola di calore è stato analizzato da un punto di vista generale, esponendo classificazioni, cause e tecniche di mitigazione presenti in letteratura. Un'adeguata comprensione delle caratteristiche tipiche dell'effetto UHI è stata una condizione necessaria per poter focalizzare ora l'attenzione su di un caso specifico: il *Canopy Layer Urban Heat Island* di Padova.

Nel presente capitolo si intende indagare l'eventuale presenza del fenomeno nella città patavina, caratterizzata da dimensioni significativamente inferiori rispetto alle grandi metropoli oggetto di studio della maggior parte dei ricercatori. Nel caso in cui l'effetto UHI fosse presente, l'obiettivo è di fornire una quantificazione dell'intensità del fenomeno e di individuarne le dinamiche temporali.

Al fine di contestualizzare l'analisi del microclima padovano, si ritiene opportuno esporre innanzitutto alcune informazioni relative alle caratteristiche climatiche della regione Veneto e una breve descrizione del territorio padovano.

### 4.1. Il clima del Veneto e di Padova

Il Veneto presenta peculiari caratteristiche climatiche che sono il risultato dell'azione combinata di un insieme di fattori che agiscono a diverse scale. In primo luogo un ruolo chiave è svolto dalla collocazione della regione alle medie latitudini, da cui derivano caratteristici effetti stagionali. Secondariamente il clima veneto è condizionato dal posizionamento geografico in una zona di transizione tra l'area centro-europea, in cui predomina l'influsso delle grandi correnti occidentali e dell'oceano atlantico, e l'area sud-europea, dominata dall'influsso degli anticloni subtropicali e del mare Mediterraneo. Infine, ulteriori fattori influenzano in modo significativo il clima regionale definendo specifiche zone sottoclimatiche: l'appartenenza al bacino padano, la presenza del mar Adriatico, la complessità orografica delle zone montuose e la presenza del lago di Garda.

Il clima della regione Veneto quindi, pur rientrando nella tipologia mediterranea, presenta delle particolarità, dovute a una posizione climatologicamente di transizione che subisce contemporaneamente l'azione mitigatrice delle acque mediterranee, l'effetto orografico della catena alpina e la continentalità dell'area centro-europea. La presenza delle Alpi impedisce l'arrivo dei venti gelidi da nord, mentre sono assenti alcune delle caratteristiche tipicamente mediterranee quali l'inverno mite (in montagna, ma anche nell'entroterra, prevalgono effetti continentali) e la siccità estiva a causa dei frequenti temporali di tipo termoconvettivo.

Nel Veneto si distinguono due regioni climatiche: la zona alpina con clima montano di tipo centro-europeo e la Pianura Padana con clima continentale, all'interno della quale sono presenti altre due sub-regioni climatiche a carattere più mite, la zona gardesana e la fascia adriatica.

La città di Padova è situata in un territorio con clima continentale padano, contraddistinto da inverni rigidi ed estati calde. Tipico del clima padano è la scarsa circolazione e il frequente ristagno delle masse d'aria, ma il dato più caratteristico è l'elevata umidità, specialmente sui terreni irrigui, che rende afosa l'estate e dà origine a nebbie frequenti e fitte durante l'inverno. Le precipitazioni sono distribuite abbastanza uniformemente durante l'anno, ad eccezione dell'inverno che risulta la stagione più secca; nelle stagioni intermedie prevalgono le perturbazioni atlantiche, mentre in estate vi sono temporali assai frequenti, non di rado associati a grandine e, più raramente, a trombe d'aria. Prevale in inverno una situazione di inversione termica, accentuata dalla ventosità limitata, con accumulo di aria fredda in prossimità del suolo. Per tale ragione sono favoriti fenomeni come l'accumulo dell'umidità (che dà luogo alle nebbie) e la concentrazione degli inquinanti rilasciati al suolo (che arrivano di frequente a valori elevati nelle aree urbane) (ARPAV 2000).

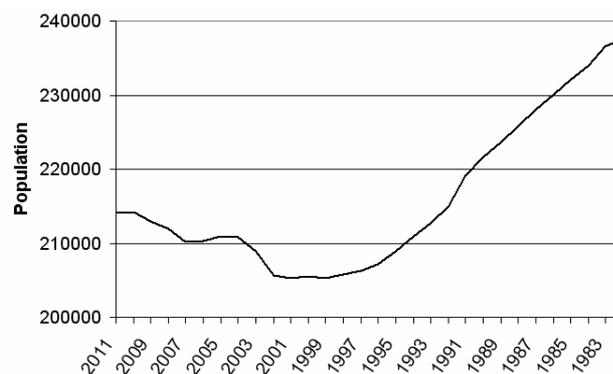
Al fine di quantificare la rigidità della stagione invernale e regolamentare il funzionamento degli impianti termici, il D.P.R. 26 agosto 1993 n. 412 ha suddiviso il territorio italiano in sei zone climatiche (A-F). La classificazione è funzione dei gradi-giorno delle diverse località, che rappresentano la somma, estesa a tutti i giorni di un periodo annuale convenzionale di riscaldamento, degli incrementi medi giornalieri necessari per raggiungere la soglia dei 20 °C. Il comune di Padova, contraddistinto da 2'383 gradi-giorno annui, appartiene alla fascia climatica E.

## 4.2. Il comune di Padova

La città di Padova è collocata all'estremità orientale della Pianura Padana circa 10 km a nord-est dei Colli Euganei e circa a 20 km ad ovest della Laguna Veneta. Il territorio comunale si sviluppa su 92.85 km<sup>2</sup> ad un'altezza media di 12 m sul livello del mare; è possibile affermare che il suolo è completamente pianeggiante dal momento che il punto più elevato è situato a 18 m s.l.m. mentre quello più depresso ha un'altitudine di 9 m s.l.m.

La popolazione residente nel comune patavino è continuamente aumentata dal momento dell'unificazione della penisola italiana fino all'inizio degli anni '80, successivamente è iniziata una riduzione demografica. Come è possibile osservare in Figura 4.1, un trend di incremento degli abitanti si è verificato nuovamente con l'inizio del terzo millennio: la nuova fase di crescita è stata determinata dal saldo migratorio positivo, capace di compensare la negatività del saldo naturale (differenza tra il numero di nati e di morti in un dato periodo).

Nell'anno 2011 i residenti nel comune erano 214'099 e la conseguente densità abitativa (un parametro spesso considerato correlato all'intensità dell'effetto isola di calore) di 2.300 abitanti/km<sup>2</sup>, la più elevata della regione Veneto e paragonabile a quella di Roma.



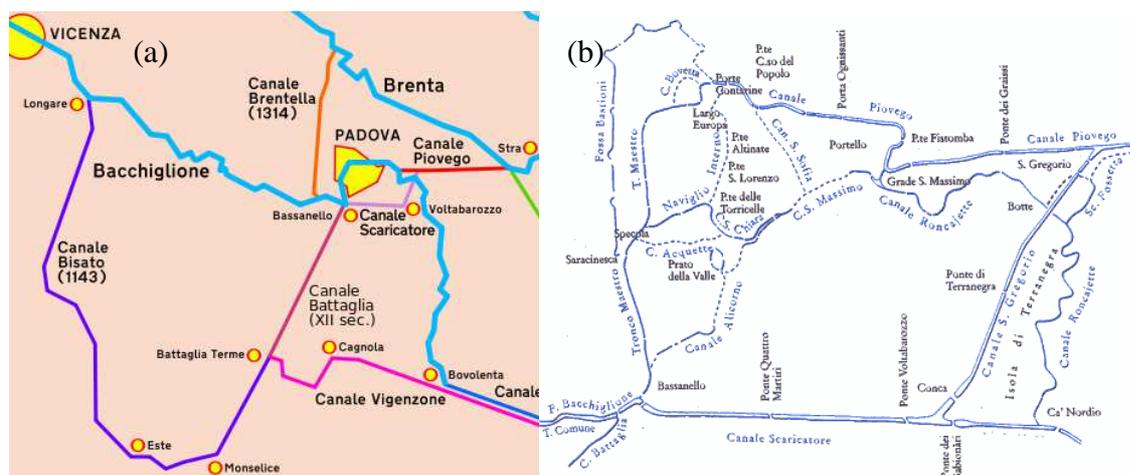
**Figura 4.1.** Evoluzione demografica della città di Padova dal 1982 (a destra) al 2011 (a sinistra)

Il centro cittadino è formato da isolati molto compatti di edifici con un'altezza media di circa 4-5 piani, spesso con cortili interni, che s'innalzano a strapiombo sulle strade urbane e generano gli *street canyon*. Nella zona centrale vi sono numerose piazze con dimensioni paragonabili agli isolati che le circondano; l'unica eccezione è Prato della

Valle, una delle più grandi piazze d'Europa caratterizzata da un'isola verde centrale circondata da un anello d'acqua.

La zona esterna alla circonvallazione è composta principalmente da quartieri residenziali, costituiti da condomini di varie forme e dimensioni, meno omogenei rispetto al centro dal punto di vista dello *skyline*. In queste aree la densità degli edifici è minore ed anche i *canyon* urbani assumono una forma più aperta. Le strade principali sono spesso alberate, in particolar modo nelle zone ovest e sud, inoltre la presenza di aree verdi è maggiore, tuttavia non si rileva la presenza di parchi urbani di dimensioni considerevoli oltre al parco Iris, con un'estensione di circa 6.5 ettari e situato in zona Forcellini. A est dell'agglomerato urbano è situata la zona industriale di Padova, un'area di 1'050 ettari a cavallo della tangenziale, coperta quasi interamente da capannoni e fabbricati produttivi, con una percentuale di verde minima (Di Gilio 2010).

La città del Santo è circondata e percorsa da numerosi corsi d'acqua, appartenenti al bacino idrografico dei fiumi Brenta e Bacchiglione (Figura 4.2.a). Il primo fiume percorre il confine nord del comune, mentre il secondo attraversa il centro urbano suddividendosi in numerosi rami (Figura 4.2.b). Il territorio è inoltre attraversato da alcuni canali artificiali: ad est della città il Canale Brentella porta al Bacchiglione le acque del Brenta, il Canale Piovego delimita le mura cinquecentesche e collega il centro città alla riviera del Brenta, mentre nella parte sud-est scorre il Canale Scaricatore, una sezione rettificata del Bacchiglione costruita per convogliare le acque in eccesso nella prosecuzione del fiume ed evitare esondazioni in città.



**Figura 4.2.** (a) Fiumi e canali che circondano il centro urbano di Padova  
(b) Vie d'acqua presenti nel centro cittadino (tratteggiate se interrato)

### 4.3.Modalità di acquisizione dei dati

Un'analisi dell'effetto isola di calore di Padova, il cui clima e territorio sono stati brevemente descritti nei precedenti paragrafi, richiede necessariamente la disponibilità di dati ambientali relativi alla città stessa ed a una località rurale limitrofa, utilizzata come riferimento per la quantificazione dell'alterazione termica. L'acquisizione delle informazioni, indispensabili per lo studio, può essere effettuata secondo due modalità:

- utilizzando stazioni meteorologiche fisse, pre-esistenti sul territorio o installate appositamente per l'analisi, che rendono disponibili serie temporali di dati;
- effettuando dei rilevamenti in "transetto", ossia posizionando degli strumenti di misura su di un veicolo, al fine di osservare la variazione dei parametri microclimatici in maniera continua nello spazio, dal territorio rurale a quello urbano.

Entrambe le tipologie di acquisizione presentano sia degli aspetti positivi che degli svantaggi e la scelta della modalità adatta dipende dall'obiettivo dell'analisi (valutazione preliminare o studio approfondito del fenomeno).

La scelta del primo metodo rende disponibili dei dati, riferiti ai luoghi selezionati, in maniera continua nel tempo, che consentono di valutare l'effetto delle condizioni meteorologiche sul fenomeno UHI e di osservare ciclicità giornaliere e stagionali. Inoltre, se i dati sono forniti da una stazione esistente, possono essere relativi ad ampi intervalli temporali e consentire notevoli semplificazioni dal punto di vista operativo, permettendo di iniziare velocemente la fase di esame. In questo caso l'analisi dovrebbe tuttavia limitarsi alle sole grandezze misurate dalla stazione, la cui posizione potrebbe non essere sufficientemente rappresentativa del territorio e la variabilità spaziale di parametri microclimatici non verrebbe considerata.

L'utilizzo della seconda modalità di acquisizione permette di ottenere una "mappatura" della città, sebbene una completa rappresentazione richieda un elevato numero di transetti. Lo svantaggio maggiore consiste nell'impossibilità di comparare direttamente i dati rilevati dalla stazione mobile, dal momento che vengono raccolti in istanti diversi con differenti condizioni climatiche. E' necessario infine evitare che il calore generato dai veicoli alteri le misure rilevate dal sensore.

Naturalmente le due tipologie di raccolta non si escludono a vicenda, al contrario l'uso integrato di serie di dati temporali e spaziali è in grado di fornire maggiori informazioni per la quantificazione del fenomeno UHI. L'analisi dei dati provenienti da stazioni meteorologiche esistenti può costituire un adeguato punto di partenza per uno studio, dal momento che non è necessario l'impiego di risorse per l'acquisizione. Dopo questa valutazione iniziale, potrebbero essere necessari dei rilevamenti con stazioni mobili per approfondire la conoscenza e la variabilità spaziale delle alterazioni microclimatiche.

#### **4.4.Dati ARPAV**

Al fine di investigare il fenomeno isola di calore della città di Padova si è ritenuto opportuno, per le motivazioni esposte nel precedente paragrafo, esaminare innanzitutto le serie di dati temporali raccolte dalle stazioni meteorologiche esistenti. I dati che sono stati analizzati provengono da due stazioni (Tabella 4.1) situate nella provincia padovana e gestite dall'ARPAV, l'Agenzia Regionale per la Protezione e Prevenzione Ambientale del Veneto<sup>1</sup>.

La stazione meteorologica di riferimento della città di Padova, in seguito alla dismissione di quella situata presso l'aeroporto "Gino Allegri", è quella dell'Orto Botanico, il più antico orto botanico universitario ancora esistente al mondo, che nel 1997 è stato inserito dall'UNESCO nella lista dei patrimoni dell'umanità. Ubicata nel centro cittadino in un luogo con un'altitudine di 12 m sul livello del mare, la stazione è dotata di strumenti per la misura della temperatura e dell'umidità dell'aria a 2 m di altezza, della direzione e dell'intensità del vento a 5 m, della quantità di precipitazioni e della radiazione globale. I dati riguardanti la temperatura dell'aria, la velocità del vento e la quantità di pioggia sono stati necessari per soddisfare la richiesta del Work Package 5.1 del progetto europeo Urban Heat Islands (Programma Central Europe): un progetto che coinvolge diverse aree urbane comunitarie tra cui Vienna, Praga, Stoccarda, Lodz, Budapest e Lubiana. L'intervallo di tempo minimo tra le rilevazioni ottenute è di un'ora, mentre il periodo di tempo al quale si riferiscono i dati è compreso tra il 01/10/1993 e il 31/03/2012.

---

<sup>1</sup>Gli obiettivi dell'ARPAV sono principalmente due:

- la protezione, realizzata attraverso controlli ambientali per la tutela della salute della popolazione e della sicurezza del territorio;
- la prevenzione, concretizzata attraverso la ricerca, la formazione, l'informazione e l'educazione ambientale.

Stazione	Longitudine	Latitudine	Altitudine
Stazione meteorologica dell'Orto Botanico di Padova	45° 23' 58" N	11° 52' 48" E	12 m
Stazione agrometeorologica di Legnaro	45° 20' 60" N	11° 57' 25" E	8 m

**Tabella 4.1.** Coordinate geografiche e altitudini delle stazioni di Padova e di Legnaro

Al fine di quantificare l'intensità dell'effetto UHI è stato necessario richiedere informazioni ambientali ad una seconda stazione, situata in prossimità della città padovana ma in un'area rurale. La stazione esistente che maggiormente rispetta le specifiche presentate è quella agrometeorologica di Legnaro, separata dall'Orto Botanico da una distanza in linea d'aria di circa 8.5 km (Figura 4.3) e posta ad un'altitudine di 8 m s.l.m. Oltre alle grandezze fisiche che sono rilevate all'Orto Botanico (unica differenza è la quota alla quale viene determinata la velocità del vento: 10 m rispetto ai 5 m di Padova), a Legnaro vengono misurate anche la temperatura del suolo a 0-10-20-30 cm di profondità e la bagnatura fogliare. Le tipologie di informazioni richieste sono state le stesse di Padova e anche in questo caso l'intervallo di tempo minimo tra i dati forniti è di un'ora, mentre è antecedente di quasi due anni il momento della prima rilevazione a disposizione, datata 01/01/1992.



**Figura 4.3.** Posizione geografica della stazione meteorologica dell'Orto Botanico di Padova e della stazione agrometeorologica di Legnaro (Google Maps)

#### 4.4.1. Analisi generale

Il parametro che è stato utilizzato per la quantificazione del *Canopy Layer Urban Heat Island* di Padova è l'intensità dell'isola di calore (UHII – *Urban Heat Island Intensity*), definita come differenza di temperatura tra la città e la zona rurale, nel caso in esame Legnaro. I dati relativi alla velocità del vento non sono direttamente confrontabili per le due località, dal momento che sono stati rilevati ad altezze diverse e delle comparazioni sono quindi possibili solamente tra misure effettuate dalla stessa stazione. Possono essere utilizzati tuttavia per constatare la correlazione già verificata in letteratura tra UHII e ventosità, similmente a quanto può essere eseguito con le informazioni relative alle precipitazioni.

Il periodo di tempo considerato nell'analisi è di diciotto anni, dal gennaio 1994 al dicembre 2011. In questo intervallo tuttavia non tutti i dati sono stati effettivamente ottenuti dalle stazioni, alcuni giorni sono privi di rilevazioni e talvolta lo sono alcuni mesi: agosto e settembre 1995 ed agosto 1996 all'Orto Botanico. Una prima valutazione dell'effetto UHI è stata effettuata attraverso il calcolo delle differenze rilevate nelle due stazioni, fatta eccezione per i mesi segnalati, tra le temperature medie mensili e tra le medie delle temperature massime e minime giornaliere di ogni mese (Tabella 4.2).

		Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Medie
2011	$\Delta T_m$	0.40	0.70	0.50	0.70	0.70	0.60	0.60	0.90	0.30	0.50	0.70	0.80	0.62
	$\Delta T_{max}$	0.40	-0.10	0.60	0.60	0.60	0.30	0.10	0.50	0.00	-0.30	-0.50	-0.10	0.18
	$\Delta T_{min}$	0.80	1.70	1.10	1.80	1.90	1.80	1.80	2.60	1.40	1.80	1.30	1.60	1.63
2010	$\Delta T_m$	0.30	0.50	0.60	0.50	0.20	0.30	0.80	0.60	0.10	-0.30	0.10	0.60	0.36
	$\Delta T_{max}$	-0.10	0.20	0.50	0.70	0.10	0.00	0.60	0.20	0.00	-0.70	-0.30	0.30	0.13
	$\Delta T_{min}$	0.60	1.00	1.10	1.60	1.00	1.00	2.00	2.00	1.10	0.60	0.40	1.10	1.13
2009	$\Delta T_m$	0.10	-0.10	-0.40	-0.10	0.20	0.10	0.10	0.20	0.00	0.00	0.00	0.50	0.05
	$\Delta T_{max}$	0.00	-0.20	-0.90	0.20	-0.10	0.00	0.10	0.00	-0.50	-0.50	-0.50	0.00	-0.20
	$\Delta T_{min}$	0.70	0.60	0.60	0.60	1.10	1.10	1.40	1.50	1.00	1.20	0.70	1.20	0.98
2008	$\Delta T_m$	1.00	0.90	0.90	0.60	0.80	1.60	1.20	0.90	0.50	0.30	0.00	-0.10	0.72
	$\Delta T_{max}$	0.30	0.30	0.60	0.70	1.10	1.60	0.80	1.10	0.10	-0.60	-0.60	-0.20	0.43
	$\Delta T_{min}$	1.70	1.70	1.50	1.50	1.70	2.20	2.50	1.70	1.50	1.40	0.50	0.30	1.52
2007	$\Delta T_m$	0.30	0.50	0.40	0.70	0.40	0.50	1.10	1.00	0.60	0.50	0.80	1.10	0.66
	$\Delta T_{max}$	-0.10	0.20	0.20	0.50	0.60	0.40	0.60	0.90	0.10	-0.50	-0.20	0.60	0.28
	$\Delta T_{min}$	1.10	1.10	1.10	2.10	1.00	1.60	2.90	2.30	1.80	1.50	1.70	1.80	1.67
2006	$\Delta T_m$	0.50	0.50	0.10	0.70	0.60	1.00	1.30	0.90	0.10	-0.50	0.60	0.40	0.52
	$\Delta T_{max}$	0.20	0.00	-0.30	0.80	0.70	1.10	1.10	0.90	-0.60	-1.70	-0.60	-0.30	0.11
	$\Delta T_{min}$	1.10	1.20	0.50	1.30	1.20	2.00	2.70	1.60	1.50	0.90	1.90	1.00	1.41

2005	$\Delta T_m$	0.50	0.40	0.90	0.60	0.70	0.80	0.40	0.30	0.10	0.10	0.00	0.50	0.44
	$\Delta T_{max}$	0.10	0.10	0.80	0.80	1.00	0.80	0.60	0.40	-0.20	-0.50	-0.50	0.20	0.30
	$\Delta T_{min}$	1.00	1.30	1.50	1.50	1.50	2.00	1.20	1.00	1.10	0.80	0.50	1.00	1.20
2004	$\Delta T_m$	0.60	0.50	0.30	-0.20	-0.20	-0.40	0.90	0.80	0.60	0.00	0.20	0.30	0.28
	$\Delta T_{max}$	0.40	0.40	0.50	0.20	0.20	0.20	1.00	0.70	-0.20	-0.50	-0.40	-0.30	0.18
	$\Delta T_{min}$	1.10	0.70	0.60	0.10	0.50	0.30	2.40	2.20	2.30	0.80	1.00	0.80	1.07
2003	$\Delta T_m$	0.80	0.90	1.10	1.00	1.00	1.00	1.60	1.50	0.90	0.60	0.50	0.80	0.98
	$\Delta T_{max}$	0.60	1.10	1.20	1.70	1.80	1.60	2.10	2.10	1.10	0.20	0.10	0.60	1.18
	$\Delta T_{min}$	1.10	1.80	2.10	1.30	2.00	2.20	2.70	2.70	2.30	1.50	1.10	1.20	1.83
2002	$\Delta T_m$	1.20	0.60	1.10	0.80	0.60	0.60	0.70	0.40	0.30	0.20	0.30	0.20	0.58
	$\Delta T_{max}$	0.70	0.60	1.00	1.20	1.00	0.80	1.20	1.00	0.60	0.20	0.00	0.30	0.72
	$\Delta T_{min}$	2.40	1.10	2.20	1.50	1.10	1.50	1.50	0.90	1.30	1.10	0.90	0.40	1.33
2001	$\Delta T_m$	0.30	1.20	0.80	1.10	1.00	1.10	0.60	1.00	0.00	0.40	0.90	1.10	0.79
	$\Delta T_{max}$	0.00	0.20	0.00	0.50	1.10	1.10	0.40	0.50	-0.60	0.00	0.50	0.80	0.38
	$\Delta T_{min}$	0.90	2.70	1.60	2.30	2.10	2.20	1.50	2.80	1.80	1.70	1.90	2.20	1.98
2000	$\Delta T_m$	1.00	0.80	0.60	0.70	0.50	1.10	1.10	1.20	1.60	1.60	0.90	0.60	0.98
	$\Delta T_{max}$	-0.20	-0.90	-0.90	-0.40	-0.40	-0.30	-0.80	-1.40	-0.80	0.30	-0.10	-0.50	-0.53
	$\Delta T_{min}$	1.90	2.30	2.10	2.00	2.00	3.20	3.30	3.80	3.60	2.40	2.10	1.40	2.51
1999	$\Delta T_m$	0.50	0.80	0.50	0.30	0.20	0.10	0.10	-0.10	0.10	0.20	0.20	0.30	0.27
	$\Delta T_{max}$	-0.70	-0.90	-0.60	-0.60	-1.00	-1.10	-1.10	-1.40	-1.50	-1.00	-0.60	-0.80	-0.94
	$\Delta T_{min}$	1.20	2.20	1.90	1.90	1.40	1.40	1.60	1.30	1.70	1.10	1.10	1.40	1.52
1998	$\Delta T_m$	0.20	0.80	0.60	-0.10	0.10	0.70	-0.90	0.30	0.00	-0.10	0.20	0.70	0.21
	$\Delta T_{max}$	-0.70	-1.00	-0.70	-1.10	-0.80	0.10	-1.90	-0.90	-1.00	-1.10	-0.60	-0.40	-0.84
	$\Delta T_{min}$	1.00	2.40	2.30	0.90	1.00	1.90	0.60	2.20	1.40	1.20	1.40	1.40	1.48
1997	$\Delta T_m$	0.30	0.60	0.90	0.50	0.30	0.10	0.50	0.50	1.10	0.10	0.00	0.10	0.42
	$\Delta T_{max}$	-0.40	-0.50	-0.60	-0.70	-0.60	-0.70	-0.80	-1.40	-1.20	-1.20	-0.90	-0.70	-0.81
	$\Delta T_{min}$	0.90	1.70	2.90	2.10	1.70	1.00	2.20	2.10	3.40	1.70	0.90	0.70	1.78
1996	$\Delta T_m$	0.20	0.60	0.80	0.60	0.60	0.40	0.50		-0.50	-0.50	0.00	0.10	0.23
	$\Delta T_{max}$	-0.30	-0.60	-0.40	-0.50	-0.60	-0.60	-0.80		-1.80	-1.90	-0.80	-0.70	-0.75
	$\Delta T_{min}$	0.70	1.70	2.30	1.80	1.80	2.00	2.20		0.80	0.50	0.90	0.50	1.27
1995	$\Delta T_m$	1.10	1.00	0.80	0.80	0.50	0.20	0.50			1.00	0.60	0.30	0.57
	$\Delta T_{max}$	-0.20	-0.20	-0.40	-0.40	-0.40	-0.80	-0.80			-1.30	-0.50	-0.40	-0.98
	$\Delta T_{min}$	2.40	2.10	2.10	2.20	1.50	1.20	2.10			3.10	1.90	1.10	1.43
1994	$\Delta T_m$	0.90	0.80	1.10	0.70	0.70	0.70	0.90	0.70	0.30	0.60	0.30	0.60	0.69
	$\Delta T_{max}$	-0.30	-0.20	-0.40	-0.50	-0.50	-0.50	-0.70	-1.10	-1.30	-0.70	-0.30	-0.10	-0.55
	$\Delta T_{min}$	2.00	1.80	2.70	1.80	2.20	2.10	2.50	2.40	1.30	2.00	1.00	1.20	1.92
	$\Delta T_m$	0.57	0.67	0.64	0.55	0.49	0.58	0.67	0.62	0.36	0.26	0.35	0.49	0.52
Medie	$\Delta T_{max}$	-0.02	-0.08	0.01	0.21	0.21	0.22	0.09	0.12	-0.43	-0.66	-0.38	-0.09	-0.07
	$\Delta T_{min}$	1.26	1.62	1.68	1.57	1.48	1.71	2.06	1.84	1.63	1.41	1.18	1.13	1.55

**Tabella 4.2.** Differenze Padova-Legnaro tra le temperatura medie, massime e minime mensili.

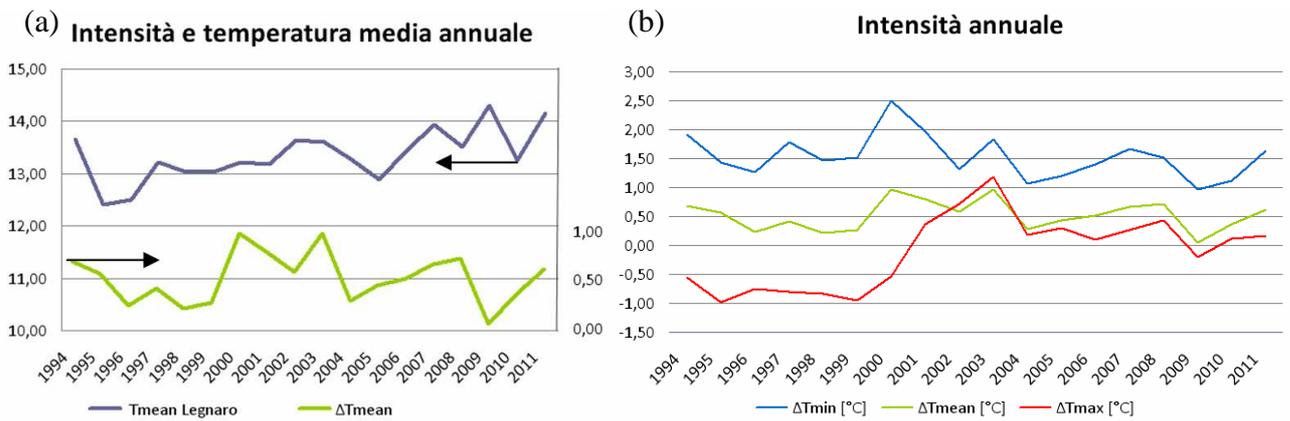
Dal confronto tra le temperature storiche della città del Santo e Legnaro emergono alcune differenze nei rispettivi microclimi. La temperatura media annuale di Padova è maggiore di circa 0.5 °C, la media annuale delle temperature minime giornaliere è superiore di circa 1.5 °C rispetto alla vicina zona rurale, mentre dall'osservazione del dato medio annuale non sembrano risultare disuguaglianze tra le temperature massime diurne. Sebbene queste informazioni medie sintetizzino delle rilevazioni effettuate in anni, stagioni, momenti della giornata differenti e nonostante valori positivi possano essere compensati da valori negativi, è tuttavia possibile affermare che:

- l'isola di calore della città di Padova, se le due stazioni utilizzate possono essere considerate rappresentative del territorio urbano e rurale, non assume un'intensità annuale paragonabile a quella delle metropoli analizzate in letteratura, caratterizzate da un'alterazione termica annua maggiore;
- similmente a quanto osservato nella maggior parte delle città dai ricercatori, il fenomeno UHI padovano è prevalentemente notturno, dal momento che la media annuale delle temperature minime giornaliere della città è superiore a quella della zona rurale.

#### *4.4.2. Analisi annuale*

L'osservazione dei dati generali di sintesi precedentemente esposti non è sufficiente, poiché eventuali trend e variabilità temporali non sono in tal modo individuabili. Sorge quindi la necessità di scomporre le medie globali e di osservare le informazioni ad un livello di aggregazione inferiore.

E' opportuno innanzitutto considerare le intensità medie, massime e minime, che si sono verificate ogni anno. L'intensità media nei 18 anni analizzati varia da un valore prossimo a 0 °C nel 2009, fino ad un'alterazione massima di 1 °C nel 2001 e nel 2003. Sembra plausibile aspettarsi che l'UHII assuma i valori massimi in anni caratterizzati da temperature mediamente elevate, tuttavia i dati contraddicono questa aspettativa. Dall'osservazione del grafico in Figura 4.4.a, che mette a confronto le intensità e le temperature medie annuali di Legnaro, risulta infatti che nell'anno con la temperatura media maggiore nell'intervallo di tempo considerato (2009) l'intensità è stata nulla, mentre nell'anno con la temperatura media meno elevata (1995) l'UHII ha assunto valori ordinari.

