



Università degli Studi di Padova

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali

Corso di Laurea Triennale in

Ingegneria Gestionale

**Il fenomeno dell'isola di calore urbana a Padova:
analisi dei dati e scenari di mitigazione**

RELATORE: Ch.mo Prof. Ing. Marco Noro

LAUREANDO: Luca Battistella

ANNO ACCADEMICO 2013/2014

INDICE

SOMMARIO	13
INTRODUZIONE	14
CAPITOLO 1 - Il fenomeno delle isole di calore urbane	16
1. Il fenomeno.....	16
2. La classificazione.....	18
3. Le cause	22
4. Le tecniche di mitigazione.....	29
CAPITOLO 2 - Il caso di Prato della Valle	32
1. Prato della Valle.....	32
2. La scelta di Prato della Valle e il Progetto UHI	34
3. Obiettivi dello studio.....	40
CAPITOLO 3 - Il software: ENVI-met.....	41
1. La struttura del software	41
1.1. Input.....	43
1.2. Interfaccia di simulazione	44
1.3. Output	45
1.4. Lettura degli Output.....	47
2. I limiti del software	48
CAPITOLO 4 - Le simulazioni	52
1. Introduzione.....	52
1.1 Il modello in ENVI-met.....	52
1.1.1. Area Input File	52
1.1.2. Config File	56
1.2. I parametri analizzati	59
1.2.1. Temperatura Potenziale dell’Aria	59
1.2.2. Temperatura Media Radiante	60
1.2.3. PMV e PPD.....	63

1.2.4. UHI Intensity (UHII).....	68
1.3. I punti scelti per l'analisi.....	72
2. La simulazione di <i>Via Roma</i>	74
2.1. Introduzione	74
2.2. I risultati.....	75
3. La simulazione dello <i>Scenario Stato di Fatto</i>	77
3.1. Introduzione	77
3.2. I risultati.....	77
4. La simulazione dello <i>Scenario Green</i>	89
4.1. Introduzione	89
4.2. Il modello.....	92
4.3. I risultati.....	97
5. La simulazione dello <i>Scenario Cool Pavements</i>	107
5.1. Introduzione	107
5.2. Il modello.....	115
5.3. I risultati.....	119
CONCLUSIONI	130
BIBLIOGRAFIA	156
APPENDICE	167

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 Percentuale della popolazione a metà anno residente nelle aree urbane (fonte: United Nations, World Urbanization Prospects, The 2014 Revision)	16
Figura 2 Mappa delle isoterme che ritrae il fenomeno dell'isola di calore urbana (fonte: EPA Compendium Basics 2008)	17
Figura 3 Rappresentazione dell'Atmospheric Boundary Layer (fonte: Oke T. R. 1976, p.275).....	19
Figura 4 Isole di calore atmosferiche e di superficie (fonte: Voogt J. 2006)	20
Figura 5 Rappresentazione grafica dei fattori che influenzano il fenomeno dell'UHI (fonte: Voogt J. 2006).....	23
Figura 6 Spettro delle radiazioni (fonte: Davolio S. dispense CNR)	24
Figura 7 Rappresentazione dei flussi energetici a diversa lunghezza d'onda (fonte: http://www.ruf.rice.edu/~sass/UHI.html)	25
Figura 8 Direzione dei flussi radiativi di giorno (a) e di notte (b) (fonte: Oke T.R. 1987)	26
Figura 9 Rappresentazione schematica del canyon urbano (fonte: Nunez M. e Oke T. R. 1977)	27
Figura 10 Fattore di vista di un canyon urbano (fonte: Bonan G. 2002, cap.14).....	28
Figura 11 Le aree metropolitane (a sinistra), caratterizzate dal 75 - 100 % di superfici impermeabili, dispongono di una quantità inferiore di umidità utile all'evapotraspirazione; i terreni naturali (a destra), caratterizzati da circa solo il 10 % di superfici impermeabili, mantengono temperature superficiali ed atmosferiche inferiori (fonte: EPA Compendium Basics 2008, p.7)	29
Figura 12 Il progetto finale di Andrea Memmo in un'incisione di Francesco Piranesi (fonte: www.Wikipedia.it)	33
Figura 13 Panoramica dell'Isola Memmia dall'angolo sud ovest della piazza (fonte: rete civica del comune di Padova)	34
Figura 14 Vista aerea di Prato della Valle (fonte: www.fotografieitalia.it)	34
Figura 15 Pianta delle aree pilota (fonte: www.eu-uhi.eu/it)	36

Figura 16 Il logo del Progetto UHI (fonte: www.eu-uhi.eu/it)	36
Figura 17 Variabili descrittive delle caratteristiche geometriche dell'U2O (fonte: UHI Newsletter 2014, p.3)	39
Figura 18 Variabili descrittive delle superfici e dei materiali dell'U2O (fonte: UHI Newsletter 2014, p.3)	39
Figura 19 Principali azioni di mitigazione (fonte: UHI Newsletter 2014, p.3)	39
Figura 20 Schema di struttura del software ENVI-met	42
Figura 21 Rappresentazione delle impostazioni generali per la creazione dell' Area Input File.IN (fonte: ENVI-met)	53
Figura 22 Foto dello strumento Leica DISTO D2 e le sue specifiche tecniche (fonte: www.leica.it)	54
Figura 23 Rilievi di una misura indiretta (fonte: www.leica)	55
Figura 24 Rappresentazione dell'Area Input File con l'Editor di ENVI-met	55
Figura 25 Immagine dall'alto della piazza (fonte: Google Earth)	56
Figura 26 Rappresentazione 3D dell'Area Input File ottenuta con il software tool LEONARDO 14 (Bruse M. e ENVI-met Team 2014).....	56
Figura 27 Immagine del Config File di ENVI-met utilizzato per la simulazione As-Is (fonte: ENVI-met Configurator)	58
Figura 28 Energy Balance (fonte: Bonan 2002, cap.7 p.4).....	61
Figura 29 Andamento tipico della Temperatura Media Radiante (fonte: www.envimet.com)	63
Figura 30 Scala ASHRAE del comfort Termico (fonte: ASHRAE Handbook Fundamentals 2009)	64
Figura 31 La scala del PMV utilizzata da ENVI-met (fonte: www.envimet.com)	66
Figura 32 Relazione tra l'andamento del PMV e PPD (fonte: ASHRAE Handbook Fundamentals 2009)	67
Figura 33 (a) Tipica variazione temporale tra temperatura della zona urbana e zona rurale, in condizioni di cielo sgombro e vento debole. L'intensità di UHI è prodotta dalla differenza nella velocità di raffreddamento delle due aree, che è molto più pronunciata nelle notti serene e con vento debole, quando le aree rurali si raffreddano più	

velocemente di quelle urbane. L'intensità (b) dell'UHI cresce tipicamente a partire dal medio-tardo pomeriggio, e raggiunge il massimo alcune ore dopo il tramonto (Chow e Roth 2006, p.26), anche se in alcuni casi il picco massimo viene raggiunto appena dopo l'alba (Wilby 2003, p.58) (fonte: EPA Compendium Basics 2008).....69

Figura 34 Correlazione tra il massimo effetto di isola di calore urbana (UHI_{max}) e la popolazione P delle città in Nord America, Europa occidentale, Giappone e Corea (di Matzarakis 2001, modificato dopo Oke 1973, 1982; Park 1986) (fonte: Review Progetto UHI 2013).....70

Figura 35 Correlazione tra il massimo effetto di isola di calore urbana (UHI_{max}) e la popolazione P. Simboli diversi sono usati per le città in diverse zone climatiche. Le linee continue sono le corrispondenti linee di regressione (fonte: Chow W. T. L. e Roth M. 2006).....71

Figura 36 Punti scelti per l'analisi. Immagine di base da ENVI-met.....73

Figura 37 Punto scelto per l'analisi della temperatura presso Via Roma (fonte: Google Earth)74

Figura 38 Via Roma (fonte: Google Earth).....74

Figura 39 Andamento temperatura giornaliera dell'aria a 1.5 m dal suolo.....76

Figura 40 Mappa termografica della temperatura potenziale dell'aria a 1.5 m dal suolo (29 luglio, ore 15:00 - Simulazione As Is); (fonte: LEONARDO 14)77

Figura 41 Mappa termografica della temperatura potenziale dell'aria a 1.5 m dal suolo (30 luglio, ore 3:00 - Simulazione As Is); (fonte: LEONARDO 14)78

Figura 42 Mappa termografica della temperatura media radiante a 1.5 m dal suolo (29 luglio, ore 15:00 - Simulazione As Is); (fonte: LEONARDO 14)85

Figura 43 Mappa termografica della temperatura media radiante a 1.5 m dal suolo (30 luglio, ore 3:00 - Simulazione As Is); (fonte: LEONARDO 14)86

Figura 44 Mappa termografica del PMV a 1.5 m dal suolo (29 luglio, ore 15:00 - Simulazione As Is); (fonte: LEONARDO 14).....86

Figura 45 Mappa termografica del PMV a 1.5 m dal suolo (30 luglio, ore 3:00 - Simulazione As Is); (fonte: LEONARDO 14).....87

Figura 46 Mappa termografica del PPD a 1.5 m dal suolo (29 luglio, ore 15:00 - Simulazione As Is); (fonte: LEONARDO 14).....87

Figura 47 Mappa termografica del PPD a 1.5 m dal suolo (30 luglio, ore 3:00 - Simulazione As Is); (fonte: LEONARDO 14).....	88
Figura 48 Posizionare dei nuovi alberi vicino alla parete ovest degli edifici può massimizzare la loro capacità di adombrare la struttura e bloccare i venti nel corso dell'inverno (fonte: EPA Compendium Trees and Vegetation 2008)	91
Figura 49 Vista dall'alto di Kensington Gardens e di Hyde Park, a pochi passi da Buckingham Palace, sede della Regina; Londra (UK) (fonte: www.wikipedia.com)	93
Figura 50 Scorcio di una delle fontane con sculture di Kensington Garden; Londra (UK) (fonte: www.wikipedia.com).....	94
Figura 51 Modello del file Area dello scenario Green con ENVI-met Editor	95
Figura 52 Modello 3D dello scenario Green da ENVI-met.....	96
Figura 53 La variazione della presenta di asfalto, prato, zone coperte da alberi e da altro tra le due simulazioni (quantità espresse in m ²) su un totale di 88620 m ²	97
Figura 54 Mappa termografica della temperatura potenziale dell'aria a 1.5 m dal suolo (29 luglio, ore 15:00 - Simulazione Green); (fonte: LEONARDO 14)	103
Figura 55 Mappa termografica della temperatura potenziale dell'aria a 1.5 m dal suolo (30 luglio, ore 3:00 - Simulazione Green); (fonte: LEONARDO 14)	103
Figura 56 Mappa termografica della temperatura media radiante a 1.5 m dal suolo (29 luglio, ore 15:00 - Simulazione Green); (fonte: LEONARDO 14).....	104
Figura 57 Mappa termografica della temperatura media radiante a 1.5 m dal suolo (30 luglio, ore 3:00 - Simulazione Green); (fonte: LEONARDO 14)	104
Figura 58 Mappa termografica del PMV a 1.5 m dal suolo (29 luglio, ore 15:00 - Simulazione Green); (fonte: LEONARDO 14).....	105
Figura 59 Mappa termografica del PMV a 1.5 m dal suolo (30 luglio, ore 3:00 - Simulazione Green); (fonte: LEONARDO 14).....	105
Figura 60 Mappa termografica del PPD a 1.5 m dal suolo (29 luglio, ore 15:00 - Simulazione Green); (fonte: LEONARDO 14).....	106
Figura 61 Mappa termografica del PPD a 1.5 m dal suolo (30 luglio, ore 3:00 - Simulazione Green); (fonte: LEONARDO 14).....	106
Figura 62 I principi base dei cool materials (fonte: Karlessi T. et al. 2011).....	108

Figura 63 Chip Seals (fonte: Kaloush K. 2010).....	111
Figura 64 A sinistra una pavimentazione con utilizzo di resine colorate, a destra esempio di veniciatura delle superfici (fonte: De Carolis L. 2012)	111
Figura 65 Whitetopping (fonte: Kaloush K. 2010)	112
Figura 66 Asfalti drenanti (fonte: Kaloush K. 2010).....	114
Figura 67 Asfalti permeabili (fonte: Golden J. e Kaloush K. 2007)	114
Figura 68 Pavimentazione permeabile con vegetazione (fonte: De Carolis L. 2012).	115
Figura 69 Confronto delle emissività di diversi tipi di superficie al variare della lunghezza d'onda (fonte: Peron F. 2000 / 2001)	117
Figura 70 Mappa termografica della temperatura potenziale dell'aria a 1.5 m dal suolo (29 luglio, ore 15:00 - Simulazione Cool Pavements); (fonte: LEONARDO 14)	125
Figura 71 Mappa termografica della temperatura potenziale dell'aria a 1.5 m dal suolo (30 luglio, ore 3:00 - Simulazione Cool Pavements); (fonte: LEONARDO 14)	126
Figura 72 Mappa termografica della temperatura media radiante a 1.5 m dal suolo (29 luglio, ore 15:00 - Simulazione Cool Pavements); (fonte: LEONARDO 14)	126
Figura 73 Mappa termografica della temperatura media radiante a 1.5 m dal suolo (30 luglio, ore 3:00 - Simulazione Cool Pavements); (fonte: LEONARDO 14)	127
Figura 74 Mappa termografica del PMV a 1.5 m dal suolo (29 luglio, ore 15:00 - Simulazione Cool Pavements); (fonte: LEONARDO 14).....	127
Figura 75 Mappa termografica del PMV a 1.5 m dal suolo (30 luglio, ore 3:00 - Simulazione Cool Pavements); (fonte: LEONARDO 14).....	128
Figura 76 Mappa termografica del PPD a 1.5 m dal suolo (29 luglio, ore 15:00 - Simulazione Cool Pavements); (fonte: LEONARDO 14).....	128
Figura 77 Mappa termografica del PPD a 1.5 m dal suolo (30 luglio, ore 3:00 - Simulazione Cool Pavements); (fonte: LEONARDO 14).....	129
Figura 78 Mappa termografica della variazione tra la temperatura potenziale dello scenario Green e quella dello scenario As Is, a 1.5 m dal suolo (29 luglio, ore 15:00); (fonte: LEONARDO 14).....	133