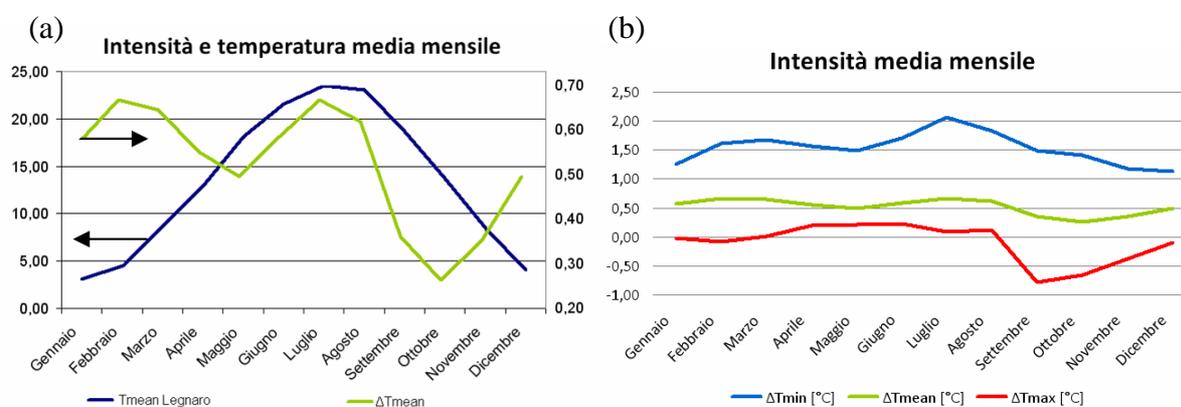


**Figura 4.4.** (a) Confronto tra UHII media annuale e la temperatura media annuale di Legnaro  
 (b) Andamento negli anni dell'UHII media, “massima” media (differenza tra le temperature massime giornaliere) e “minima” media (differenza tra le temperature minime giornaliere)

In Figura 4.4.b. è rappresentato graficamente l'andamento annuale dell'UHII media comparato con l'andamento delle differenze di temperatura massima e minima tra Padova e Legnaro; differenze a cui in seguito ci si riferisce impropriamente con i termini intensità “massima” e “minima”, nonostante possano essere relative a differenti istanti della giornata. L'intensità dell'isola di calore padovana nelle ore notturne varia da 1 °C nel 2009 ai 2.5 °C nel 2000 e la curva che ne rappresenta l'evoluzione (linea azzurra) è simile a quella dell'intensità media (linea verde) traslata verso l'alto. Al contrario, l'andamento annuale dell'intensità calcolata nell'istante più caldo del giorno è considerevolmente diversa dall'UHII media e il solo valore medio (circa 0 °C) non può essere un indicatore efficace della situazione. Il grafico evidenzia infatti un cambiamento nei valori tipici dell'intensità “massima” (linea rossa) avvenuto nell'anno 2001. Il dato medio nullo è in realtà risultato della compensazione tra il periodo 1994-2000, durante il quale le temperature massime di Padova erano inferiori a quelle di Legnaro in media di 0.7 °C, e il periodo 2001-2011, caratterizzato da un'intensità positiva media di 0.33 °C. E' quindi possibile affermare che dal 2001 le temperature massime di Padova superano mediamente quelle di Legnaro, mentre precedentemente accadeva l'opposto. Nonostante le informazioni ricavate siano interessanti è fondamentale considerarne i limiti; un'analisi annuale permette di evidenziare eventuali trend in corso o mutazioni negli andamenti, ma la sintesi dei dati è ancora notevole. Le intensità invernali sono infatti considerate alla pari rispetto a quelle estive, le prime sono tuttavia un fenomeno favorevole mentre le seconde sono un evento indesiderato. Al fine di valutare diversamente intensità con conseguenze distinte è opportuno osservare i dati ottenuti dalle stazioni suddividendoli mensilmente.

### 4.4.3. Analisi mensile

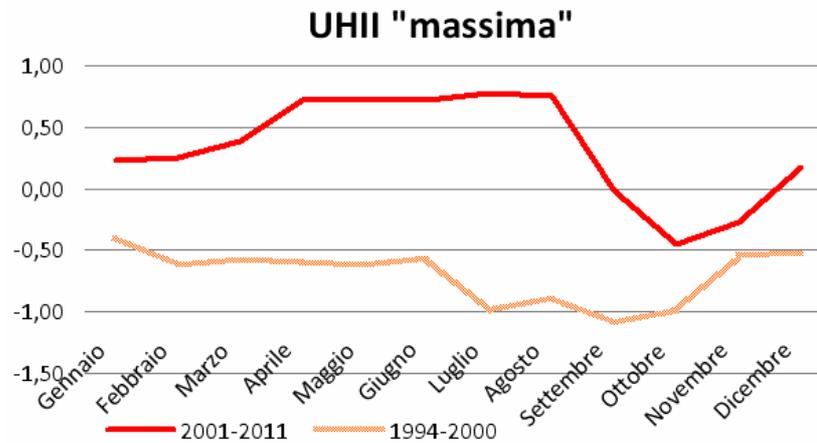
L'intensità media annuale di  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  è il risultato dall'aggregazione delle intensità medie mensili, comprese tra  $0.26\text{ }^{\circ}\text{C}$  di ottobre e  $0.67\text{ }^{\circ}\text{C}$  di luglio. Nella città di Padova quindi la maggiore UHII media mensile si osserva nel periodo estivo, similmente a quanto accade in molte delle metropoli studiate in letteratura. Tuttavia, come è possibile osservare in Figura 4.5.a l'andamento dell'intensità media nel corso dei mesi (linea verde) calcolata negli ultimi diciotto anni non imita l'evoluzione della temperatura media (linea blu): i mesi con UHII superiore a  $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  sono febbraio, marzo, luglio e agosto, mentre nei mesi autunnali si verificano mediamente intensità inferiori a  $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 4.5.** (a) Confronto tra UHII media mensile e temperatura media mensile  
(b) Andamento nei mesi dell'UHII media, “massima” media (differenza tra le temperature massime) e “minima” media (differenza tra le temperature minime)

Un'evoluzione simile a quella dell'UHII media caratterizza la differenza tra le temperature minime di Padova e Legnaro: massima a luglio con  $2.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  e minima a dicembre con  $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  (linea azzurra in Figura 4.5.b). Differentemente, l'intensità “massima” (linea rossa in Figura 4.5.b) presenta un andamento opposto all'UHII, eccezion fatta per gli ultimi quattro mesi. Tuttavia, alla luce di quanto esposto nel paragrafo precedente, questi dati devono essere suddivisi tra quelli antecedenti e quelli successivi all'anno 2000. La ripartizione permette infatti di considerare il mutamento avvenuto e di isolare quei dati che sembrano non essere rappresentativi della situazione attuale. Il grafico in Figura 4.6 rappresenta graficamente la differenza di UHII “massima” tra gli intervalli 1994-2000 e 2001-2011: intensità medie sempre negative fino al 2000, assumono valori medi positivi negli anni successivi, ad esclusione del periodo autunnale. Il cambiamento avvenuto ha interessato ogni mese dell'anno e ha

trasferito il picco da gennaio (seppur negativo) all'intervallo di mesi aprile-agosto (con valore medio poco superiore a 0.7 °C); un periodo indubbiamente meno favorevole dal punto di vista energetico e di thermal comfort.



**Figura 4.6.** Confronto tra la differenza media mensile delle temperature massime giornaliere di Padova e di Legnaro negli anni 1994-2000 e 2001-2011

#### 4.4.4. *Analisi oraria*

Al fine di completare l'analisi e di esaminare le dinamiche temporali dell'effetto isola di calore a Padova si è ritenuto opportuno classificare i dati disponibili in base all'orario di rilevamento. Dall'aggregazione delle informazioni orarie di ogni mese e di ogni anno (rappresentate graficamente in Figura 4.7) risulta che i valori massimi di UHII si verificano mediamente tra le 23:00 e le 6:00 mentre le intensità meno elevate si osservano negli orari 16:00-18:00 e 9:00-11:00. Tuttavia la sintesi di dati relativi ad anni e stagioni diverse, nelle quali il sole sorge e tramonta ad orari differenti, non permette di quantificare in maniera adeguata il fenomeno. Per poter analizzare il fenomeno con le sue attuali dinamiche deve essere innanzitutto considerato il cambiamento avvenuto nel 2001, che ha determinato un'intensità positiva anche durante le ore più calde della giornata. Tale trasformazione è in parte osservabile in Figura 4.8.a, nella quale sono rappresentate le evoluzioni giornaliere medie dell'intensità negli ultimi diciotto anni, mentre è individuabile con maggior chiarezza in Figura 4.8.b, che confronta le UHII medie orarie degli anni precedenti con quelli successivi al 2000.

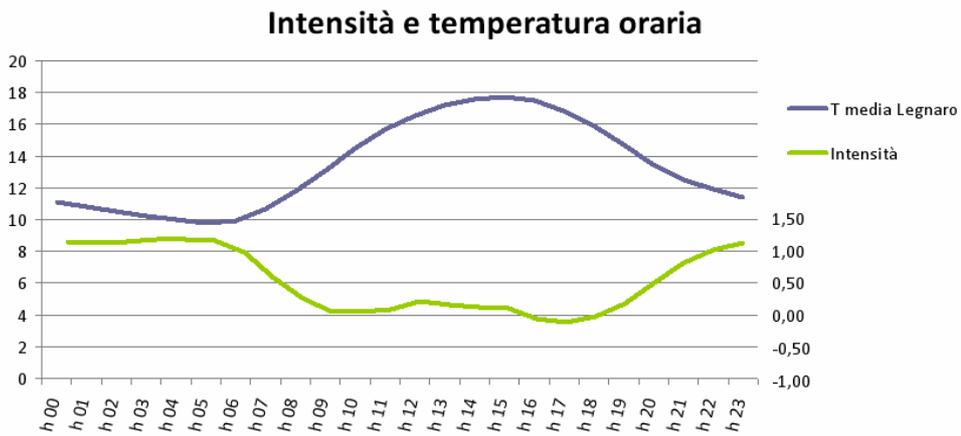


Figura 4.7. Confronto tra UHII media oraria e temperatura media oraria

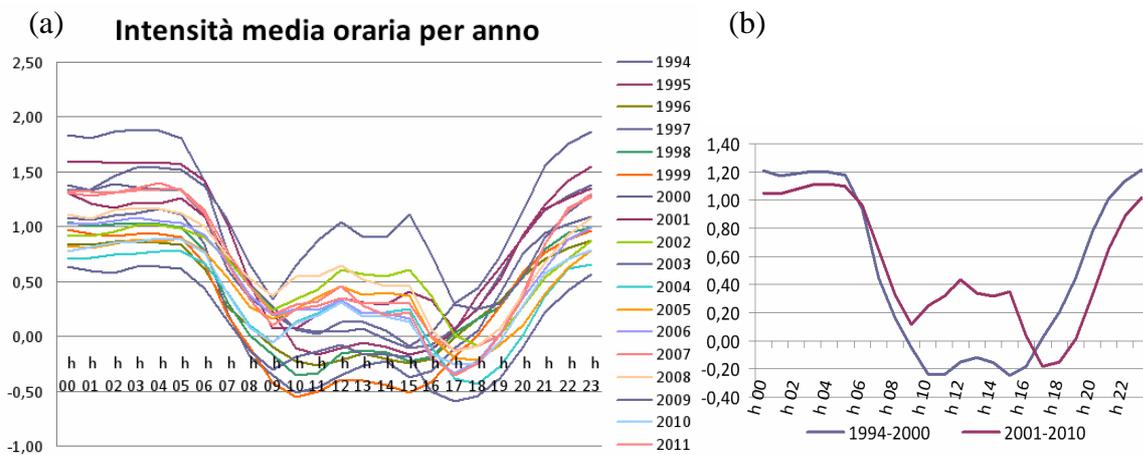


Figura 4.8. (a) Evoluzione giornaliera media dell'UHII negli ultimi diciotto anni  
(b) Confronto tra l'evoluzione giornaliera dell'UHII negli anni 1994-2000 e 2001-2011

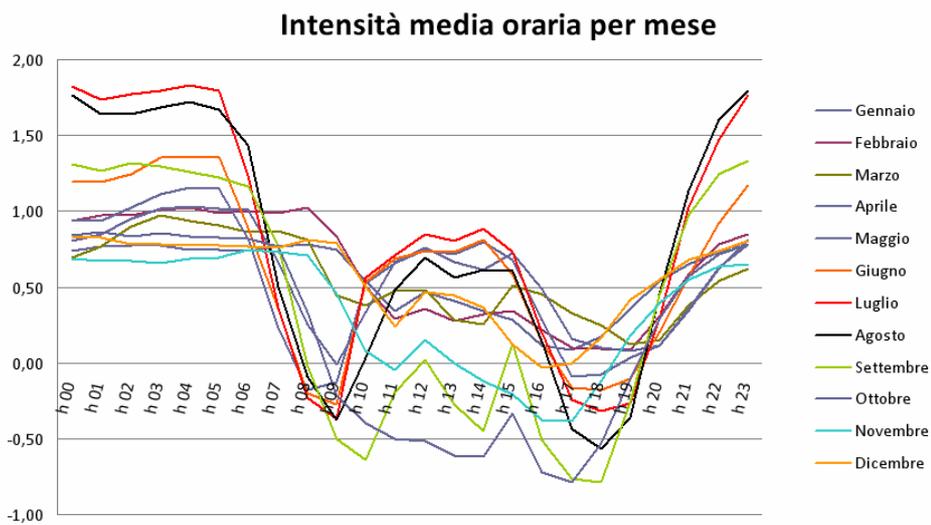


Figura 4.9. Evoluzione giornaliera dell'UHII nei diversi mesi, per gli anni successivi al 2000

La dinamica temporale giornaliera nel nuovo millennio è mediamente cambiata: l'istante di intensità minima assoluta nel pomeriggio è ritardato dalle 15:00 alle 17:00, il minimo relativo della mattinata assume valori maggiori e infine il massimo giornaliero, precedentemente negativo, è ora di 0.4 °C. Tali differenze sono molto rilevanti e per tale ragione nella successiva analisi verranno considerati solamente i dati successivi al 2000, al fine di descrivere il fenomeno con le sue caratteristiche attuali.

Una valutazione realistica dell'impatto dell'effetto isola di calore può essere effettuata soltanto disaggregando i dati mensilmente (Figura 4.9). Le maggiori differenze di temperatura tra Padova e Legnaro si verificano senza eccezione durante il periodo notturno ma variano in valore nei diversi mesi: l'UHII maggiore è a luglio e agosto quando raggiunge in media 1.8 °C, giugno e settembre presentano intensità massime inferiori di circa mezzo grado, mentre nei rimanenti mesi sono comprese tra 0.7 °C e 1 °C. Una notevole variabilità si osserva anche nel massimo relativo diurno: da aprile ad agosto esiste un'alterazione termica uguale o superiore a 0.7 °C tra le 12:00 e le 14:00 (picco a luglio con 0.8 °C), da settembre a novembre il massimo relativo è negativo o quasi nullo e nei restanti mesi è compreso tra 0.4 °C e 0.5 °C. Il periodo estivo, luglio in particolare, è quindi il periodo in cui l'UHII assume i valori maggiori sia durante il giorno che durante la notte, mentre nel periodo invernale l'intensità non è mai negativa. Un'ultima osservazione riguarda la morfologia delle curve prodotte dalla variazione dell'UHII durante un giorno: nei mesi con temperature più miti, da aprile a settembre, le curve presentano alle ore 9:00 e alle 18:00 due minimi con intensità simile, al contrario da novembre a marzo il valore del minimo mattutino è sempre superiore rispetto al minimo assoluto pomeridiano.

#### *4.4.5. Intensità massime*

Il fenomeno UHI della città di Padova è stato descritto fino a questo momento in termini medi. Nel corrente paragrafo si osserveranno invece alcune situazioni estreme, durante le quali l'intensità ha raggiunto valori particolarmente elevati.

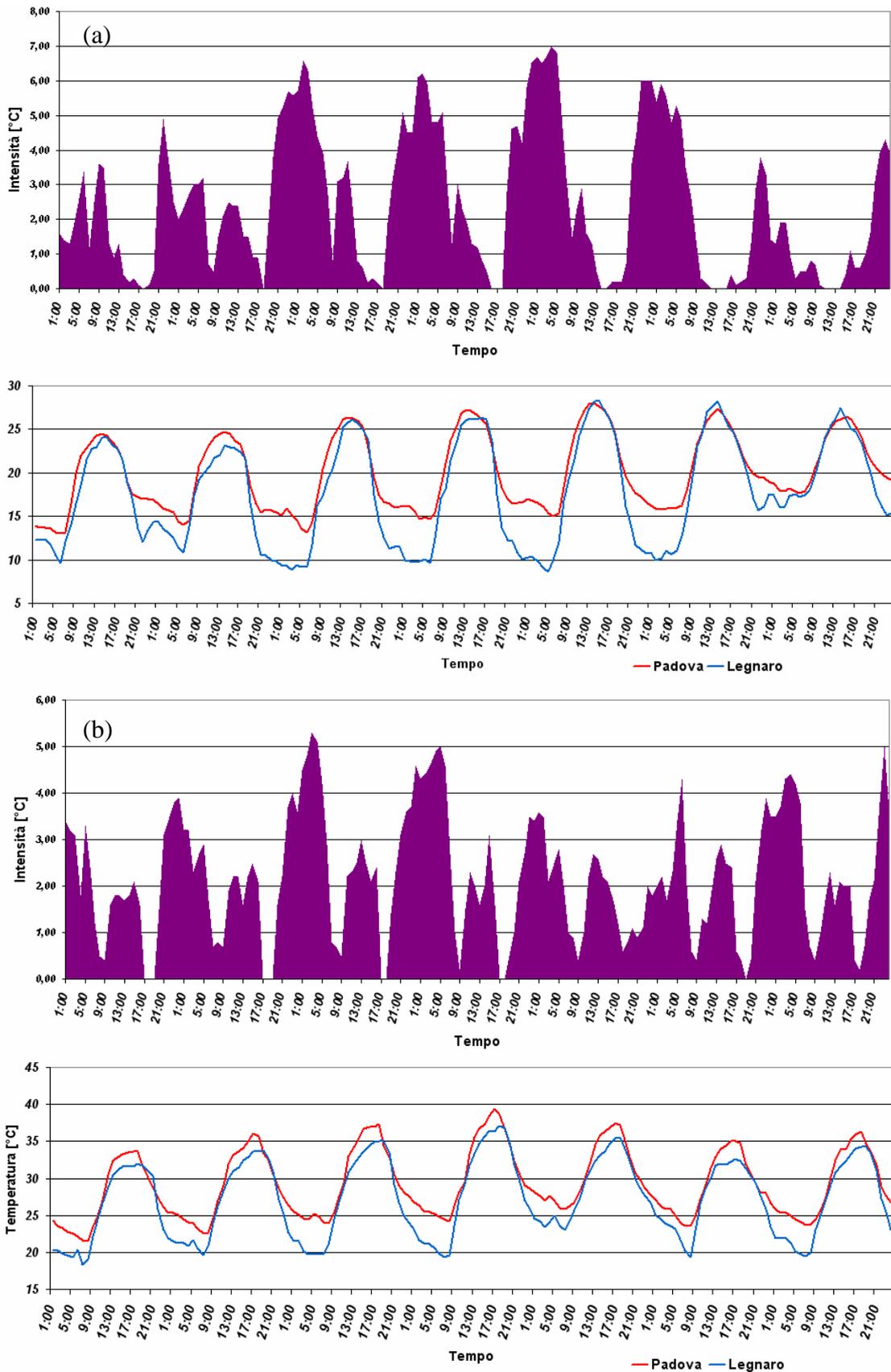
L'UHII è mediamente maggiore durante i mesi di luglio e agosto, quando raggiunge quasi 2 °C durante le ore notturne e poco meno di 1 °C nelle ore centrali della giornata. Tuttavia i valori massimi istantanei annuali dell'intensità non si verificano solamente d'estate, ma anche durante febbraio, marzo e settembre, come è possibile osservare nella seguente tabella:

	UHII	data	ora		UHII	data	ora
1994	6,7	12-lug	01:00	2003	5,3	04-ago	03:00
1995	6,3	27-ott	05:00	2004	5,5	10-lug	04:00
1996	6,9	08-set	00:00	2005	4,1	14-feb	22:00
1997	7,3	19-set	01:00	2006	5,6	19-lug	04:00
1998	6,2	09-ago	00:00	2007	5,8	20-lug	03:00
1999	4,6	27-feb	01:00	2008	4,7	22-feb	01:00
2000	7,0	01-ago 12-set	05:00	2009	4,9	01-set	02:00
2001	5,1	10-set	23:00	2010	5,6	19-dic	01:00
2002	5,3	29-mar	03:00	2011	5,9	28-ago	00:00

**Tabella 4.3.** UHII massime annuali accompagnate da data e ora di rilevamento.

La differenza di temperatura maggiore tra Padova e Legnaro nell'intervallo di tempo analizzato è stata di 7.3 °C ed è avvenuta nel settembre 1997. In altri anni si sono raggiunti i 7 °C, ma l'intensità massima annuale più frequente è di circa 5 °C. Nella città patavina, similmente a quanto accade in città con dimensioni maggiori, l'UHII può quindi raggiungere valori molto rilevanti, seppure occasionalmente.

Nonostante l'osservazione delle UHII massime sia importante, esaminare una serie di giornate consecutive che presentano intensità elevate è maggiormente significativo per giudicare l'impatto dell'effetto isola di calore. In Figura 4.10 sono state perciò rappresentate intensità positive e temperature delle due settimane caratterizzate da maggiore alterazione termica negli ultimi diciotto anni. I due intervalli sono accomunati dall'assenza di precipitazioni e da velocità del vento nulla; condizioni climatiche favorevoli all'effetto UHI. Tra l'8 e il 14 settembre 2000 la differenza di temperatura notturna tra Padova e Legnaro è stata di 6 °C per quattro giorni consecutivi, mentre durante la mattinata è stata frequentemente di 3 °C. La seconda settimana rappresentata in figura (2-8 agosto 2003) è contraddistinta da intensità leggermente inferiori, massime notturne di 4-5 °C e diurne di 2-3 °C, ma è sicuramente più critica, poiché relativa ad un'estate eccezionalmente calda. Le temperature di Padova infatti, a causa dell'effetto UHI hanno sfiorato nei giorni considerati i 40 °C e sono scese raramente sotto 25 °C.



**Figura 4.10.** (a) UHII e temperature a Padova e Legnaro dall'8 al 14 settembre 2000  
 (b) UHII e temperature a Padova e Legnaro dal 2 all'8 agosto 2003

# Capitolo 5

## Strumenti e sistema di acquisizione

Le serie storiche di temperatura analizzate nel precedente capitolo hanno consentito di rilevare la presenza dell'effetto UHI a Padova e di osservare che la massima intensità media del fenomeno si verifica nel periodo notturno estivo. Tuttavia le informazioni ricavate si riferiscono solamente alle zone in cui sono situate le stazioni ARPAV, mentre la variabilità spaziale nel territorio cittadino dei parametri microclimatici non è stata considerata. Al fine di raggiungere una maggiore conoscenza del fenomeno UHI sono stati quindi effettuati dei rilevamenti, percorrendo un percorso tramite un autoveicolo equipaggiato con degli strumenti di misura. In questo capitolo sono descritti gli strumenti e il sistema d'acquisizione utilizzati per le rilevazioni, mentre nei successivi verranno presentate le misurazioni ottenute.

### 5.1.Gli strumenti di misura

Gli strumenti impiegati per le misurazioni delle variabili ambientali nel territorio padovano sono stati acquistati dall'azienda milanese LSI-Lastem e consegnati nel giugno 2012. La ditta produttrice garantisce la calibrazione o la taratura delle apparecchiature attraverso la fornitura di appositi certificati; poiché il tempo trascorso tra il collaudo e l'utilizzo della strumentazione è limitato, si ipotizza che l'incertezza delle misurazioni effettuate sia pari a quella dichiarata nella documentazione.

Le grandezze fisiche valutate rilevanti per l'investigazione dell'UHI della città del Santo e acquisite attraverso i sensori LSI-Lastem sono la temperatura dell'aria, l'umidità atmosferica (relativa), la velocità del vento, la radiazione globale, la radiazione netta e la temperatura media radiante.

#### 5.1.1.Termoigrometro

Lo strumento utilizzato per la misura della temperatura e dell'umidità relativa dell'aria è un termoigrometro (codice prodotto DMA672.1), composto da una termoresistenza Pt100 e da un sensore di umidità capacitivo. Le caratteristiche tecniche sono riportate

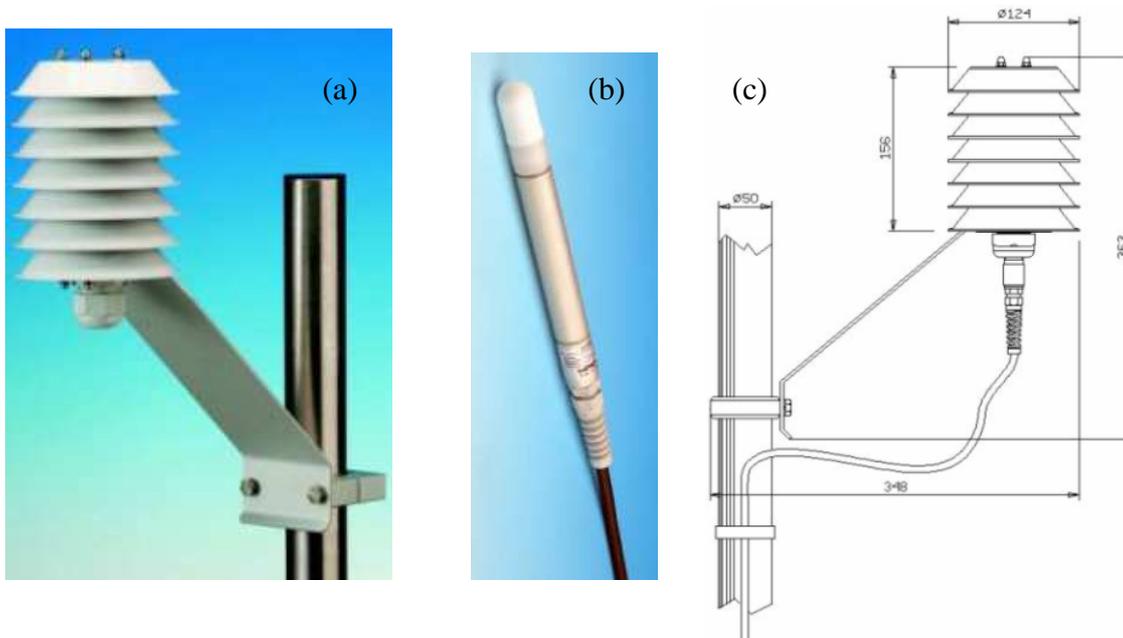
nella Tabella 5.1, mentre in Figura 5.1.b è possibile osservare l'aspetto dello strumento, rivestito esteriormente da materiali isolanti a protezione degli elementi sensibili. Nonostante siano presenti queste coperture, quando l'apparecchio viene utilizzato in applicazioni meteorologiche deve essere corredato da uno schermo antiradiante (rappresentato in Figura 5.2.b) per impedire che la radiazione solare diretta o dei corpi con particolari caratteristiche termiche influenzino la misurazione. Le caratteristiche dello schermo antiradiante a ventilazione naturale ad alto potere riflessivo acquistato (codice DYA230) sono elencate in Tabella 5.2, inoltre uno schema di montaggio è mostrato in Figura 5.2.c.

<b>Termoigrometro DMA672.1</b>		
Grandezza fisica	Temperatura	Umidità relativa
Campo di misura	-30 ÷ +70 °C	0 ÷ 100%
Elemento sensibile	Pt100 1/3 DIN-B	Capacitivo
Incertezza (riproducibilità e isteresi)	± 0.1 °C (0 °C)	1.5 % (5%-95%, 23 °C) 2% (<5% o >95%, 23 °C)
Risoluzione	NA	0.12%
Tempo di risposta	10 s	
Deriva termica	NA	max ± 1.5%
Stabilità a lungo termine	< 1 °C per anno	< 1% per anno
Uscita elettrica	Pt100 (Ω)	0-1 V
Consumo	max 2 mA	

**Tabella 5.1.** Parametri tecnici del termoigrometro DMA672.1

<b>Schermo antiradiante a ventilazione naturale DYA230</b>	
Attacco per sonda	Passacavo diametro 18 mm
Attacco a palo	Tramite collare DYA051 d=50mm
Materiale	Plastica luran
Peso	670 g
Protezione sonda interna	IP66

**Tabella 5.2.** Parametri tecnici dello schermo antiradiante a ventilazione naturale DYA230



**Figura 5.1.** (a) Schermo antiradiazione a ventilazione naturale DYA230  
 (b) Termoigrometro DMA672.1 (c) Schema di montaggio con dimensioni

### 5.1.1.2 Termoresistenza

Le termoresistenze, definite anche RTD (Resistance Thermal Detector), sono trasduttori elettrici passivi che sfruttano la proprietà dei metalli di variare la resistività elettrica a seconda della temperatura. Esse sono costituite da sottili fili di materiale conduttore avvolti su supporti isolati di forma cilindrica oppure da un film metallico depositato su di un piccolo supporto di ceramica. I materiali principalmente utilizzati per la costruzione dell'elemento sensibile sono platino e nichel. Il motivo del loro utilizzo sta nell'alta resistività, che permette quindi di realizzare cavi di piccole dimensioni senza perdere sensibilità dello strumento, e nella ottima stabilità alle alte temperature, che permette la riproducibilità delle misurazioni. Inoltre, mentre la resistenza di un metallo è in generale una funzione complessa della temperatura, per i metalli elencati la relazione può essere descritta con buona approssimazione da uno sviluppo in serie di potenze. Nel caso del platino si utilizza l'equazione di Callendar–Van Dusen, valida da  $-200\text{ °C}$  a  $660\text{ °C}$ :

$$R = R_0 \left[ 1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3 \right] \quad (5.1)$$

dove  $t$  è la temperatura in gradi Celsius,  $R$  la resistenza alla temperatura  $t$ ,  $R_0$  la resistenza a  $0\text{ °C}$  mentre  $A$ ,  $B$  e  $C$  sono costanti dipendenti dalle proprietà del platino utilizzato per realizzare il sensore, ricavati sperimentalmente dalle misure di  $R_0$ ,  $R_{100}$  e  $R_{260}$ . Il valore del coefficiente  $C$  è nullo per temperature superiori allo zero e il termine

quadratico comincia a pesare oltre valori elevati di temperatura, perciò nel range 0-100 °C è possibile considerare la relazione esposta lineare.

La tipologia di metallo impiegato per la realizzazione della termoresistenza e il valore di resistenza a 0 °C ( $R_0$ ) sono utilizzati per l'identificazione della stessa; la sigla Pt100 presente in Tabella 5.1 denota quindi un RTD in platino con resistenza nominale di 100 Ω a 0 °C. Le Pt100 sono molto diffuse e diversi enti di normazione le hanno classificate a seconda della tolleranza nella misura fornita dal sensore (Figura 5.2). RTD di classe B forniscono un'incertezza di misura maggiore rispetto a quelle di classe A, mentre le classi 1/3-1/5-1/10 DIN B sono caratterizzate da incertezza ottenibile moltiplicando quella della classe B per la frazione contenuta nel nome. Il sensore utilizzato nelle rilevazioni (classe 1/3 DIN) ha perciò un'incertezza di misura di 0.1 °C alla temperatura di 0 °C, che aumenta progressivamente con l'allontanamento dalla temperatura di riferimento.

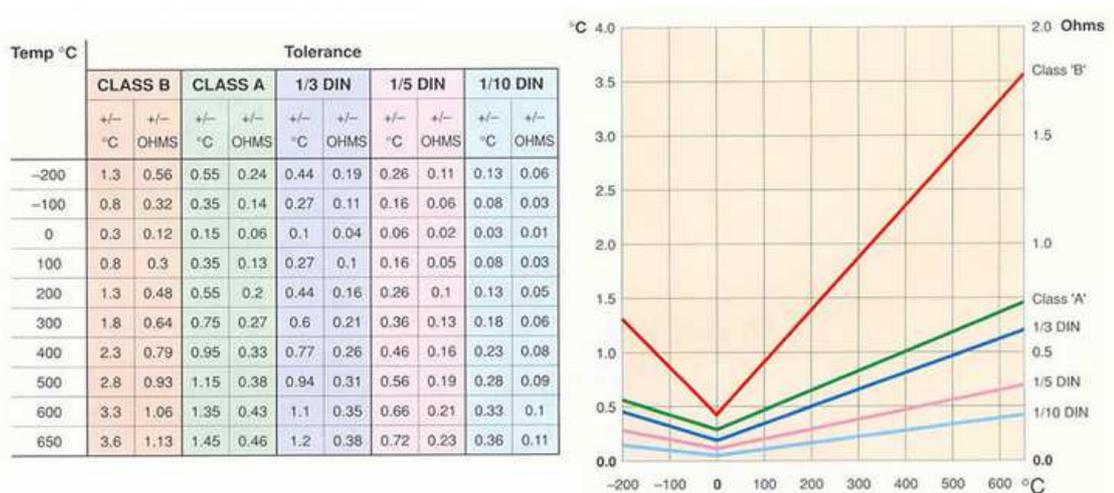


Figura 5.2. Classi di precisione e tolleranze Pt100 secondo: IEC751 – BS1904 – DIN 43760

La precisione del valore di temperatura risultante tuttavia non dipende solo dalla classe del sensore utilizzato, ma anche dalla modalità di collegamento della RTD con l'apparecchio di misura. La misurazione della resistenza dell'elemento sensibile può essere infatti effettuata con un metodo a ponte o con il metodo volt-amperometrico. La configurazione più semplice del circuito di misura prevede il collegamento dell'elemento sensibile a un ramo del ponte tramite due fili, ma la resistenza dei cavi impiegati ne influenza inevitabilmente la misura. L'utilizzo di tre fili di lunghezza uguale nel circuito permette di eliminare tale influenza, mentre l'impiego quattro fili consente di adoperare linee di lunghezza diversa. La maggior precisione in senso assoluto è tuttavia ottenibile attraverso il metodo volt-amperometrico, utilizzato per i

rilevamenti ambientali nella città di Padova e possibile con una RTD a quattro fili. Un voltmetro misura la caduta di potenziale che si ha nel trasduttore in seguito ad un passaggio di corrente d'intensità nota; le resistenze di collegamento non influiscono sulla misura dal momento che nei collegamenti del voltmetro non circola corrente.

#### 5.1.1.2 Igrometro

Il sensore di umidità utilizzato rileva l'umidità relativa, definita come il rapporto tra l'umidità assoluta (quantità di vapore acqueo contenuta in un metro cubo d'aria) e l'umidità di saturazione (la massima quantità di vapore acqueo che un metro cubo di aria può contenere). Il trasduttore è formato da un condensatore e da dei polimeri igroscopici che portano alla modifica della costante dielettrica in funzione delle variazioni della pressione parziale di vapore d'acqua contenuto nell'ambiente. L'elemento sensibile fa parte di un circuito elettronico che in uscita fornisce un segnale in tensione (0-1 V) proporzionale all'umidità, con un'incertezza pari all'1.5% nel range 5%-95% di umidità e pari al 2% per percentuali inferiori o maggiori.

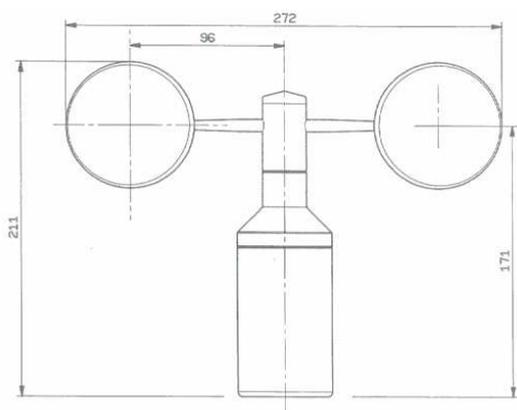
#### *5.1.2. Anemometro*

Lo strumento utilizzato per la misura della velocità del vento è un anemometro a tre coppette (Figura 5.3), con caratteristiche tecniche elencate in Tabella 5.3. Il funzionamento dell'anemometro è possibile grazie a dei dispositivi elettronici che interagiscono con la luce (optoelettronici): un led e un fotodiodo. Un disco con 32 tacche, solidale all'albero di rotazione delle coppette emisferiche di alluminio, interrompe il fascio luminoso del diodo emettitore generando degli impulsi, che vengono rilevati dal fotodiodo. La frequenza di impulsi ricevuti (0-565 Hz) è quindi proporzionale all'interno del campo di utilizzo dello strumento (0-60 m/s) alla velocità di rotazione del rotore e del vento, con una risoluzione di 0.1 m/s.

Il sistema tachimetrico è montato all'interno di un corpo in alluminio anodizzato, che fornisce una protezione dell'apparecchiatura elettrica di classe IP 65, contro l'accesso di corpi solidi (prima cifra) e liquidi (seconda cifra). Il corpo sensore è quindi in grado di proteggere totalmente le parti elettriche dalla polvere, massimo livello di protezione verso i solidi, e di evitare l'accesso di getti d'acqua.

<b>Tacoanemometro DNA031#C</b>	
Uscita	0 ÷ 565 Hz
Alimentazione	5 ÷ 30 Vcc
Consumo	15 mA
Principio di funzionamento	Anemometro a 3 coppe
Sensore primario	Optoelettronico a 32 tacche
Sospensione degli alberi	cuscinetti inox a bassa coppia
Protezione	IP65
Attacco	A palo Ø 48 - 50 mm
Materiale corpo sensore	Alluminio anodizzato
Materiale rotore	Alluminio
Diametro rotore	466 mm
Peso (senza cavo)	720 g
Limite di danneggiamento	Velocità > 75 ms <sup>-1</sup>
Campo di misura	0 ÷ 60 ms <sup>-1</sup>
Soglia	0.20 ms <sup>-1</sup>
Tempo di risposta (63% a 5 ms <sup>-1</sup> )	1.16 s
Percorso di ritardo (63% a 5 ms <sup>-1</sup> )	4.6 m
Risoluzione di velocità (tempo di integrazione 1 s)	0.1 ms <sup>-1</sup>
Linearità e accuratezza	0.1 ms <sup>-1</sup> + 1% valore letto
Temperatura operativa	-30 °C ÷ + 70 °C

**Tabella 5.3.** Parametri tecnici dell'anemometro DNA031#C



**Figura 5.3.** Schema dell'anemometro DNA031#C con dimensioni significative

### 5.1.3. Piranometro

Il piranometro è lo strumento che misura la radiazione solare globale, definita come il flusso di radiazione diretta e diffusa ricevuto da un angolo solido di  $2\pi$  sr su di una superficie orizzontale. Lo strumento impiegato, con codice prodotto DPA053 e parametri tecnici esposti in Tabella 5.4, misura l'intensità della radiazione globale utilizzando un sensore a termopila, composto da più termocoppie collegate in serie.

La superficie sensibile della termopila è racchiusa in una cupola di vetro trasparente alla radiazione solare e opaca alla radiazione di origine terrestre ad onda lunga (Figura 5.4), che limita la sensibilità dello strumento al campo spettrale 300÷2800 nm e impedisce il raffreddamento della superficie per convezione. L'esposizione del piranometro alla radiazione solare determina una differenza di temperatura tra la superficie sensibile della termopila (giunto caldo), annerita per massimizzare l'assorbimento energetico, e il corpo dello strumento (giunto freddo): a causa dell'effetto Seebeck, si manifesta tra i giunti una differenza di potenziale proporzionale al valore della radiazione solare.

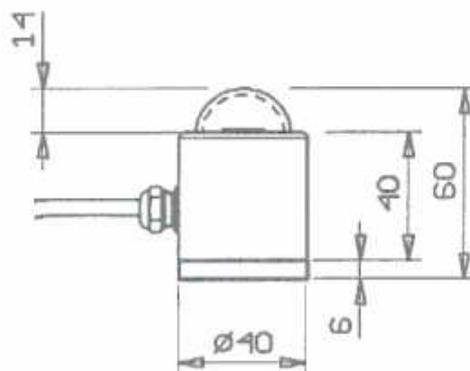
<b>Radiometro Globale (Piranometro) DPA053</b>	
Campo spettrale	300 ÷ 2800 nm
Campo di misura	< 2000 Wm <sup>-2</sup>
Uscita (sensibilità)	25 ÷ 40 μVW <sup>-1</sup> m <sup>2</sup>
Incertezza totale (su 1 giorno di misura)	10%
Tempo di risposta (95%)	60 s
Zero off-set dovuto al cambiamento di temperatura (5 °C/h)	< 20 Wm <sup>-2</sup>
Errore direzionale (80°, 800 Wm <sup>-2</sup> )	< ± 20 Wm <sup>-2</sup>
Non stabilità (deriva/anno)	± 1% sensibilità
Deriva termica sulla sensibilità (-10° ÷ +40 °C)	< ± 6.5%
Consumo	-
Cavo di uscita incluso	5 m
Attacco a palo Ø 50 mm	DYA034 e DYA051
Peso (senza cavo)	80 g
Limiti ambientali	-40 ÷ +80 °C

**Tabella 5.4.** Parametri tecnici del piranometro DPA053

Il WMO (*World Meteorological Organization*) e la norma ISO9060 classificano i piranometri in tre categorie, classificandoli in base a caratteristiche e prestazioni (Tabella 5.5). Lo strumento LSI-Lastem acquistato è conforme agli standard ISO e appartiene alla seconda classe della normativa.

Specification	Pyranometer category		
	Secondary standard	first class	second class
Response time (time for 95% response)	< 15 s	< 30 s	< 60 s
Zero offsets response to 200 W/m <sup>2</sup> net thermal radiation response to 5 K/hr temperature change	< 7 W/m <sup>2</sup> < 2 W/m <sup>2</sup>	< 15 W/m <sup>2</sup> < 4 W/m <sup>2</sup>	< 30 W/m <sup>2</sup> < 8 W/m <sup>2</sup>
Non-stability (percentage change in responsivity per year)	< 0.8 %	< 1.5 %	< 3 %
Non-linearity (due to change in irradiance within 100 to 1000 W/m <sup>2</sup> )	< 0.5 %	< 1 %	< 3 %
Directional response	< 10 W/m <sup>2</sup>	< 20 W/m <sup>2</sup>	< 30 W/m <sup>2</sup>
Spectral selectivity	< 3 %	< 5 %	< 10 %
Temperature response	< 2 %	< 4 %	< 8 %

**Tabella 5.5.** Classificazione ISO 9060 dei piranometri



**Figura 5.4.** Schema del piranometro DPA053

#### 5.1.4. Radiometro Netto

Il radiometro DPA240, rappresentato in Figura 5.5, è un sensore in grado di misurare la radiazione netta, cioè il bilancio in una direzione tra la radiazione entrante e quella uscente nel campo spettrale 0.3-60  $\mu\text{m}$ . Il principio di funzionamento è lo stesso utilizzato nel piranometro DPA053 e si basa sulla differenza di temperatura esistente alle estremità di una termopila, composta da 100 termocoppie Cu-CuNi. In questo strumento, diversamente rispetto al piranometro, vi è una coppia di superfici sensibili

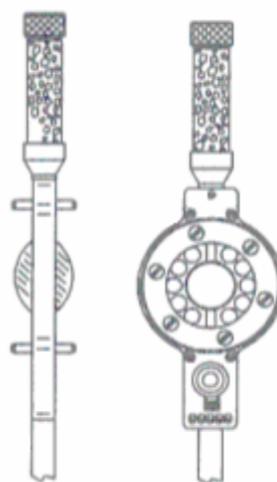
che costituiscono le due giunzioni. Due calotte emi-sferiche di materiale plastico proteggono gli elementi sensibili e sono trasparenti sia alla radiazione solare sia alla radiazione di origine terrestre, consentendo di avere una risposta spettrale dal lontano infrarosso all'ultravioletto.

All'estremità del radiometro è presente un contenitore cilindrico con dei sali igroscopici, che impediscono la formazione di condensa internamente alle cupole. Per garantire l'accuratezza della misura è necessario controllare periodicamente la pulizia delle superfici riceventi e verificare che i sali igroscopici siano di colore azzurro. Se al contrario colorazione dei sali tende verso il rosa devono essere sostituiti o rigenerati, tramite l'esposizione ad un getto d'aria calda (60 °C-70 °C).

Nella seguente tabella sono elencate le caratteristiche tecniche del radiometro netto DPA240, mentre in Figura 5.5 sono rappresentate due viste dello strumento.

<b>Radiometro Netto DPA240</b>	
Elemento sensibile	Termopila
Campo spettrale	0.3-60 $\mu\text{m}$
Campo di misura	$<2000 \text{ Wm}^{-2}$
Uscita elettrica	9-15 $\mu\text{VWm}^{-2}$
Tolleranza	5%
Non linearità	$<1.5\%$
Emissività	$>95\%$
Deriva T (-10 +40 °C)	$<2\%$
Tempo risposta(63%)	2s
Temperatura operativa	-40° +70 °C
Risposta al coseno	5%
Materiale termocoppie	Cu-CuNi
Numero termocoppie	100
Consumo	-
Cavo uscita	10 m
Peso (senza cavo)	250 g

**Tabella 5.6.** Parametri tecnici del radiometro netto DPA240



**Figura 5.5.** Vista laterale e superiore del radiometro netto DPA240

### 5.1.5. Globotermometro

Il globotermometro, o termometro al globo, è lo strumento per la misura sperimentale della temperatura media radiante ( $T_{mr}$ ), definita come la temperatura uniforme di una cavità nera fittizia in cui gli occupanti scambierebbero per irraggiamento la stessa quantità di energia termica effettivamente scambiata con le superfici reali (generalmente disomogenee) che delimitano l'ambiente in cui si trovano.

Lo strumento è costituito da una sfera metallica cava verniciata di nero opaco e contenente un sensore termometrico (Figura 5.6). Il materiale del globo deve essere buon conduttore termico, ad esempio rame, e di dimensioni standard: 0.2 mm di spessore e 15 cm di diametro. La temperatura dell'aria interna misurata a regime è pari alla temperatura epidermica della sfera, che scambiando calore per convezione e per radiazione con le superfici dell'ambiente in cui si effettua la misura ha raggiunto una condizione di equilibrio termico. Essendo la sfera realizzata con un ottimo conduttore si può ritenere che l'equilibrio raggiunto all'interno sia uniforme, cioè indipendente dalla direzione di provenienza delle radiazioni termiche. Noto il valore di temperatura fornito dal globotermometro è quindi possibile calcolare la temperatura media radiante  $T_{mr}$  conoscendo la temperatura dell'aria  $T_a$  e la velocità del vento, utilizzando la seguente formula ottenuta a partire dal bilancio energetico della sfera:

$$T_{mr} = \sqrt[4]{T_g^4 + \frac{\alpha}{\sigma \cdot \varepsilon} (T_g - T_a)} \quad (5.1)$$

dove  $\alpha$  è il coefficiente di convezione,  $\sigma$  la costante di Stefan-Boltzmann, mentre  $\varepsilon$  è l'emissività della sfera ed è pari a 0.95.



**Figura 5.6.** Globotermometro EST131

## 5.2. Il sistema di acquisizione

Un sistema di acquisizione dati è un sistema elettronico realizzato per monitorare, memorizzare ed eventualmente post-elaborare i segnali generati dagli strumenti di misura. Durante l'investigazione del fenomeno isola di calore della città di Padova la registrazione dei valori rilevati da quasi tutti i sensori presentati nel precedente paragrafo, ad esclusione del globotermometro, è stata effettuata tramite l'acquisitore E-Log (Codice ELO305). Il datalogger, realizzato dalla stessa azienda produttrice della strumentazione, consente di acquisire dati da dodici sensori, otto analogici e quattro digitali (due impulsivi e due on-off) ed è in grado di alimentare gli strumenti realizzati con sensori passivi. Nel caso in cui il tempo stabilito tra due misurazioni successive sia sufficiente è possibile impostare l'accensione e lo spegnimento degli strumenti attraverso delle logiche di attuazione per ridurre i consumi energetici; sono presenti sette attuatori, ognuno in grado di conferire l'alimentazione a due sensori. L'associazione tra ingresso ed attuatore è fissa, come è evidenziato in Figura 5.7.

<b>MORSETTIERA</b>								
Ingresso analogico	Segnale				GND	Attuatore		
	A	B	C	D		Numero	+V	0V
1	1	2	3	4	7	1	5	6
2	8	9	10	11				
3	12	13	14	15	18	2	16	17
4	19	20	21	22				
5	34	35	36	37	40	3	38	39
6	41	42	43	44				
7	45	46	47	48	51	4	49	50
8	52	53	54	55				

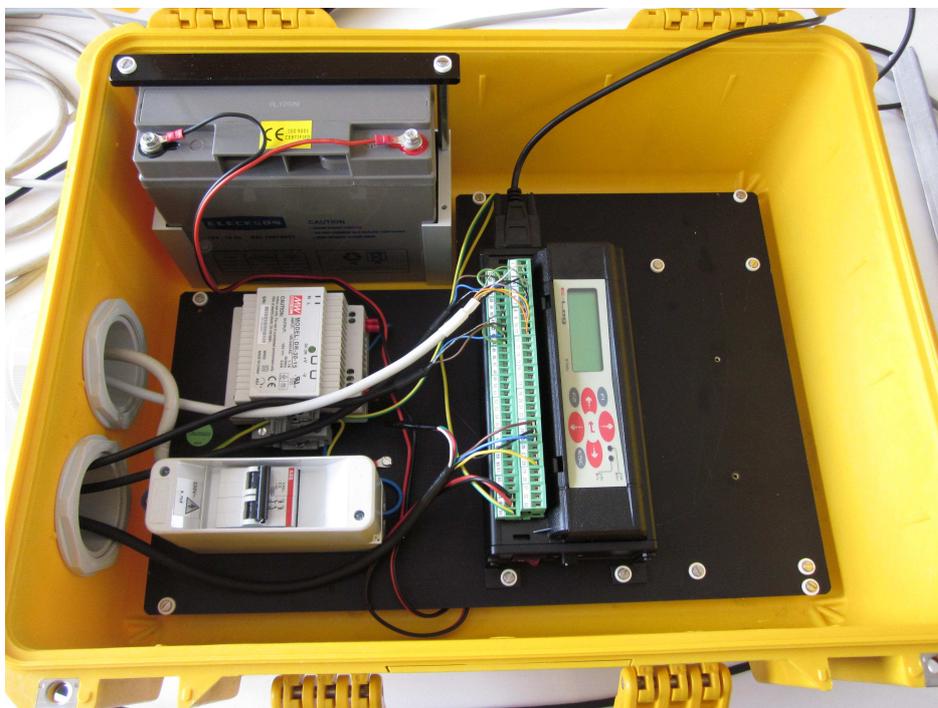
  

Ingresso digitale	Segnale			GND	Attuatore		
	E	F	G		Numero	+V	0V
9	23	24	25	28	5	26	27
10	56	57	58				
11	-	29	30	61	6	59	60
12	-	62	63				
				28	7	33	32

**Figura 5.7.** Associazione presente nell'E-Log tra numero di morsetto, ingresso ed attuatore.

Nel corso del monitoraggio ambientale mobile effettuato, l'intervallo temporale tra due istanti di misurazione è stato molto breve e per tale motivo le logiche di attuazione non sono state adottate. I rilevamenti in transetto hanno inoltre imposto il posizionamento dell'acquisitore su di un autoveicolo, impedendo il collegamento diretto alla rete elettrica e introducendo la necessità di utilizzare una batteria. La batteria impiegata ha una capacità di 15 Ah e consente di alimentare l'acquisitore con una tensione di 12 V

(DC); la presenza di un trasformatore è quindi necessaria per permettere la ricarica dalla rete elettrica. Il trasporto del sistema è facilitato dalla disposizione dei dispositivi elencati, con l'aggiunta di un interruttore magnetotermico che garantisce protezione da eventuali cortocircuiti o sovracorrenti, in una apposita valigia di plastica (Figura 5.8).

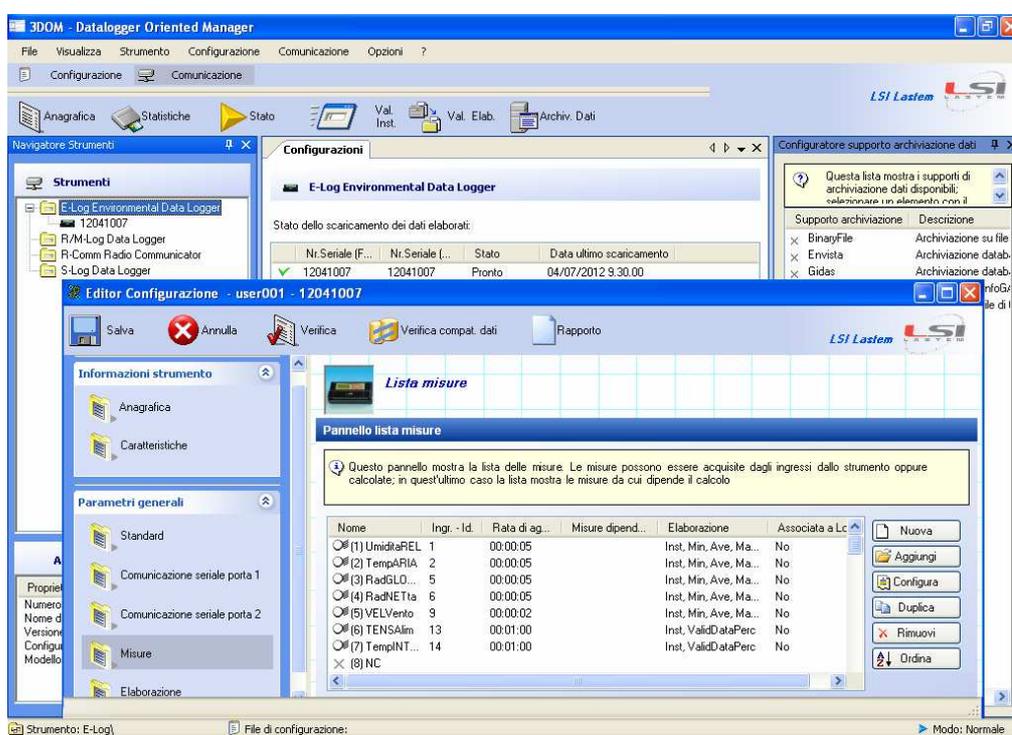


**Figura 5.8.** Acquisitore E-Log, batteria ricaricabile da 12 V - 15 Ah, trasformatore e interruttore magnetotermico all'interno della valigia in plastica ELF432.

### 5.2.1. Configurazione dell'acquisitore

Condizione necessaria per l'utilizzo del sistema di acquisizione è la configurazione di E-Log attraverso il software 3DOM (*Free Datalogger Oriented Manager*). Dopo aver connesso il computer e il datalogger tramite cavo seriale RS232 alla porta seriale 1, è possibile avviare il programma ed effettuare la procedura guidata per l'inserimento di un nuovo strumento (E-Log) selezionando il menù *Strumento\_Nuovo*. Completata la procedura il programma scarica la configurazione di fabbrica residente nell'apparecchio, per consentire la comunicazione. Successivamente, in base al numero e alla tipologia di strumenti di misura che si desidera collegare all'acquisitore, è necessario modificare la configurazione selezionando la voce *Configurazione\_Modifica*. Il comando determina l'apertura della finestra visualizzata in Figura 5.8, dalla quale

premo il pulsante *Misure* nel pannello *Parametri Generali* è possibile specificare il modello dello strumento che verrà collegato a ciascun ingresso e la rata di aggiornamento della misura, compresa tra 1 s e 12 h: nel caso specifico è stato ritenuto appropriato un intervallo di tempo tra rilevamenti successivi pari a 10 secondi per tutte le grandezze rilevate. Inoltre tramite la voce *Elaborazione* presente nel medesimo pannello deve essere indicata la rata di elaborazione delle misure acquisite, uguale per tutti gli strumenti e non inferiore alla rata di aggiornamento con intervallo maggiore. Dopo essere stato salvato, il file di configurazione realizzato può essere inviato al datalogger attraverso il comando *Configurazione\_Invia*.

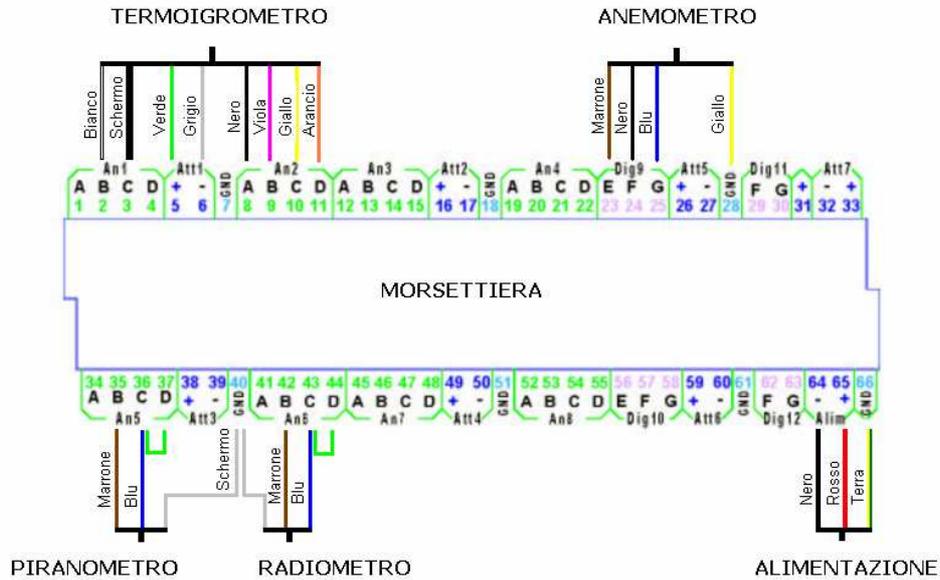


**Figura 5.9.** Finestra visualizzata nel software 3DOM durante la configurazione

### 5.2.2. Connessione elettrica delle sonde

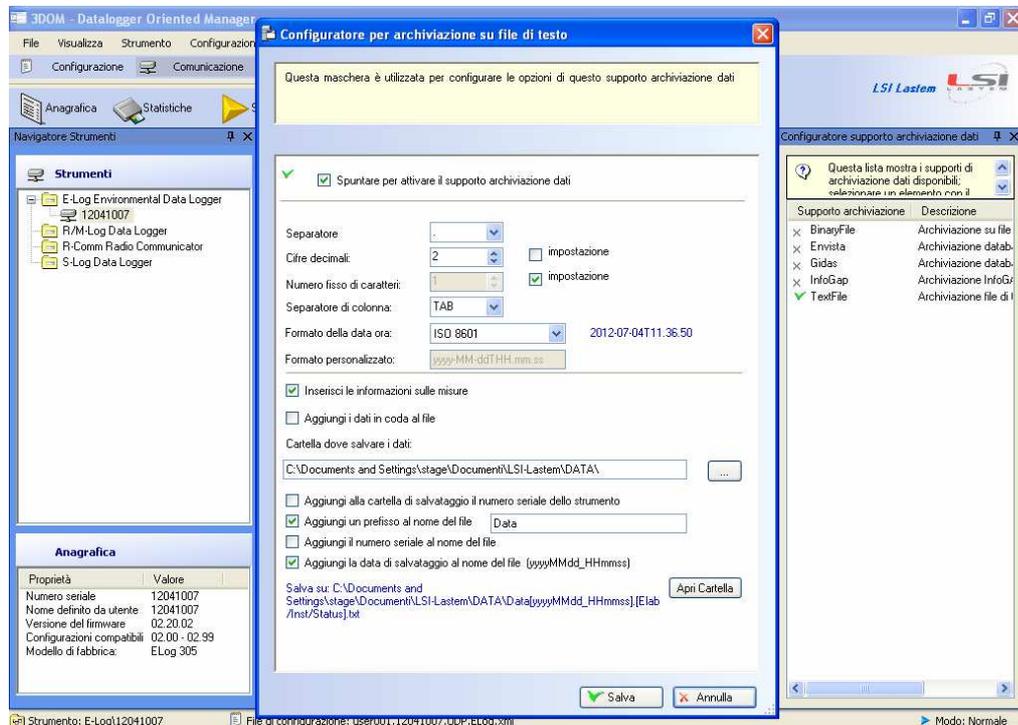
La connessione degli strumenti di misura agli ingressi dell'E-Log deve ovviamente corrispondere alle informazioni contenute nel file di configurazione presente nell'acquisitore. Nella figura seguente è esposto lo schema dei collegamenti effettuati: i terminali dell'igrometro capacitivo sono stati collegati al primo canale (morsetti 1-4), la termoresistenza al secondo (morsetti 8-11), il piranometro e il radiometro netto

rispettivamente al quinto (morsetti 34-37) e al sesto (morsetti 41-44), infine l'anemometro al nono (morsetti 23-25).



**Figura 5.10.** Schema dei collegamenti degli strumenti utilizzati alla morsettiera dell'E-Log

### 5.2.3. Opzioni di salvataggio dei dati



**Figura 5.11.** Finestra per la configurazione dell'archiviazione dei dati in un file di testo

Per scaricare i dati dalla memoria del datalogger in seguito a un rilevamento è necessario configurare le modalità di archiviazione dei dati attraverso la voce *Archiviazione dati* presente nel sottomenù *Configurazione*. La tipologia di salvataggio adottata consente l'esportazione dei dati in un file ASCII di testo. Nella finestra visualizzata in seguito alla scelta di questa modalità (Figura 5.11) è sufficiente selezionare la casella di controllo "Spuntare per attivare il supporto archiviazione dati" ed impostare le opzioni di salvataggio desiderate. L'esportazione dei dati in un file .txt sarà poi possibile cliccando il pulsante *Valori Elaborati* nel sottomenù *Comunicazione*.