Figura 79 Mappa termografica della variazione tra la temperatura potenziale dello scenario Green e quella dello scenario As Is, a 1.5 m dal suolo (30 luglio, ore 3:00); (fonte: LEONARDO 14).....	134
Figura 80 Mappa termografica della variazione tra la temperatura media radiante dello scenario Green e quella dello scenario As Is, a 1.5 m dal suolo (29 luglio, ore 15:00); (fonte: LEONARDO 14).....	134
Figura 81 Mappa termografica della variazione tra la temperatura media radiante dello scenario Green e quella dello scenario As Is, a 1.5 m dal suolo (30 luglio, ore 3:00); (fonte: LEONARDO 14).....	135
Figura 82 Mappa termografica della variazione tra il PMV dello scenario Green e quello dello scenario As Is, a 1.5 m dal suolo (29 luglio, ore 15:00); (fonte: LEONARDO 14)	135
Figura 83 Mappa termografica della variazione tra il PMV dello scenario Green e quello dello scenario As Is, a 1.5 m dal suolo (30 luglio, ore 3:00); (fonte: LEONARDO 14)	136
Figura 84 Mappa termografica della variazione tra il PPD dello scenario Green e quello dello scenario As Is, a 1.5 m dal suolo (29 luglio, ore 15:00); (fonte: LEONARDO 14)	136
Figura 85 Mappa termografica della variazione tra il PPD dello scenario Green e quello dello scenario As Is, a 1.5 m dal suolo (30 luglio, ore 3:00); (fonte: LEONARDO 14)	137
Figura 86 Mappa termografica della variazione tra la temperatura potenziale dello scenario Cool Pavements e quella dello scenario As Is, a 1.5 m dal suolo (29 luglio, ore 15:00); (fonte: LEONARDO 14)	137
Figura 87 Mappa termografica della variazione tra la temperatura potenziale dello scenario Cool Pavements e quella dello scenario As Is, a 1.5 m dal suolo (30 luglio, ore 3:00); (fonte: LEONARDO 14)	138
Figura 88 Mappa termografica della variazione tra la temperatura media radiante dello scenario Cool Pavements e quella dello scenario As Is, a 1.5 m dal suolo (29 luglio, ore 15:00); (fonte: LEONARDO 14)	138
Figura 89 Mappa termografica della variazione tra la temperatura media radiante dello scenario Cool Pavements e quella dello scenario As Is, a 1.5 m dal suolo (30 luglio, ore 3:00); (fonte: LEONARDO 14)	139

Figura 90 Mappa termografica della variazione tra il PMV dello scenario Cool Pavements e quello dello scenario As Is, a 1.5 m dal suolo (29 luglio, ore 15:00); (fonte: LEONARDO 14).....	139
Figura 91 Mappa termografica della variazione tra il PMV dello scenario Cool Pavements e quello dello scenario As Is, a 1.5 m dal suolo (30 luglio, ore 3:00); (fonte: LEONARDO 14).....	140
Figura 92 Mappa termografica della variazione tra il PPD dello scenario Cool Pavements e quello dello scenario As Is, a 1.5 m dal suolo (29 luglio, ore 15:00); (fonte: LEONARDO 14).....	140
Figura 93 Mappa termografica della variazione tra il PPD dello scenario Cool Pavements e quello dello scenario As Is, a 1.5 m dal suolo (30 luglio, ore 3:00); (fonte: LEONARDO 14).....	141
Figura 94 Confronto dell'andamento giornaliero della temperatura potenziale della posizione 1, nei tre scenari.....	142
Figura 95 Confronto dell'andamento giornaliero della temperatura potenziale della posizione 2, nei tre scenari.....	142
Figura 96 Confronto dell'andamento giornaliero della temperatura potenziale della posizione 3, nei tre scenari.....	143
Figura 97 Confronto dell'andamento giornaliero della temperatura potenziale della posizione 4, nei tre scenari.....	143
Figura 98 Confronto dell'andamento giornaliero della temperatura potenziale della posizione 5, nei tre scenari.....	144
Figura 99 Confronto dell'andamento giornaliero della temperatura potenziale della posizione 6, nei tre scenari.....	144
Figura 100 Confronto dell'andamento giornaliero della temperatura potenziale della posizione 7, nei tre scenari.....	145
Figura 101 Confronto dell'andamento giornaliero della temperatura media radiante della posizione 1, nei tre scenari.....	145
Figura 102 Confronto dell'andamento giornaliero della temperatura media radiante della posizione 2, nei tre scenari.....	146

Figura 103 Confronto dell'andamento giornaliero della temperatura media radiante della posizione 3, nei tre scenari.....	146
Figura 104 Confronto dell'andamento giornaliero della temperatura media radiante della posizione 4, nei tre scenari.....	147
Figura 105 Confronto dell'andamento giornaliero della temperatura media radiante della posizione 5, nei tre scenari.....	147
Figura 106 Confronto dell'andamento giornaliero della temperatura media radiante della posizione 6, nei tre scenari.....	148
Figura 107 Confronto dell'andamento giornaliero della temperatura media radiante della posizione 7, nei tre scenari.....	148
Figura 108 Confronto dell'andamento giornaliero del PMV della posizione 1, nei tre scenari	149
Figura 109 Confronto dell'andamento giornaliero del PMV della posizione 2, nei tre scenari	149
Figura 110 Confronto dell'andamento giornaliero del PMV della posizione 3, nei tre scenari	150
Figura 111 Confronto dell'andamento giornaliero del PMV della posizione 4, nei tre scenari	150
Figura 112 Confronto dell'andamento giornaliero del PMV della posizione 5, nei tre scenari	151
Figura 113 Confronto dell'andamento giornaliero del PMV della posizione 6, nei tre scenari	151
Figura 114 Confronto dell'andamento giornaliero del PMV della posizione 7, nei tre scenari	152
Figura 115 Confronto dell'andamento giornaliero dell'UHII della posizione 1, nei tre scenari	152
Figura 116 Confronto dell'andamento giornaliero dell'UHII della posizione 2, nei tre scenari	153
Figura 117 Confronto dell'andamento giornaliero dell'UHII della posizione 3, nei tre scenari	153

Figura 118 Confronto dell'andamento giornaliero dell'UHII della posizione 4, nei tre scenari	154
Figura 119 Confronto dell'andamento giornaliero dell'UHII della posizione 5, nei tre scenari	154
Figura 120 Confronto dell'andamento giornaliero dell'UHII della posizione 6, nei tre scenari	155
Figura 121 Confronto dell'andamento giornaliero dell'UHII della posizione 7, nei tre scenari	155

SOMMARIO

La presente tesi raccoglie i dati sull'isola di calore a Prato della Valle, nel centro di Padova. I risultati sono stati ottenuti dalle simulazioni attraverso il software ENVI-met. Ad una prima descrizione del fenomeno dell'isola di calore, segue la presentazione del software utilizzato. Le simulazioni hanno lo scopo di individuare l'intensità dell'isola di calore in quest'area e di quantificare l'impatto potenziale di due scenari di mitigazione: il primo, *Green*, è caratterizzato da un aumento delle superfici verdi che tendono a migliorare le condizioni di vivibilità delle città attraverso l'ombreggiamento e l'evapotraspirazione; il secondo, *Cool Pavements*, intende mostrare l'effetto dei *cool materials*, materiali dalle elevate proprietà riflettenti che assorbono una minor quantità di radiazione solare e che quindi generano temperature superficiali minori. La quantificazione del fenomeno dell'isola di calore viene fatta calcolando la differenza tra la temperatura dell'area urbana rispetto a quella di una zona rurale di riferimento. Nel presente lavoro tuttavia, vengono presi in considerazione anche altri parametri, come la temperatura media radiante e due indici di comfort, il voto medio previsto (PMV) e la percentuale di insoddisfatti (PPD). L'analisi dei dati ottenuti permette di definire l'entità del fenomeno e quantificare l'effetto delle azioni di mitigazione: al commento dei risultati viene affiancata la presentazione con tabelle, grafici e mappe termografiche dei valori calcolati dalle simulazioni, così da consentire una immediata comprensione delle variabili prese in considerazione.

INTRODUZIONE

L'ambiente urbano è comunemente percepito come più caldo rispetto a quello agricolo; tale percezione è entrata nel comune senso collettivo del vivere la città e la campagna, ancor prima che potesse essere dimostrata da parte della comunità scientifica. Nel XX secolo, la rapida urbanizzazione ha modificato profondamente l'ambiente e il clima delle zone urbane: superfici impermeabili, scarsa vegetazione, consumi energetici e la complessa geometria della struttura urbana hanno indotto un innalzamento della temperatura delle città rispetto alle campagne adiacenti: è ciò a cui ci si riferisce quando si parla di *Isole di Calore Urbane (UHI - Urban Heat Islands)*. Localmente, infatti, la presenza di un'area urbana modifica la temperatura e l'umidità dell'aria, il profilo e la struttura dei regimi di circolazione del vento. I dati sortiti dai rilievi effettuati su alcune città evidenziano come le temperature nelle zone densamente popolate siano effettivamente mediamente più alte rispetto a quelle rurali. In molti casi, l'urbanizzazione può incidere sul clima locale di una città più intensamente e più rapidamente di quanto non faccia il riscaldamento globale.

Quello delle isole di calore è un fenomeno ampiamente documentato negli ultimi 30 anni, ma ancora non sono state prese delle adeguate misure di mitigazione. Le tecniche di mitigazione hanno il compito di controbilanciare il fenomeno e hanno a che fare con l'uso intensivo delle aree verdi, l'applicazione di materiali altamente riflettenti, il decremento del calore antropogenico e l'incremento del vento nel canopy layer. Da tali ragionamenti ha origine questo lavoro, che si pone come principale obiettivo quello di approfondire la conoscenza del fenomeno dell'isola di calore, e di quantificare gli effetti di possibili azioni di mitigazione, a partire da soluzioni di tecnica edilizia e pianificazione urbanistica e territoriale. Per fare questo, si è utilizzato un software di simulazione dinamica dell'ambiente microclimatico della città, ENVI-met. La presentazione delle caratteristiche di questo programma viene fatta seguire dalla descrizione della creazione dei modelli di studio e degli scenari di mitigazione. In dettaglio l'elaborato si articola come segue:

- nel primo capitolo si affronta la descrizione del fenomeno oggetto di studio, con una spiegazione della classificazione, delle cause e dei maggiori effetti sulle attività umane dell'isola di calore; inoltre si definiscono le linee guida per alcune azioni di mitigazione.
- il secondo capitolo si occupa di presentare l'area di studio, Prato della Valle, e il Progetto UHI dell'Unione Europea. Ivi vengono posti anche gli obiettivi della tesi.
- al terzo capitolo è affidata la presentazione del software ENVI-met che verrà utilizzato per le simulazioni: questa parte del lavoro ne mostra la struttura, gli

elementi chiave e anche i limiti, che occorre conoscere per creare dei modelli il più possibile aderenti alla realtà.

- nel quarto capitolo è presente la parte principale dell'elaborato: vengono definiti tutti i passaggi che portano alla creazione del modello tridimensionale di Prato della Valle attraverso ENVI-met, si passano in rassegna i tre scenari di simulazione (As Is, Green e Cool Pavements) e per ciascuno si presentano le caratteristiche peculiari e i risultati delle simulazioni, attraverso dei confronti tra gli scenari ed altri studi di letteratura.
- il capitolo conclusivo è dedicato alla dimostrazione della bontà del modello e delle azioni di mitigazione e vi si raccolgono tutte le mappe termografiche ed i grafici sull'andamento giornaliero dei parametri analizzati.

CAPITOLO 1

Il fenomeno delle isole di calore urbane

1. Il fenomeno

A partire dall'inizio del Novecento, si è assistito ad un processo di inurbamento senza precedenti: il numero di persone che vivevano nelle città è salito dai 746 milioni del 1950, ai 3.8 miliardi del 2014, e se questo dato continuerà a crescere, come è probabile, si arriverà a più del 65% della popolazione mondiale entro la metà del XXI secolo, che allora si stima poter essere di circa di nove miliardi e mezzo di persone (United Nations, World Urbanization Prospects, The 2014 Revision) (Figura 1).

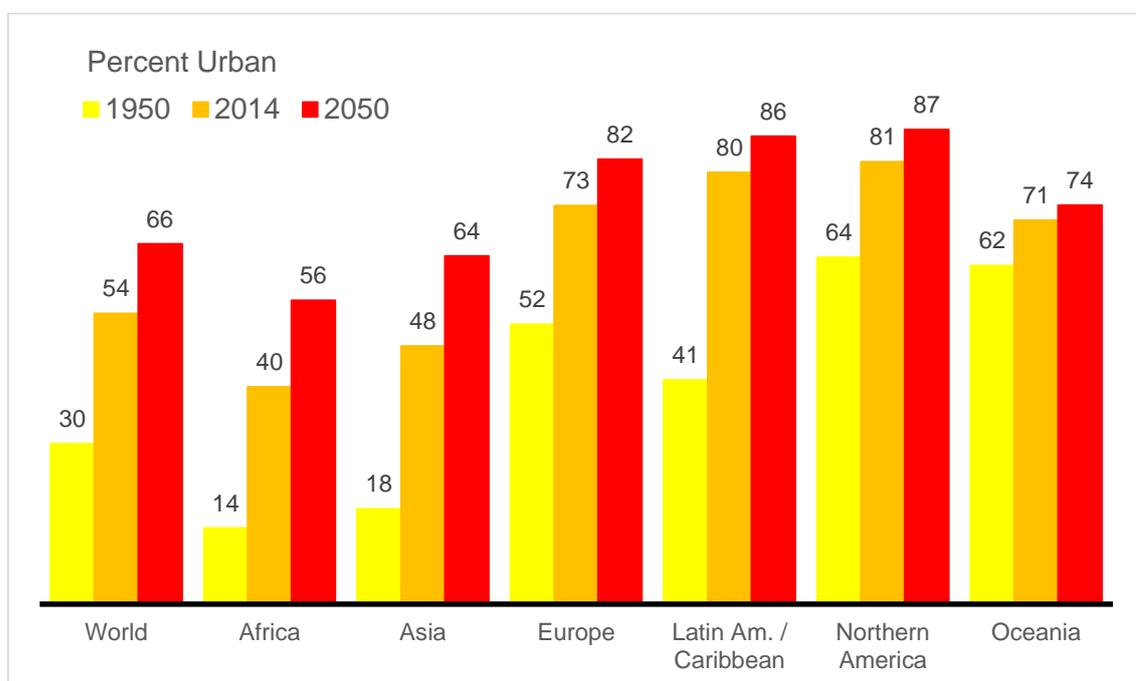


Figura 1 Percentuale della popolazione a metà anno residente nelle aree urbane (fonte: United Nations, World Urbanization Prospects, The 2014 Revision)

L'incremento dell'industrializzazione e dell'urbanizzazione (si deve ricordare che dal secolo scorso la popolazione mondiale è passata da 2.5 a 7 miliardi di individui) ha aumentato il numero di edifici nelle città, intensificando i consumi energetici e modificando il microclima urbano, eliminando gli spazi verdi e sostituendoli con strade e vaste zone cementificate impermeabili. Soprattutto l'eccessiva edificazione ha prodotto, nel corso degli anni, diversi effetti negativi sul clima e in generale sul tenore di vita degli abitanti delle città. In particolare, l'urbanizzazione ha aggravato un problema noto già da tempo, quello delle *isole di calore urbane* (Urban Heat Island - UHI). Si tratta di un

fenomeno microclimatico caratteristico delle aree metropolitane, consistente in un incremento significativo della temperatura nelle aree urbane rispetto alle zone periurbane e rurali circostanti. Che il centro urbano fosse una zona più calda rispetto alle campagne limitrofe era già cosa nota da tempo, ma negli ultimi 30 anni i dati sull'inurbamento sono aumentati così tanto che si è deciso di affrontare approfonditamente lo studio di questo problema e cercare di trovare delle soluzioni a riguardo. L'intensità del fenomeno UHI, infatti, aumenta proporzionalmente alla dimensione ed alla popolazione dell'area urbana, e di conseguenza esso è destinato a rafforzarsi nei prossimi anni a seguito del costante aumento della popolazione nelle aree urbane.

Questo particolare fenomeno prende il curioso appellativo di *isola*, per il fatto che, se la temperatura nell'area urbana viene rappresentata attraverso delle isoterme, si può facilmente notare come la parte centrale della città sia una sorta di "isola", immersa in un "mare" che rappresenta le zone periferiche a temperatura inferiore (Figura 2).



Figura 2 Mappa delle isoterme che ritrae il fenomeno dell'isola di calore urbana (fonte: EPA Compendium Basics 2008)

Un'isola di calore può essere rappresentata anche come una sorta di "cupola" di aria calda stagnante sopra le aree densamente edificate della città. La differenza tra la temperatura di questa "cupola" calda e quella della zona rurale circostante funge da indicatore per quantificare l'entità dell'isola di calore e prende il nome di *UHI Intensity* o *UHII*.

Lo scostamento tra le temperature delle zone urbane e quelle rurali si genera poiché il calore che viene assorbito durante il giorno dagli edifici, dalle strade e dalle altre strutture, viene ri-emesso, dopo il tramonto, nell'ambiente circostante. Tuttavia, mentre le superfici rurali sono in grado di rilasciare velocemente il calore immagazzinato, i materiali da costruzione delle città rilasciano l'energia assorbita molto lentamente durante la notte: questo determina un riscaldamento maggiore e più persistente del tessuto urbano, che inizia quindi a "soffrire" del fenomeno dell'isola di calore.

L'esatta forma e le dimensioni di questo fenomeno variano nel tempo e nello spazio a causa di caratteristiche meteorologiche, regionali e urbane: pertanto, la morfologia dell'isola di calore urbana è fortemente influenzata dal carattere di unicità di ogni città. Nonostante questo, comunque, è possibile individuare dei valori indicativi di intensità di isola di calore, comuni a delle città simili per posizione geografica, per dimensione e per popolazione. Oke T.R. (1997) suggerisce che una grande città, con una popolazione di un milione di abitanti, situata nell'emisfero nord, ad una media latitudine, può presentare una temperatura media annua di 1 / 3 °C maggiore rispetto alle zone rurali limitrofe, e un'intensità massima di isola di calore pari a 12 °C in una notte estiva, in condizioni di scarsa ventosità.

La grande attenzione posta sull'isola di calore è dovuta ai numerosi effetti che può avere sulla vita e sul benessere dei cittadini che vivono nelle aree metropolitane interessate da questo fenomeno. Innanzitutto, l'innalzamento localizzato della temperatura incide negativamente sulla qualità della vita: si assiste infatti ad un abbassamento del comfort e della qualità dell'aria e dell'acqua, principalmente dovuti all'inquinamento termico. L'urbanizzazione e l'isola di calore portano con sé anche delle emissioni elevate di inquinanti e gas serra, che sono responsabili di un peggioramento delle condizioni di salute degli individui. A queste conseguenze sulla vita dei cittadini, si associa anche un incremento dei consumi di energia per il raffrescamento degli ambienti: l'aumento della temperatura si traduce infatti in maggiori richieste di risorse idriche ed energetiche. Gli edifici vedono aumentare il carico termico estivo e quindi si rendono necessari impianti di climatizzazione più potenti (con rischi connessi a possibili black-out) con, tra l'altro, EER ridotti (anche fino al 25 %) a causa delle peggiori condizioni di scambio termico dei condensatori.

2. La classificazione

Per comprendere quali impatti possa avere un'area urbana sul clima locale, occorre innanzitutto capire come sia composto lo strato limite atmosferico (*atmospheric boundary layer*, ABL), cioè quella parte di atmosfera (approssimativamente dalla

superficie fino ad un paio di chilometri di quota) influenzata direttamente dalle interazioni con la superficie terrestre.

L'isola di calore è infatti il risultato del riscaldamento dello strato limite atmosferico, causato da diversi fattori. In ambito urbano, l'ABL viene generalmente diviso in due zone a seconda della quota analizzata (Figura 3):

- Lo strato della copertura urbana (*urban canopy layer*, UCL): esso rappresenta lo strato climatico che va dalla linea di terra (0 m), fino all'altezza degli edifici e contiene quella parte di atmosfera racchiusa tra gli elementi di "rugosità" della superficie urbana (principalmente edifici). Esso mostra caratteristiche intrinseche tra città e città (altezza degli edifici, materiali da costruzione di facciate e tetti, tessuto urbano, rapporto tra aree verdi, aree libere e aree edificate). Nelle aree densamente edificate, il suo limite superiore è solitamente indicato come la quota media a cui si trovano i tetti, mentre per gli spazi aperti questo strato viene considerato praticamente assente (Oke T. R. 1976, p.274-275). L'UCL è governato dai processi che agiscono in "microscala", e proprio per questo è l'oggetto di studio delle analisi di questo tipo.
- Lo strato limite urbano (*urban boundary layer*, UBL) è la parte dell'ABL soprastante l'urban canopy layer. Si estende solitamente da una qualche decina di metri sopra la linea di terra fino all'altezza di due chilometri circa. È uno strato in cui vengono coinvolti i fenomeni locali o di mesoscala, direttamente dovuti alla presenza di un'area urbana al di sotto di esso.

Il risultato dell'interazione tra urban boundary layer, canopy layer e la superficie urbana (surface layer) è la presenza sopra la città di un'isola di calore.

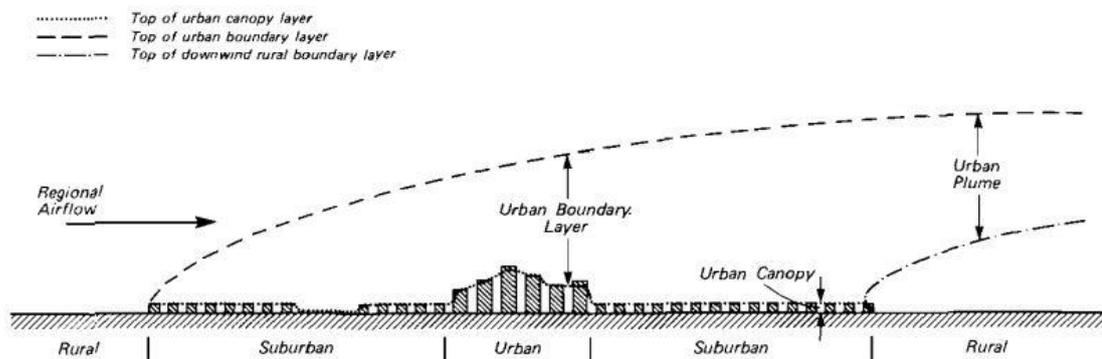


Figura 3 Rappresentazione dell'Atmospheric Boundary Layer (fonte: Oke T. R. 1976, p.275)

In relazione a questa distinzione nell'atmosfera che si trova al di sopra dell'area urbana, è possibile individuare tre tipi di isole di calore:

1. 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.
2. Isola di calore di superficie (*surface UHI - SUHI*)
3. Isola di calore del sottosuolo (*subsurface UHI*).

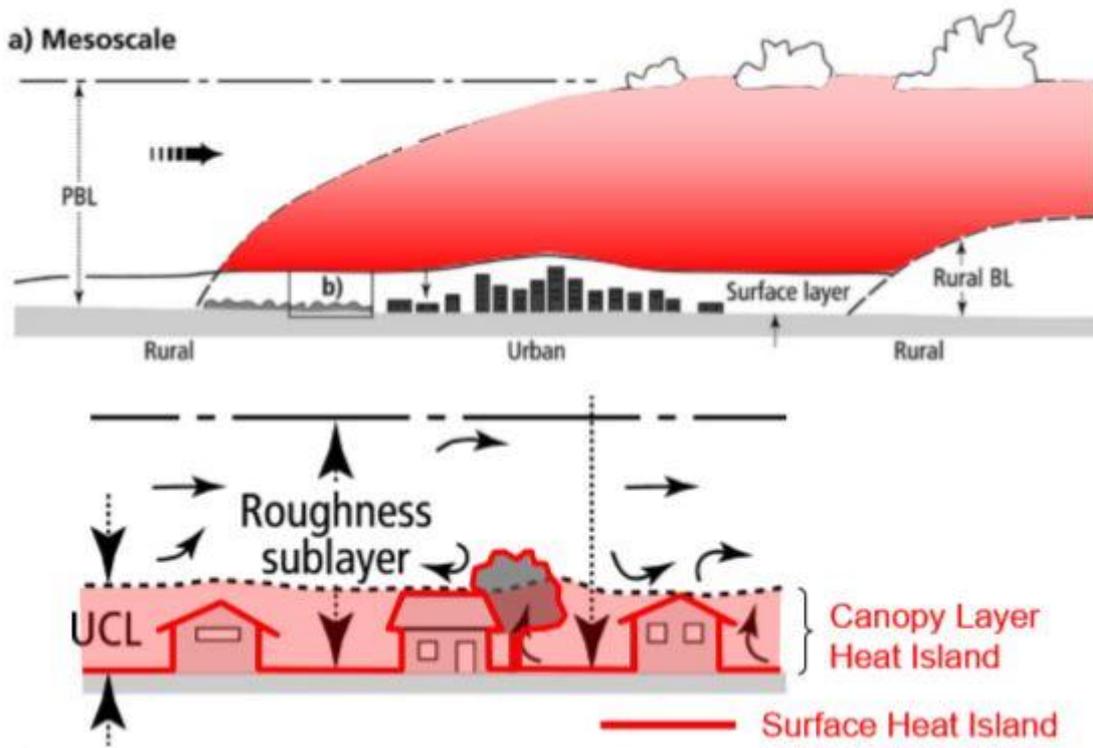


Figura 4 Isole di calore atmosferiche e di superficie (fonte: Voogt J. 2006)

Come si può già comprendere dal nome, queste tre manifestazioni del fenomeno sono profondamente differenti, ancorché correlate; esse si differenziano per il modo in cui si formano, per le tecniche di misurazione e di identificazione, per il diverso impatto e per le diverse dinamiche temporali. Senza questa distinzione non sarebbe possibile riconciliare, per esempio, 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).

Come si è appena detto, le diverse tipologie di isole di calore hanno innanzitutto delle differenti tecniche di misurazione; l'isola di calore atmosferica, per esempio, 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). 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. Diversamente dall'isola di calore atmosferica, la misurazione dell'UHI di superficie avviene o tramite delle termocoppie / termoresistenze per le aree urbane limitate, o, per le zone più ampie, 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. La misura, infine, dell'isola di calore "subsurface" viene fatta attraverso dei sensori che sono in grado di stabilire la temperatura del terreno a diverse profondità e la temperatura dell'acqua presente nel sottosuolo.

Per quanto riguarda l'intensità di queste tre tipologie di isole di calore, si può affermare che le differenze sono molto nette. Parlando delle SUHIs, occorre ricordare che le superfici urbane, durante le calde giornate estive, possono raggiungere temperature fino a 50 °C superiori rispetto a quelle dell'aria sovrastante, mentre una copertura realizzata in asfalto nero può arrivare fino a 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 denota questa differenza di temperatura epidermica tra area urbana e aree rurali. 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 (EPA Compendium Basics 2008, p.2). Nell'isola di calore atmosferica invece, l'interesse è rivolto propriamente alla temperatura dell'aria. In particolare, per misurare la CLUHI, la temperatura viene misurata ad un'altezza circa pari a quella delle persone o al massimo al primo piano degli edifici, tra 1.5 e 3 m dal suolo: se questa temperatura è più alta di quella misurata, alla stessa altezza, nelle zone rurali circostanti, allora si può affermare l'esistenza di questo tipo di UHI (Oke T. R. 1976). L'isola di calore dello strato

della copertura urbana è sicuramente la manifestazione del fenomeno maggiormente osservata e studiata in quanto esercita la propria influenza laddove la popolazione vive. Per questo motivo, molto spesso, parlando di isola di calore urbana, non si accenna neppure alle suddivisioni di cui sopra, dando per scontato che l'interesse sia rivolto al solo strato limite urbano. A differenza della SUHI, la letteratura "insegna" che l'isola di calore atmosferica è meno intensa durante il giorno: nel tardo pomeriggio ed in serata essa si sviluppa gradualmente, fino a raggiungere la sua massima intensità durante la notte, tendendo ad essere più intensa in giornate di cielo limpido e caratterizzate da basse ventosità. L'intensità di questo tipo di UHI, è molto variabile e, come già affermato precedentemente, è strettamente connessa al carattere di unicità delle città.

Per quanto concerne, infine, la subsurface UHI, questa è certamente la meno nota dei tre tipi ed anche la meno studiata: essa viene solitamente calcolata come differenza tra la temperatura dell'acqua che si trova nel sottosuolo delle aree urbane rispetto a quella dell'acqua delle zone rurali. Non di rado, la prima si presenta tra i 3 e i 7 °C superiore (Bayer P. et al. 2013, p.130). Nella maggior parte dei casi, questo scostamento è imputabile alla più alta quantità di calore assorbito dalle superfici urbane, alla presenza di reti fognarie, agli effetti di dispersione dei cavi ad alta tensione, alle reti di distribuzione del riscaldamento, se non, infine, anche a fonti di calore endogene.

D'ora in poi, nella seguente trattazione, faremo sempre riferimento, ogni qual volta si parlerà di isola di calore e salvo eventuali indicazioni, all'isola di calore della copertura urbana.

3. Le cause

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, come si può notare dalla Figura 5.