# Capitolo 6

## Misurazioni mobili nel territorio padovano

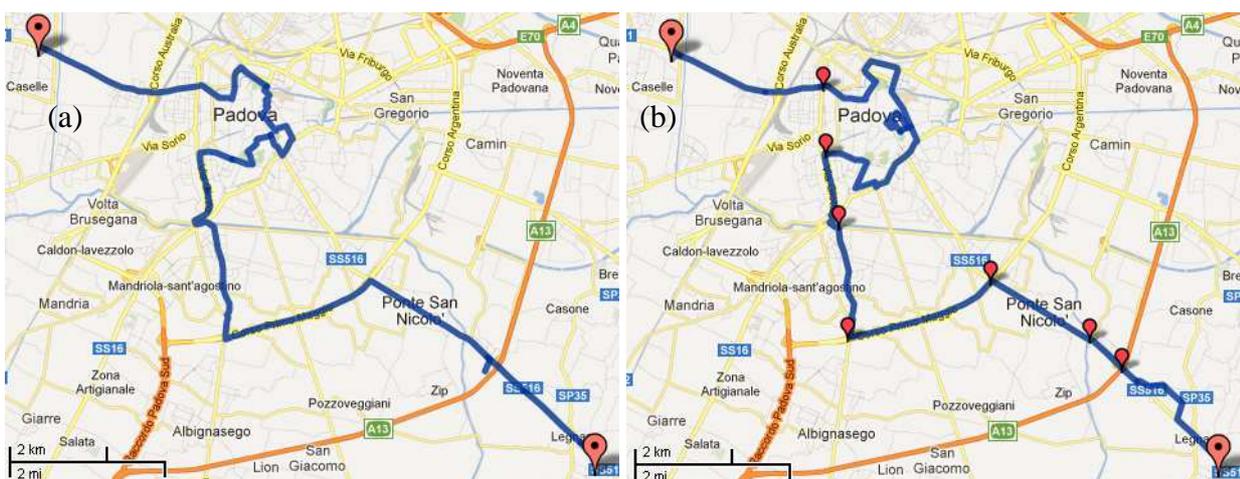
L'analisi dei dati storici raccolti dalle postazioni ARPAV ha permesso un'iniziale quantificazione dell'intensità dell'effetto isola di calore nella città di Padova. Non è stato tuttavia possibile effettuare valutazioni relative all'area compresa tra le due stazioni, inoltre i dati utilizzati potrebbero non essere totalmente rappresentativi del territorio urbano e del territorio rurale. Al fine di esaminare la variabilità spaziale del fenomeno UHI sono stati quindi eseguiti dei rilevamenti con una stazione mobile. In questo capitolo sono presentate le informazioni ambientali ottenute dalle misurazioni effettuate in transetto utilizzando la strumentazione descritta nella sezione precedente.

### 6.1. Il percorso di misura

Il tragitto individuato per l'investigazione del fenomeno isola di calore della città patavina è rappresentato in Figura 6.1 ed è suddiviso tra percorso di "andata" e di "ritorno". Il punto di partenza è situato a nord-est della città, in prossimità dell'incontro tra la strada statale 11 Padana Superiore e il canale Brentella. Da questa postazione il transetto procede verso le mura comunali, distanti circa 3 km, e prosegue nel centro attraversando numerose strade cittadine (elenco completo in Tabella 6.1), tra cui Piazza del Santo e Prato della Valle. Il percorso prevede quindi l'allontanamento dal centro urbano attraverso via Goito, un viale alberato che costeggia il Tronco Maestro del fiume Bacchiglione, e via Guizza Conselvana. Il tratto di tangenziale est denominato corso Primo Maggio consente in seguito di raggiungere la strada statale 516 Piovese, che attraversa gli abitati di Ponte San Nicolò e di Legnaro. Oltrepassato il paese che ospita la stazione agrometeorologica ARPAV e raggiunta la zona rurale l'attraversamento del territorio è completato ai fini dell'analisi ambientale ed è previsto quindi l'inizio del percorso di ritorno. Le strade attraversate durante la seconda parte del transetto coincidono nella maggioranza dei casi con quelle percorse nella prima, sono tuttavia presenti alcune diversità: il transito nella zona industriale di Legnaro, il passaggio attraverso Piazza Insurrezione e l'impossibilità di raggiungere alcune zone del centro

cittadino per la presenza di strade a senso unico. Contraddistinto da una lunghezza di circa 52 km, il percorso di misura attraversa il territorio urbano, suburbano e rurale situato in prossimità della città di Padova e termina con il raggiungimento del punto d'arrivo, che corrisponde alla postazione di partenza.

Al fine di agevolare la comprensione delle informazioni ambientali ottenute durante le sessioni di misura, il transetto è stato suddiviso in tratte (delimitate dai marcatori rossi con dimensioni inferiori in Figura 6.1.b) a seconda della tipologia del territorio e della denominazione delle strade. La tratta iniziale con caratteristiche suburbane è compresa tra il punto di partenza e il passaggio attraverso le mura della città (tra via Vicenza e corso Milano), che possiamo considerare frontiera del territorio urbano. Il percorso è situato all'interno delle mura fino all'intersezione tra via Paoli e il Tronco Maestro del Bacchiglione, mentre la successiva tratta coincide interamente con via Goito, poiché la presenza di numerosi alberi e l'adiacenza al fiume rappresentano degli elementi di peculiarità. Sia via Guizza Conselvana, che corso Primo Maggio sono state considerate separatamente: la prima è una strada di transizione tra il territorio suburbano e le zone rurali a sud di Padova, mentre la seconda è un tratto di tangenziale che attraversa delle aree agricole contraddistinte da una bassissima densità di abitazioni. Infine la strada statale Piovese è stata suddivisa in tre tratti in corrispondenza dei cambiamenti di nome della stessa: via Marconi è sede del centro di Ponte San Nicolò, via Romea attraversa il paese di Legnaro, mentre via Roma è posizionata tra i due centri abitati ed è delimitata a nord-ovest dal Bacchiglione e a sud-est dall'autostrada A13.



**Figura 6.1.** Transetto suddiviso nel percorso di andata (a) e di ritorno (b).

I marcatori presenti nel percorso di ritorno delimitano le differenti tratte (Google Maps)

ANDATA	RITORNO
(1) Via Chiesanuova	(44) Via Romea
(2) Cavalcavia Chiesanuova	(45) Via Enrico Fermi
(3) Via Vicenza	(46) Via Vittorio Veneto
(4) Corso Milano	(47) Via Romea
(5) Via Dante Alighieri	(48) Via Roma
(6) Via Ponte Molino	(49) Via Guglielmo Marconi
(7) Via Francesco Petrarca	(50) Corso Primo Maggio
(8) Via Torquato Tasso	(51) Via Guizza in Conselvana
(9) Viale Mazzini	(52) Via Vittorio Veneto
(10) Viale Codalunga	(53) Ponte Scaricatore
(11) Via Trieste	(54) Via Goito
(12) Via Gaspare Gozzi	(55) Via Pasquale Paoli
(13) Ponte Porciglia	(56) Via Alberto Cavalletto
(14) Via Gianbattista Morgagni	(57) Piazza Prato della Valle
(15) Via Giulio Alessio	(58) Via Giosuè Carducci
(16) Via Luigi Lucatello	(59) Via Marghera
(17) Via San Gaetano	(60) Via Alessandro Manzoni
(18) Via Altinate	(61) Via Alessandro Stoppato
(19) Via Rinaldo Rinaldi	(62) Via Gattamelata
(20) Via San Biagio	(63) Via Nicolò Giustiniani
(21) Via Fabio Filzi	(64) Via Ospedale Civile
(22) Via Cesare Battisti	(65) Via Aristide Gabelli
(23) Via Ospedale Civile	(66) Via Santa Sofia
(24) Via Nicolò Giustiniani	(67) Via Cesare Battisti
(25) Via Gattamelata	(68) Via Santa Caterina
(26) Via Alessandro Stoppato	(69) Via San Francesco
(27) Via Jacopo Facciolati	(70) Via Santa Sofia
(28) Piazzale Pontecorvo	(71) Via Cesare Battisti
(29) Via San Francesco	(72) Via Ospedale Civile
(30) Via Melchiorre Cesarotti	(73) Via Gabriele Faloppio
(31) Piazza del Santo	(74) Via Gianbattista Morgagni
(32) Via Beato Luca Belludi	(75) Ponte Giambattista Morgagni
(33) Piazza Prato della Valle	(76) Via Gaspare Gozzi
(34) Via Alberto Cavalletto	(77) Piazza Gaetano Salvemini
(35) Via Pasquale Paoli	(78) Via Nicolò Tommaseo
(36) Via Goito	(79) Viale Codalunga
(37) Via Isonzo	(80) Via Giotto
(38) Ponte Isonzo	(81) Via Giacomo Matteotti
(39) Via Vittorio Veneto	(82) Via Calatafimi
(40) Via Guizza in Conselvana	(83) Piazza Insurrezione
(41) Corso Primo Maggio	(84) Via Verdi
(42) Via Guglielmo Marconi	(85) Corso Milano
(43) Via Roma	(86) Via Vicenza
(44) Via Romea	(87) Cavalcavia Chiesanuova
	(88) Via Chiesanuova

**Tabella 6.1.** Elenco completo delle piazze e delle vie attraversate durante il percorso di andata e di ritorno.

## **6.2. La stazione mobile**

Gli strumenti utilizzati per l'ottenimento dei dati ambientali durante le misurazioni mobili del fenomeno UHI sono il termoigrometro e il piranometro (quest'ultimo solamente durante le sessioni di misura diurne) descritti nel precedente capitolo. Entrambi gli apparecchi sono stati fissati alla copertura di uno Scudo Fiat, di proprietà del Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali, e collegati al datalogger E-Log situato all'interno del veicolo tramite dei cavi. La necessaria georeferenziazione dei dati acquisiti è stata possibile utilizzando un ricevitore GPS in comunicazione con un notebook o, in alternativa, un'applicazione di tracciatura per iPhone (EasyTrack) e per Android (Maverick). La sincronizzazione tra gli orologi dei ricevitori e del sistema d'acquisizione, verificata prima di ogni sessione, ha permesso di attribuire correttamente ai dati le informazioni relative alla posizione geografica.

## **6.3. Le sessioni di misura**

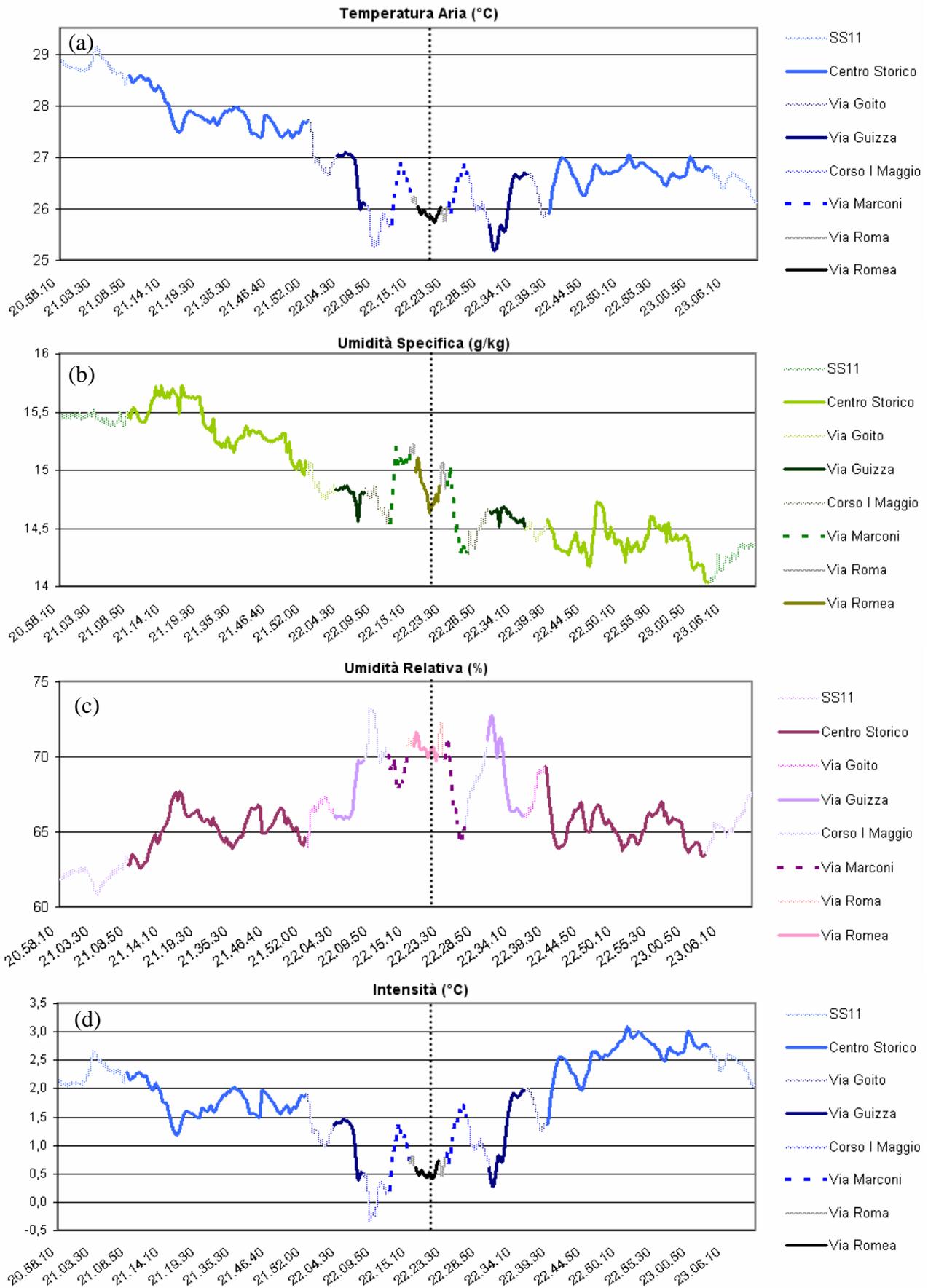
La stazione mobile è stata impiegata durante otto sessioni di misure ambientali, tra il 26/07/2012 e il 09/08/2012. La maggior parte dei rilevamenti è avvenuta in periodo serale/notturno (dopo il tramonto), perché sia i dati raccolti dalla letteratura sia quelli raccolti dalle postazioni ARPAV (cap. 4) hanno permesso di rilevare che le maggiori intensità del fenomeno UHI si verificano durante tale periodo appunto. In due occasioni tuttavia le misurazioni sono avvenute nel periodo diurno, per consentire un confronto tra le due differenti situazioni. Utilizzando la suddivisione in tratte precedentemente presentata, le informazioni ottenute dalla stazione sono state rappresentate graficamente, dopo essere state opportunamente filtrate. Durante l'esecuzione dei transetti sono state effettuate infatti delle fermate per consentire lo studio di siti di particolare interesse, che saranno presentati nel capitolo successivo. L'esclusione dei dati relativi a tali siti è stata necessaria per permettere che la rappresentazione realizzata su scala temporale non si differenziasse eccessivamente rispetto a una rappresentazione su scala spaziale, preferibile ma difficilmente ottenibile. Le fermate sono state effettuate esclusivamente durante il tragitto d'andata, minimizzando quindi il tempo di percorrenza del ritorno, al fine di poter esaminare i dati nonostante lo svantaggio principale dei rilevamenti mobili: le differenze temporali esistenti tra le misure. Il percorso di ritorno rappresenta il tragitto maggiormente significativo per il confronto diretto dei dati, poiché la

diminuzione di temperatura in atto permette di stimare l'effetto UHI in condizioni di sicurezza (sia in termini spaziali perchè ci si sta muovendo dalla campagna al centro città, sia in termini temporali perchè si sta andando verso le ore più fresche). E' comunque possibile una quantificazione dell'UHI nel corso dell'intero transetto determinando la differenza tra la temperatura misurata dalla stazione mobile e un valore di riferimento registrato alla medesima ora in un sito di riferimento fisso. Nel corso delle successive analisi sono state utilizzate come riferimento i valori di temperatura della stazione ARPAV di Legnaro (valori medi calcolati ogni 15 minuti); il valore fornito è stato considerato proprio dell'istante centrale dell'intervallo, mentre i valori intermedi sono stati stimati per interpolazione lineare.

### *6.3.1. Sessione notturna del 26/07/2012*

La prima sessione di misura è avvenuta il 26 luglio dalle 20:58 alle 23:11. Il percorso effettuato presenta alcune differenze rispetto a quello di riferimento descritto in precedenza: nel comune di Ponte San Nicolò non sono state realizzate misurazioni nel tratto di via Roma che si addentra nel territorio agricolo, il tragitto di andata termina in prossimità di Agripolis prima del centro cittadino di Legnaro, infine non è stato effettuato l'attraversamento di via Vittorio Veneto (zona industriale di Legnaro) e di piazza Insurrezione. Nella rappresentazione grafica dei dati ottenuti, osservabile in Figura 6.2, una linea verticale tratteggiata indica la conclusione del transetto d'andata e l'inizio del transetto di ritorno. Tale linea, dal momento che le strade percorse successivamente all'inversione di marcia non cambiano e che la differenza temporale tra due misure effettuate nel medesimo punto non è elevata, rappresenta l'asse di simmetria per la parte centrale del grafico di temperatura (Figura 6.2.a). Tuttavia, è possibile osservare come le differenti tratte nelle quali il transetto è stato suddiviso non siano rigorosamente simmetriche rispetto all'asse. L'asimmetria, dovuta probabilmente al tempo di risposta della termoresistenza, si verifica quando le differenze di temperatura sono significative e le velocità di spostamento elevate, ad esempio durante la percorrenza di corso Primo Maggio. Le due condizioni determinano quindi un errore nelle misurazioni, ma non sono presenti durante la maggior parte del percorso.

Le temperature del tragitto di andata riprodotte in Figura 6.2.a, per le motivazioni esposte nel precedente paragrafo, permettono solamente di individuare delle differenze tra zone non eccessivamente distanti; nel centro cittadino le maggiori sono state rilevate

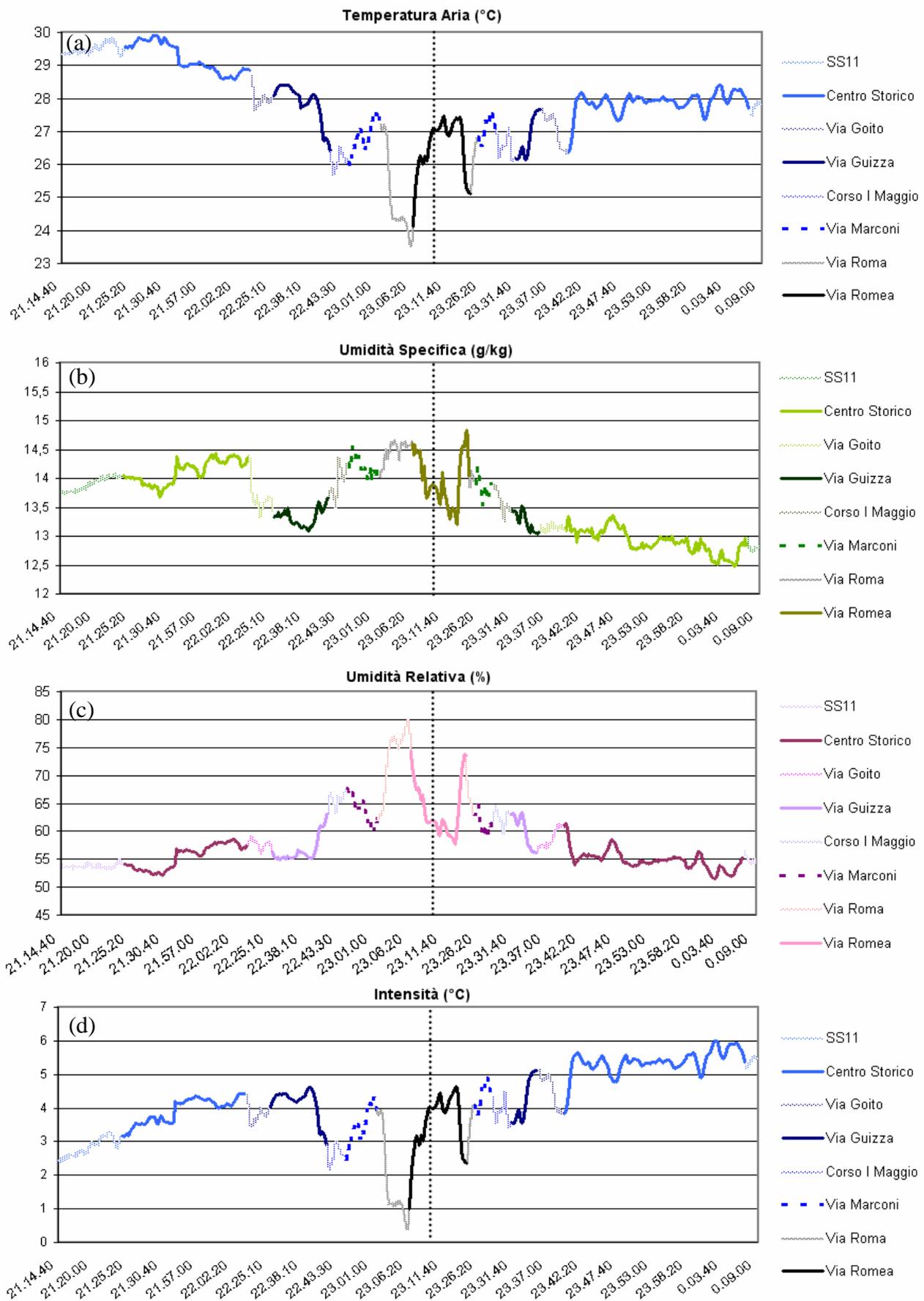


**Figura 6.2.** Rappresentazione grafica dei dati di temperatura (a), di umidità specifica (b) e relativa (c) ottenuti durante la prima sessione e della differenza tra la temperatura rilevata e quella di Legnaro (d).

in via Alessio, via Giustiniani e via Cesarotti, mentre sono state inferiori di circa 0.5 °C presso Ponte Porciglia, via Rinaldi, via Battisti e Prato della Valle. Valutazioni relative all'alterazione termica della prima parte del transetto sono invece possibili osservando il grafico in Figura 2.2.d, che rappresenta le differenze istantanee tra le temperature misurate e quelle ottenute dalla stazione ARPAV di Legnaro. L'intensità dell'isola di calore di Padova tra le 21:00 e le 22:00 risulta di  $1.5 \div 2$  °C ed è inferiore rispetto all'intensità presente alle ore 23:00, pari a  $2.5 \div 3$  °C. L'effetto UHI è inoltre osservabile nel tragitto di ritorno direttamente dai dati di temperatura in Figura 6.2.a, nella quale l'alterazione termica (2 °C) è tuttavia inferiore rispetto all'intensità effettiva (3 °C) a causa della differenza temporale esistente tra gli istanti di acquisizione dei dati. Le temperature minime (circa 25 °C) in entrambi i percorsi sono state rilevate in prossimità del collegamento tra corso Primo Maggio e via Guizza Conselvana, zona in cui sono presenti numerosi terreni agricoli e in cui l'umidità relativa risulta particolarmente elevata. Una bassa densità abitativa contraddistingue anche via Roma (zona in cui si registra un picco di umidità specifica) e il tratto di via Romea attraversato, nelle quali sono stati misurati circa 26 °C. Le temperature massime (27 °C) del ritorno sono relative all'abitato di Ponte San Nicolò ed a Padova, dove tuttavia esistono alcune diversità. Prato della Valle, Via Battisti e Viale Mazzini sono infatti caratterizzati da temperature maggiori di almeno 0.5 °C rispetto a via Gozzi e via Manzoni, che beneficiano probabilmente della vicinanza dei Giardini dell'Arena e delle aree verdi esistenti a ridosso delle mura comunali, dal momento che i valori di umidità specifica sono maggiori rispetto alle aree limitrofe. In via Goito la vegetazione rende inoltre possibile una riduzione di temperatura di 1 °C, osservabile in entrambi i tragitti.

### ***6.3.2. Sessione notturna del 27/07/2012***

Il transetto effettuato nella seconda sessione di misura, iniziata alle 21:14 del 27 luglio e terminata alle 0:09, non presenta variazioni rispetto al percorso presentato nella parte iniziale del capitolo. Nella giornata di misurazione in analisi e nelle successive è stato sempre effettuato il transito nel territorio ad utilizzo agricolo situato nel tratto di via Roma che costituisce una laterale della strada statale 516 Piovese e caratterizzato da temperature sensibilmente inferiori rispetto alle altre zone attraversate. L'area nella quale sono state rilevate le temperature minime nella prima sessione (tra via Guizza



**Figura 6.3.** Rappresentazione grafica dei dati di temperatura (a), di umidità specifica (b) e relativa (c) ottenuti nella seconda sessione e della differenza tra la temperatura rilevata e quella di Legnaro (d).

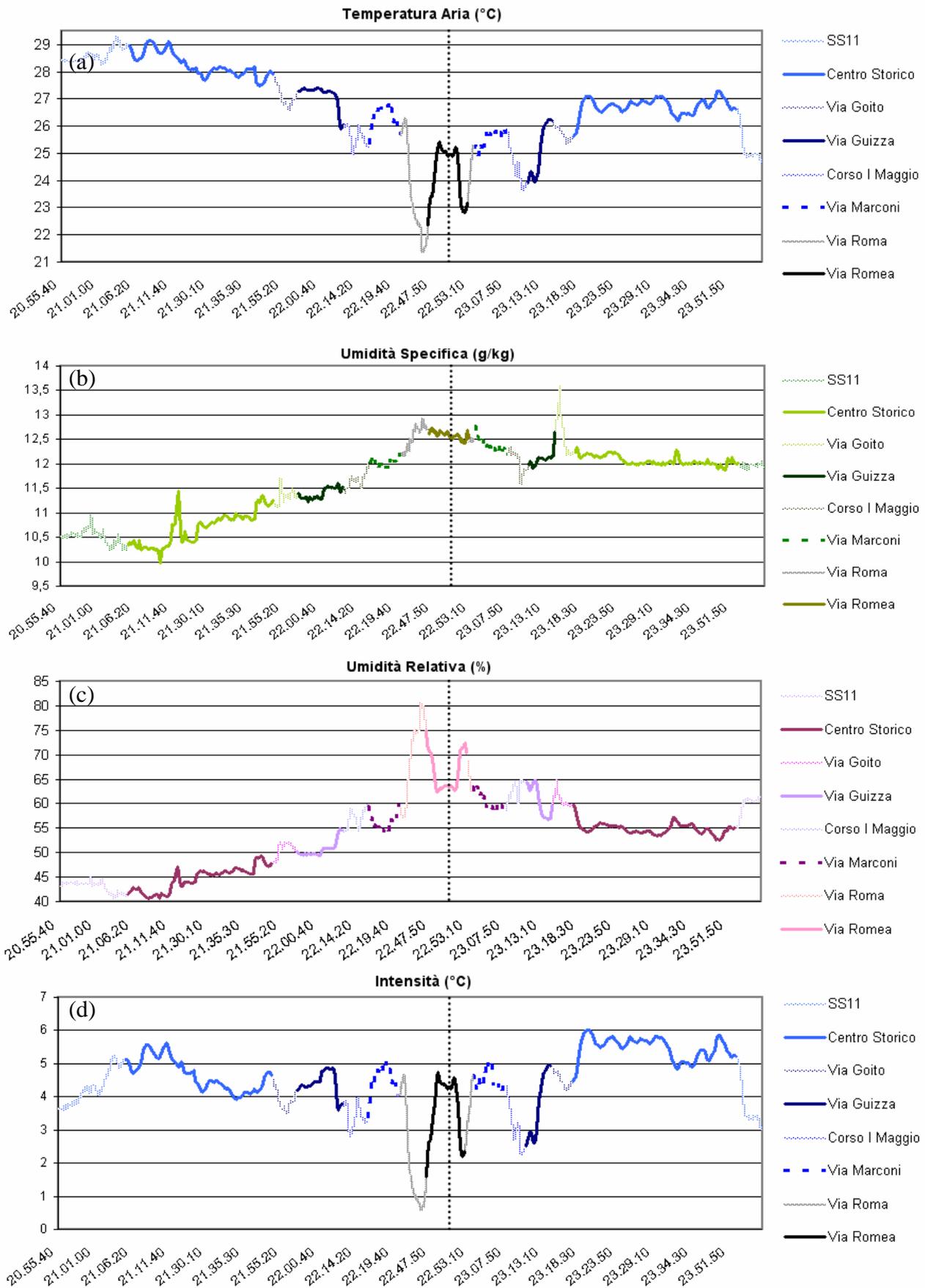
Conselvana e corso Primo Maggio), presenta infatti nella misurazione in esame una temperatura maggiore di 2.5 °C rispetto al tratto rurale di via Roma. A partire da questa sessione inoltre i grafici non saranno simmetrici rispetto al punto di inversione, a causa della differenza di percorso (percorrenza del tratto agricolo di via Roma solamente all'andata e di via Vittorio Veneto unicamente al ritorno) ed a causa delle fermate effettuate talvolta per la misurazione della temperatura media radiante.

I grafici in Figura 6.3 riportano i dati raccolti nella seconda serata di misurazioni e in Figura 6.3.a è possibile osservare come le temperature cittadine siano state mediamente maggiori rispetto al giorno precedente. La temperatura rilevata nel centro di Padova durante il percorso di ritorno è infatti di 28 °C circa (contro 27 °C dell'antecedente sessione) e dal confronto con i 23.5 °C di via Roma risulta quindi una significativa differenza di temperatura, pari a 4.5 °C. L'intensità dell'isola di calore (UHII) assume tuttavia valori maggiori se calcolata rispetto alla temperatura della stazione ARPAV di Legnaro (Figura 6.3.d): l'UHII calcolata in città raggiunge infatti 6 °C e il trend sembra essere di costante crescita con l'inoltrarsi della notte.

Nel centro patavino persistono alcune differenze microclimatiche nel transetto di ritorno: in via Manzoni e presso Ponte Porciglia sono stati rilevati 27.4 °C, in via Giotto 28.4 °C e nel canyon urbano di via Verdi 28.3 °C. Nel paese di Legnaro, di Ponte San Nicolò e nella zona industriale di Legnaro, caratterizzata da limitati valori di umidità specifica e relativa, si osservano temperature inferiori di 0.5 °C rispetto al centro della città del Santo, mentre la differenza d'intensità è prossima a 1 °C. Similmente a quanto osservato nella precedente sessione, l'attraversamento di via Goito determina un abbassamento di temperatura di 1 °C e la percorrenza di via Guizza Conselvana comporta una diminuzione di quasi 2 °C in direzione uscente dalla città ed un aumento di pari entità in senso contrario.

### ***6.3.3. Sessione notturna del 30/07/2012***

La misurazione della maggior differenza di temperatura (5.5 °C) tra il centro urbano di Padova e il territorio rurale a sud-est della città è avvenuta nel corso della terza uscita, realizzata dalle 20:56 alle 23:56 il 30 luglio. L'unica differenza esistente nel transetto effettuato rispetto a quello di riferimento riguarda l'inizio del percorso di ritorno: l'inversione di marcia è stata infatti compiuta non oltre ma in prossimità del centro abitato di Legnaro.

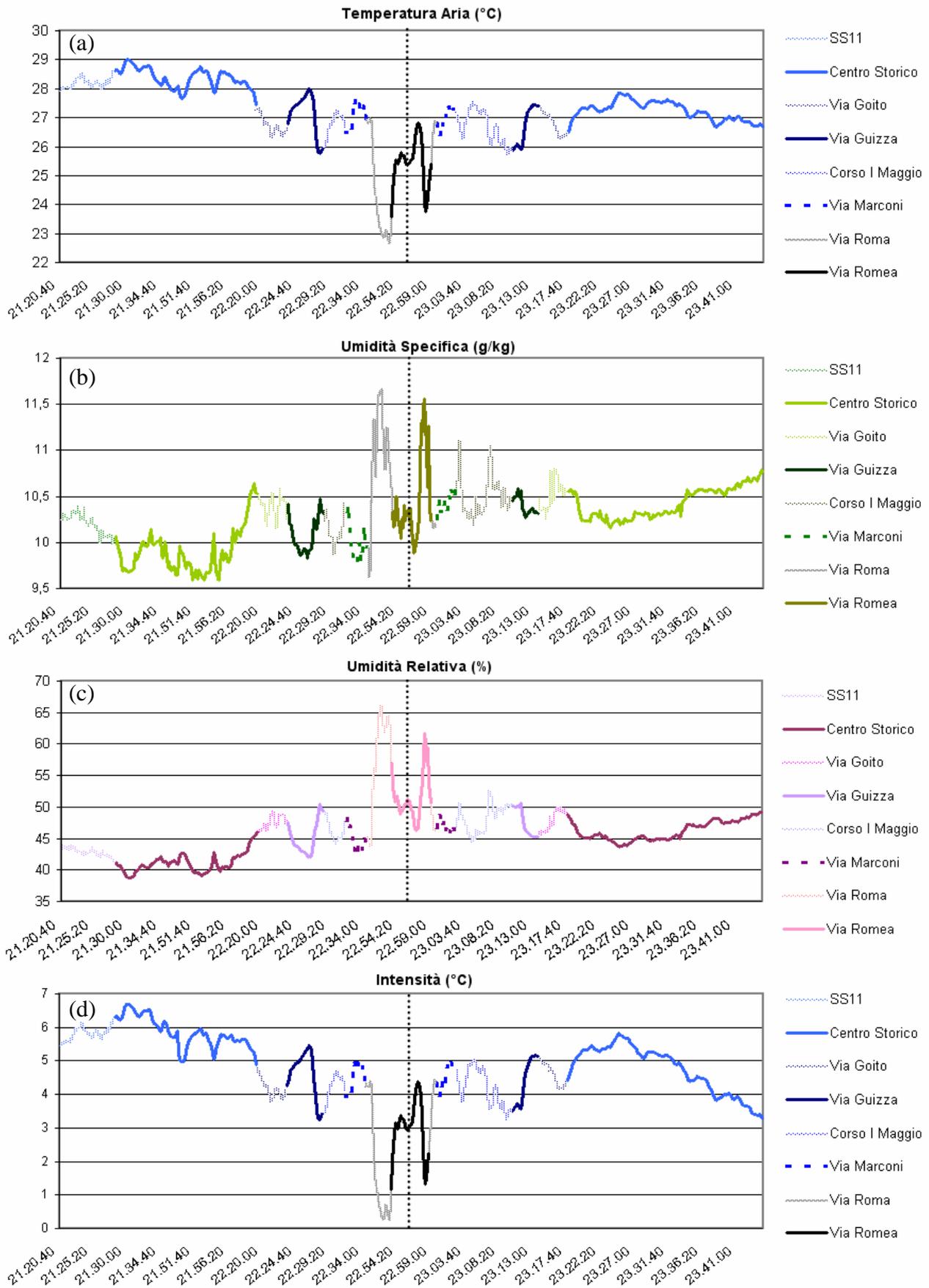


**Figura 6.4.** Rappresentazione grafica dei dati di temperatura (a), di umidità specifica (b) e relativa (c) ottenuti durante la terza sessione e della differenza tra la temperatura rilevata e quella di Legnaro (d).

Durante il tragitto di andata sono state osservate in via San Biagio e via Rinaldi temperature inferiori rispetto alle zone limitrofe, mentre sono state superiori in corso Milano, in via Giustiniani e nel primo tratto di via Trieste. Al contrario, nella seconda parte di via Trieste la temperatura è diminuita progressivamente ed è avvenuto un picco di umidità specifica (11.5 g/kg), osservabile in Figura 6.4.b, determinato dalla vicinanza del canale Piovego e dei Giardini dell'Arena. In seguito all'allontanamento dal centro cittadino si sono verificate, come nelle sessioni precedenti, delle diminuzioni di temperatura in via Goito e in via Guizza Conselvana. Degli aumenti sono invece riscontrabili in prossimità di Ponte San Nicolò (Figura 6.4.a.), sebbene di entità differenti nel corso dei due attraversamenti a causa del tempo trascorso per le misurazioni con il globotermometro effettuate in via Roma. Nel tratto di tale via che si addentra nel territorio agricolo sono state rilevate la massima umidità relativa e la minima temperatura del transetto, pari rispettivamente all' 80 % e a 21.5 °C; nel tratto di via Roma percorso al ritorno sono stati misurati invece 23 °C. Durante la seconda parte del transetto le temperature massime, pari a circa 27 °C, sono state ottenute nel centro di Padova, dove le zone maggiormente critiche sono risultate via Verdi (27.3 °C) e via Carducci (27.1 °C), mentre le temperature urbane minime rilevate sono state di 26.5 °C in via Manzoni e di 26.3 °C in via Gozzi. L'intensità massima dell'isola di calore (Figura 6.4.d) è pari a 6 °C nelle zone cittadine, valore prossimo a quello calcolato durante l'andata, diversamente da quanto accaduto nelle precedenti sessioni. Nel corso del ritorno, temperature inferiori di 1 °C e 2 °C rispetto alla città del Santo sono state rilevate nel centro di Ponte San Nicolò (UHII = 5 °C) e nella zona industriale di Legnaro (UHII = 4.5 °C), mentre in prossimità del collegamento tra corso Primo Maggio e via Guizza la differenza è stata di 3 °C (UHII = 2.5 °C). E' infine interessante notare che il valore massimo di umidità specifica (13.5 g/kg) è stato acquisito non in una zona rurale, ma in prossimità del centro cittadino durante il transito in via Goito.

#### ***6.3.4. Sessione notturna del 31/07/2012***

La quarta sessione di misura del fenomeno isola di calore nella città di Padova è avvenuta il 31 luglio dalle ore 21:21 alle ore 23:44. Durante il transetto di ritorno è stato percorso un tratto di tangenziale est, corso Esperanto e corso John e Robert Kennedy, che ha permesso di acquisire dei dati ambientali relativi alla zona industriale



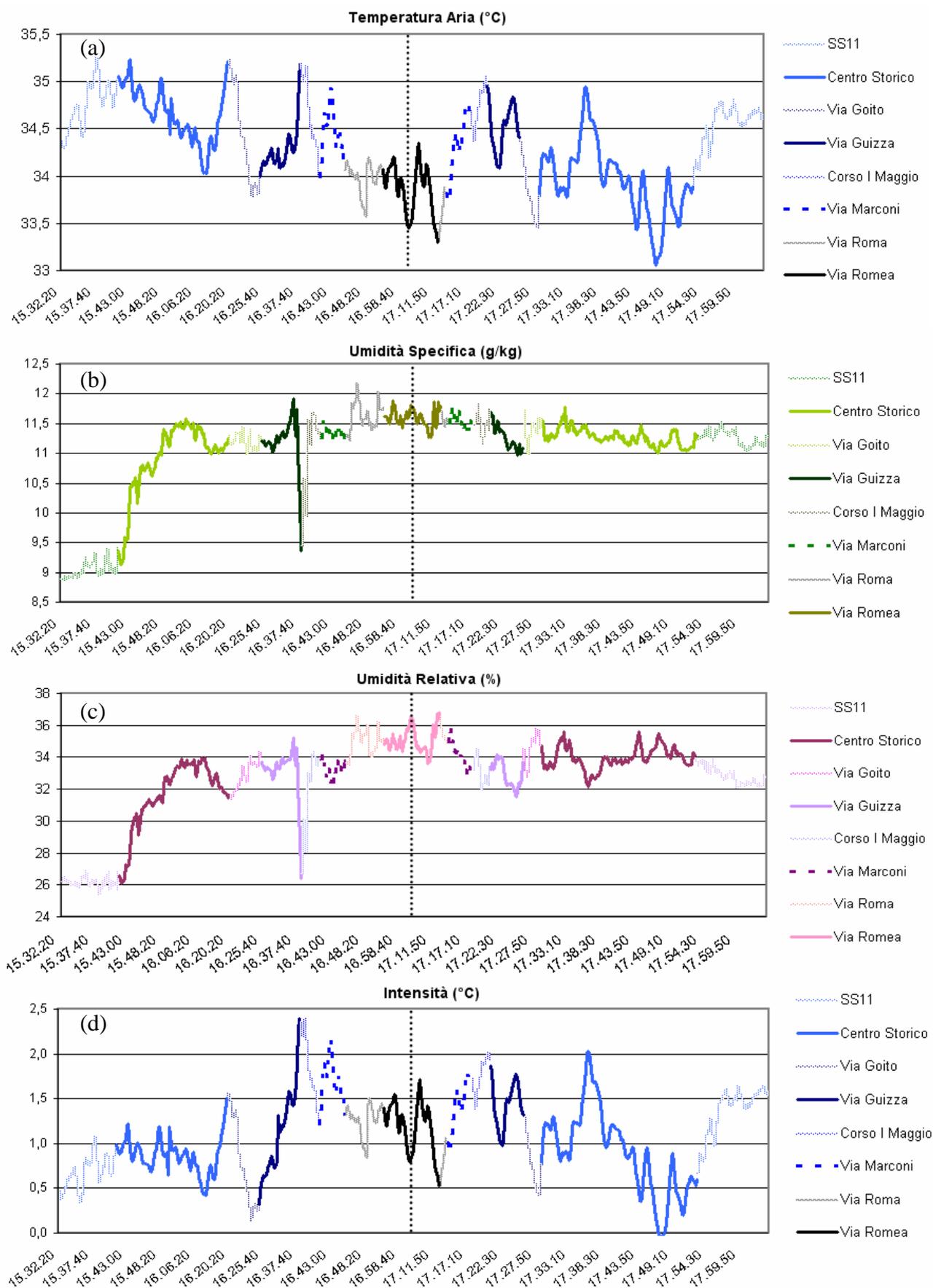
**Figura 6.5.** Rappresentazione grafica dei dati di temperatura (a), di umidità specifica (b) e relativa (c) ottenuti durante la quarta sessione e della differenza tra la temperatura rilevata e quella di Legnaro (d).

di Padova; nella suddivisione utilizzata per la rappresentazione grafica dei dati (Figura 6.5) tale tratto è stato raggruppato con quello relativo a corso Primo Maggio. L'inizio del ritorno in prossimità del centro di Legnaro e la conclusione dello stesso al termine del tratto relativo al centro storico costituiscono due ulteriori elementi di diversità rispetto al transetto "standard".

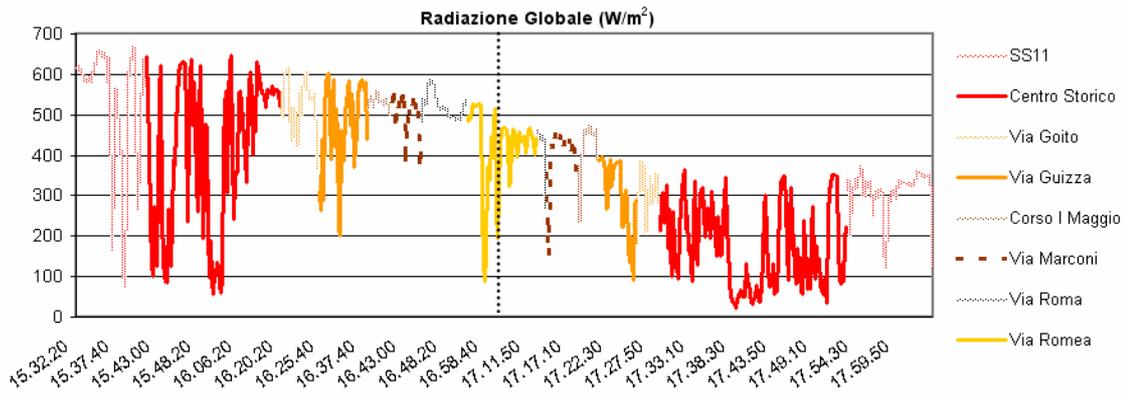
Similmente a quanto accaduto nelle precedenti sessioni, è possibile osservare (Figura 6.5.a) delle differenze di temperatura di circa 1 °C tra i dati relativi al primo tratto del centro storico: corso Milano, via Giustiniani e Prato della Valle costituiscono le zone con le temperature maggiori, mentre in via Rinaldi e in via Cesarotti si registrano quelle inferiori. Il tragitto d'andata non presenta significative difformità rispetto ai grafici precedentemente esposti, ad eccezione di un incremento termico nella parte centrale di via Guizza Conselvana. La temperatura minima nel corso dell'intera sessione, circa 23 °C, è stata rilevata nuovamente nel tratto rurale di via Roma, caratterizzata inoltre da elevati valori di umidità specifica e relativa. Utilizzando la temperatura di via Roma come riferimento, l'alterazione termica durante il percorso di ritorno è stata di 4 °C nella zona industriale di Legnaro, di 4.5 °C in quella di Padova e nell'abitato di Ponte San Nicolò e di 5 °C nella città del Santo. Tali differenze sono simili ai valori di intensità dell'isola di calore osservabili in Figura 6.5.d. In questa sessione tuttavia l'intensità massima (6.5 °C) è stata calcolata nel corso dell'andata, mentre nella seconda parte del transetto 6 °C sono stati quantificati solamente in via Gattamelata, dove la temperatura è stata di 28 °C alle 23:30. Seppur contraddistinte da valori inferiori, anche le temperature di via Tommaseo e di via Verdi sono state maggiori rispetto alle zone limitrofe, mentre è possibile affermare l'opposto riferendosi a via Manzoni, via Gozzi e via Matteotti.

### ***6.3.5. Sessione giornaliera del 02/08/2012***

Nella giornata di giovedì 2 agosto sono state effettuate due sessioni di misura: una diurna e una notturna. Le misurazioni pomeridiane sono avvenute senza variazioni rispetto al percorso di riferimento tra le ore 15:32 e le 18:04. La radiazione solare e la riflettività della copertura dello Scudo Fiat hanno tuttavia introdotto degli errori di misurazione del termoigrometro, probabilmente dovuti alla mancanza di efficacia dello schermo antiradiante nei confronti delle radiazioni provenienti dal basso. Durante alcune fermate del mezzo si sono infatti verificati significativi (0.5 - 1°C) aumenti delle

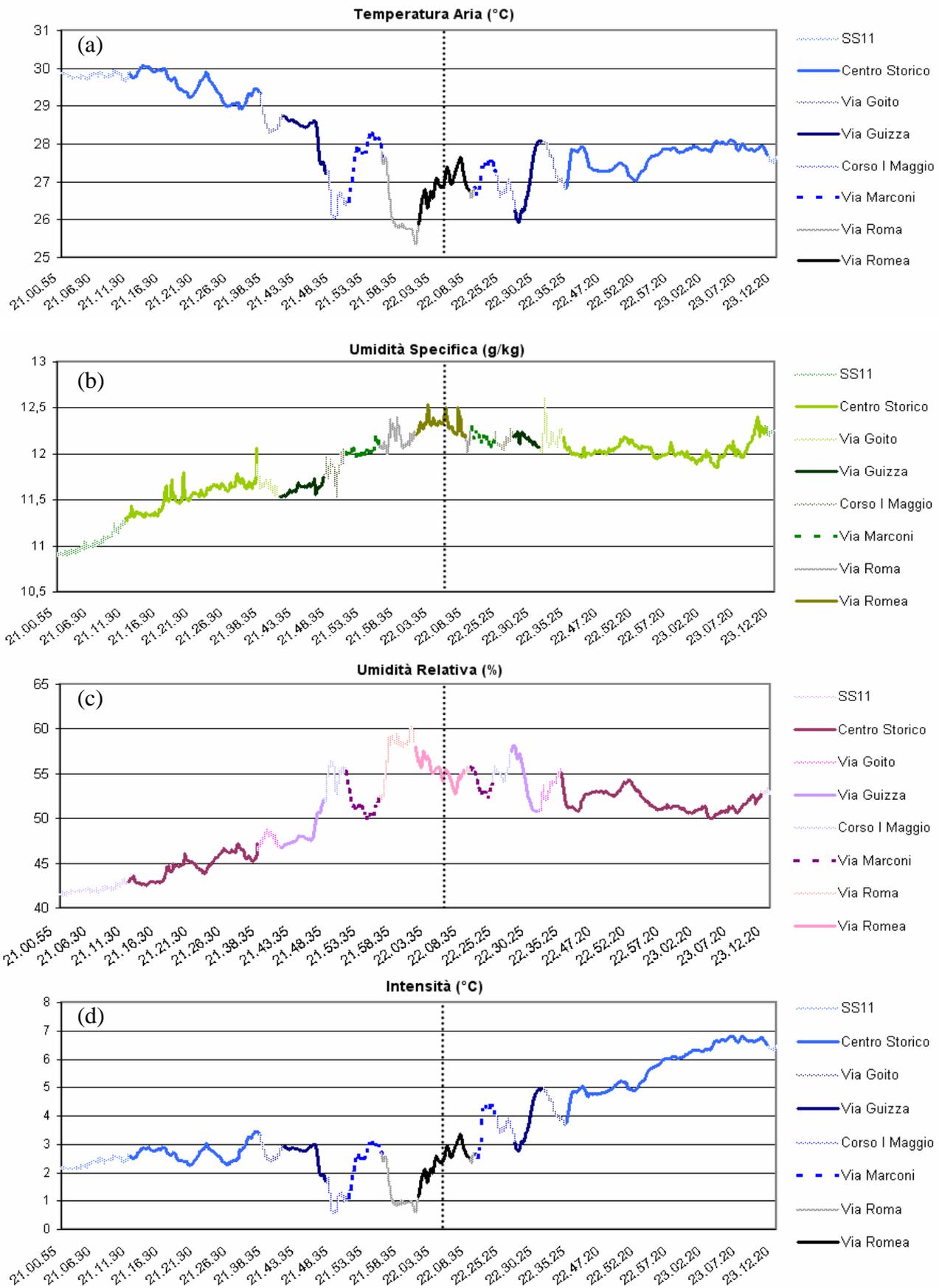


**Figura 6.6.** Rappresentazione grafica dei dati di temperatura (a), di umidità specifica (b) e relativa (c) ottenuti durante la quinta sessione e della differenza tra la temperatura rilevata e quella di Legnaro (d).



**Figura 6.7.** Radiazione globale rilevata nel corso della quinta sessione di misura

temperature misurate. Si ritiene comunque che gli errori siano trascurabili nei rilevamenti effettuati in movimento, e anche nel caso in cui non lo fossero i dati acquisiti resterebbero significativi in termini differenziali, data la natura sistematica degli errori stessi. Nelle rappresentazioni grafiche nelle Figure 6.6 e 6.7 sono stati quindi eliminati alcuni dati ottenuti in seguito alle soste, quando il sensore di temperatura forniva valori eccessivamente elevati. Dalla comparazione del grafico in Figura 6.6.a con i grafici di temperatura delle sessioni precedenti risulta evidente la diversità tra la situazione diurna e quella notturna. Nel grafico in esame le differenze di temperatura non sono elevate come in precedenza ed esiste una maggiore variabilità all'interno del centro cittadino presumibilmente causata dall'irraggiamento solare non uniforme; confrontando le Figure 6.7 e 6.6.a è possibile infatti osservare una certa corrispondenza tra i minimi relativi presenti. Seppur di entità inferiore rispetto al periodo notturno, il fenomeno isola di calore sembra essere presente anche nel pomeriggio (Figura 6.6.d): l'intensità calcolata in corso Milano e in via Gozzi nel transetto di andata è pari a 1.2 °C, mentre è di 2 °C in via Stoppato durante il ritorno. In entrambi i percorsi è inoltre presente un'alterazione termica in via Marconi e nell'area tra via Guizza Conselvana e corso Primo Maggio (caratterizzata da basse temperature durante le osservazioni notturne), poiché in questi luoghi la temperatura è maggiore di circa 1.5 °C rispetto a quella di via Roma. La riduzione di temperatura che si verifica presso via Roma è indubbiamente inferiore rispetto a quella osservata nel periodo notturno, mentre rimane invariato l'abbassamento termico di 1 °C che avviene percorrendo via Goito. Elementi di diversità rispetto alla situazione notturna sono; l'andamento crescente di temperatura in via Guizza Conselvana nel transetto di andata e la differenza di circa 1.5 °C presente tra l'ultimo tratto del transetto (via Chiesanuova) e alcune zone del centro, tra cui il piazzale della Stazione e piazza Insurrezione.



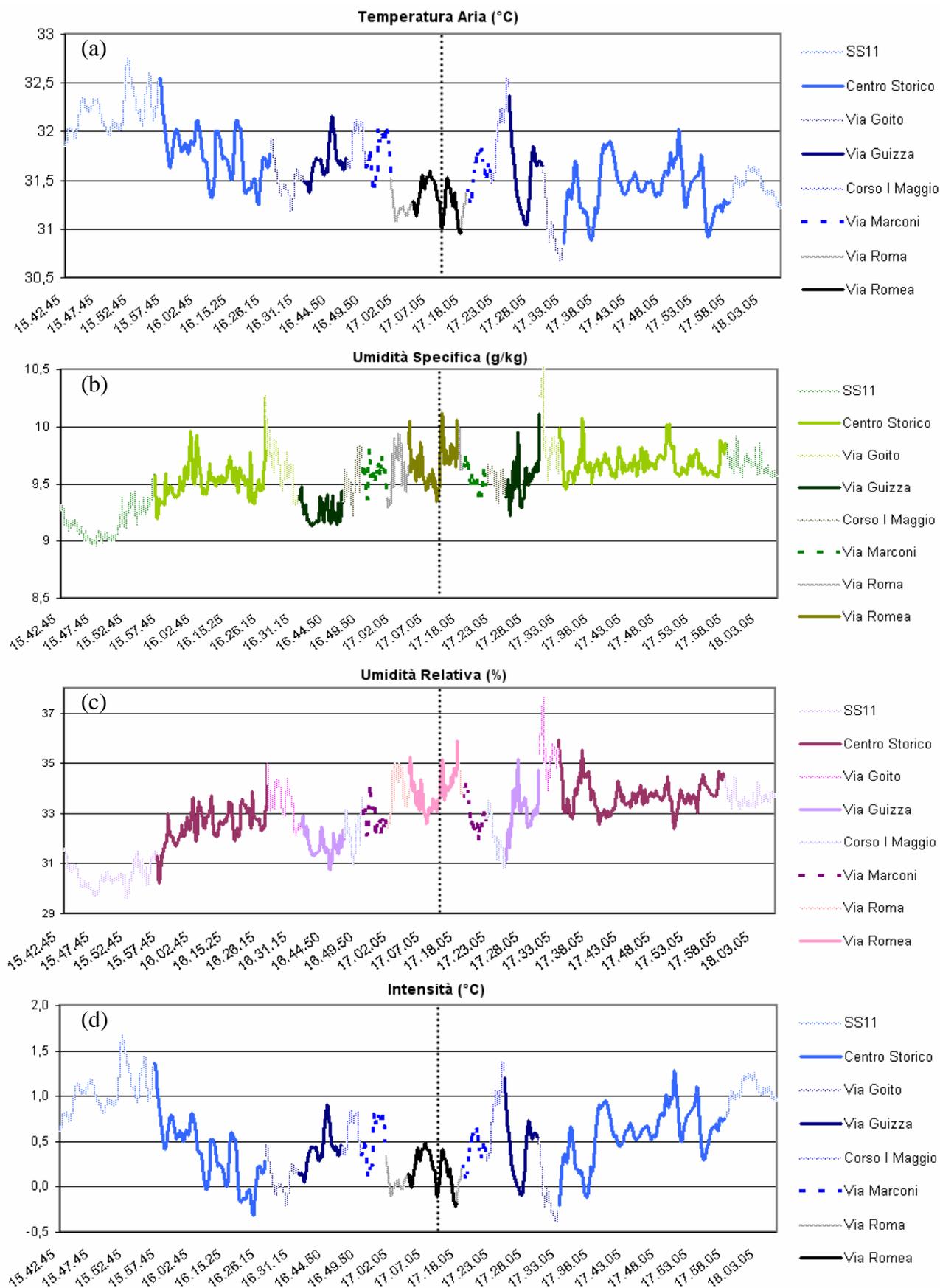
**Figura 6.8.** Rappresentazione grafica dei dati di temperatura (a), di umidità specifica (b) e relativa (c) ottenuti durante la sesta sessione e della differenza tra la temperatura rilevata e quella di Legnaro (d).

### *6.3.6. Sessione notturna del 02/08/2012*

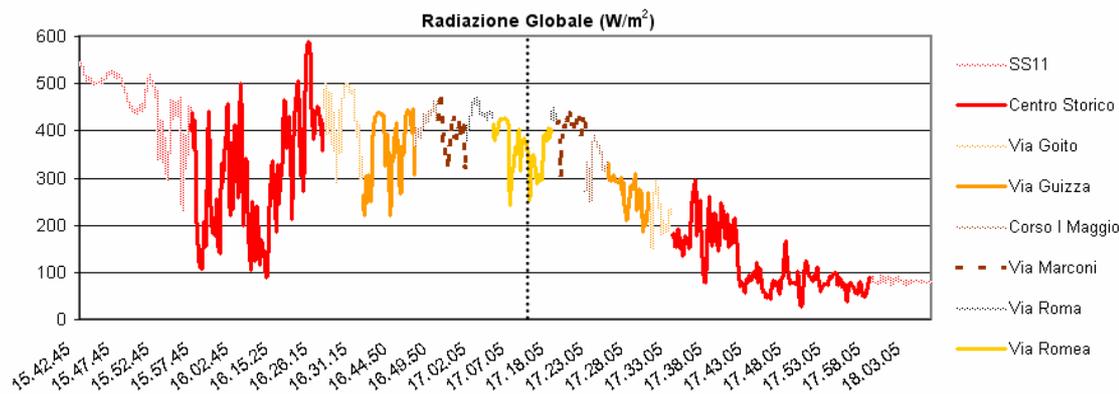
I dati ottenuti nel corso della seconda sessione di misura del 2 agosto, realizzata dalle ore 21:01 alle ore 23:13, sono rappresentati in Figura 6.8. Nonostante la temperatura all'orario di partenza (30 °C) sia la maggiore tra quelle rilevate all'inizio delle misurazioni notturne, la differenza di temperatura rilevata (Figura 6.8.a) è inferiore rispetto alle sessioni effettuate in luglio. La minor differenza osservabile, 2.5 °C contro 4.5 ÷ 5.5 °C, è probabilmente dovuta alla diversità tra gli orari di transito in via Roma: nel caso in esame il passaggio è infatti avvenuto alle 22:00 mentre in precedenza si verificava verso le ore 23:00. Tuttavia il grafico in Figura 6.8.d rivela come le rilevazioni effettuate al ritorno sottostimino l'intensità dell'effetto UHI, che raggiunge invece i 7 °C: mentre la temperatura del centro patavino risultava di circa 28 °C (eccetto via Carducci e via Manzoni), il rapido raffreddamento verificatosi nell'area rurale ha determinato l'alterazione termica più elevata tra quelle osservate. Nel transetto di andata invece l'intensità dell'effetto in città è notevolmente minore ed è compresa tra i 2 °C di via Battisti e Prato della Valle ed i 3°C di via Trieste e via Ospedale Civile. Intensità inferiori rispetto a quelle massime rilevate a Padova si sono verificate presso Ponte San Niccolò (3 °C all'andata e 4.4 °C al ritorno) e nella zona industriale di Legnaro (3.3 °C). Diminuzioni di temperatura, con entità simile rispetto alle sessioni precedenti, si ripresentano presso via Guizza e via Goito, contraddistinta da valori di umidità specifica particolarmente elevati (Figura 6.8.b).

### *6.3.7. Sessione giornaliera del 09/08/2012*

Nel corso del 9 agosto sono state effettuate le ultime due sessioni di misura, la prima delle quali è avvenuta dalle ore 15:43 alle 18:06. La seconda investigazione pomeridiana del fenomeno UHI sembra confermare le informazioni ottenute nella precedente svolta nel medesimo orario: l'effetto diurno è notevolmente inferiore a quello serale, dal momento che l'intensità massima osservata in città è di poco superiore a 1 °C e in alcune zone assume valori negativi (Figura 6.9.d). Nella seconda parte del percorso tuttavia, le alterazioni termiche osservate potrebbero essere state influenzate dal progressivo aumento di nuvolosità che si è verificato, come è osservabile dalla diminuzione della radiazione globale in Figura 6.10.



**Figura 6.9.** Rappresentazione grafica dei dati di temperatura (a), di umidità specifica (b) e relativa (c) ottenuti nella settima sessione e della differenza tra la temperatura rilevata e quella di Legnaro (d).