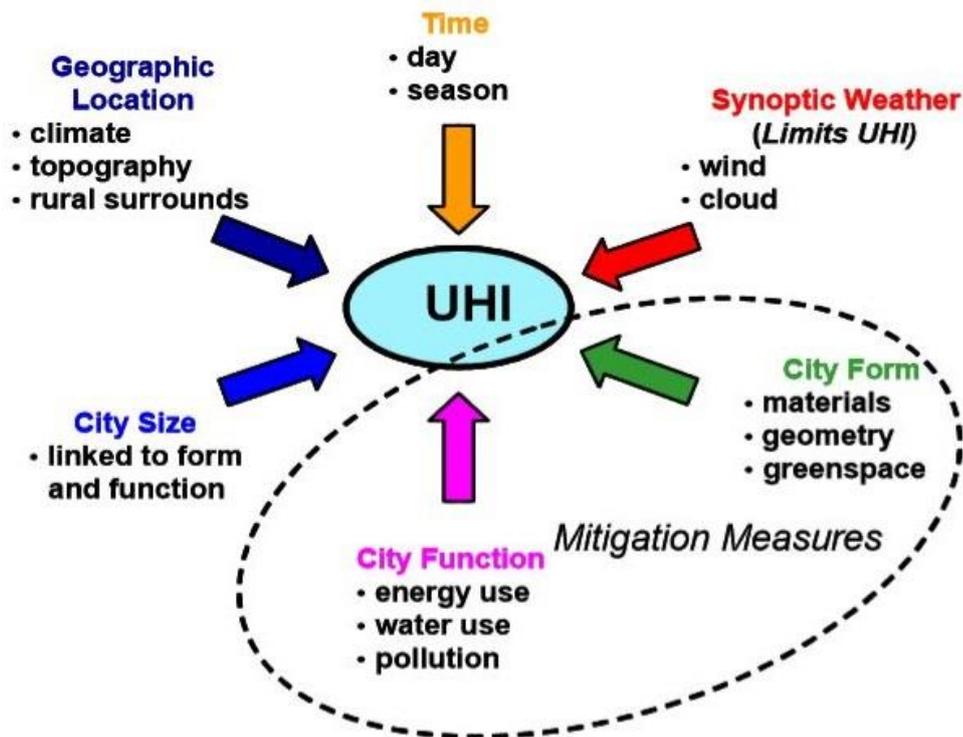


Figura 5 Rappresentazione grafica dei fattori che influenzano il fenomeno dell'UHI (fonte: Voogt J. 2006)

Volendo riassumere i principali fattori responsabili dell'isola di calore, essi possono essere distinti principalmente in quattro ambiti:

1. Fattori legati alla struttura urbana (densità e altezza degli edifici, ampiezza delle strade, presenza di vegetazione e acqua, albedo stradale);
2. Fattori legati al contesto ambientale (latitudine e altitudine, irraggiamento, direzione e velocità del vento, vicinanza al mare o laghi);
3. Fattori legati agli edifici (albedo delle superfici, capacità termica delle chiusure, emissività dei materiali);
4. Fattori legati alla componente umana (componente antropogenica, traffico urbano, presenza di industrie).

Per comprendere a fondo però come si possa creare l'isola di calore e capire come queste quattro tipologie di fattori possano concorrere, tutte assieme, alla formazione di questo fenomeno, è necessario chiarire come alla base di tutto vi sia una differenza nel *bilancio energetico*. In particolare, il bilancio a cui bisogna riferirsi è quello sulla superficie terrestre. La principale sorgente di energia per la Terra è rappresentata dalla radiazione solare, la quale viaggia sotto forma di onde elettromagnetiche alla velocità della luce $c = 2.9937 \cdot 10^8$ m/s; si tratta di un insieme di onde caratterizzate ognuna da una lunghezza d'onda λ ed una frequenza ν , legate dall'espressione $\lambda \nu = c$. La radiazione solare si

estende su tutto lo spettro elettromagnetico, dai raggi γ , ai raggi x , attraverso l'ultravioletto (uv), il visibile e l'infrarosso, fino alle microonde e radioonde (Figura 6).

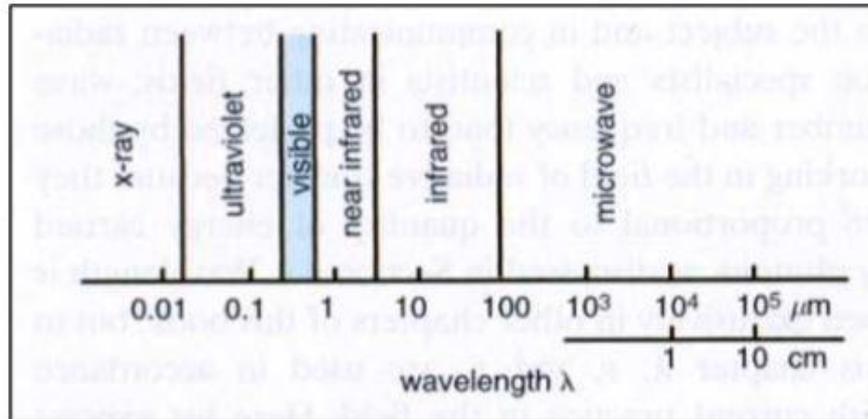


Figura 6 Spettro delle radiazioni (fonte: Davolio S. dispense CNR)

La parte più significativa dello spettro, per quanto riguarda il trasferimento radiativo di energia nel sistema clima, è compresa tra l'ultravioletto e il vicino infrarosso. Tutta l'energia che entra nell'atmosfera terrestre arriva dal sole, in quanto la conduzione verso l'esterno del calore proveniente dall'interno della Terra, dovuto al decadimento radioattivo, è del tutto trascurabile. La radiazione solare entrante viene in parte assorbita, in parte deviata (scattering) ed in parte riflessa dai vari gas che compongono l'atmosfera, dagli aerosols e dalle nubi. La parte rimanente che raggiunge la superficie terrestre viene quasi completamente assorbita da oceani, litosfera, criosfera e biosfera e solo in minima parte riflessa.

È noto poi che un qualsiasi corpo avente temperatura superiore allo zero assoluto emette energia sottoforma di radiazione distribuita su un ampio range di lunghezze d'onda dello spettro elettromagnetico; inoltre, maggiore è la temperatura, maggiore sarà la quantità di energia emessa e minore la lunghezza d'onda corrispondente al picco di emissione (*Legge di Wien*). A causa dell'enorme differenza di temperatura di emissione tra il sole (~6000 K) e la Terra (~255 K), la radiazione solare raggiunge il massimo di emissione nella banda del visibile ($\lambda \sim 0.5 \mu\text{m}$), mentre la radiazione terrestre ha il suo picco nell'infrarosso (IR, $\lambda \sim 10 \mu\text{m}$). La maggior parte dell'energia solare di interesse per il sistema climatico si trova tra 0.1 e 3.0 μm , ovvero è compresa nell' uv , visibile e vicino IR, mentre la maggior parte dell'energia uscente dalla Terra verso lo spazio si trova tra i 3.0 e i 60 μm , ovvero interamente nell'IR. Questo ci permette di scomporre in due parti distinte lo spettro di radiazione che interessa il sistema clima, ovvero (Figura 7):

- Radiazione ad onda corta (short wave radiation) o radiazione solare con λ compresa tra 0.1 a 3 μm ; essa può essere sia diretta, cioè proveniente

direttamente dal sole, oppure diffusa, la quale include anche il contributo di radiazioni ad onda corta dell'atmosfera, che in parte assorbe le radiazioni e in parte le riflette in maniera diffusa appunto;

- Radiazione ad onda lunga (long wave radiation) o radiazione terrestre con λ compresa tra 3 e 60 μm , emessa dalla Terra e da tutti i componenti ambientali quando sono sottoposti a riscaldamento (*Legge di Stefan - Boltzmann*)

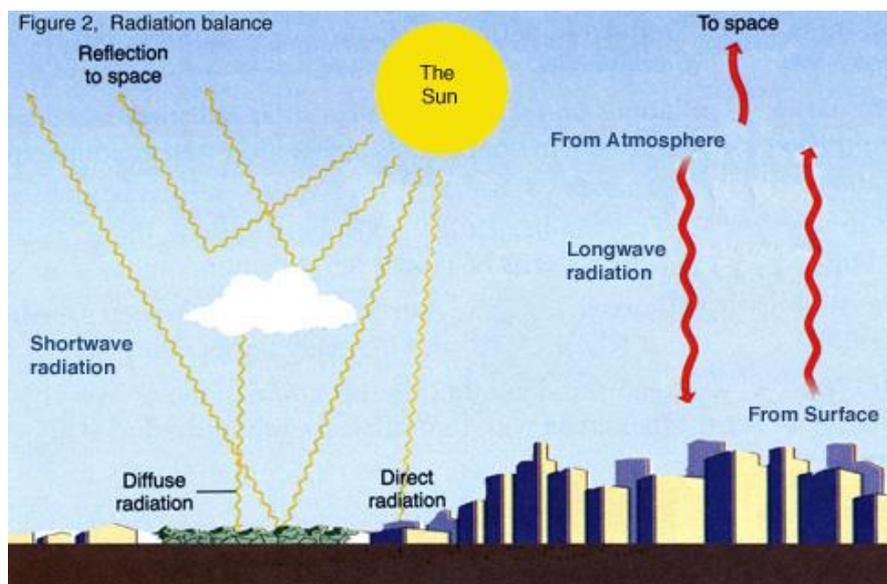


Figura 7 Rappresentazione dei flussi energetici a diversa lunghezza d'onda (fonte: <http://www.ruf.rice.edu/~sass/UHI.html>)

Sulla base di questa suddivisione, possiamo adottare un modello molto noto, quello di Stull (1988), per rappresentare il bilancio energetico sulla superficie:

$$Q^* = K \uparrow + K \downarrow + L \uparrow + L \downarrow$$

La radiazione netta (Q^*) è divisa in una componente ad onda corta (K) ed una ad onda lunga (L). Le frecce a fianco denotano le direzioni dei flussi radiativi ed è applicata la seguente convenzione nei segni: le componenti che veicolano l'energia verso la superficie sono positive, mentre quelle che la asportano sono negative. Quindi:

$K \uparrow$ radiazione solare riflessa dalla superficie

$K \downarrow$ radiazione solare incidente (diretta e diffusa)

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

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

E' utile ricordare che la radiazione solare uscente $K \uparrow$ è proporzionale alla radiazione solare incidente $K \downarrow$ secondo:

$$K \uparrow = -a * K \downarrow$$

dove la frazione di radiazione solare a è la cosiddetta *albedo*: essa rappresenta la percentuale di energia solare riflessa dalla superficie e dipende dal tipo di copertura del suolo e dall'angolo di incidenza.

Le radiazioni ad onda lunga, invece, sono dovute alla temperatura dei corpi che le emettono, e quindi trovano diretta rappresentazione nella legge di Stefan-Boltzmann, secondo cui un corpo emette una certa quantità di radiazioni in relazione alla sua temperatura ($L = \varepsilon * \sigma * T^4$). Per questo motivo vale:

$$L \uparrow = -a * L \downarrow - \varepsilon * \sigma * T^4$$

dove a è l'albedo, σ la costante di Boltzmann e ε l'emissività: quest'ultima può essere definita come la frazione di energia irradiata da quel corpo rispetto all'energia irradiata da un corpo nero che sia alla stessa temperatura e quindi non è altro che una misura della capacità di un materiale di irradiare energia.

Volendo rappresentare ora il bilancio energetico nelle ore diurne e in quelle notturne, si può capire come uno squilibrio del bilancio tra zone rurali e zone urbane possa dar vita all'effetto dell'isola di calore (Figura 8), e il motivo per il quale questa, tenda a svilupparsi soprattutto durante la notte.

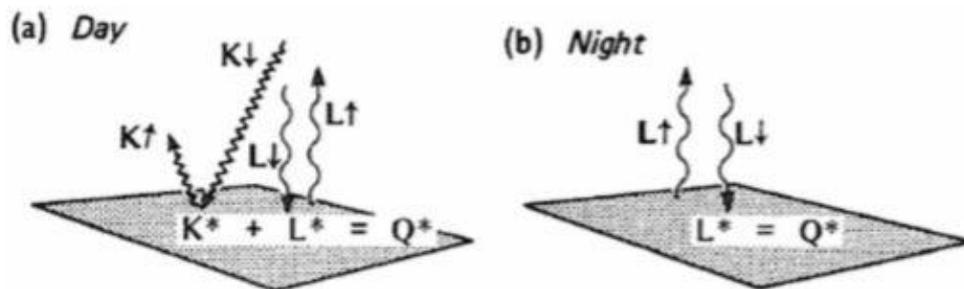


Figura 8 Direzione dei flussi radiativi di giorno (a) e di notte (b) (fonte: Oke T.R. 1987)

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 R. 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. Quindi, il processo di formazione dell'isola di calore può essere sintetizzato nei seguenti punti:

1. Di giorno, la quantità di energia assorbita dalle superfici urbane è maggiore di quella immagazzinata dalla zona urbana, a causa dell'albedo inferiore dell'asfalto e del cemento utilizzato sulle strade e sugli edifici;
2. L'assorbimento di una quota maggiore di radiazioni solari fa raggiungere alle superfici urbane temperature superiori a quelle delle aree di campagna;
3. Durante la notte, quando il bilancio presenta solo le componenti ad onda lunga, che dipendono dalla temperatura superficiale dei materiali, l'area urbana tende ad emettere una maggiore quantità di energia, e quindi a produrre il fenomeno dell'isola di calore.

Il fatto che la superficie urbana assorba più energia rispetto alle zone rurali e raggiunga temperature epidermiche superiori, che consentono una maggiore emissione di radiazione infrarossa $L \uparrow$ nella notte, non è l'unica causa, seppure la principale dell'UHI. Il grande processo di inurbamento a cui si è assistito a partire dagli inizi del ventesimo secolo ha fatto aumentare vertiginosamente l'estensione delle città, comportando una radicale modifica dell'assetto urbano: le aree verdi che un tempo comparivano qua e là nelle città, sono state via via sostituite con edifici e vaste zone cementificate. L'elevata densità degli edifici ha indotto una netta diminuzione del flusso d'aria nel tessuto urbano, contribuendo così all'innalzamento della temperatura dell'aria. L'aumento delle superfici verticali si è tradotto, infatti, in un incremento delle superfici che assorbono e riflettono i raggi solari e che bloccano i venti e le correnti d'aria, che potrebbero invece favorire l'abbassamento della temperatura. A partire da questi elementi, può risultare chiaro come anche la disposizione geometrica degli edifici abbia un ruolo rilevante nella formazione dell'isola di calore. 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 9).

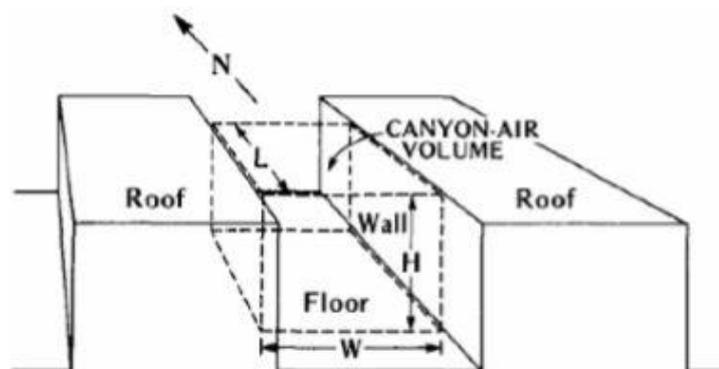


Figura 9 Rappresentazione schematica del canyon urbano (fonte: Nunez M. e Oke T. R. 1977)

Non solo la geometria del canyon ostacola la turbolenza dell'aria, ma influenza il bilancio energetico urbano in vari modi: esso infatti 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. 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. È anche 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. Per questo motivo, si valutano le condizioni termiche nei canyon in relazione alla frazione di cielo visibile (*sky view factor*, SVF) (Figura 10).

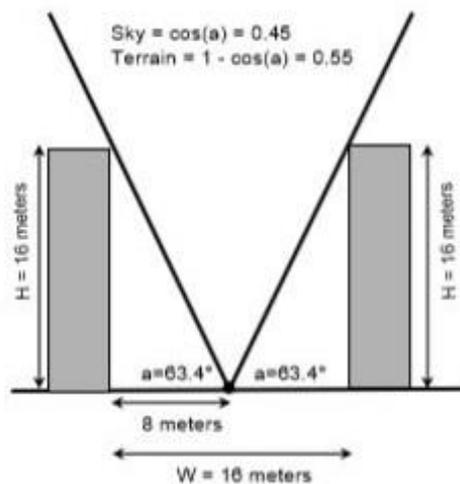


Figura 10 Fattore di vista di un canyon urbano (fonte: Bonan G. 2002, cap.14)

Non si può nemmeno dimenticare che l'inurbamento ha fatto scomparire le uniche superfici che garantiscano l'evaporazione: le superfici evaporative naturali, ossia le aree verdi, contribuiscono notevolmente a mantenere più stabile il bilancio energetico. L'umidità disponibile, infatti, aumenta i processi di evapotraspirazione messi in atto da piante e prati, e determina una diminuzione della quota di calore sensibile, che favorisce in tal modo un minor incremento della temperatura: infatti, se una quota superiore di energia viene convertita in calore latente, attraverso l'evaporazione dell'acqua del suolo, essendo tale processo a temperatura costante, questo incide su un minor incremento generale della temperatura dell'aria (Figura 11).

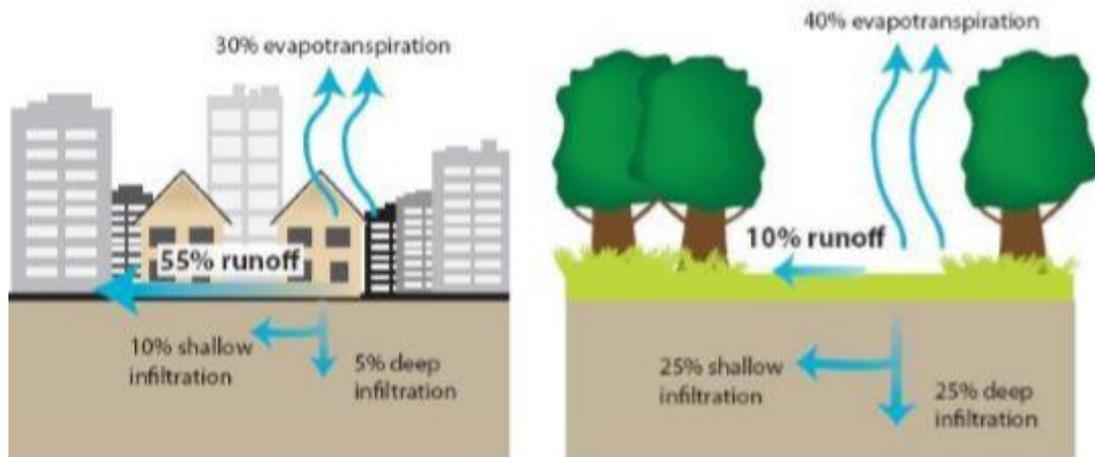


Figura 11 Le aree metropolitane (a sinistra), caratterizzate dal 75 - 100 % di superfici impermeabili, dispongono di una quantità inferiore di umidità utile all'evapotraspirazione; i terreni naturali (a destra), caratterizzati da circa solo il 10 % di superfici impermeabili, mantengono temperature superficiali ed atmosferiche inferiori (fonte: EPA Compendium Basics 2008, p.7)

Infine, hanno un rilievo nella formazione dell'isola di calore anche i fattori legati alla componente umana. Questa quota di energia prende il nome di "calore antropogenico", e rappresenta il calore che deriva dalle attività umane, produttive ed industriali, e dai consumi energetici che esse comportano. Questo calore aggiuntivo è in grado di riscaldare l'aria prossima alla superficie, contribuendo alla creazione dell'effetto UHI. Esso dipende dall'intensità del consumo energetico, da come l'energia viene prodotta, dai sistemi di trasporto e, soprattutto, dai nostri sistemi di condizionamento / riscaldamento.

4. Le tecniche di mitigazione

I pesanti effetti che le isole di calore hanno sulla vivibilità delle città e sui consumi energetici rendono necessari degli interventi tempestivi per ridurre le cause di questo fenomeno. Nonostante, infatti, le maggiori temperature esistenti in città possano essere considerate un effetto positivo durante il periodo invernale, poiché riducono il carico di riscaldamento degli edifici, le conseguenze negative dell'UHI sembrano superarne i benefici. È 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.

Per contrastare l'aumento della temperatura, difendere la qualità dell'ambiente urbano e ridurre i rischi per la salute dei cittadini, occorrono dei piani di azione sul territorio, in modo da restituire agli spazi la naturale capacità di traspirazione e, agli edifici e ai tessuti urbani, di valorizzare al meglio i naturali apporti del sole, dei venti, delle ombre e dei corsi d'acqua. Questi piani ovviamente devono coinvolgere sia partner scientifici, che possano studiare il fenomeno e il potenziale impatto delle misure di mitigazione ed adattamento, sia le amministrazioni statali / regionali che possano invece permettere l'attuazione di queste modifiche all'assetto urbano. Le principali tecniche di mitigazione coinvolgono diversi ambiti, e mirano tutte a ridurre l'impatto negativo dei quattro fattori identificati in precedenza come cause dell'isola di calore; le linee guida di queste azioni sono:

- 1) Incrementare la presenza di aree verdi e garantirne la continuità (*scenari "green"*):
 - Preservando boschi, parchi e spazi rimasti liberi dall'edificazione;
 - Creando corridoi verdi e bioclimatici che colleghino i parchi e le aree naturali tra di loro;
 - Piantando migliaia di alberi che producono un positivo effetto sia come ombra che nel ciclo atmosferico.
- 2) Restituire la permeabilità alle aree libere dagli edifici:
 - Ri-permeabilizzando le aree asfaltate come parcheggi, cortili, piazze con materiali che consentano la traspirazione dell'aria e il passaggio dell'acqua; riportando in superficie i corsi d'acqua intubati;
 - Stabilendo indici di permeabilità minima in tutti gli interventi urbanistici e per le aree libere stabilendo soglie minime di alberi da piantumare;
 - Recuperando e depurando le acque meteoriche e grigie per riutilizzarle negli spazi verdi e per gli usi compatibili in città.
- 3) Introdurre obiettivi bioclimatici negli interventi edilizi:
 - Per aumentare l'albedo in città attraverso l'utilizzo di colori chiari e materiali che assorbono meno calore sulle superfici degli edifici (*Cool Materials*);
 - La diffusione di tetti verdi che migliorano anche l'isolamento degli edifici (*Green Roofs*);
 - La piantumazione di alberi intorno agli edifici e nelle strade per valorizzare l'ombreggiamento.
- 4) Diffondere le fonti rinnovabili e ridurre i fabbisogni energetici degli edifici:
 - Solare termico, solare fotovoltaico, mini - eolico, biomasse, geotermia: le fonti rinnovabili possono garantire larga parte del fabbisogno termico ed elettrico delle

città e dunque vanno diffuse e integrate in tutti gli interventi di trasformazione edilizia e urbana;

- Migliorare l'isolamento termico degli edifici: per ridurre il fabbisogno di riscaldamento invernale e raffrescamento estivo; valorizzare gli apporti solari passivi (sfruttando al meglio l'orientamento degli edifici), la ventilazione, le ombre, la presenza di corsi d'acqua;
- Aumentare l'efficienza degli impianti energetici: a partire da quelli di riscaldamento, attraverso l'utilizzo dei sistemi più efficienti (microcogenerazione, caldaie a condensazione, teleriscaldamento); negli elettrodomestici elevando gli standard di rendimento; nella illuminazione pubblica riducendo la dispersione e introducendo sistemi innovativi di risparmio energetico.

5) Ridurre il traffico privato, integrare le modalità di trasporto sostenibili:

- Rafforzare le reti del trasporto pubblico con investimenti che consentano di avere un efficiente e integrato sistema di ferrovie metropolitane, tram, autobus che viaggiano all'interno di corsie protette;
- Estendere la tariffazione della sosta per le auto private con canoni crescenti verso le aree centrali, introdurre pedaggi di ingresso all'area urbana per finanziare gli interventi di mobilità sostenibile;
- Realizzare una fitta rete di percorsi ciclabili e pedonali che colleghino tutte le principali direzioni di spostamento e le stazioni del trasporto pubblico in modo da rendere sicuro e continuo lo spostamento a piedi e in bici;
- Utilizzare nei mezzi pubblici tecnologie con bassi consumi e emissioni (elettrici, metano, idrogeno, ecc.).

Nei capitoli seguenti particolare attenzione verrà posta alle tecniche che utilizzano l'*ampliamento delle zone verdi* e quelle che sfruttano i *cool materials*, vale a dire materiali che consentono di assorbire una minor quota di radiazioni solari, per cercare di invertire il costante peggioramento del bilancio energetico delle superfici urbane. Questi interventi verranno descritti in maniera dettagliata nel capitolo 4 e saranno legati ad una simulazione numerica dinamica in grado di quantificarne i benefici in termini di riduzione di temperatura e di guadagni economici e ambientali.

CAPITOLO 2

Il caso di Prato della Valle

1. Prato della Valle

Situata a pochi passi dal centro storico della città, Prato della Valle è la piazza più grande di Padova e una tra le maggiori d'Italia e d'Europa, con una superficie di ben 88620 m² (Puppi L. e Toffanin G. 1983, p.163). La piazza è in realtà un grande spazio monumentale, caratterizzato da un'isola verde centrale, chiamata Isola Memmia (dal podestà che commissionò i lavori), che ha un perimetro esterno di 1450 metri. L'isola è circondata da una canaletta (alimentata dal canale Alicorno), la quale è ornata da un doppio basamento di statue numerate che raffigurano celebri personaggi del passato che hanno reso grande la città Padova. Secondo il progetto originario, esse avrebbero dovute essere 88, ma oggi ne possiamo osservare, invece, solo 78, mentre 8 piedistalli sono sormontati da obelischi e 2 rimangono vuoti. Quattro viali, infine, attraversano il Prato su dei piccoli ponti, per poi incontrarsi nel centro dell'isolotto dove, circondata da prati e alberi, una fontana accoglie i visitatori provenienti dai quattro angoli della piazza.

La piazza vanta una storia più che millenaria: risale infatti all'epoca romana, quando ancora non aveva la configurazione con cui oggi la conosciamo. In quel tempo, totalmente coperta da terra, erba e acquitrini, aveva il nome di Campo di Marte, perché destinata, tra le altre funzioni, a essere luogo di riunioni militari. Allora, era sede anche di un vasto teatro, lo Zairo, delle cui fondamenta sono state rinvenute le tracce nel canale che circonda l'isola Memmia, e di un circo per le corse dei cavalli. Nel VI secolo iniziò la costruzione, nell'angolo sud est della piazza, per mano dei monaci di Santa Giustina, della prima basilica in onore della martire, che verrà poi ricostruita nel 1123 a seguito di un terremoto. Nel Medioevo invece, vi si svolgevano fiere, giostre e feste pubbliche, e già dal 1077 si hanno notizie che fosse luogo di "mercato" due volte al mese. Sebbene comunque si trovasse a ridosso delle mura della città, e fungesse anche da crocevia per coloro che arrivavano dalle antiche piste paleovenete che collegavano Padova con altri due grandi centri, Este e Adria, la piazza continuò a mantenere per secoli il suo aspetto paludoso e malsano, dovuto alla conformazione a catino del terreno, dove l'acqua ristagnava, tanto da assumere quell'aspetto di valle che, dall'Alto Medioevo, ne giustifica il nome. L'area rimase per secoli di proprietà dell'abbazia di Santa Giustina, che tuttavia non aveva i mezzi per curarne la bonifica. Tutti questi fattori, come pure la destinazione cimiteriale di una sua parte, contribuirono così a preservare la zona da radicali cambiamenti e a lasciarla a lungo ineditata.

Nel Quattrocento però venne realizzato, all'angolo nord del Prato, un imponente edificio porticato su tre arcate come residenza padovana del cardinale Bessarione (oggi noto come palazzo Angeli). Da questo momento in poi inizia un corso di rinnovamento della piazza che la porta fino ad assumere la forma dei giorni nostri: nel 1434, il banchiere fiorentino Palla Strozzi, esiliato da Firenze, si stabilì a Padova facendosi costruire in Prato un palazzo che importò per primo il linguaggio architettonico del Rinascimento in città; nel 1498 si iniziò la demolizione della basilica romanica di Santa Giustina per erigere la nuova ed attuale chiesa rinascimentale e su progetto di Andrea Moroni, già architetto della nuova basilica, nel 1556-1557 si costruì palazzo Zacco (oggi Circolo Ufficiali di Presidio).

Ma fu nella seconda metà del XVIII secolo che si assistette alla svolta: nel 1767 il Senato Veneto dichiarò l'area di proprietà comunale contro le pretese dei monaci di Santa Giustina. Nemmeno dieci anni dopo, nel 1775, il patrizio veneziano illuminista Andrea Memmo, nominato Provveditore della Serenissima a Padova, rinnovò totalmente questo spazio, mettendo in atto una radicale bonifica dell'area, attraverso la creazione di una canalizzazione sotterranea destinata a far defluire le acque dal centro della piazza, e sostituendo l'acquitrino che da secoli caratterizzava il Prato, con un isolotto. Ne fece anche adornare il perimetro con una doppia fila di statue, che vennero scolpite in pietra di Costozza tra il 1775 e il 1783 da diversi artisti: si vollero rappresentare i più illustri figli della città, padovani di nascita o d'adozione, e ricordare professori e studenti che onorarono la città e lo Studio padovano. Di superlativo valore artistico è, tra le altre, la statua numero 52, opera giovanile del celebre scultore Antonio Canova, oggi conservata ai Musei Civici e sostituita con una copia.