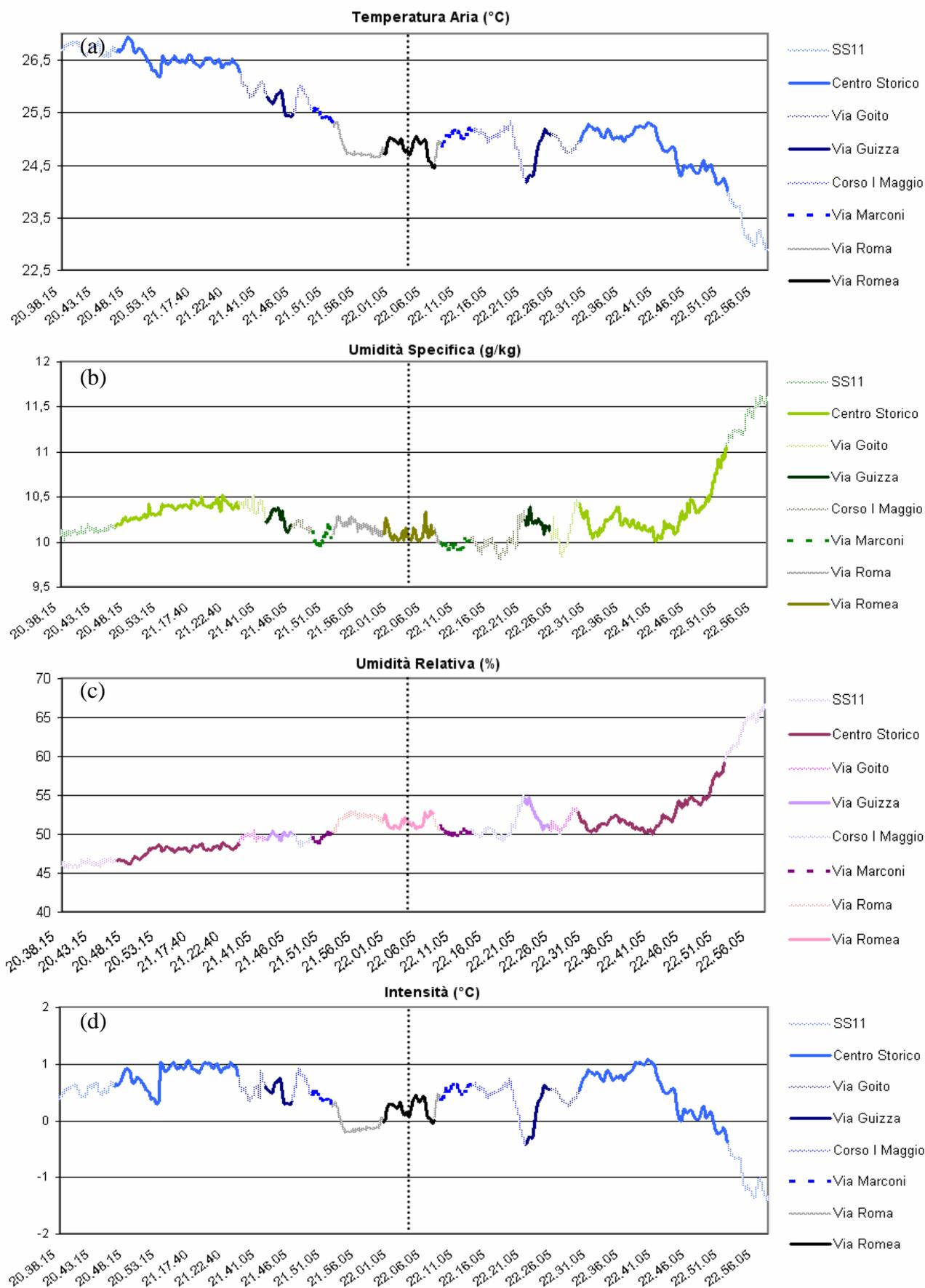


**Figura 6.10.** Radiazione globale rilevata nel corso della quinta sessione di misura

Le temperature (32.5 °C) e le intensità (1.5 °C) maggiori sono state rilevate al di fuori del centro urbano: nel tratto attraversato di strada statale 11 e in prossimità della connessione tra via Guizza e corso Primo Maggio. L'intensità massima misurata a Padova è stata di circa 1 °C in via Gozzi e in via Giotto durante la seconda parte del transetto, mentre i valori minimi e leggermente negativi sono stati ottenuti presso Prato della Valle all'andata, in via Manzoni al ritorno e in via Goito in entrambi i percorsi. Nell'ultima strada nominata, similmente a quanto accaduto nei precedenti rilievi, i valori di umidità specifica e relativa sono stati i più elevati tra quelli acquisiti.

### 6.3.8. Sessione notturna del 09/08/2012

L'ultima sessione di misura è avvenuta il 9 agosto dalle 20:38 alle 22:58. La temperatura alla partenza del transetto (quasi 27 °C) è stata la minore tra quelle osservate all'inizio delle acquisizioni notturne, nonostante la massima (32 °C) giornaliera rilevate dalla stazione ARPAV di Legnaro sia stata simile alle massime delle prime quattro giornate di misura (31.3 ÷ 33.1 °C). La causa della minor temperatura rilevata è stata l'aumento di nuvolosità verificatosi nel tardo pomeriggio, responsabile delle leggere precipitazioni avvenute nell'ultima parte del transetto e di una pioggia intensa al termine delle misurazioni. I dati raccolti confermano la correlazione negativa esistente tra le condizioni atmosferiche descritte e l'intensità dell'isola di calore (UHII). Infatti la massima differenza di temperatura tra centro e zone rurali osservabile nel tragitto di ritorno in Figura 6.11.a è di 1 °C: il valore inferiore tra quelli rilevati nelle sessioni notturne.

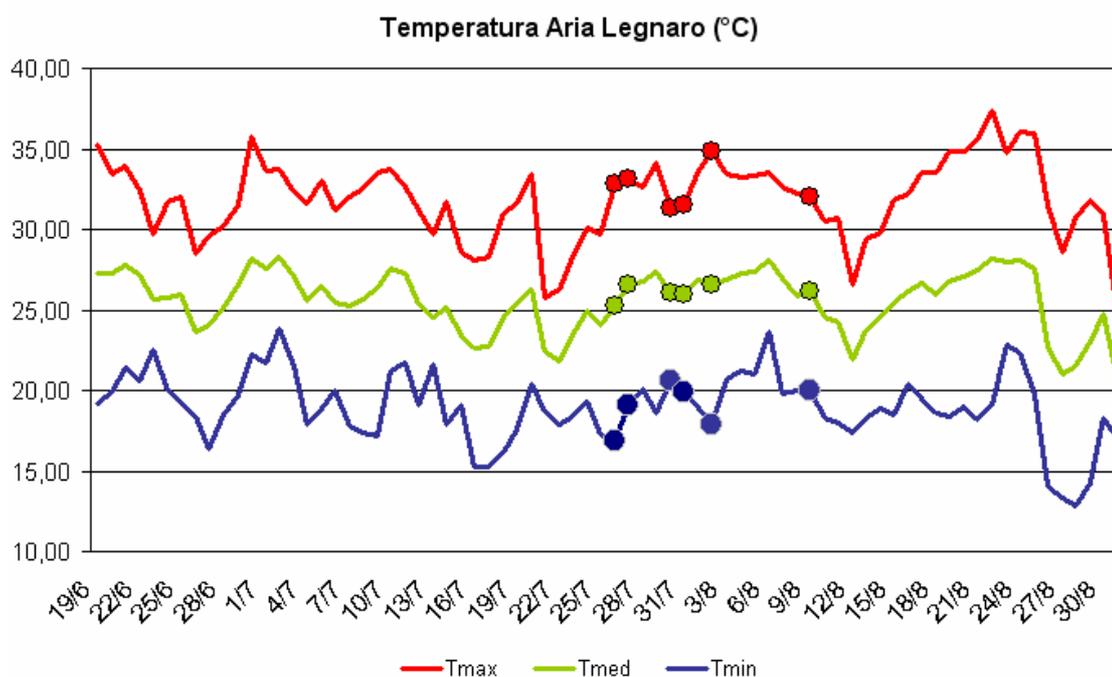


**Figura 6.11.** Rappresentazione grafica dei dati di temperatura (a), di umidità specifica (b) e relativa (c) ottenuti nell'ottava sessione e della differenza tra la temperatura rilevata e quella di Legnaro (d).

Le temperature e le intensità inferiori, escludendo la parte finale del tracciato, sono state acquisite nuovamente in via Roma e tra via Guizza Conselvana e Corso Primo Maggio. L'alterazione termica (Figura 6.11.d) osservata nel centro cittadino rispetto a queste zone è di circa 1 °C, mentre non sono significativi per un confronto i dati ottenuti nella seconda parte del tragitto di ritorno: la diminuzione di temperatura, l'aumento di umidità specifica e relativa testimoniano l'inizio del fenomeno temporalesco.

## 6.4.Gli esiti delle misurazioni

La percorrenza di oltre 400 km ha permesso di esaminare la variabilità territoriale del fenomeno isola di calore della città di Padova. Dal momento che le sessioni di misura sono state effettuate in giornate con temperature tipiche del periodo estivo (Figura 6.12), è probabile che l'effetto UHI possa manifestarsi con caratteristiche simili a quelle rilevate. Le intensità (UHII) ottenute sono tuttavia risultate considerevolmente diverse rispetto a quelle osservate nell'analisi dei dati ARPAV precedentemente effettuata; mentre l'alterazione massima misurata è di 7 °C, la differenza tra le serie storiche di temperature ARPAV di Padova e Legnaro assume tale valore soltanto due volte negli ultimi 18 anni. Poiché le temperature acquisite nelle zone rurali dalla stazione mobile e



**Figura 6.12.** Temperatura massime, medie e minime giornaliere rilevate dalla stazione ARPAV di Legnaro durante l'estate 2012. Sono in evidenza le giornate di misurazione.

dalla stazione fissa non differiscono in maniera significativa, la stazione dell'Orto Botanico appare quindi non sufficientemente rappresentativa del territorio urbano.

In accordo con la dinamica temporale del fenomeno individuata nel quarto capitolo, l'alterazione termica della città patavina è risultata minore nell'intervallo 15:00 – 18:00 ( $0 \div 2$  °C) rispetto al periodo notturno 21:00 – 00:00, quando l'intensità osservata in assenza di precipitazioni è stata compresa tra 1 °C e 7 °C. Le intensità più elevate si sono verificate generalmente nel tragitto di ritorno ma valori maggiori si sarebbero probabilmente potuti acquisire nell'intervallo 00:00 – 06:00.

La variabilità spaziale dell'effetto nel centro urbano risulta di almeno 1 °C (anche nelle sessioni diurne), ma è tuttavia difficilmente quantificabile con precisione a causa della discrepanza temporale tra le misure. E' possibile comunque individuare le zone contraddistinte da condizioni termiche differenti se confrontate con le aree limitrofe. Temperature inferiori sono state rilevate in via Gozzi e presso ponte Porciglia grazie alla vicinanza del canale Piovego e dei Giardini dell'Arena, in via Manzoni per la presenza di vegetazione e solamente durante le ore di luce o in prossimità del tramonto nei canyon di via Battisti, via Rinaldi e via Cesarotti poiché l'elevato rapporto altezza-distanza degli edifici riduce la radiazione solare entrante, ma ostacola il raffreddamento nelle ore successive. Temperature mediamente più elevate sono state al contrario ottenute in via Gattamelata e in via Giustiniani, nel percorso notturno di ritorno in via Verdi e in via Battisti a causa dell'effetto canyon.

E' stato inoltre possibile osservare degli andamenti regolari nel territorio situato tra le due stazioni. L'attraversamento di via Goito ha determinato in tutte le sessioni di misura un abbassamento di temperatura di 1 °C, causato dalla maggior umidità disponibile grazie alla vicinanza del canale. La percorrenza di via Guizza Conselvana consente invece una diminuzione di quasi 2 °C in direzione uscente dalla città ed un aumento di pari entità in senso contrario nelle sessioni notturne, mentre è accaduto l'opposto nelle misurazioni diurne. Infine le temperature minori sono state acquisite quasi sempre nell'area compresa Legnaro e Ponte San Nicolò, mentre nei centri dei due paesi l'alterazione termica osservata è risultata significativa e in alcune misurazioni ha raggiunto i 5 °C.

# Capitolo 7

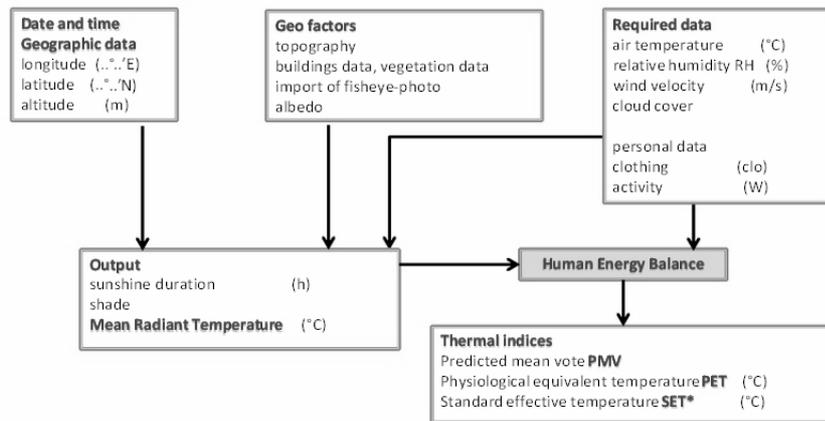
## Analisi di siti caratteristici

Nei precedenti capitoli lo studio del fenomeno UHI della città di Padova è avvenuto utilizzando dati ottenuti da stazioni meteorologiche fisse e attraverso misurazioni realizzate “in transetto”. Esiste tuttavia una terza modalità, complementare alle precedenti, che permette l’osservazione del fenomeno: l’acquisizione di informazioni ambientali in siti prescelti impiegando una stazione mobile in maniera “fissa” per brevi periodi di tempo. Tale modalità consente di non dedicare la strumentazione di misura ad un’unica postazione e di ottenere grandezze fisiche aggiuntive rispetto alle misurazioni effettuate in movimento (nel nostro caso temperatura media radiante, velocità del vento e radiazione netta); inoltre, l’individuazione di un sito caratteristico di un ambito territoriale, consente di caratterizzarlo ai fini di una possibile analisi delle strategie di mitigazione del fenomeno. In quest’ultimo capitolo vengono esposte le informazioni ottenute durante le fermate della stazione mobile ed è testata l’accuratezza nella simulazione della temperatura media radiante del software RayMan, utilizzato inoltre per calcolare il livello di comfort termico nei siti investigati.

### 7.1.RayMan 1.2

La temperatura media radiante è uno dei parametri ambientali che maggiormente influenza il benessere termo-igrometrico degli individui durante la stagione estiva. Questo vale sia negli spazi indoor che in quelli outdoor, dove può variare considerevolmente in virtù dell’importante contributo della radiazione solare. Il software RayMan è stato sviluppato dall’Istituto Meteorologico dell’Università di Friburgo per valutare i flussi radiativi scambiati dal corpo umano con l’ambiente circostante e per calcolare alcuni indici di comfort in ambiente outdoor (Matzarakis et al. 2007). La stima della temperatura media radiante è possibile fornendo al software tre categorie di input (Figura 7.1): dati temporali e geografici, informazioni relative alle strutture presenti e variabili meteorologico-ambientali. Attraverso la conoscenza di data, ora e coordinate geografiche del sito (latitudine, longitudine e altitudine) viene inizialmente calcolata la radiazione globale in condizioni di orizzonte libero e in

assenza di nubi. Sono quantificate successivamente le componenti di radiazione diretta e diffusa che raggiungono il luogo, nota la limitazione dell'orizzonte prodotta dalle strutture e la nuvolosità espressa in okta o ottavi del cielo (unità di misura variabile nell'intervallo  $0 \div 8$  che esprime in termini frazionari l'area del cielo coperta da nubi).



**Figura 7.1.** Schema del modello di simulazione utilizzato da RayMan (Fontanesi 2011)

La radiazione atmosferica viene in seguito calcolata utilizzando i dati relativi alla temperatura dell'aria, alla pressione di vapore e alla nuvolosità. Infine, la radiazione emessa e la temperatura delle superfici sono stimate attraverso un procedimento iterativo impiegando alcuni input aggiuntivi: il coefficiente di riflessione della radiazione solare, l'emissività ed il rapporto di Bowen (rapporto tra il flusso di calore sensibile e latente) delle superfici e la velocità del vento (Matzarakis et al. 2010). I flussi radiativi stimati permettono quindi di ottenere, senza la necessità di misurazioni sperimentali, la temperatura media radiante del sito nell'istante considerato, seppur con inevitabili approssimazioni. Il software consente inoltre di valutare il comfort termico percepito nella posizione esaminata purché, oltre alle variabili ambientali, siano fornite informazioni soggettive relative alla persona coinvolta nei processi di trasferimento energetico: la resistenza termica del vestiario ed il flusso metabolico.

Nelle prossime sezioni sono riportati i dati necessari per l'utilizzo del software RayMan e la descrizione degli output ottenibili.

### 7.1.1. Inserimento delle caratteristiche del sito

L'immissione della maggior parte dei dati avviene utilizzando gli appositi campi presenti nella finestra principale del programma. Tuttavia l'inserimento delle informazioni relative alla limitazione dell'orizzonte (e quindi utili al calcolo dei fattori

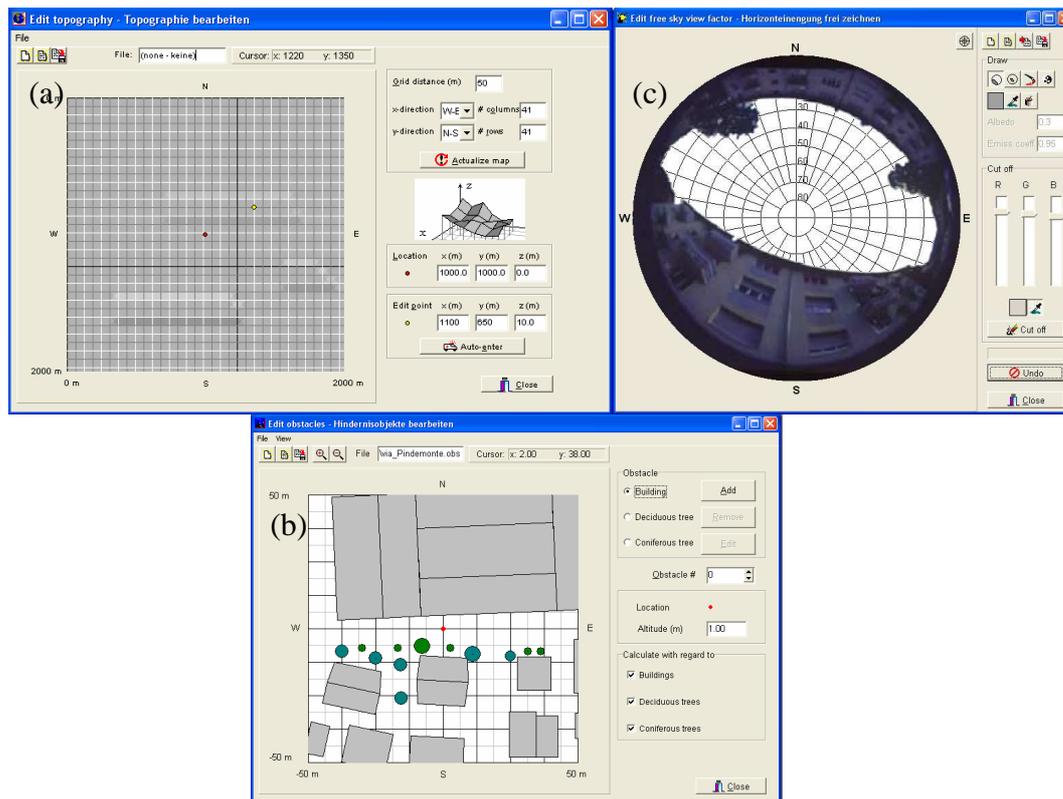
di vista) deve essere effettuato tramite finestre dedicate ed è possibile attraverso tre differenti modalità equivalenti: *Topography*, *Obstacles* e *Sky view factor*.

La finestra *Topography* (Figura 7.2.a) consente di specificare l'altezza esistente in ogni posizione del sito scelto, per permettere al modello di considerare l'influenza degli edifici e dei rilievi superficiali sui flussi radiativi.

Nel caso in cui il terreno sia pianeggiante l'inserimento delle caratteristiche delle strutture è più agevole attraverso la seconda modalità (Figura 7.2.b), con la quale è possibile collocare in un mappa dotata di un sistema di coordinate cartesiane tridimensionale tre tipologie di ostacoli: edifici, alberi decidui e conifere. L'inserimento delle costruzioni (colore grigio) è più celere rispetto alla modalità *Topography*, poiché è sufficiente indicare l'altitudine dei quattro vertici. Un ulteriore elemento di diversità è rappresentato dalla possibile presenza di alberi, suddivisi tra decidui (colore verde) e conifere (colore verde acqua) al fine di considerare nel calcolo la perdita del fogliame nel periodo autunno-invernale. L'introduzione di una pianta nel modello richiede tuttavia la disponibilità dei dati relativi al raggio della chioma e all'altezza minima e massima raggiunta dalle fronde. Le tre tipologie di ostacoli, identificate dalle differenti colorazioni, possono essere attivate o disattivate ai fini della simulazione per valutare l'influenza sulla temperatura media radiante di ciascun gruppo.

La terza modalità è il sistema più rapido per consentire al software di calcolare il fattore di vista del cielo, definito come il rapporto, compreso tra zero e uno, tra la radiazione emessa (o ricevuta) dallo specifica posizione scelta e la radiazione ricevuta (o emessa) dall'intero ambiente emisferico. Importando un'immagine fotografica fish-eye (Figura 7.2.c) non sono infatti necessarie attività manuali di inserimento delle caratteristiche del sito, come invece avviene nelle precedenti modalità. La realizzazione di un'immagine fish-eye è tuttavia possibile solamente utilizzando un apposito obiettivo grandangolare estremo in grado di abbracciare un angolo di campo non minore di 180°. Qualora vi fosse la disponibilità dell'obiettivo è consigliabile scattare l'immagine ad una quota di 1.1 m, l'altezza del centro di gravità medio di un uomo adulto (Matzarakis et al. 2010). Nel caso contrario è comunque possibile disegnare attraverso la finestra *Sky view factor* una vista simile ad una fish-eye.

A causa della natura pianeggiante del terreno e della mancanza di un obiettivo fish-eye, nelle simulazioni riguardanti i siti caratteristici del territorio padovano è stata utilizzata la modalità *Obstacles*, che inoltre ha consentito di distinguere gli ostacoli presenti nei siti tra vegetazione ad alto fusto ed edifici.



**Figura 7.2.** Modalità differenti per l’inserimento delle informazioni relative alla limitazione dell’orizzonte: (a) *Topography*, (b) *Obstacles* e (c) *Sky view factor*.

### 7.1.2. Output ottenibili

Sebbene la finalità principale del programma sia la stima della temperatura media radiante, RayMan consente di calcolare degli output aggiuntivi. E’ possibile infatti ottenere un diagramma con il percorso effettuato dal sole in un giorno stabilito, osservare le zone d’ombra determinate dagli edifici e dalla vegetazione in un istante specifico, avere a disposizione la durata di soleggiamento del sito per ogni giorno dell’anno (con e senza limitazioni dell’orizzonte) e ottenere alcuni indici di comfort.

Gli indici di comfort esprimono attraverso un valore numerico lo stato di benessere di un individuo e verranno utilizzati nei successivi paragrafi per evidenziare le differenze tra i siti individuati nel territorio padovano. E’ opportuno per tale motivo descrivere in questa sezione le caratteristiche degli indici calcolati dal software: PMV, PET e SET\*.

Le variabili principali utilizzate nei tre casi per quantificare il benessere termigrometrico sono classificabili in ambientali (temperatura a bulbo secco dell’aria,

umidità dell'aria, temperatura media radiante e velocità media relativa dell'aria) e soggettive (attività fisica svolta e resistenza termica del vestiario).

Il PMV (Predicted Mean Vote) è stato definito dallo studioso danese Fanger che, osservando la risposta ai cambiamenti delle sette variabili in un ampio gruppo di persone, è riuscito a definire una funzione matematica del benessere. Il risultato della funzione, pensata per condizioni indoor, è un valore numerico nel range  $-3 \div 3$  (Figura 7.3) dove lo zero rappresenta lo stato di benessere termico. Essendo un indice medio riferito ad un gruppo di individui, il raggiungimento di un PMV pari a zero non annulla completamente la percentuale di persone insoddisfatte ma la minimizza al 5%.

La temperatura fisiologica equivalente (Physiological Equivalent Temperature - PET) è definita come la temperatura dell'aria di un tipico ambiente indoor, nel quale il bilancio termico del corpo umano e le temperature interna e della pelle sarebbero uguali rispetto alla situazione considerata. Le condizioni utilizzate come riferimento nell'ambiente chiuso sono: temperatura dell'aria pari alla temperatura media radiante, velocità dell'aria di 0.1 m/s, tensione di vapore di 12 hPa (50% UR a 20 °C), un metabolismo da lavoro uguale a 80 W (aggiuntivi rispetto al metabolismo basale) e la resistenza termica del vestiario di 0.9 clo (l'isolamento di un abito europeo di mezza stagione è di 1 clo). Nonostante la PET sia una temperatura equivalente rispetto a delle condizioni indoor virtuali sembra essere applicabile a una grande varietà di condizioni esterne (Honjo 2009). In Figura 7.3 è osservabile una comparazione tra PET e PMV.

Il terzo indice ottenibile con RayMan è la *new Standard Effective Temperature* - SET\*. Si tratta (Figura 7.3) della temperatura a bulbo secco che avrebbe un ipotetico ambiente caratterizzato dal 50% di umidità relativa, nel quale l'abbigliamento indossato dal soggetto fosse standardizzato in base all'attività svolta nella realtà e in cui la temperatura della pelle e il livello di sudorazione del soggetto rimanessero invariati.

PMV	PET (°C)	Human sensation	Thermal stress level
-3.5	4	very cold	extreme cold stress
-2.5	8	cold	strong cold stress
-1.5	13	cool	moderate cold stress
-0.5	18	slightly cool	slight cold stress
0.5	23	comfortable	no thermal stress
1.5	29	slightly warm	slight heat stress
2.5	35	warm	moderate heat stress
3.5	41	hot	strong heat stress
		very hot	extreme heat stress

SET	vote	sensation
> 37.5	> 3	very hot, great discomfort
37.5-34.5	+2 to +3	hot, very unacceptable
34.5-30	+1 to +2	warm, uncomfortable, unacceptable
30-25.6	+0.5 to +1	slightly warm, slightly unacceptable
25.6-22.2	-0.5, +0.5	comfortable, acceptable
22.2-17.5	-1 to -0.5	slightly cool, slightly unacceptable
17.5-14.5	-2 to -1	cool, unacceptable
14.5-10	-3 to -2	cold, very unacceptable

**Figura 7.3.** Confronto tra i valori degli indici PMV-PET-SET\* (Gulyas et al. 2003)

## 7.2. Misurazioni

Le fermate effettuate con la stazione mobile nel tessuto urbano, sub-urbano e rurale patavino hanno permesso di investigare in maniera più approfondita il fenomeno UHI in alcuni siti prescelti. Oltre alle grandezze ottenute durante i transetti (temperatura a bulbo secco e umidità relativa) è stato infatti possibile rilevare la velocità del vento, la temperatura media radiante e la radiazione netta. La conoscenza di questi dati, impossibili da ottenere in movimento, ha permesso il calcolo tramite RayMan degli indici di comfort al fine di comparare il benessere percepito nei differenti ambienti.

Il globotermometro è stato impiegato unicamente durante le sessioni notturne; dal valore  $T_g$  fornito in output è stata calcolata la temperatura media radiante  $T_{mr}$  attraverso la seguente formula (vedi paragrafo 5.1.5), utilizzata anche da Thorsson et. al (2007) e da Cheng et al. (2012) in ambienti outdoor:

$$T_{mr} = \sqrt[4]{T_g^4 + \frac{\alpha}{\sigma \cdot \varepsilon} (T_g - T_a)} \quad \text{dove} \quad \alpha = 6.3 \frac{v^{0.6}}{D^{0.4}} \quad (7.1)$$

in cui  $T_a$  è la temperatura dell'aria,  $\sigma$  la costante di Stefan-Boltzmann,  $\varepsilon=0.95$  l'emissività della sfera,  $\alpha$  il coefficiente di convezione,  $v$  la velocità del vento e  $D=15$  cm il diametro del globo. Le misurazioni della radiazione netta sono state al contrario effettuate solamente nelle sessioni diurne, poiché nel periodo notturno gli scambi radiativi netti sono risultati significativi nella sola direzione perpendicolare al suolo. La procedura adottata ha previsto il mantenimento di una distanza di almeno 1.5 m dalle superfici emittenti, l'individuazione dei punti cardinali tramite bussola, l'orientamento del sensore in condizioni di ortogonalità rispetto alla direzione scelta con l'ausilio di una livella a bolla e il mantenimento della posizione fino alla stabilità della misura acquisita. In ogni misurazione la procedura descritta è stata ripetuta tre volte per rilevare il flusso radiativo netto nelle direzioni ovest-est, sud-nord e sotto-sopra. Un bollino rosso presente sul radiometro ha inoltre permesso di riconoscere il verso considerato positivo dallo strumento: nei rilevamenti effettuati le radiazioni provenienti da ovest, sud e sotto sono state considerate convenzionalmente positive.

### 7.2.1. Via Rinaldi

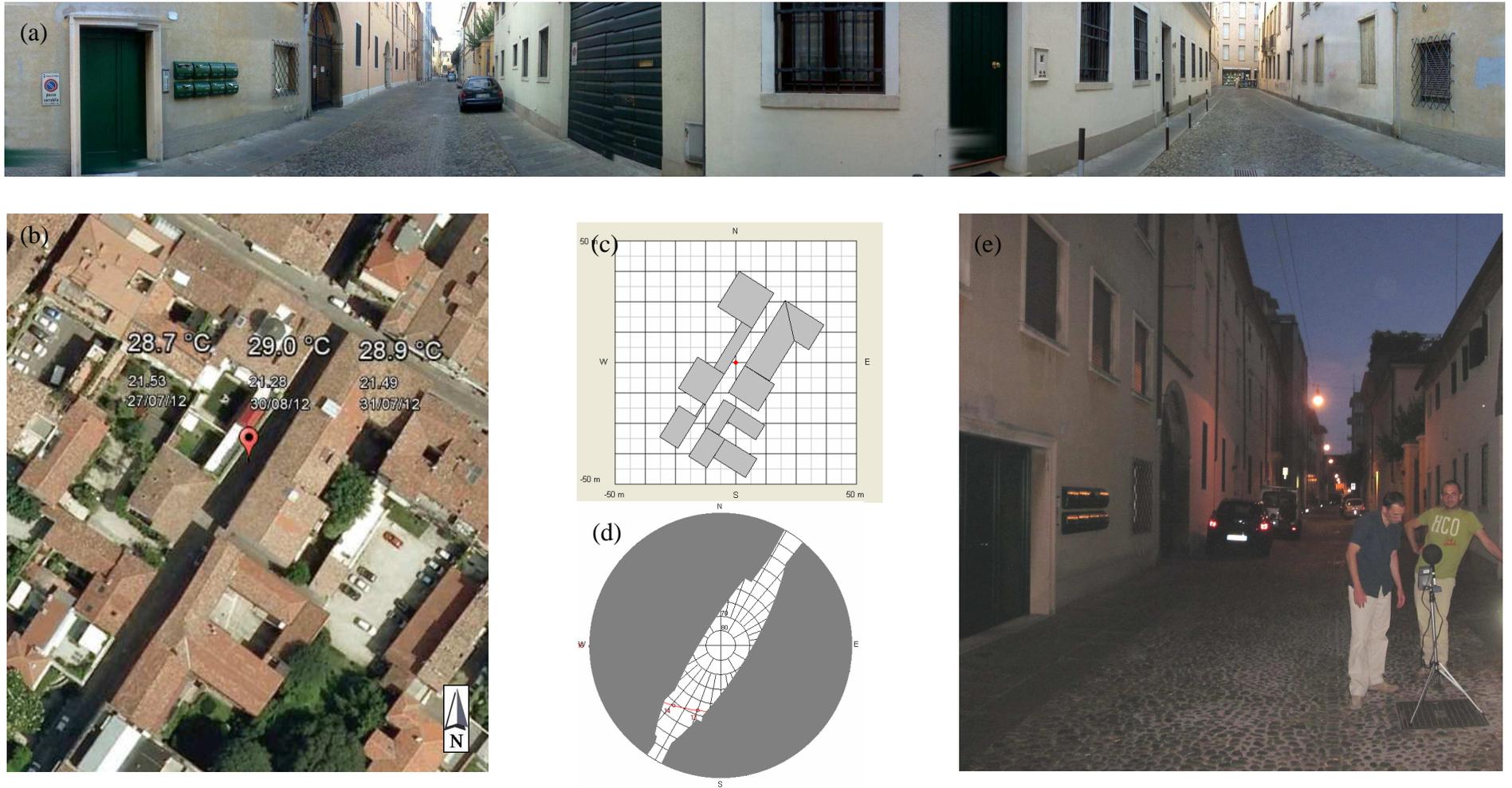
Il primo luogo caratteristico esaminato è via Rinaldi: un canyon urbano presente nel centro storico della città del Santo. La pavimentazione stradale è realizzata in porfido, gli edifici in laterizi e la copertura in coppi, come è osservabile nelle immagini

descrittive del sito in Figura 7.4. L'elemento distintivo è l'elevato rapporto H/W (il rapporto tra altezza e larghezza del canyon) pari a circa 1.8, determinato dalla larghezza stradale di 5.5 m e dall'altezza di 8 e 12 m degli edifici nella posizione considerata. Tuttavia un parametro maggiormente adatto per quantificare l'influenza della geometria sugli scambi radiativi in condizioni di asimmetria delle strutture è lo *sky view factor* (SVF), stimato uguale a 0.18 nel caso in esame (Figura 7.4.d) dal software RayMan a partire dalla disposizione e dall'altezza degli edifici (Figura 7.4.c).