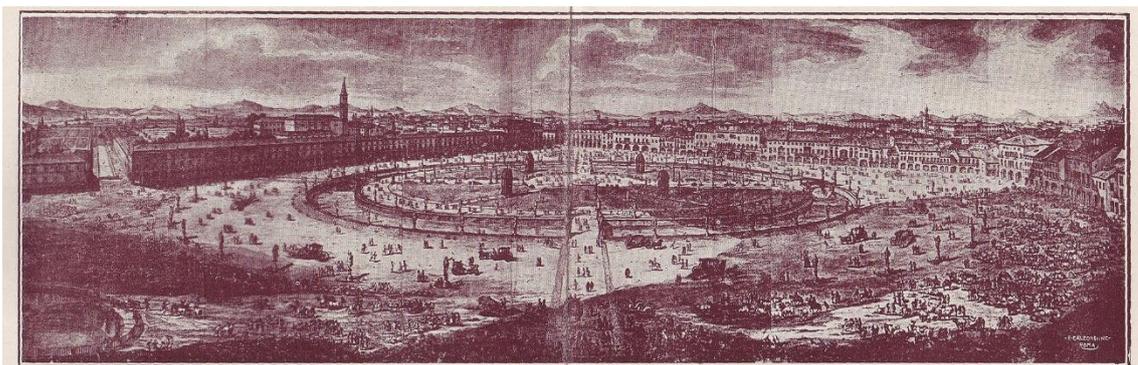


Figura 12 Il progetto finale di Andrea Memmo in un'incisione di Francesco Piranesi (fonte: www.Wikipedia.it)

Infine, nel 1861, venne costruita la nota Loggia Amulea, per decenni sede del corpo dei Vigili del Fuoco e poi dal 1989 trasformata in uffici comunali. Risale invece al 1913 la

realizzazione del Foro Boario che chiude la piazza sul lato sud e la separa da piazza Rabin.

Ancora oggi, come è stato per secoli, Prato della Valle conserva la sua grande funzione di centro ricreativo e d'incontro per la cittadinanza, e attira turisti da tutto il Veneto: le sere d'estate, la piazza ospita sempre numerosissimi ragazzi che vi si incontrano fino a tardi, ed ogni anno vi si organizzano delle feste con musica e fuochi d'artificio. Per molti anni è stato anche sede della tappa padovana del Festivalbar e di altri concerti, e ogni sabato vi si svolge il mercato tradizionale di Padova con oltre 160 banchi e ogni terza domenica del mese il mercatino dell'antiquariato.



Figura 13 Panoramica dell'Isola Memmia dall'angolo sud ovest della piazza (fonte: rete civica del comune di Padova)



Figura 14 Vista aerea di Prato della Valle (fonte: www.fotografieitalia.it)

2. La scelta di Prato della Valle e il Progetto UHI

La scelta di affrontare lo studio dell'isola di calore proprio a Prato della Valle è stata fatta per diversi motivi: innanzitutto la piazza, per la sua posizione e per la presenza rilevante

di superfici asfaltate, è un'area che potrebbe facilmente essere soggetta al fenomeno in questione. Inoltre, se le analisi confermassero l'esistenza di un effetto "isola di calore" a Prato della Valle, sarebbe certamente un problema che avrebbe dei risvolti notevoli sul benessere di un elevato numero di persone, dal momento che è una delle zone più frequentate di Padova. Ne potrebbe altresì risultare penalizzato anche il consumo energetico per il raffrescamento delle abitazioni che avvolgono, nel complesso urbano, la piazza su tutti e quattro i lati.

L'ultimo motivo è legato invece al fatto che Padova è una delle otto città scelte dal *Progetto UHI* per lo studio del fenomeno dell'isola di calore nell'Unione Europea ("UHI - Development and application of mitigation and adaptation strategies and measures for counteracting the global Urban Heat Islands phenomenon" (3CE292P3)). Questo progetto fa parte di un programma molto più ampio, denominato *Programma Central Europe* che, a partire dal 2007, si adopera per incoraggiare la cooperazione tra i Paesi dell'Europa centrale (Italia, Germania, Austria, Repubblica Ceca, Polonia, Ucraina, Slovacchia, Ungheria e Slovenia), al fine di promuovere lo sviluppo economico e sociale di queste regioni e per favorire la tutela dell'ambiente nell'intera area. Il Progetto UHI, partito nel Maggio 2011, rientra, nello specifico, nell'asse ambientale del programma, e mira a fronteggiare, attraverso delle misure di pianificazione territoriale, il problema delle isole di calore e degli effetti negativi sulle fasce più deboli e a rischio della popolazione, soprattutto durante i mesi più caldi dell'anno. Esso coinvolge otto tra le principali aree metropolitane che rientrano nel territorio del Programma Central Europe (Figura 15), ossia:

- L'agglomerato metropolitano Bologna – Modena (Italia)
- Il corridoio urbano Venezia – Padova (Italia)
- Vienna (Austria)
- Stoccarda (Germania)
- Lodz & Varsavia (Polonia)
- Lubiana (Slovenia)
- Budapest (Ungheria)
- Praga (Rep. Ceca)



Figura 15 Pianta delle aree pilota (fonte: www.eu-uhi.eu/it)



Figura 16 Il logo del Progetto UHI (fonte: www.eu-uhi.eu/it)

La strategia innovativa del Progetto UHI è quella di far interagire due discipline che tradizionalmente sono estranee l'una dall'altra: la meteo-climatologia e la pianificazione urbana. A partire da una specifica analisi bibliografica del fenomeno, sulla base di misure microclimatiche in situ e con l'uso di tecniche di tele - rilevamento, l'intento del progetto è quello di identificare e descrivere misure di mitigazione e strategie di prevenzione e gestione del rischio. In particolare, le azioni di mitigazione consistono nell'adozione di modelli di pianificazione e uso del territorio capaci di limitare il fenomeno, mentre le strategie di prevenzione e gestione del rischio mirano a ridurre l'impatto sulla vivibilità dei centri urbani. In maniera più dettagliata, gli obiettivi specifici del progetto sono:

- La migliore conoscenza del fenomeno UHI, dei rischi ad esso connessi e delle sue interazioni con i cambiamenti climatici anche attraverso l'analisi delle politiche europee ai vari livelli di governo.
- La definizione di opportune strategie per la mitigazione del fenomeno UHI e l'adattamento agli effetti da esso generati, anche tramite l'approfondimento e lo studio di tecniche mirate.

- Lo sviluppo di nuove proposte per una migliore “governance” del territorio e una più efficace gestione del rischio per la salute umana, attraverso l’inserimento di misure preventive di allerta / riduzione / contenimento sistemi di protezioni civili vigenti.
- La definizione di metodologie e opportune politiche urbanistiche e di edificazione / recupero, atte a ridurre effetti e conseguenze del fenomeno UHI, nell’ambito degli strumenti di pianificazione territoriale/urbanistica;
- La sperimentazione di soluzioni concrete, applicabili nella situazione territoriale di riferimento, finalizzate al contenimento del fenomeno UHI e alla creazione di una rete permanente per il monitoraggio.
- La creazione di una sensibilità comune a livello europeo sui rischi conseguenti all’isola di calore urbana e lo stimolo al confronto transnazionale tra decisori politici, amministratori locali e professionisti per l’elaborazione di politiche ed azioni finalizzate alla prevenzione, adattamento e mitigazione dei rischi connessi agli aumenti delle temperature nei centri abitati.

Il perseguimento di tutti questi obiettivi può essere effettuato solo se si sottende all’intero programma soprattutto l’impegno a consolidare una *corretta relazione tra la conoscenza del fenomeno e gli interventi sul territorio*, attraverso la condivisione di ricerche sul campo da un lato, e le politiche e le azioni di prevenzione, mitigazione ed adattamento dall’altro. In effetti, applicare i risultati della ricerca, in un campo così vasto ed incerto, nel processo di regolamentazione e di pianificazione, risulta in molti casi complicato. In questo progetto, la parte di ricerca si concentra in particolare sullo studio dell’evoluzione del fenomeno a livello urbano e le sue complicate interazioni con i modelli meteorologici. Per realizzare il connubio tra conoscenza e interventi concreti, occorre però condurre una sistematica azione di confronto multi-disciplinare per rendere i risultati ottenuti di immediata utilità per le amministrazioni, in particolare per quanto riguarda la fase di verifica dell’efficacia delle azioni. Dall’altro verso le amministrazioni, sia nella fase di pianificazione che in quella di gestione, possono favorire l’attenuazione degli effetti negativi legati alla rapida urbanizzazione del territorio e il cambiamento del clima. Questo significa che, tenendo conto del fenomeno dell’isola di calore nei processi decisionali ad ogni livello, si potrebbero attuare delle politiche di incentivazione e regolamentazione che rispettino le esigenze economiche, sociali ed ambientali del territorio. Il Progetto UHI intende affrontare tutti questi aspetti e proprio per questa ragione all’interno del partenariato sono presenti in modo bilanciato partner “istituzionali” (amministrazioni comunali, regionali) e partner “scientifici” (università, istituti ed enti di ricerca). Un aspetto molto significativo di questo progetto è infine, la condivisione di competenze ed

esperienze, che non è limitata all'interno del partenariato, ma estesa a tutte le Istituzioni Europee e più in generale a tutti i potenziali portatori di interesse, tra cui, non certo per ultima, l'intera popolazione.

Volendo approfondire meglio il fronte della ricerca (quello che maggiormente interessa il presente studio), il progetto ha deciso di dare una veste più rigorosa e uniforme alle analisi del fenomeno dell'isola di calore, realizzate sulle aree pilota dai vari gruppi di lavoro nazionali: questo, al fine di indirizzare meglio le attività verso il comune scopo del progetto. Per questo motivo, è stato sviluppato (Mahdavi et al. 2013) uno schema per quantificare il fenomeno su un'area di studio denominata "*U2O (unit of observation)*", e valutare le possibili azioni di mitigazione e adattamento sfruttando le potenzialità di modelli numerici. Lo schema si applica nelle seguenti fasi:

- i. Definizione dell'area studio U2O: è un'area scelta con precisi confini in base alle caratteristiche urbanistiche e costituisce il caso studio per le misure di mitigazione;
- ii. Descrizione delle caratteristiche e delle proprietà geometriche e fisiche delle superfici presenti nell'U2O;
- iii. Calcolo dell'intensità dell'isola di calore;
- iv. Scelta degli interventi di mitigazione previsti;
- v. Valutazione dell'effetto delle misure di mitigazione con strumenti modellistici;
- vi. Classificazione dell'impatto delle misure in termini di riduzione dell'intensità del fenomeno;
- vii. Valutazione complessiva degli interventi con analisi costi / benefici.

Con questo approccio l'U2O viene utilizzata per quantificare sistematicamente la variabilità del microclima nell'area della città scelta dal progetto. L'estensione dell'area viene definita facendo riferimento ad un diametro compreso tra 400 e 1000 m, all'interno di una zona con caratteristiche urbanistiche e costruttive comuni. Per precisare il rapporto tra microclima e caratteristiche morfologiche, geometriche, ottiche e termiche sono state scelte e incluse nell'analisi una serie di variabili legate ad esse. Per stimare l'efficacia delle azioni di mitigazione nella riduzione dell'intensità dell'isola di calore, gli interventi vanno espressi in termini di variazione delle caratteristiche dell'U2O. A questo scopo è stato individuato un set di variabili, riassunte in Figura 17 e Figura 18, scelte in base a precedenti studi (Mahdavi et al. 2013, Kiesel et al. 2013) ed al confronto avvenuto nei meeting del progetto.

Geometric properties	Definition
Sky View Factor	Fraction of sky hemisphere visible from ground level
Aspect ratio	Mean height-to-width ratio of street canyons
Built area fraction	The ratio of building plan area to total ground area
Unbuilt area fraction	The ratio of unbuilt plan area to total ground area
Impervious surface fraction	The ratio of unbuilt impervious plan area to total ground area
Pervious surface fraction	The ratio of unbuilt impervious surface area to total ground area
Mean building compactness	The ratio of built volume (above terrain) to total building plan area
Built surface fraction	The ratio of total built surface area to total built area
Wall surface fraction	The total area of vertical surfaces (walls)
Roof surface fraction	The total area of horizontal surfaces (roofs)
Mean sea level	Average height above sea level

Figura 17 Variabili descrittive delle caratteristiche geometriche dell'U2O (fonte: UHI Newsletter 2014, p.3)

Surface/material properties	Definition
Reflectance/albedo	Fraction of reflected direct and diffuse shortwave radiation
Emissivity	Ability of a surface to emit energy by radiation (longwave)
Thermal conductivity	Property of a material's ability to conduct heat, given separately for impervious and pervious materials
Specific heat capacity	Amount of heat required to change a body's temperature by a given amount, given separately for impervious and pervious materials
Density	Mass contained per unit volume, given separately for impervious and pervious materials
Anthropogenic heat output	Heat flux density from fuel combustion and human activity (traffic, industry, heating and cooling of buildings, etc.)

Figura 18 Variabili descrittive delle superfici e dei materiali dell'U2O (fonte: UHI Newsletter 2014, p.3)

Dopo aver scelto l'U2O e averla descritta in base ai parametri scelti, le misure di mitigazione (Figura 19) possono essere tradotte in termini di variazioni dei valori dei parametri. Per esempio l'introduzione di tetti e facciate verdi comporta variazioni dell'albedo, dell'emissività, della conduzione termica, della capacità calorica specifica e della densità. Nella Figura 19 sono riassunte le più diffuse azioni di mitigazione. Queste azioni possono essere raggruppate in tre famiglie: edifici, pavimentazioni e vegetazione. In Figura 19 sono riassunte anche i principali benefici attesi da ciascuna delle azioni.

Category	Measure	Expected benefit
Buildings	Cool roofs	High solar reflectance and high thermal emissivity
	Green roofs	Shading and evapotranspiration
	Green facades	Reducing ambient air temperature, shading properties, natural cooling, control airborne pollutants, energy efficiency
	Facade construction and retrofit	Reducing cooling/heating load, reducing ambient air temperature, improving building envelope quality
	Geometry of urban canyon (new projects)	Fresh air advection, cool air transport into the city
Pavements	Cool pavements	Decreasing ambient air temperature
	Pervious pavements	Storm water management
Green areas	Planting trees within the urban canyon	shading and evapotranspiration, lower peak summer air temperatures, reducing air pollution
	Parks, green areas	

Figura 19 Principali azioni di mitigazione (fonte: UHI Newsletter 2014, p.3)

Successivamente l'impatto delle misure può essere stimato utilizzando appropriati strumenti modellistici. A questo scopo lo schema consiglia ai gruppi di lavoro di utilizzare modelli di due tipi: l'analisi statistica dei dati empirici e la computational fluid dynamic (CFD). L'analisi statistica dei dati permette di stimare sulla base di misure empiriche la correlazione tra l'intensità del fenomeno e le diverse caratteristiche dell'area in esame. Per quanto riguarda i modelli numerici, si possono applicare a diversa scala, da quella più ampia dei modelli climatici regionali fino ai modelli di simulazione per singolo edificio (Mirzaei P.A. e Haghghat F. 2010).

In questo modo la raccolta dei dati sul fenomeno dell'isola di calore nelle varie aree pilota può avvenire in maniera completa e garantire alle stesse amministrazioni di avere un'ottima base di conoscenze e indicazioni per indirizzare lo sviluppo territoriale e favorire le azioni di mitigazione e contenimento di questo fenomeno.