Il limitato fattore di vista del cielo ostacola il raffreddamento notturno del canyon e comporta delle temperature medie radianti notturne superiori o uguali alla temperatura dell'aria (Tabella 7.1). Nelle tre misurazioni effettuate infatti la  $T_{mr}$  è risultata prossima ai 29 °C, mentre la temperatura dell'aria era compresa tra 28 e 29 °C nell'orario 21:30-22:00. L'intensità notturna dell'isola di calore osservata è stata sempre superiore ai 4 °C, ma valori probabilmente maggiori sarebbero stati osservati in piena notte a causa della minor velocità di raffreddamento del sito rispetto alla campagna. Le condizioni ambientali descritte, per una persona con un abbigliamento estivo e in leggera attività (variabili soggettive utilizzate come riferimento), determinano situazioni di leggero stress termico per gli indici PMV e PET, mentre sono accettabili secondo l'indice SET\*. Il fenomeno isola di calore nelle ore diurne risulta al contrario di entità limitata (intensità di 0.8 e 0.4 °C), similmente a quanto osservato nel centro urbano durante le

	Via Rinaldi				
Data	27-lug	30-lug	31-lug	2-ago	9-ago
Orario	21.53	21.28	21.49	16.01	16.11
Temperatura (°C)	29.1	27.9	28.0	34.5	31.7
Intensità (°C)	4.2	4.5	5.5	0.8	0.4
Umidità Relativa (%)	57.1	45.6	41.9	33.4	33.1
Umidità Specifica (g/kg aria secca)	14.5	10.7	9.9	11.4	9.7
Velocità Vento (m/s)	0.3	0.2	0.2	0.9	0.5
T globo (°C)	28.9	28.5	28.4		
T media radiante (°C)	28.7	29.0	28.9		
PMV	1.4	1.2	1.2		
PET (°C)	28.8	28.3	28.2		
SET* (°C)	23.1	23.1	23.0		
Radiazione Globale (W/m <sup>2</sup> )				622	182
Radiazione Netta (W/m <sup>2</sup> )	ovest-est			45	3
	sud-nord			26	-16
	sotto-sopra			-202	-26

**Tabella 7.1.** Dati ottenuti dalle misurazioni effettuate in via Rinaldi. Gli indici di comfort si riferiscono ad un soggetto in abiti estivi (0.5 clo) e in leggera attività (80 W aggiuntivi)



**Figura 7.4.** Immagini di via Rinaldi: (a) foto panoramica, (b) vista satellitare con punto di misurazione del globotermometro e  $T_{mr}$  ottenute (Google Earth), (c) input realizzato per RayMan e (d) riduzione della vista del cielo prodotta SVF=0.18, (e) scatto effettuato durante la misurazione del 30 luglio.

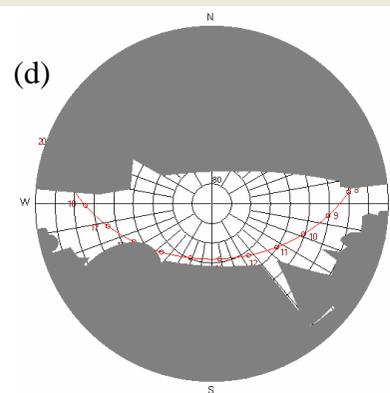
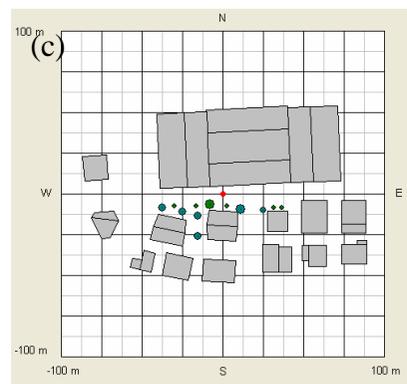
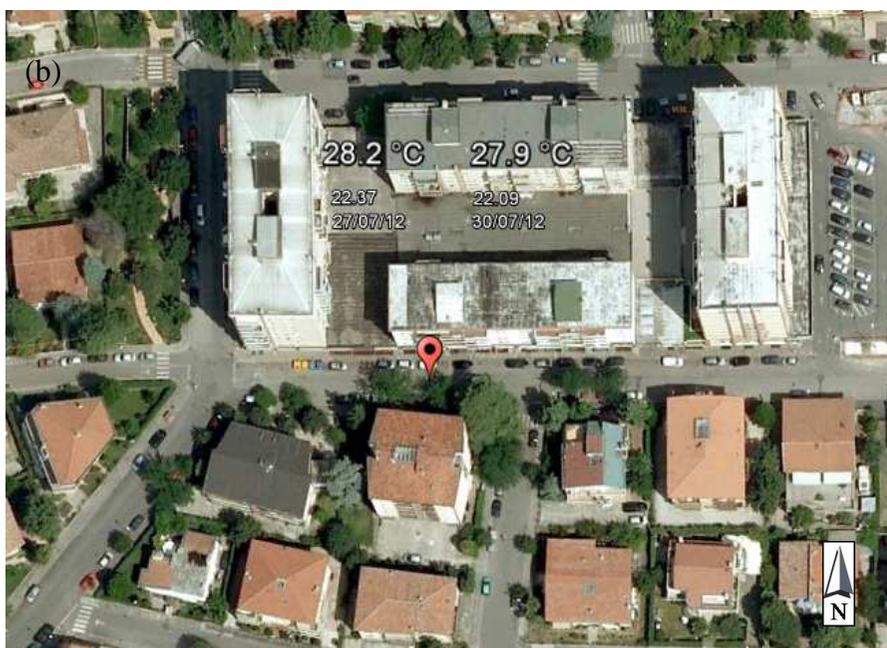
misurazioni mobili. Valori inferiori potrebbero essere rilevati al mattino poiché il diagramma in Figura 7.4.d prodotto dal software mostra che la radiazione diretta nel periodo dell'anno considerato raggiunge il sito solamente nelle ore centrali del giorno. Le misurazioni effettuate con il radiometro netto sono significativamente differenti nei due giorni: in entrambi i casi è maggiore la radiazione proveniente da ovest (il muro ha ricevuto per più ore la radiazione solare) e dall'alto (presenza della radiazione solare diretta) rispetto alla quella rilasciata dalle superfici ad est e dal porfido, mentre il flusso netto in direzione sud-nord cambia verso nelle due sessioni. I valori delle radiazioni globali sembrano testimoniare una differenza nelle condizioni di misura: in effetti nell'ultima sessione del 9 agosto vi era la presenza di un cielo parzialmente velato che si è poi via via sempre più coperto durante le ore serali.

### 7.2.2. Via Pindemonte

Il secondo sito investigato è situato in una zona residenziale in via Pindemonte, una laterale di via Guizza Conselvana. Nonostante gli edifici presenti nel sito siano più elevati (18 m) rispetto a quelli di via Rinaldi, il rapporto H/W (1.2) è inferiore a causa della maggior distanza che li separa (15 m). Ulteriori elementi di differenziazione sono la pavimentazione stradale in conglomerato bituminoso, comunemente definito asfalto,

	Via Pindemonte			
Data	27-lug	30-lug	2-ago	9-ago
Orario	22.37	22.09	16.28	16.42
Temperatura (°C)	27.7	27.2	34.2	31.3
Intensità (°C)	4.2	4.8	0.8	0.3
Umidità Relativa (%)	56.6	50.6	33.0	32.7
Umidità Specifica (g/kg aria secca)	13.2	11.4	11.2	9.4
Velocità Vento (m/s)	0.6	0.3	2.1	0.9
T globo (°C)	27.9	27.5		
T media radiante (°C)	28.2	27.9		
PMV	0.9	0.9		
PET (°C)	26.8	27.0		
SET* (°C)	21.1	21.7		
Radiazione Globale (W/m <sup>2</sup> )			548	375
Radiazione Netta (W/m <sup>2</sup> )	ovest-est		169	120
	sud-nord		10	-42
	sotto-sopra		-150	-102

**Tabella 7.2.** Dati ottenuti dalle misurazioni effettuate in via Pindemonte. Gli indici di comfort si riferiscono ad un soggetto in abiti estivi (0.5 clo) e in leggera attività (80 W aggiuntivi)



**Figura 7.5.** Immagini di via Pindemonte: (a) foto panoramica, (b) vista satellitare con punto di misurazione del globotermometro e  $T_{mr}$  ottenute (Google Earth), (c) input realizzato per RayMan e (d) riduzione della vista del cielo prodotta  $SVF=0.29$ , (e) immagine del palazzo situato a sud

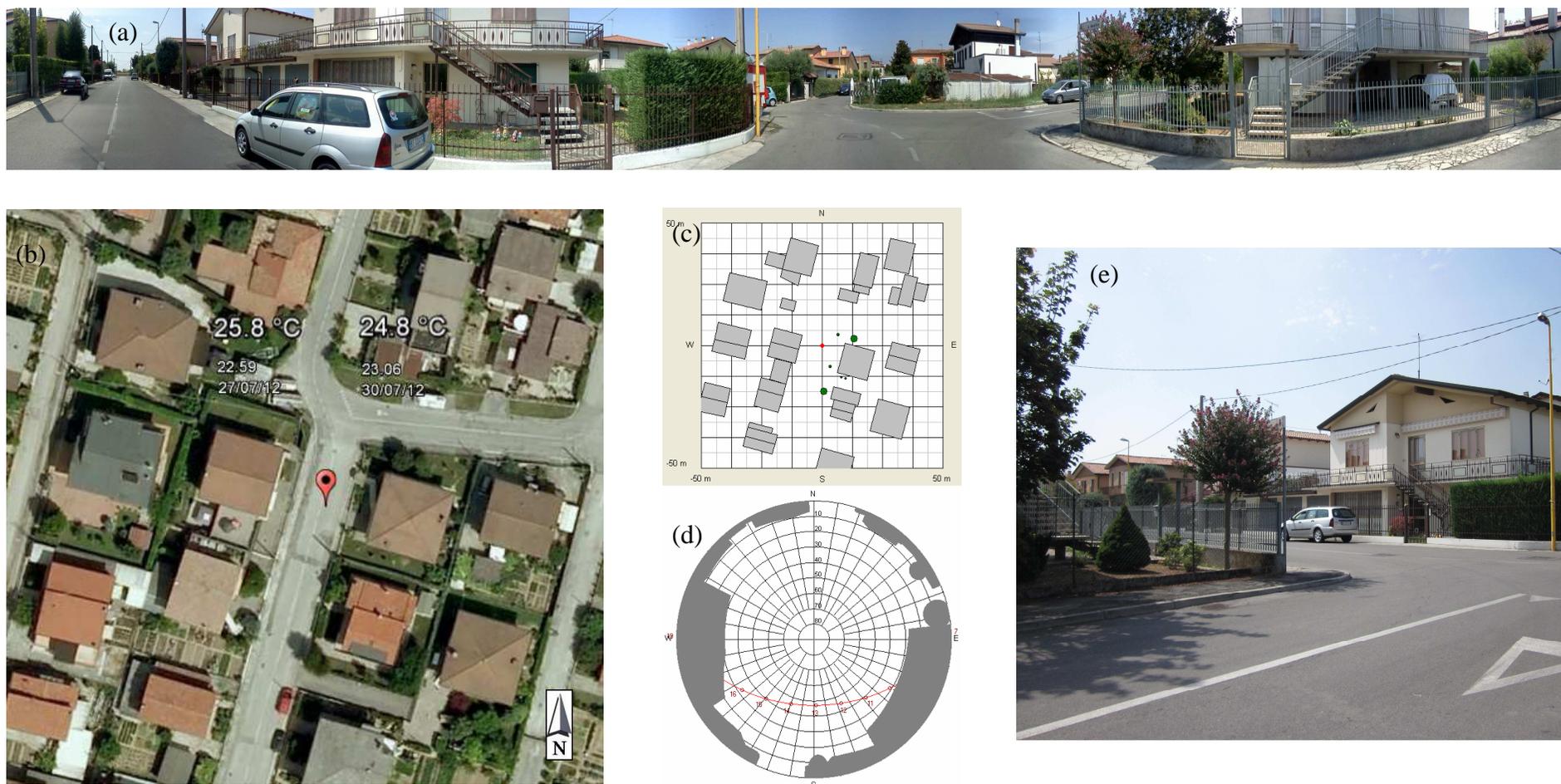
e la presenza di alberi sul margine della carreggiata. In aggiunta alle caratteristiche degli edifici sono state quindi inserite nell'input fornito al software (Figura 7.5.c) anche quelle relative alle piante ad alto fusto presenti e lo *sky view factor* calcolato è stato pari a 0.29 (Figura 7.5.d). Il limitato SVF determina, come nel caso precedente,  $T_{mr}$  notturne prossime a quelle dell'aria. L'utilizzo del globotermometro ha permesso infatti di quantificare  $T_{mr}$  in circa 28 °C (Figura 7.5.b), quando le temperature dell'aria erano di 27.7 e 27.2 °C (Tabella 7.2). I valori risultano più bassi rispetto a via Rinaldi, anche se entrambi i rilevamenti sono stati effettuati in un orario successivo e le intensità dell'isola di calore risultano circa le stesse. Le velocità del vento sono state invece maggiori e hanno contribuito a diminuire gli indici di comfort: l'ambiente era leggermente caldo per gli indici PMV e PET, mentre risultava lievemente fresco secondo il SET\* che presumibilmente sottostima le condizioni reali.

Durante le sessioni di misura pomeridiane la ventosità è stata doppia rispetto ai valori osservati in via Rinaldi, a causa della minor continuità degli ostacoli aerodinamici e del minor rapporto H/W, mentre le intensità sono risultate nuovamente simili.

Le radiazioni nette rilevate sembrano confermare il cambiamento di condizioni tra le due giornate di misure. Anche in questo caso il flusso sud-nord inverte la direzione e si verifica una riduzione del flusso sopra-sotto ed ovest-est, tuttavia le potenze trasferite sono maggiori rispetto al canyon urbano presumibilmente a causa della maggior esposizione del sito alla radiazione solare diretta (Figura 7.5.d).

### 7.2.3. Via San Basilio

Nel corso delle sessioni di misura è stata esaminata un'altra area residenziale con una minor densità abitativa di via Pindemonte, situata in via San Basilio nel territorio comunale di Ponte San Nicolò. Le costruzioni monofamiliari presenti sono caratterizzate da un'altezza di circa 6-7 m e, poiché la larghezza stradale è di 18 m, il rapporto H/W risulta di 0.4. Il fattore di vista del cielo, data anche l'assenza di alberi ad alto fusto, è quindi notevolmente maggiore rispetto ai casi precedenti: 0.75 è il valore ottenuto utilizzando il software (Figura 7.5.d). Nonostante l'elevato SVF l'intensità osservata dell'isola di calore notturna risulta significativa, pari a 3.1 e 4.8 °C (Tabella 7.3), ma inferiore di 1 °C nella prima delle due misurazioni rispetto alle vie prima esposte. Grazie alla modesta limitazione dell'orizzonte la temperatura media radiante misurata è stata comunque inferiore alla temperatura dell'aria di circa 0.5 e 1 °C,



**Figura 7.6.** Immagini di via San Basilio: (a) foto panoramica, (b) vista satellitare con punto di misurazione del globotermometro e  $T_{mr}$  ottenute (Google Earth), (c) input realizzato per RayMan e (d) riduzione della vista del cielo prodotta SVF=0.75, (e) sito di misura osservato da nord-est

concorrendo a migliorare le condizioni di benessere. I valori assunti dagli indici PMV e PET indicano infatti delle condizioni ambientali confortevoli alle ore 23:00, mentre l'indice SET\* giudica il contesto leggermente fresco.

Le misurazioni pomeridiane eseguite ha avuto esiti simili a quelle realizzate nel corso della stessa giornata in via Pindemonte: un'intensità dell'isola di calore di 0.3 °C e una velocità del vento di 0.8 m/s. Sono stati rilevati inoltre valori molto simili di radiazione netta, ad esclusione di quelli acquisiti nella direzione sud-nord. Questa differenza è stata determinata dalle strutture emittenti presenti in via Pindemonte, mentre in tale direzione gli edifici sono assenti in via San Basilio.

	Via San Basilio		
Data	27-lug	30-lug	9-ago
Orario	22.59	23.06	16.57
Temperatura (°C)	26.4	25.9	31.5
Intensità (°C)	3.1	4.8	0.3
Umidità Relativa (%)	65.2	58.7	33.2
Umidità Specifica (g/kg aria secca)	14.1	12.3	9.6
Velocità Vento (m/s)	0.3	0.4	0.8
T globo (°C)	26.1	25.4	
T media radiante (°C)	25.8	24.8	
PMV	0.6	0.3	
PET (°C)	25.7	24.4	
SET* (°C)	20.5	19.2	
Radiazione Globale (W/m <sup>2</sup> )			432
Radiazione Netta (W/m <sup>2</sup> )	ovest-est		126
	sud-nord		11
	sotto-sopra		-104

**Tabella 7.3.** Dati ottenuti dalle misurazioni effettuate in via San Basilio. Gli indici di comfort si riferiscono ad un soggetto in abiti estivi (0.5 clo) e in leggera attività (80 W aggiuntivi)

#### 7.2.4. Via Roma

Al fine di confrontare le condizioni ambientali dei siti urbani con quelle di un ambiente rurale, sono state effettuate delle misurazioni nel tratto di via Roma che si addentra nel territorio agricolo. La strada sterrata nella quale sono state spesso rilevate le temperature minime durante i transesti è contraddistinta dalla scarsità di strutture, dall'adiacenza di un corso d'acqua e dalla vicinanza di terreni coltivati (Figura 7.7). Dal momento che non sono presenti ostacoli il fattore di vista del cielo è prossimo ad uno ed i valori di temperatura media radiante rilevati sono infatti inferiori di 3 °C e 2.3 °C rispetto alla



**Figura 7.7.** (a) Vista satellitare di via Roma con punto di misurazione del globotermometro e  $T_{mr}$  ottenute, (b) Immagine del sito di misura (Google Earth e Street View)

Data	Via Roma		
	30-lug	31-lug	2-ago
Orario	22.46	22.52	16.53
Temperatura (°C)	21.4	22.9	33.6
Intensità (°C)	0.5	0.4	0.8
Umidità Relativa (%)	80.8	61.2	35.8
Umidità Specifica (g/kg aria secca)	13.0	10.7	11.6
Velocità Vento (m/s)	0.0	0.2	2.4
T globo (°C)	19.0	21.6	
T media radiante (°C)	18.4	20.6	
PMV	-0.5	-0.4	
PET (°C)	21.6	21.4	
SET* (°C)	15.8	17	
Radiazione Globale (W/m <sup>2</sup> )			502
Radiazione Netta (W/m <sup>2</sup> )	ovest-est		155
	sud-nord		52
	sotto-sopra		-90

**Tabella 7.4.** Dati ottenuti dalle misurazioni effettuate in via Roma. Gli indici di comfort si riferiscono ad un soggetto in abiti estivi (0.5 clo) e in leggera attività (80 W aggiuntivi)

temperatura dell'aria (Tabella 7.4). In aggiunta all'elevato SVF un ulteriore elemento contribuisce ad abbassare la temperatura media radiante rispetto ai siti urbani: le minor temperature delle superfici agricole, caratterizzate da una maggiore emissività, da minor inerzia termica e da maggior capacità di accumulo idrico. Tali proprietà permettono di raggiungere delle migliori condizioni notturne di benessere: gli indici PMV e PET giudicano infatti l'ambiente ottimale dal punto di vista del *thermal comfort*, mentre l'indice SET\*, poiché ritiene le condizioni eccessivamente fresche, sembra nuovamente sottostimarle.

Durante le misurazioni diurne, data l'assenza di ostacoli aerodinamici, è stata rilevata la velocità del vento massima tra i siti analizzati, nonostante la ventosità notturna sia stata nulla. Una possibile spiegazione della maggior ventosità urbana nel periodo notturno considera la stabilità atmosferica: il rapido raffreddamento delle superfici rurali favorisce l'instaurazione di uno strato stabile notturno, invece in città persiste uno strato convettivo residuo prodotto dalle temperature superficiali maggiori rispetto all'aria. L'intensità pomeridiana è simile a quella osservata nel medesimo giorno presso gli altri siti, mentre i flussi radiativi paralleli al suolo risultano maggiori a causa della mancanza di strutture in grado di intercettare la radiazione solare. Sebbene la radiazione globale non sia inferiore, la radiazione netta in direzione perpendicolare alla superficie assume valori meno negativi, grazie alla maggior albedo del terreno agricolo.

### 7.2.5. Prato della Valle

L'acquisizione dei parametri ambientali che influenzano il *thermal comfort* è stata effettuata anche in una delle aree urbane più conosciute, utilizzata anche come luogo di ritrovo dagli abitanti di Padova nelle serate estive: Prato della Valle. La piazza patavina è caratterizzata da un'isola verde centrale, delimitata da un canale ornato di statue e circondata da un ampio anello d'asfalto. Data la diversità delle superfici e l'estensione dell'area, le misurazioni sono state effettuate in sei differenti postazioni (Figura 7.8) al fine di individuare eventuali differenze microclimatiche. I dati ambientali necessari per il confronto tra i siti sono stati acquisiti il 2 agosto dalle 21:44 alle 22:44 (Tabella 7.5). In tale intervallo temporale è stata osservata una differenza di circa 0.5-1 °C tra la temperatura dell'aria nelle postazioni situate nell'isola Memmia e quelle esterne in prossimità delle strade urbane, mentre i valori di temperatura media radiante presentano una variabilità notevolmente maggiore: esiste infatti una differenza di 7 °C tra il dato



**Figura 7.8.** Immagini di Prato della Valle: (a) foto panoramica dalla posizione 3, (b) vista satellitare con i punti di misura e  $T_{mr}$  ottenute (Google Earth), (c-d-e) foto relative alle posizioni di misura numero 4, numero 5 e numero 6.

	Pos.1	Pos.2	Pos.3	Pos.4	Pos.5
Data	2-ago	2-ago	2-ago	2-ago	2-ago
Orario	21.53	22.03	22.14	22.25	22.35
Temperatura (°C)	28.4	28.4	28.1	27.0	26.9
Intensità (°C)	3.2	3.9	4.3	3.8	3.7
Umidità Relativa (%)	48.0	48.2	49.1	52.9	53.5
Umidità Specifica (g/kg aria secca)	11.6	11.7	11.7	11.8	11.8
Velocità Vento (m/s)	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7
T globo (°C)	27.8	28.1	27.2	24.8	25.3
T media radiante (°C)	26.5	27.4	25.2	20.1	22.2
PMV	0.8	0.8	0.6	0.0	0.1
PET (°C)	26.1	26.5	25.3	22.5	23.3
SET* (°C)	20.1	20.5	19.3	16.5	17.6

	Posizione 6				
Data	2-ago	30-lug	31-lug	2-ago	9-ago
Orario	22.44	21.51	22.03	16.16	16.24
Temperatura (°C)	27.4	27.6	28.5	34.7	31.3
Intensità (°C)	4.7	4.2	5.8	1.1	-0.3
Umidità Relativa (%)	51.5	48.5	40.8	30.3	32.7
Umidità Specifica (g/kg aria secca)	11.7	11.2	9.9	10.4	9.3
Velocità Vento (m/s)	0.7	0.4	0.3	1.7	1.6
T globo (°C)	26.5	26.5	27.5		
T media radiante (°C)	24.8	25.0	26.5		
PMV	0.5	0.6	0.9		
PET (°C)	24.7	25.6	27.0		
SET* (°C)	19.0	20.0	21.4		
Radiazione Globale (W/m <sup>2</sup> )				632	554
Radiazione Netta (W/m <sup>2</sup> )	ovest-est			183	85
	sud-nord			88	22
	sotto-sopra			-136	-130

**Tabella 7.5.** Dati ottenuti dalle misurazioni effettuate in Prato della Valle. Gli indici di comfort si riferiscono ad un soggetto in abiti estivi (0.5 clo) e in leggera attività (80 W aggiuntivi)

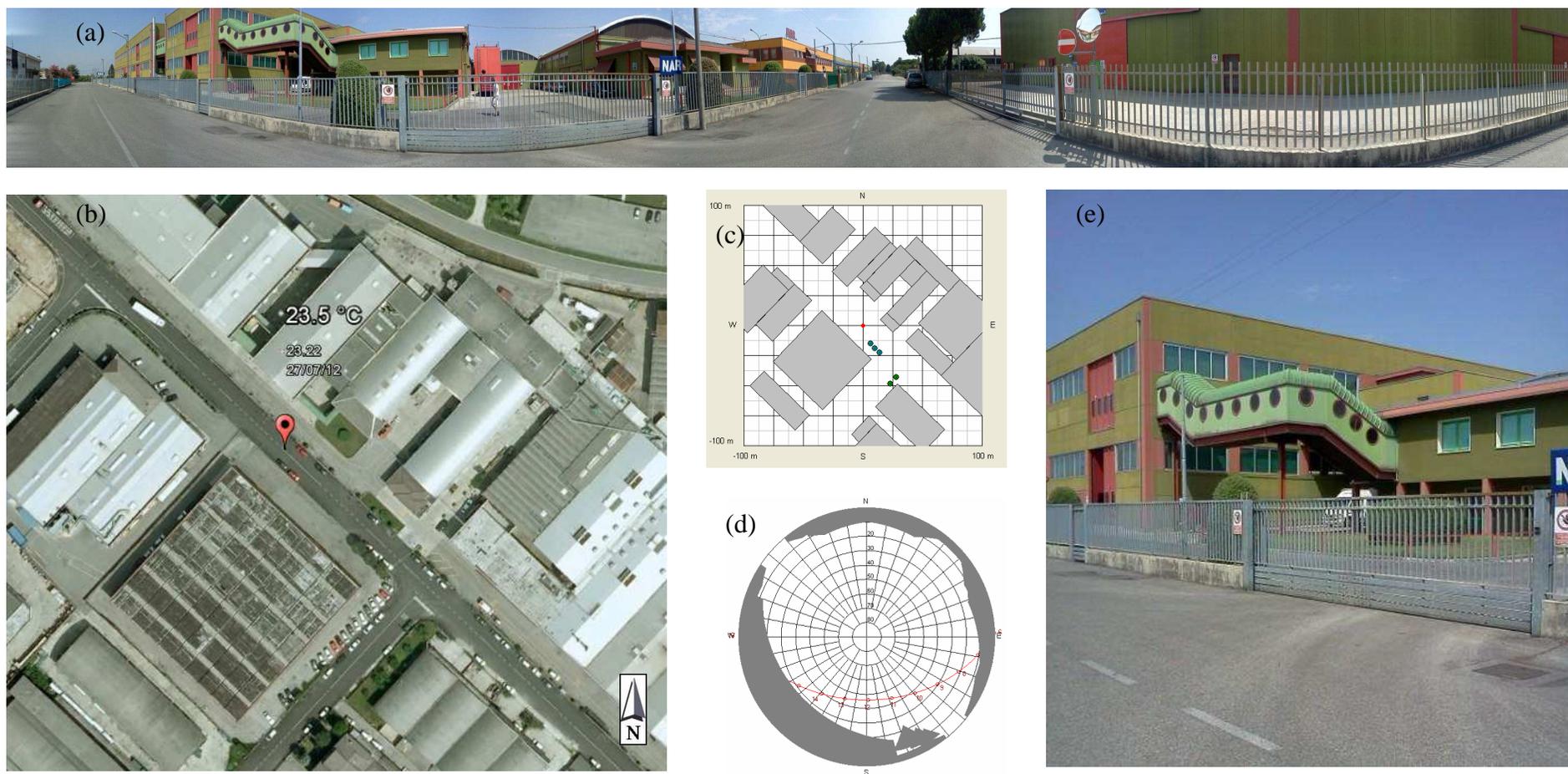
massimo e quello minimo. Una  $T_{mr}$  di 27.4 °C ha contraddistinto la postazione numero 2, situata presso il vertice nord della piazza e dotata di uno *sky view factor* ridotto dagli edifici adiacenti in due direzioni. La limitazione dell'orizzonte è inferiore nel sito numero 1 poiché è maggiore l'angolo formato dagli edifici che compongono i due "lati" est di Prato della Valle: ciò consente una diminuzione a 26.5 °C della  $T_{mr}$ . Un'ulteriore riduzione fino a circa 25 °C si verifica nelle postazioni 3 e 6, accomunate dall'orientazione delle strutture attigue in un'unica direzione. I valori rilevati nell'isola

Memmia sono invece considerevolmente inferiori (20.1 e 22.2 °C), grazie alla temperatura superficiale minore del terreno erboso e del viale rispetto all'asfalto e alle pareti delle abitazioni, oltre che per l'elevato SVF.

Le diversità nei valori di temperatura dell'aria e temperatura media radiante determinano differenti condizioni di benessere nelle sei postazioni: gli indici PMV e PET indicano infatti situazioni di leggero stress termico nei siti esterni, mentre le condizioni ambientali sono giudicate ottimali nelle postazioni interne all'isola Memmia. L'acquisizione di dati ambientali aggiuntivi nella postazione di misura numero 6 è avvenuta inoltre nel corso di altre quattro sessioni: due pomeridiane e due notturne. Seppur ottenuti in orari differenti i dati serali ottenuti il 30 luglio risultano simili a quelli del 2 agosto, al contrario la temperatura dell'aria, quella media radiante e l'intensità relative al 31 luglio sono maggiori di circa 1 °C. Le misurazioni diurne confermano la minor entità del fenomeno UHI nelle ore di luce e una maggior ventosità rispetto altri siti urbani. Infine il flusso maggiormente negativo di radiazione netta in direzione perpendicolare al suolo testimonia il maggior assorbimento dell'asfalto se confrontato con la superficie sterrata di via Roma.

### *7.2.6. Via Vittorio Veneto*

L'ultimo sito caratteristico investigato è situato in via Vittorio Veneto, nella zona industriale di Legnaro. Le costruzioni presenti hanno un'altezza di 7-9 m e, poiché la larghezza stradale è di circa 28 m, il rapporto H/W risulta di 0.3: il valore inferiore tra quelli calcolati. La limitazione dell'orizzonte non è quindi considerevole ed il fattore di vista del cielo ottenuto tramite RayMan (Figura 7.9.d) è di 0.76. L'elevato SVF rende possibile una temperatura media radiante notturna inferiore di 4 °C rispetto alla temperatura dell'aria (Tabella 7.6), migliorando il benessere percepito. Il PMV risultante indica infatti delle condizioni confortevoli, mentre se la  $T_{mr}$  fosse stata pari a quella dell'aria un individuo presente nel sito avrebbe percepito un leggero stress termico (PMV = 0.7). Il limitato rapporto H/W non è tuttavia sufficiente per eliminare l'effetto isola di calore, dal momento che l'intensità notturna osservata è stata pari a 4.5 °C, determinata presumibilmente dalla capacità di accumulo termico delle superfici impermeabili. Seppur di entità inferiore rispetto al periodo notturno, l'effetto UHI è presente anche nei rilevamenti pomeridiani; nella giornata particolarmente calda del 2



**Figura 7.9.** Immagini di via Vittorio Veneto: (a) foto panoramica, (b) vista satellitare con punto di misura del globotermometro e  $T_{mr}$  ottenuta (GoogleEarth), (c) input realizzato per RayMan e (d) riduzione della vista del cielo prodotta  $SVF=0.76$ , (e) vista in direzione nord

agosto l'intensità è risultata superiore rispetto ai siti precedenti. La ventosità diurna è stata simile a quella misurata in Prato della Valle, mentre i valori della radiazione netta acquisiti testimoniano la maggiore nuvolosità che ha caratterizzato il giorno 9 agosto.

	Via Vittorio Veneto		
Data	27-lug	2-ago	9-ago
Orario	23.22	17.10	17.15
Temperatura (°C)	27.4	34.2	31.5
Intensità (°C)	4.5	1.6	0.4
Umidità Relativa (%)	58.4	33.6	32.6
Umidità Specifica (g/kg aria secca)	13.3	11.3	9.5
Velocità Vento (m/s)	0.8	1.6	1.2
T globo (°C)	26.1		
T media radiante (°C)	23.5		
PMV	0.4		
PET (°C)	24.1		
SET* (°C)	18.4		
Radiazione Globale (W/m <sup>2</sup> )		454	286
Radiazione Netta (W/m <sup>2</sup> )	ovest-est	195	53
	sud-nord	122	-15
	sotto-sopra	-94	-56

**Tabella 7.6.** Dati ottenuti dalle misurazioni effettuate in via Vittorio Veneto. Gli indici di comfort si riferiscono ad un soggetto in abiti estivi (0.5 clo) e in leggera attività (80 W aggiuntivi)

### 7.3.Simulazioni

In questa sezione sarà verificata l'accuratezza del software RayMan nella simulazione della temperatura media radiante, confrontando le stime ottenute con i valori sperimentali acquisiti e nei siti caratteristici del territorio padovano esposti in precedenza. Affinché la simulazione sia possibile è necessario fornire al programma i dati ambientali del sito (temperatura dell'aria, umidità relativa e velocità del vento), e la disposizione spaziale delle strutture presenti, ricostruita nel caso in esame attraverso l'osservazione dei luoghi e delle immagini satellitari. Sono inoltre richiesti degli ulteriori input meno agevoli da ottenere: l'albedo, il rapporto di Bowen e la nuvolosità del cielo. Il programma può accettare un unico valore per il coefficiente di riflessione e non considera le differenti proprietà delle superfici; tuttavia nelle simulazioni condotte tale semplificazione è influente dal momento che si riferiscono al periodo notturno. Il

rapporto di Bowen  $\beta$  può variare notevolmente a seconda dell'ora del giorno, dell'umidità disponibile nel suolo, del tipo di suolo e della copertura del terreno; nonostante questa variabilità  $\beta$  è stato impostato ad un valore standard di 1.5, poiché difficilmente quantificabile e poiché un'analisi di sensitività ha rivelato che cambiamenti significativi del rapporto ( $\Delta\beta = 5$ ) determinano variazioni poco rilevanti della temperatura media radiante (0.5 °C). Le condizioni di nuvolosità influenzano invece profondamente l'output del programma, in misura maggiore nei siti con elevato *sky view factor*, nei quali la differenza di  $T_{mr}$  tra cielo limpido e volta celeste coperta può raggiungere i 6 °C. Dal momento che le misurazioni sperimentali sono state effettuate in condizioni di cielo sereno (eccetto l'ultima serale del 9 agosto), nelle simulazioni è stato quindi utilizzato il valore di 1 okta (nuvole rare e sparse).

Le simulazioni della temperatura media radiante hanno riguardato i siti di via Rinaldi, via Pindemonte, via San Basilio e via Vittorio Veneto: sono state eseguite utilizzando le variabili ambientali rilevate dalla stazione mobile riportate nelle tabelle 7.1-7.2-7.3-7.6 e impiegando le rappresentazioni delle strutture presenti nei siti, realizzate attraverso la modalità *Obstacles* e osservabili nelle figure 7.4.c-7.5.c-7.6.c-7.9.c. I risultati prodotti dal programma sono riportati in tabella 7.7. I dati presentati consentono di affermare che RayMan sottostima la temperatura media radiante in tutte le situazioni simulate di 2 ÷ 6 °C; poiché le misure sono relative al periodo notturno, tali risultati sono in accordo con lo studio di Thorsson et. al (2007), nel quale è stata provata l'accuratezza del software solamente in condizioni di elevazione solare sufficiente. Lo scostamento

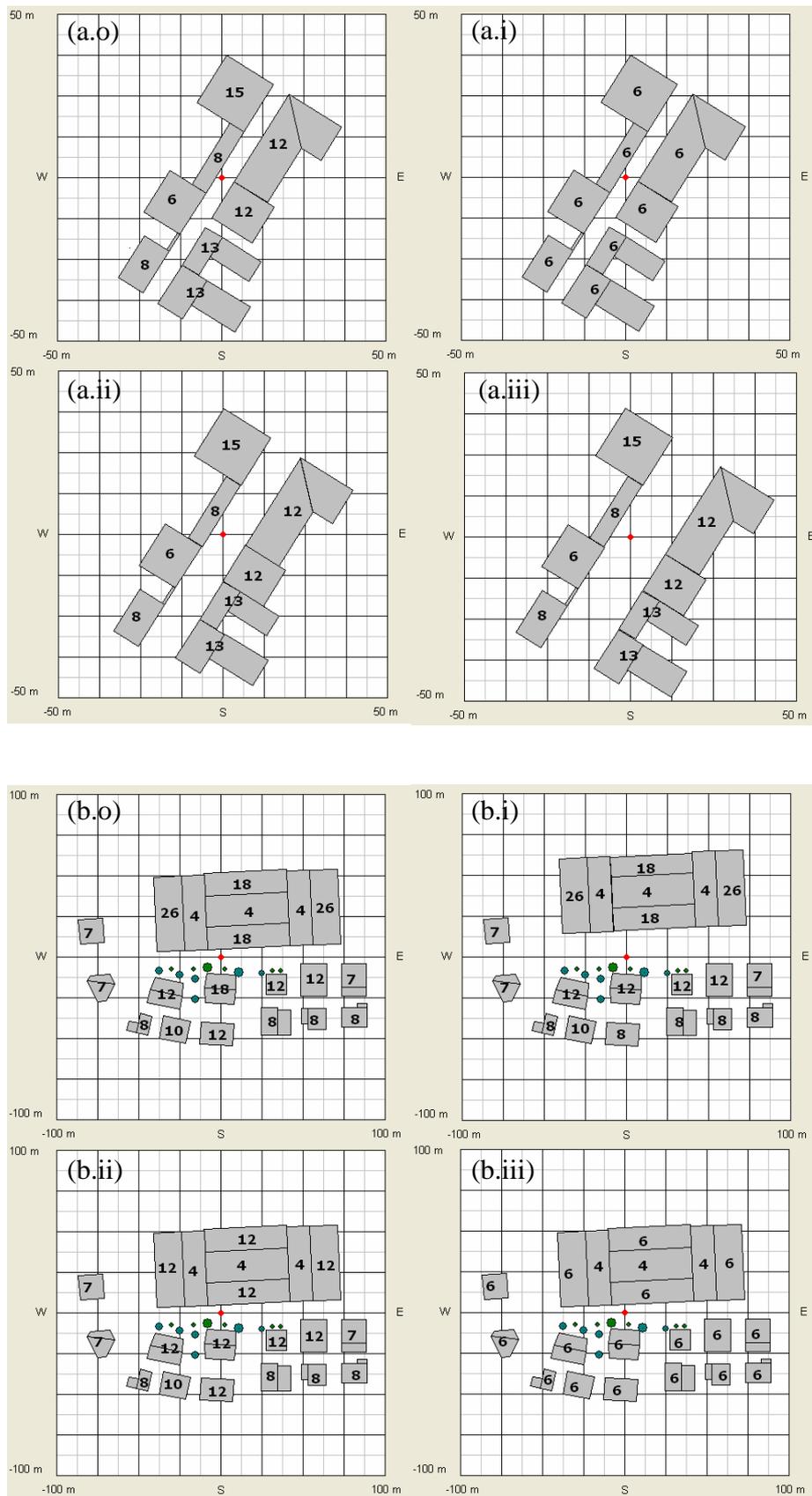
	$T_{mr}$ (°C)				PMV		
	Misurata	Simulata	Delta	Delta %	Misurato	Simulato	Delta
<b>Via Rinaldi</b> SVF = 0.18	28.7	27.1	1.6	6%	1.4	1.2	0.2
	29.0	25.9	3.1	11%	1.2	0.9	0.3
	28.9	26.0	2.9	10%	1.2	0.9	0.3
<b>Via Pindemonte</b> SVF = 0.29	28.2	24.9	3.3	12%	0.9	0.6	0.3
	27.9	24.3	3.6	13%	0.9	0.5	0.4
<b>Via San Basilio</b> SVF = 0.75	25.8	19.7	6.1	24%	0.6	0.1	0.5
	24.8	19.2	5.6	23%	0.3	-0.2	0.5
<b>Via Vittorio Veneto</b> SVF = 0.76	23.5	20.7	2.8	12%	0.4	0.1	0.3

**Tabella 7.7.** Confronto tra le temperature medie radianti misurate e quelle simulate dal software RayMan (rapporto di Bowen  $\beta = 1.5$ , nuvolosità = 1 okta) e comparazione tra PMV delle condizioni reali e quelle simulate (resistenza vestiario = 0.5 clo, metabolismo da lavoro = 80 W)

massimo dai valori misurati è tuttavia di 3.6 °C escludendo il sito di via San Basilio, contraddistinto, nonostante l'elevato SVF, da  $T_{mr}$  inferiori di solo 1 °C rispetto alla temperatura dell'aria. Gli errori nella stima sono una conseguenza delle semplificazioni introdotte nel modello, nel quale non è consentito specificare l'emissività dei differenti materiali e viene considerata quindi una temperatura superficiale uguale per tutte le superfici; probabilmente il calcolo della  $T_{mr}$  è quindi corretto quando la radiazione solare limita il contributo delle emissioni superficiali, ma non quando quest'ultimo diventa influente.

Dal momento che le altre variabili ambientali sono stabili, le differenze tra  $T_{mr}$  misurate e simulate si manifestano nei valori dei PMV inferiori di 0.2 ÷ 0.5. Le condizioni di benessere sono giudicate dalla simulazione ottimali in via San Basilio e via Vittorio Veneto, mentre indicano una situazione di stress termico in via Rinaldi e in via Pindemonte. In questi ultimi due siti sono state effettuate quindi delle ulteriori simulazioni, condotte a parità di variabili ambientali, al fine di comprendere quanto la modifica di alcune caratteristiche del sito potrebbe migliorarne il comfort termico. Il cambiamento dei valori di albedo ed emissività del sito potrebbe portare a dei miglioramenti effettivamente realizzabili nella realtà attraverso dei rivestimenti superficiali, tuttavia la versione del software distribuita non permette di specificare l'emissività dei materiali e la semplicità del modello non consente di valutare le conseguenze di un maggior coefficiente di riflessione: la minor temperatura superficiale non sarebbe infatti stimata dal programma perché viene calcolata dalla temperatura dell'aria che deve essere fornita in input. Per tali motivi le variazioni effettuate hanno riguardato solamente l'altezza e la distanza degli edifici, che non sono realizzabili concretamente nei siti considerati; tuttavia i risultati delle simulazioni possono fornire delle indicazioni utili per la progettazione e la realizzazione di nuove strutture urbane.

I cambiamenti ipotizzati in via Rinaldi hanno simulato un aumento del fattore di vista del cielo e attraverso il software è stato possibile quantificare la riduzione della  $T_{mr}$ . In Figura 7.10.a sono riprodotte, in aggiunta alla situazione attuale (a.o), le situazioni analizzate: la prima modifica ha limitato l'altezza degli edifici ad un massimo di 6 m (a.i), nel secondo caso è stata raddoppiata la larghezza della strada (a.ii), mentre è stata triplicata nel terzo (a.iii). Gli esiti delle simulazioni, riferiti alle tre differenti condizioni ambientali delle misurazioni effettuate, sono riportati nella tabella 7.8. La riduzione dell'altezza massima degli edifici a 6 m e l'allargamento a 11 m della strada hanno determinato una riduzione della  $T_{mr}$  di 1 °C, del PMV di 0.1 e del PET di 0.5-0.7 °C: le



**Figura 7.10.** Differenti input forniti a RayMan per valutare la variazione del livello di comfort in via Rinaldi (a) e in via Pindemonte (b). Sopra a ciascuna struttura è indicata l'altezza in metri.

		Via Rinaldi				
		SVF	Condizioni	T <sub>mr</sub>	PMV	PET
Sito reale (a.o)	0.18	1	27.1	1.2	28.0	
		2	25.9	0.8	26.7	
		3	26.0	0.8	26.7	
Altezza massima edifici 6 m (a.i)	0.31	1	26.0	1.1	27.5	
		2	24.8	0.7	26.2	
		3	24.8	0.7	26.2	
Larghezza della strada doppia (a.ii)	0.35	1	25.8	1.1	27.4	
		2	24.5	0.7	26.0	
		3	24.5	0.7	26.0	
Larghezza della strada tripla (a.iii)	0.48	1	24.6	1.0	26.8	
		2	23.3	0.6	25.5	
		3	23.4	0.6	25.5	
Nessun ostacolo	1	1	20.0	0.5	24.7	
		2	18.6	0.1	23.2	
		3	18.6	0.1	23.2	

**Tabella 7.8.** Esiti delle simulazioni realizzate tramite il software RayMan relative a via Rinaldi ( $\beta = 1.5$ , nuvolosità = 1 okta, resistenza vestiario = 0.5 clo, metabolismo da lavoro = 80 W)

conseguenze sono state circa le stesse poiché nei due casi lo SVF successivo alle modifiche risulta simile (0.31 e 0.35). Il fattore di vista del cielo aumenta in misura maggiore (0.48) nel terzo caso esposto; nonostante esso sia quasi triplicato rispetto alla situazione originale la temperatura media radiante diminuisce solamente di 2.6 °C e gli indici di comfort, seppur più favorevoli, indicano ancora una situazione di leggero stress termico. Dei valori confortevoli degli indici per ognuna delle tre condizioni ambientali considerate si raggiungono, a causa dell'elevata temperatura dell'aria, solamente eliminando tutte le costruzioni presenti nel sito (PMV pari a 0.5, 0.1 e 0.1).

Un'analisi simile a quella appena esposta è stata effettuata anche nel sito di via Pindemonte e le differenti situazioni utilizzate nella simulazione sono riprodotte in Figura 7.11.b. Rispetto al contesto originario (b.o) è stato valutato l'impatto sulla temperatura media radiante e sul benessere dell'aumento della distanza tra gli edifici da 15 a 25 m (b.i), della riduzione delle altezze massime delle costruzioni a 12 m (b.ii) e a 6 m (b.iii) e dell'eliminazione di ogni tipologia di ostacolo. Ogni simulazione è stata replicata modificando le variabili ambientali (temperatura dell'aria, umidità relativa e velocità del vento) osservate nel corso delle due misurazioni e i risultati ottenuti sono riportati nella seguente tabella:

	Via Pindemonte				
	SVF	Condizioni	T <sub>mr</sub>	PMV	PET
Sito reale (b.o)	0.29	1	24.9	0.6	25.3
		2	24.3	0.5	25.3
Strada allargata di 10 m (b.i)	0.38	1	24.2	0.5	25
		2	23.6	0.5	24.9
Altezza massima edifici 12 m (b.ii)	0.45	1	23.6	0.5	24.7
		2	22.9	0.4	24.6
Altezza massima edifici 6 m (b.iii)	0.6	1	22.3	0.4	24.2
		2	21.7	0.3	24.1
Nessun ostacolo	1	1	18.8	0.1	22.8
		2	18.1	0.0	22.5

**Tabella 7.9.** Esiti delle simulazioni realizzate tramite RayMan relative a via Pindemonte ( $\beta = 1.5$ , nuvolosità = 1 okta, resistenza vestiario = 0.5 clo e metabolismo da lavoro = 80 W)

Le modifiche attuate alle strutture consentono a un soggetto presente nel sito di ricevere una minor quantità di radiazioni: l'allargamento della strada ha permesso di diminuire la temperatura media radiante di 0.7 °C e la riduzione a 12 m dell'altezza massima degli edifici ha aumentato lo SVF del 50% e diminuito la T<sub>mr</sub> di 1.3 °C. L'influenza maggiore sul benessere è stata invece ottenuta limitando l'altezza massima a 6 m (SVF raddoppiato), poiché il PMV è diminuito di 0.2 e la T<sub>mr</sub> di 2.6 °C. I cambiamenti anche importanti descritti non hanno tuttavia consentito di azzerare il PMV nel sito, risultato invece possibile rimuovendo tutte le strutture dalla simulazione.

Nonostante i risultati ottenuti siano interessanti, è fondamentale considerarne i limiti: il mantenimento della temperatura dell'aria costante nelle simulazioni non rappresenta in alcuni casi un'ipotesi realistica. La riduzione degli ostacoli permetterebbe infatti un maggior raffreddamento convettivo e radiativo delle superfici e determinerebbe quindi una minor temperatura. Gli effetti dell'aumento del fattore di vista del cielo nel periodo notturno sono perciò sottovalutati dal programma, che calcola la T<sub>mr</sub> a partire dalla temperatura dell'aria. RayMan si rivela per tale ragione un software adatto per lo studio di siti esistenti dei quali sia nota la temperatura, ma probabilmente sottostima l'impatto di cambiamenti significativi dello *sky view factor*.

# Conclusioni

L'analisi dell'isola di calore della città di Padova è stata effettuata utilizzando informazioni provenienti da due diverse fonti: le stazioni meteorologiche ARPAV e una stazione mobile realizzata appositamente.

I dati acquisiti dalle stazioni meteorologiche di Legnaro e di Padova hanno permesso di determinare l'entità dell'effetto UHI in maniera preliminare, di osservarne le dinamiche temporali e l'evoluzione nel corso degli ultimi 20 anni. Le temperature medie annue della stazione padovana rispetto a quelle della zona rurale sono risultate maggiori di circa 0.5 °C, ma l'alterazione termica più importante è stata rilevata nel periodo notturno ed estivo: la differenza calcolata tra le temperature minime è stata infatti di 1.5 °C su base annuale e massima nel mese di luglio (2°C). I dati relativi alle temperature massime presentano invece un significativo cambiamento dall'anno 2001; mentre in precedenza si registravano all'Orto Botanico temperature massime mediamente inferiori di 0.7 °C rispetto a Legnaro, nel periodo 2001-2011 sono state superiori di circa 0.3 °C. I dati utilizzati, sebbene abbiano il pregio di essere relativi ad un ampio intervallo temporale, consentono tuttavia di ottenere informazioni riguardanti solo l'area in cui è situata la stazione urbana e non permettono di quantificare adeguatamente l'entità dell'effetto UHI.

Al fine di esaminare la variabilità spaziale dell'isola di calore della città di Padova sono stati effettuati dei rilevamenti con una stazione mobile. La percorrenza di oltre 400 km di "transetti" con un ricevitore GPS durante i mesi di luglio e agosto 2012 ha permesso di acquisire informazioni ambientali in differenti ambiti territoriali. L'impossibilità di una comparazione diretta tra le temperature misurate, a causa delle differenze temporali tra le acquisizioni, ha reso necessario quantificare il fenomeno in termini differenziali, utilizzando come riferimento la temperatura rilevata dalla stazione ARPAV di Legnaro. Intensità comprese tra 1 °C e 7 °C sono state osservate nel periodo notturno 21:00 – 00:00, mentre sono risultate inferiori nell'intervallo 15:00 – 18:00 (0 ÷ 2 °C). Dal momento che negli ultimi 20 anni la stazione dell'Orto Botanico ha invece registrato intensità di 7 °C solamente in due occasioni e in orari maggiormente favorevoli al

fenomeno (00:00 – 06:00), la stazione meteorologica cittadina appare quindi poco rappresentativa del territorio urbano.

Nel corso delle misurazioni mobili sono state inoltre effettuate delle fermate in siti prescelti, per investigare il fenomeno isola di calore attraverso una modalità complementare alle precedenti. L'utilizzo della stazione mobile in maniera "fissa" per brevi periodi di tempo ha consentito infatti di ottenere delle grandezze fisiche aggiuntive rispetto alle misurazioni in transetto e di quantificare quindi lo stato di benessere tramite degli indici di comfort (PMV – PET – SET\*). Il confronto tra siti caratteristici di diversi ambiti territoriali ha rivelato differenze significative soprattutto nella temperatura media radiante: la maggior limitazione dell'orizzonte prodotta da edifici alti e ravvicinati ostacola infatti il raffreddamento notturno.

Particolarmente interessanti sono inoltre i dati ottenuti nel corso di una misurazione serale (22:00 – 23:00) in Prato della Valle. Mentre in alcune postazioni esterne all'isola Memmia gli indici di comfort indicavano una situazione di leggero stress termico, giudicavano invece ottimali le condizioni ambientali delle postazioni interne contraddistinte da una temperatura dell'aria inferiore di 1 - 2 °C e da una temperatura media radiante minore di 3 - 7 °C.

Un software di simulazione è stato infine impiegato per stimare i cambiamenti della temperatura media radiante e dello stato di benessere al variare delle caratteristiche dei siti critici dal punto di vista del *thermal comfort*.

Le misurazioni sperimentali hanno permesso di rilevare la reale entità dell'isola di calore padovana, che osservata dalla stazione meteorologica dell'Orto Botanico risultava invece sottovalutata. Le alterazioni termiche di 7 °C, acquisite non negli orari in cui l'effetto è massimo, permettono di affermare che il fenomeno della città patavina è comparabile con quello rilevato in altre città studiate in letteratura, caratterizzate da dimensioni significativamente maggiori. Tuttavia, un'accurata quantificazione dell'isola di calore nella città del Santo appare possibile solamente attraverso una rete diffusa di sensori, in grado di monitorare le condizioni ambientali in maniera continuativa nel tempo. Una tale modalità d'indagine, seppur dispendiosa, appare ragionevole data l'entità del fenomeno rilevata da questa analisi e potrebbe essere adottata da studi futuri.

# Bibliografia

Akbari H. (2005), “Energy Saving Potentials and Air Quality Benefits of Urban Heat Island Mitigation”, Lawrence Berkeley National Laboratory.

Akbari H., R. Bell et al. (2008) “Urban heat island basics”, EPA-U.S. Environmental Protection Agency.

Arnfield A. J. (2003) ,“Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island”, *International journal of climatology* 23, 1-26.

ARPAV, Agenzia Regionale per la prevenzione e protezione ambientale del Veneto - Area Tecnico-Scientifica - Osservatorio Regionale Aria (2000), “La caratterizzazione climatica della Regione Veneto”, Quaderni per l’Ambiente Veneto.

Bell R., Cole D., DeAngelo B. et al. (2008) “Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. Tree and Vegetation”, EPA-U.S. Environmental Protection Agency.

Bell R., R. Berghage, H. Doshi et al. (2008), ”Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies Green Roofs”, EPA-U.S. Environmental Protection Agency.

Bonafè G. (2006), “Microclima urbano: Impatto dell'urbanizzazione sulle condizioni climatiche locali e fattori di mitigazione”, ARPA Emilia-Romagna.

Chapman L., Thornes J. E., Bradley A. V. (2001), “Modelling of road surface temperature from a geographical parameter database”, *Meteorological Application*, vol. 8, 409-419.

Cheng V., E. Ng, C. Chane e B. Givoni (2012), “Outdoor thermal comfort study in a sub-tropical climate: a longitudinal study based in Hong Kong”, *International Journal of Climatology*, 56:43 – 56.

Chin G., A. Desjarlais, M. Estes et al. (2008), “Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. Cool Roofs”, EPA-U.S. Environmental Protection Agency.

Di Gilio Marco (2010), “Studio sulla variabilità spaziale dei parametri termogrametrici nel territorio di Padova”, Università degli studi di Padova.

Ferguson G. e Woodbury A. D. (2004), “Subsurface heat flow in an urban environment”, *Journal of Geophysical Research*, 109.

Ferguson B., K. Fisher, J. Golden et al. (2008), “Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. Cool Pavements”, EPA-U.S. Environmental Protection Agency.

Fanchiotti e Carnielo (2011),” Impatto di cool material sulla mitigazione dell’isola di calore urbana e sui livelli di comfort termico negli edifici”, ENEA- Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie, l’Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile.

Fontanesi Filippo (2011), “Application of thermal comfort indices to outdoor urban settings using Rayman model”, Università degli Studi di Parma – Facoltà di Ingegneria.

Gartland Lisa (2008), *Heat Islands: Understanding and Mitigating Heat in Urban Areas*, Earthscan, London.

Grimmond C.S.B. (1992), “The suburban energy balance: methodological considerations and results for a mid latitude west coast city under winter and spring conditions”, *International Journal of Climatology*, 12, 481–497.

Gulyas Á., J. Unger, B. Balazs and A. Matzarakis (2003), “Analysis of the bioclimatic conditions within different surface structures in a medium-sized city (Szeged, Hungary)”, *Acta Climatologica ET Chorologica - Universitatis Szegediensis*, Tom. 36-37, 37-44.

Haberl J. e S. Cho (2004), “Literature Review of Uncertainty of Analysis Methods (Cool Roofs), Report to the Texas Commission on Environmental Quality. Energy Systems Laboratory” (<http://esl.tamu.edu>), Texas A&M University.

Honjo T. (2009), “Thermal Comfort in Outdoor Environment”, *Global Environmental Research*, v. 13, p. 43 47.

Huang S., Taniguchi, M. Yamano, M. Wang C. (2009), “Detecting urbanization effects on surface and subsurface thermal environment A case study of Osaka”, *Science of the total environment*, 407(9), 3142 3152.

Ichinose Toshiaki, Kazuhiro Shimodozono e Keisuke Hanaki (1999), “Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo”, *Atmospheric Environment* 33, 24 25, 3897 3909.

Kim, Yeon Hee, Jong Jin Baik (2002), “Maximum urban heat island intensity in seoul”, *Journal of Applied Meteorology*, 41, 651–659.

Landsberg H. E. (1981), *The Urban Climate*, Academic Press, New York.

Lazzarin Renato M. (2011), “Le isole di calore nelle aree urbane”, *Casa&Clima*, n. 34, 34 40.

Lazzarin R., Castellotti F., Busato F. (2005), “Experimental measurements and numerical modelling of a green roof”, *Energy and Buildings*, vol. 37, 1260 1267, ISSN: 0378 7788.

Matzarakis A., Rutz F., Mayer H. (2007), “Modelling radiation fluxes in simple and complex environments – Application of the RayMan model”, *International Journal of Biometeorology*, 51, 323 334.

Matzarakis A., Rutz F., Mayer H. (2010), "Modelling Radiation fluxes in simple and complex environments – Basics of the RayMan model", *International Journal of Biometeorology*, 54, 131 139.

Mirzaei Parham A., Fariboz Haghghat (2010), "Approaches to study Urban Heat Island Abilities and limitations", *Building and Environment*, 45, 2192 2201.

Nunez M. and Oke T.R. (1977), "The Energy Balance of an Urban Canyon", *Journal of Applied Meteorology*, vol. 16, pp.11 19.

Oke T.R. (1976), "The distinction between canopy and boundary layer urban heat islands", *Atmosphere*, 14, 268 277.

Oke T. R. (1982), "The energetic basis of the urban heat island", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 108, n. 455, 1 24.

Oke T.R. (1987), *Boundary layer climates*, Routledge, Londra.

Oke T. R. (1995) "The heat island characteristics of the urban boundary layer: Characteristics, causes and effects", *Wind Climate in Cities*, pp. 81–107.

Oke T.R. (1997), "Urban Climates and Global Environmental Change", In: Thompson, R.D. and A. Perry (eds.) *Applied Climatology: Principles & Practices*. New York NY, Routledge. pp. 273 287.

Oke T.R. (2006), "Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites", *Instruments and observing methods*, World Meteorological Organization, Report no. 81.

Oke T.R., Spronken Smith R.A., Jauregui E., Grimmond C.S.B. (1999), "The energy balance of central Mexico City during the dry season", *Atmospheric Environment*, 33, 3919 3930.

Rizwan, Ahmed Memon, Leung Dennis Y.C. e Chunho Liu (2008), "A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island", *Journal of Environmental Sciences* 20, 120 128.

Pauleit S., Duhme F. (2000), "Assessing the environmental performance of land cover types for urban planning", *Landscape and Urban Planning*, 52, 1–20.

Sailor David J. e Lu Lu (2004), "A top down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas", *Atmospheric Environment* 38, 2737 2748.

Santamouris M. (2001), *Energy and Climate in the Urban Built Environment*, James&James Science Publishers Ltd, Londra.

Santamouris M., N. Papanikolaou, I. Livada et al. (2001), "On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings", *Solar Energy*, 70, n. 3, 210 216.

Santamouris M., A. Synnefa, e T. Karlessi (2011), "Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions.", *Solar Energy* 85, 12, 3085 3102.

Sozzi Roberto (2003), "La micrometeorologia e la dispersione degli inquinanti in aria", APAT Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici.

Stull Roland B. (1989), *An introduction to Boundary Layer Meteorology*, Springer.

Taha Haider (1997), "Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat", *Energy and Buildings*, 25, 99 103.

Thorsson S, Lindberg F, Eliasson I, Holmer B (2007), "Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting", *International Journal of Climatology*, 27:1983 – 1993.

Unger Janos (2009) "Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database", *International Journal of Environment and Pollution*, 36, 59 - 80.

Voogt J. A. (2000a), "Urban Heat Island", *Encyclopedia of Global Environmental Change*, vol. 3, 660 666.

Voogt J. A. (2000b), "Image representations of complete urban surface temperatures", *Geocarto International*, 15, 19 30.

Voogt J. A. (2006), "How Researchers Measure Urban Heat Islands", US EPA.

Voogt J. A. and Oke T. R. (1997), "Complete urban surface temperatures", *Journal of Applied Meteorology*, 36, 1117 – 1132.

Voogt J. A. and Oke T.R. (2003), "Thermal remote sensing of urban areas", *Remote Sensing of Environment*, 86, 370 384.