3. Obiettivi dello studio

Nei tre anni di studio, i vari partner scientifici, artefici della realizzazione della parte di ricerca del progetto, hanno mostrato come le simulazioni e gli studi di scenario attraverso la CFD, siano strumenti essenziali per valutare l'efficacia dei piani urbanistici nel ridurre il fenomeno delle isole di calore urbano e gli effetti correlati di peggioramento della qualità dell'aria e aumento dello stress da calore. Utilizzando quindi una struttura simile a quella introdotta dallo schema della U2O del Progetto UHI, il presente studio mira non solo a individuare l'intensità dell'isola di calore che si può riscontrare nel centro di Padova e in particolar modo a Prato della Valle, ma vuole avanzare anche delle proposte di mitigazione e di ripianificazione territoriale, con dei nuovi scenari pensati per la piazza. L'analisi è stata condotta con l'ausilio del software ENVI-met, sfruttando perciò la capacità della computational fluid dynamic di valutare l'efficacia delle azioni di mitigazione pensate per le varie aree di studio.

CAPITOLO 3

Il software: ENVI-met

1. La struttura del software

Per poter simulare accuratamente i processi fisici e climatici di un'area urbana, il software per la modellizzazione deve necessariamente soddisfare alcune caratteristiche fondamentali (Huttner S. 2012, p.11):

- La risoluzione delle griglie con cui si realizza il modello dell'area di studio deve essere abbastanza piccola da poter rappresentare bene edifici e alberi, quindi inferiore a 10 metri: se così non fosse, il modello verrebbe tradotto in un insieme di elementi cubici senza alcun legame con la realtà.
- Il programma deve permettere di calcolare il bilancio energetico su qualunque tipo di superficie.
- La simulazione deve includere il comportamento fisico e fisiologico delle piante.
- Il sistema di calcolo dei processi atmosferici deve poter fare delle previsioni abbastanza accurate.

La maggior parte dei modelli di microscala esistenti si focalizza solitamente su uno solo di questi requisiti e per questo non è in grado di elaborare dei risultati soddisfacenti per favorire la corretta pianificazione urbana. ENVI-met, invece, è uno dei pochi modelli di simulazione numerica in grado di soddisfare proprio tutte queste esigenze. Si tratta di un software di simulazione ambientale e microclimatica che opera ad un livello di micro-scala urbana e che, attraverso equazioni di tipo termo-fluidodinamico, permette di riprodurre il comportamento di un modello climatico tridimensionale (Carnielo E. Fanchiotti A. 2011, p.12). Sviluppato dal Prof. Michael Bruse del Gruppo Modellistica Ambientale dell'Istituto di Geografia presso l'Università di Mainz, in Germania, ENVI-met è in grado di simulare microaree urbane con una risoluzione variabile fra gli 0.5 e i 10 metri. Esso analizza le interazioni tra edifici, superfici, vegetazione e i flussi d'aria e di energia all'interno del tessuto urbano; a differenza però di altri software di CFD, ENVI-met è maggiormente adatto a simulare porzioni di aree cittadine non molto vaste, assimilabili alle dimensioni di un quartiere o addirittura più piccole: ecco perché si parla solitamente di micro-scala urbana. La struttura di base del software implementa un modello di calcolo molto complesso che comprende (Bruse M. 2007 sito):

- Flussi di radiazioni ad onda lunga e ad onda corta, su tutto lo spettro, dall'infrarosso all'ultravioletto, tenuto anche conto dell'ombrosità, della riflessione e dell'emissione di radiazioni, prodotte dagli edifici e dalla vegetazione;
- Traspirazione, evaporazione e flussi di calore sensibile verso l'ambiente derivanti dalla vegetazione;
- Simulazione completa dei fattori fisici delle piante, come ad esempio la reazione di fotosintesi ed i suoi effetti;
- Temperatura delle superfici dell'area di simulazione (edifici e suolo);
- Scambi di calore e di acqua all'interno del suolo;
- Calcolo di parametri biometereologici come la temperatura media radiante e il PMV (Predicted Mean Vote) dei fruitori dell'area in analisi;
- Dispersione di gas inerti e particolato e sedimentazione su superfici e foglie;
- Flussi d'aria e turbolenze, dati relativi al vento.

Proprio in relazione a questo vasto sistema di calcolo in grado di gestire contemporaneamente molti fattori, il software in oggetto è spesso impiegato all'interno di studi sugli effetti dell'isola di calore nelle città, della vegetazione nel contesto urbano, delle variazioni dei flussi d'aria e di calore in relazione alle modifiche del contesto micro climatico ma anche in studi riguardanti la qualità dell'aria e la diffusione degli inquinanti.

Envi-met è composto di diverse interfacce, ognuna delle quali è necessaria alla composizione di una parte della simulazione o alla lettura dei dati di output. La struttura del software vede infatti tre principali componenti di input che vanno a convergere nell'interfaccia che svolge la vera e propria simulazione applicando i modelli di calcolo. I risultati dei calcoli svolti sono raggruppati in numerosi file output che possono essere letti e analizzati attraverso due ulteriori interfacce di lettura (Figura 20).

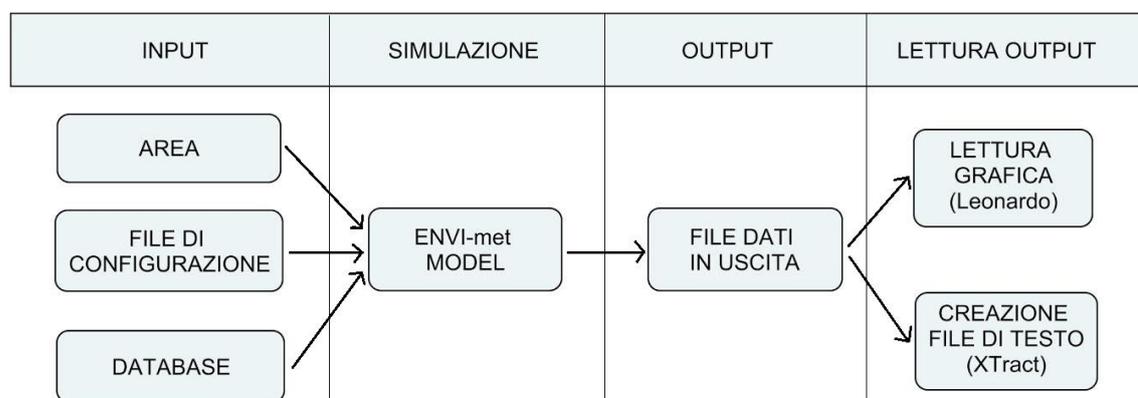


Figura 20 Schema di struttura del software ENVI-met

1.1. Input

Gli input della simulazione possono essere suddivisi in tre componenti: "Area", "File di Configurazione" e "Database". Questi tre elementi vengono importati nell'interfaccia che svolge la vera e propria simulazione, e su di essi si applicano i modelli di calcolo.

Il file "Area" (.in) è creato attraverso l'interfaccia grafica del software, chiamata ENVI-met Editor. L'area viene rappresentata con un modello discretizzato in celle (volumi finiti - *grids*): è possibile decidere non solo il numero di celle componenti il modello, ma anche la dimensione, ovvero la risoluzione, con cui si può rappresentare tale area. Questi volumi possono avere delle dimensioni dx, dy, dz che variano tra 0.5 e 10 metri, mentre il numero massimo di grids a disposizione dell'utente è 250 x 250 x 30. Solitamente nelle simulazioni, al numero di griglie deciso per il modello, se ne aggiungono delle altre: si tratta delle cosiddette "nesting grids", che rappresentano una fascia di celle attorno all'area da analizzare e per cui il programma svolge i calcoli senza inserire i risultati nei file in uscita. Questa fascia viene introdotta cautelativamente per assorbire l'incidenza delle condizioni al contorno, di cui si serve il processo di simulazione, e la scarsa attendibilità dei dati iniziali (Bruse M. 2007). Il file "Area" quindi contiene i dati geometrici e qualitativi del modello simulato, come:

- Dimensione dell'area (sottoforma di numero di grids)
- Edifici (altezza, sporgenze e rientranze)
- Spazi verdi (a terra ed in quota)
- Tipo di vegetazione
- Strade
- Tipologie di suolo
- Presenza di specchi d'acqua.

E' attraverso questa interfaccia che si identifica la zona geografica in cui l'area di modello è posta e l'orientamento cardinale della stessa. La determinazione dell'area geografica avviene attraverso la scelta di una città cui associare l'area, oppure mediante l'indicazione delle coordinate di latitudine e longitudine del sito. È possibile porre all'interno del modello anche dei punti di ricezione speciale, detti recettori, cui viene associato un file output che raccoglie i dati relativi allo spazio sovrastante il punto stesso.

Il "File di Configurazione" (.cf) contiene tutti quelli che sono i parametri iniziali di calcolo e le condizioni a contorno della simulazione e alcuni altri dati aggiuntivi relativi all'area modellata. Il file contiene le seguenti informazioni:

- Data solare di inizio simulazione

- Durata della simulazione (in ore)
- Ora di inizio della simulazione (nel giorno indicato al primo punto)
- Time-step di calcolo (ovvero l'intervallo di tempo al quale il programma associa la risoluzione delle equazioni)
- Dati relativi agli edifici (albedo e trasmittanze delle strutture)
- Dati relativi al suolo (albedo, temperatura e umidità relativa superficiale e a diverse profondità)
- Dati relativi al vento (direzione di provenienza, velocità a 10 m dal suolo, indice di rugosità della zona)
- Presenza di nuvole in cielo
- Eventuali sorgenti di gas inerti o particolato (l'anidride carbonica è trattata insieme alla vegetazione)
- Opzioni relative al tipo di condizioni al contorno per il calcolo
- Modelli e condizioni di calcolo per le turbolenze dell'aria
- Informazioni strettamente legate all'organizzazione dei file relativi alla simulazione (collegamento col file Area, nomi della simulazione e dei file output).

I "database" associati ad ogni modello di simulazione (a sua volta formato da una coppia file "Area" e file "Configurazione") sono tre: uno relativo alla vegetazione, uno alla stratigrafia del suolo, uno contenente dati relativi ad ogni strato del suolo. Ognuno di questi file contiene dati e parametri che vengono poi impiegati nelle equazioni dei modelli fisico-matematici implementati dal software. Si tratta di dati legati alla tipologia specifica di piante o terreno: contenuto d'acqua, conducibilità termica, caratteristiche fisiologiche delle foglie e delle radici, densità di area fogliare, riflettanza.

1.2. Interfaccia di simulazione

L'interfaccia di simulazione è la parte centrale del software, in cui si associano i file di input relativi al modello ed avviene lo svolgimento dei calcoli. Essa rappresenta il motore del software e si serve di complessi modelli di calcolo attraverso cui generare tutti i parametri fluido dinamici come il flusso d'aria e la turbolenza e simulare i processi termodinamici che interessano le superfici, gli edifici e la vegetazione, compresi tutti i tipi di radiazione e le evoluzioni delle variabili climatiche nel tempo. Per svolgere la simulazione il software implementa dei modelli fisici teorici tradotti in sistemi di equazioni molto complessi, solitamente non lineari e li risolve attraverso modelli matematici. Tali sistemi sono ingigantiti e maggiormente complessi a causa della tridimensionalità del modello cui vengono applicati. Il rischio di divergenza nello svolgimento dei calcoli è molto alto, per questo il programma ha bisogno di parametri di calcolo e di espedienti di

controllo che impediscano di arrivare a punti critici nello svolgimento delle equazioni. Durante questa attività, attraverso una finestra sullo svolgimento della simulazione, è possibile controllare l'avanzamento dei calcoli, mediante l'indicazione istantanea del tempo simulato, e gli eventuali errori che portano al blocco del processo.

In questo studio, la trattazione dei complessi sistemi di calcolo e dei modelli teorici appositamente programmati per la simulazione viene tralasciata, perché troppo specifica e di poca importanza per lo scopo dello stesso. Eventualmente, la spiegazione dell'intero sistema di modelli ed un ottimo approfondimento si possono trovare in Huttner S. (2012, pp.5-39), Trimmel H. (2008, pp.18-28 & 48-57), Bruse M. (2004 Jacobs), Bruse M. (2004 Updated Overview)

1.3. Output

ENVI-met genera moltissimi output e li suddivide in cartelle di destinazione a seconda dei datafield cui sono associati i dati. I datafield in cui sono organizzati i risultati sono così denominati: Atmosphere, BOTworld, Inflow, Log, Receptors, Soil, Surface. Escludiamo dalla nostra attenzione i file contenuti nella seconda e quarta cartella che si riferiscono a dati per effettuare l'analisi del benessere di soggetti virtuali inseriti nell'area analizzata, nel primo caso, e a dati relativi alla prima lettura del modello di area e del file di configurazione da parte dell'interfaccia di simulazione, nel secondo caso. Le altre cartelle invece raccolgono informazioni della simulazione riguardante ambiti diversi:

- *Atmosphere* La cartella Atmosphere contiene due file per ogni ora di simulazione: l'uno, leggibile come normale file di testo, non contiene tuttavia dati comparabili a meno che non sia aperto tramite una delle due interfacce di lettura degli output; l'altro risulta collegato ed associato al primo, anche se non viene mai aperto ed analizzato direttamente. Questi file orari contengono, per ogni quota z corrispondente ad una cella, i dati relativi a: vento (velocità sulle tre direzioni, velocità complessiva, direzione risultante, variazione percentuale di velocità del vento), umidità relativa e assoluta, temperatura dell'aria, espressa attraverso temperatura potenziale (di cui è indicata anche la variazione oraria) e la temperatura media radiante. Sono indicate anche le temperature superficiali, espresse però attraverso la temperatura del bordo della cella. I file ATM contengono anche numerosi dati relativi al flusso di vapore, di anidride carbonica o di altri inquinanti eventualmente inseriti nel modello e informazioni relative alla vegetazione; vi sono poi ulteriori informazioni riguardanti le turbolenze: coefficienti di scambio e dissipazione cinetica. Sono presenti anche risultati relativi ai flussi radiativi: flusso incidente (diretto, diffuso e riflesso), fattore di vista

del cielo (differenziato a seconda che consideri solo gli edifici o l'interazione di edifici e vegetazione), flussi radiativi di scambio a bassa frequenza.

- *Inflow* La cartella denominata *Inflow* contiene dati relativi al modello monodimensionale che ENVI-met calcola inizialmente per avere dei dati di partenza impiegati come forzanti per la risoluzione delle equazioni successive. Esiste dunque un file per ogni ora di simulazione che esprime i valori di alcuni parametri, da $z = 0$ metri a $z = 2500$ metri, ad intervalli di spazio sempre maggiori con l'aumentare della quota. I parametri sono pressoché tutti relativi al vento e alle turbolenze dei flussi d'aria relativamente ai quali il software necessita di avere maggiori dati iniziali. Esiste anche un valore di temperatura e di umidità specifica dell'aria. Alla quota coincidente col punto più alto del modello tridimensionale, nell'ora di inizio della simulazione, tale valore di temperatura coincide con il valore iniziale imposto del file di configurazione e varia di ora in ora secondo la radiazione solare in funzione del modello astronomico-solare applicato. Tali dati non sono strettamente necessari per l'analisi dei risultati, essi sono utili piuttosto per avere un'idea dei parametri necessari al programma per il calcolo dei flussi d'aria e, al più, per controllare il gradiente di temperatura e vento oltre la quota del modello tridimensionale. I dati sono comunque indicativi: il modello monodimensionale, in quanto tale, non distingue e diversifica i punti dello spazio, ritenendo che sopra la quota estrema del modello tridimensionale i parametri siano pressoché identici e non subiscano più l'influenza degli elementi presenti nell'area.
- *Receptors* La cartella indicata come "Receptors" contiene tutti i dati relativi ai recettori che sono stati posti nel modello. È dunque presente una sottocartella per ognuno di essi. Per meglio comprendere i dati di output in oggetto è necessario ricordare che un recettore posto in un punto del modello restituisce i dati relativi a tutta la colonna di volumi discreti posta sopra il recettore stesso; e anche quelli relativi alla porzione di suolo sottostante. All'interno di ogni sottocartella, dunque, sono presenti tre tipologie di file: dati atmosferici, dati relativi ai flussi radiativi scambiati e dati relativi al suolo. I file relativi ai recettori sono molto utili per l'analisi del modello; essi infatti permettono di avere immediatamente informazioni relative ad un singolo punto e su tutta l'altezza dello stesso. Ottenere queste informazioni sarebbe possibile anche attraverso gli altri file output, ma solo mediante un laborioso "taglio" dei dati all'interno dei file "tridimensionali".
- *Soil* La cartella "Soil" si presenta come la "Atmosphere": presenta infatti due file per ogni ora di simulazione. Anche in questo caso, le informazioni raccolte in

essa possono essere lette attraverso l'interfaccia grafica Leonardo o con XTract. Dai dati in questa cartella è possibile ottenere informazioni relative alla temperatura del suolo ed al suo contenuto d'acqua a diverse profondità dalla superficie fino a $z = -50$ cm.

- *Surface* La cartella "Surface" contiene due file per ogni ora di simulazione, in modo identico alle cartelle Soil e Atmosphere. I file surface contengono dati relativi solamente alla quota $z = 0$, si tratta dunque di dati bidimensionali. Essi presentano informazioni relative alla temperatura della superficie e alla sua variazione nel tempo, all'umidità relativa dell'aria e alla velocità del vento alla prima quota sovrastante la superficie del suolo. Sono poi presenti altri dati relativi ai flussi radiativi scambiati dalla superficie del suolo con il primo strato d'aria e alle radiazioni che incidono sul suolo. Dati simili sono presenti anche nei file dei recettori, dove tuttavia è più difficile identificare il significato fisico di ogni flusso poiché risultante da un bilancio complesso. In questo file invece i dati sono relativi ai soli flussi incidenti la superficie, differenziati per provenienza: sole / cielo, vegetazione, edifici circostanti.

1.4. Lettura degli Output

Il software ENVI-met prevede due interfacce di lettura dei dati in uscita: Leonardo e Xtract:

- *Leonardo* rappresenta l'interfaccia di lettura grafica dei file output. Importando uno di questi file all'interno dell'interfaccia Leonardo, è possibile visualizzare l'elenco dei parametri output presenti in esso e selezionare il metodo di rappresentazione più adeguato per ognuno. Leonardo permette di visualizzare i dati attraverso quattro principali metodi grafici: data, vector, special, isoline. Essi rappresentano dei layer sul disegno, vale a dire una sorta di "strato" sul disegno ed è possibile visualizzarli singolarmente o contemporaneamente a seconda del tipo di rappresentazione che si desidera ottenere, e anche svolgere operazioni fra di essi. Il primo visualizza i dati su una scala cromatica, con legenda affiancata alla mappa. È utile per la rappresentazione del gradiente di temperatura, o può essere associato alla rappresentazione dei vettori o delle isolinee per esprimere, attraverso il colore, un dato in più associato all'indicatore. Il secondo visualizza i dati attraverso delle frecce (vettori) direzionati e con modulo proporzionale al valore. È un ottimo metodo di rappresentazione del flusso d'aria e del vento. Il layer Special è usato per l'indicazione degli edifici e della vegetazione all'interno della rappresentazione grafica degli altri parametri. Infine Isoline utilizza il metodo

di rappresentazione delle isolinee. Permette di visualizzare la distribuzione di molti parametri come fattore di vista del cielo, temperature, flussi radiativi incidenti, fattori legati alla turbolenza dell'aria, velocità del vento. Accanto alle curve viene indicato il valore del parametro che essa rappresenta.

Una volta indicati i parametri da rappresentare e scelto il metodo con cui farlo, Leonardo permette di definire il piano spaziale del quale si vogliono analizzare i dati. Si può scegliere di sezionare lo spazio su piani orizzontali xy a diverse quote z, oppure su piani xz e yz a definiti livelli rispettivamente della coordinata y e x. Attraverso questo sistema è possibile visualizzare i dati in tutti i punti dello spazio modellato. Il limite di questa rappresentazione è che essa è limitata solamente ai dati del file orario definito, non si può rappresentare la variazione di un solo o più parametri lungo tutto l'arco della giornata. L'unico confronto possibile è per differenza, fra due momenti del giorno diversi.

- *XTract* serve per estrarre dai file bidimensionali e tridimensionali in uscita dalla simulazione dei file di testo leggibili ed analizzabili contenenti i dati di output. L'interfaccia è estremamente intuitiva. Scelto il file output da analizzare, lo si importa all'interno del software, attraverso le coordinate si sceglie il piano di sezione e si effettua il "taglio". Così si ottiene un ulteriore file contenente i dati che si desiderano in un formato leggibile e importabile in altri programmi di analisi dati. Per quanto facile, una sezione effettuata in questo modo presenta alcuni limiti. In primis il fatto che la sezione di dati viene effettuata solamente su di un datafield. Si è dunque costretti a scegliere un solo parametro fra tutti gli output che il programma propone. Il "taglio" è inoltre effettuato su di un file orario, dunque i dati ottenuti saranno relativi solo a quell'istante della giornata. Si comprende così come, per poter effettuare un'analisi numerica, ad esempio quella della variazione giornaliera di un parametro (che, come si è visto, non è possibile effettuare con Leonardo), sia necessario estrarre numerosi file ed importarli poi tutti insieme in un foglio di calcolo.

2. I limiti del software

ENVI-met è un software molto potente: permette di effettuare simulazioni energetico-ambientali di aree urbane, analizzando e restituendo un numero molto elevato di dati e parametri. Il modello di calcolo di questo sistema però, risulta notevolmente complesso poiché i fattori ambientali interferiscono e si influenzano vicendevolmente. I risultati ottenuti da queste simulazioni possono essere considerati attendibili nella maggior parte dei casi, ma è evidente come un sistema così complesso debba effettuare delle semplificazioni. Comprendere quali siano e come si ripercuotano sui risultati, aiuta a

scegliere il campo e le tipologie di applicazioni migliori per poter impiegare il programma al massimo delle sue potenzialità così da ottenere valori soddisfacenti.

Le semplificazioni maggiori sono legate alla creazione del file di Area, e sono solitamente anche le più citate nella letteratura dagli autori, che ricordano come eventuali discrepanze tra i dati calcolati e quelli misurati nella realtà siano imputabili proprio a queste semplificazioni. Come fatto notare da Fröhlich D. e Matzarakis A. (2013, pp.547-558), una prima semplificazione è quella riferita al fatto che, per quanto buona possa essere la risoluzione del modello, tutti gli oggetti dell'area, dagli edifici alle piante, sono considerati come volumi puramente geometrici formati da elementi cubici (le grids). Tuttavia, mentre gli oggetti più grandi sono formati da più sotto-elementi, e quindi ne sono meglio rappresentati, quelli più piccoli della dimensione delle grids, sono, ovviamente, sovrastimati nel volume. Questa approssimazione nella grandezza degli oggetti conduce ad un'impresione nei calcoli dei flussi radiativi e del moto dell'aria, dal momento che questi volumi interferiscono sia coi venti che con l'incidenza della radiazione sul suolo (ombra, ecc.). Può capitare, per esempio, che oggetti che nella realtà sono ad una certa distanza l'uno dall'altro, si trovino in posizione adiacente per effetto della risoluzione del modello: questo induce inevitabilmente ad una grande sovrastima degli ostacoli per le correnti d'aria. È quello che solitamente accade con la vegetazione: alberi che si trovano per esempio ad una certa distanza, ma che occupano, in lunghezza, appena più della dimensione di una grid, vengono rappresentati con due elementi, invece che uno, creando una sorta di blocco unico di alberi, per tutta la lunghezza delle due griglie adiacenti che li rappresentano: questo crea una sorta di ostacolo, non presente nella realtà, che diminuisce notevolmente la velocità del vento nella simulazione del modello. Un'attenta analisi dei risultati, attraverso la lettura grafica degli output, permette di individuare immediatamente queste "anomalie" ed escluderle facilmente.

Emmanuel R. e Fernando HJS. (2007, pp.241-251) invece ricordano come tutti gli edifici presenti in un file Area siano vincolati ad avere lo stesso albedo. Non è possibile differenziare il parametro fra superfici verticali, ma è tuttavia possibile farlo tra aree verticali ed orizzontali. Esattamente nello stesso modo, le trasmittanze possono essere differenziate fra superfici verticali e orizzontali, ma non fra edifici. Le superfici esterne degli edifici inoltre sono considerate tutte opache, ovvero non è possibile riprodurre le porzioni vetrate. Con questi vincoli, è possibile effettuare analisi e simulazioni solo su contesti micro-ambientali in cui gli edifici sono pressoché tutti simili per albedo e trasmittanza. L'ampiezza della zona simulata è dunque vincolata non solo per aspetti di complicazione della simulazioni e di tempi di risoluzione, ma anche perché può

estendersi solo a zone omogenee. L'impossibilità di inserire superfici vetrate negli edifici fa sì che il programma tralasci alcuni effetti che esse porterebbero con sé, quali riflessione, variazione di trasmittanza, irraggiamento all'interno degli edifici. E' chiaro che la scelta è legata alla necessità di semplificazione del modello e dei calcoli, tuttavia, da un lato risulta comprensibile trascurare gli effetti delle parti vetrate sulle condizioni di temperature interne agli edifici che sarebbero legate ad innumerevoli altri fattori, dall'altro risulta poco preciso trascurare gli effetti che una porzione vetrata porta sul microclima ambientale. Esistono infatti numerosi tipo di vetrazioni in grado di riflettere e assorbire le radiazioni luminose e termiche in maniera molto differenziata e che dunque posso andare ad incidere sulle condizioni esterne all'edificio. Un'altra semplificazione, legata sempre agli edifici, viene sottolineata invece da Bryan H. et al. (2008, p.201): essi fanno presente che la temperatura interna degli edifici è considerata costante. Questo ovviamente è ammissibile nella realtà solo se si dà per scontata la presenza di sistemi di condizionamento, che si occupano di termostatare gli ambienti interni. Poiché però il comportamento di questi sistemi è assimilabile a qualsiasi sorgente di calore di tipo antropogenico, l'impossibilità di simulare componenti antropogeniche in ENVI-met, come si discuterà nelle righe seguenti, rende l'invarianza della temperatura interna un'altra semplificazione.

Un'altra componente che viene trascurata nella simulazione degli edifici è la capacità termica. Essa risulta fondamentale nel calcolo del microclima ed è uno dei parametri principali che entrano in gioco nella creazione del fenomeno dell'isola di calore. Trascurare questo aspetto rappresenta dunque una forte mancanza ed i risultati ottenuti in relazione agli scambi di calore fra edifici potrebbero essere considerati poco attendibili o sottostimati. La capacità termica viene invece inclusa nei dati relativi al suolo, in tutte le stratigrafie che lo compongono.

Sempre nel file di Area, risulta impossibile modificare il livello del suolo dell'area: la quota zero è fissata e univoca. La simulazione dunque può limitarsi solo a zone di altimetria assimilabile, senza dislivelli importati, colline interne o sviluppi su diverse altimetrie (ad esempio città in montagna). È anche impossibile rappresentare dislivelli legati a strade, edifici, rampe. Questi elementi portano spesso variazioni importanti dei flussi d'aria e zone d'ombra che devono perciò essere trascurati.

Bruse M. (2007) ammette che all'interno della simulazione sia impossibile riprodurre fontane o effetti del moto dell'acqua. Non si tratta di una limitazione fortemente stringente, anche se la presenza di bacini d'acqua può avere, sulla temperatura dell'aria, un effetto diverso da quello, ad esempio, di una fontana che porta con sé anche una

componente di acqua nebulizzata che entra direttamente nell'aria. Inoltre gli effetti maggiori della presenza di un bacino d'acqua si riscontrano nell'abbassamento della temperatura dell'aria soprattutto dopo il tramonto, mentre quelli di una fontana possono essere notevoli anche durante le ore diurne.

Un ulteriore vincolo è legato al tipo di risultati ottenibili: non è possibile porre un recettore su di un edificio. I recettori sono posti sul livello del suolo, a quota zero; se posti in corrispondenza di un edificio non sono in grado di fornire dati relativi all'atmosfera sovrastante il tetto, ma risultano come coperti dall'edificio stesso. È tuttavia possibile avere dati relativi a tale zona, ma solo indirettamente, attraverso gli output generici ed una serie di sezioni su piani contenenti le superfici di interesse.

Molti altri studiosi mettono in luce uno dei limiti del software, che sarà affrontato anche in questo studio: come evidenziato infatti da Carnielo E. e Franchiotti A. (2011, p.12), la versione di ENVI-met utilizzata (attualmente è disponibile la versione 3.5 Beta), non consente di "forzare delle variabili", vale a dire che non è possibile inserire come input l'andamento orario delle grandezze in un arco di tempo (ad esempio temperature ed umidità) ad una quota prestabilita dal suolo o di certe superfici. Si noterà come, nel capitolo 4, questo impedirà di simulare adeguatamente le aree verdi irrigate.

Infine, come già affermato precedentemente, la lettura degli output può avvenire solamente analizzando un solo file orario, o al massimo, con Leonardo, confrontando due file. L'analisi tuttavia deve avvenire valutando un solo parametro alla volta.

Alla luce dei vincoli che il programma impone, ENVI-met è usato soprattutto in simulazioni che prevedono lo studio dell'incidenza della vegetazione sul microclima, nei confronti tra i comportamenti dello stesso sistema in condizioni di verde diverse, nelle valutazioni dei parametri e del comfort micro-ambientale ottenuti con piani di modifica e ristrutturazione urbana, negli studi relativi alle possibili modifiche effettuabili per attenuare l'effetto dell'isola di calore, in termini di variazione di albedo delle superfici e introduzione di vegetazione.

CAPITOLO 4

Le simulazioni

1. Introduzione

1.1 Il modello in ENVI-met

1.1.1. Area Input File

Il primo passo per avviare la simulazione prevede di creare un modello tridimensionale rappresentativo dell'area di studio attraverso l'Editor di ENVI-met. Dal momento che la piazza vanta un'estensione di circa 88620 m², a cui si deve aggiungere un'area perimetrale coperta da edifici e altre zone verdi di (approssimativamente) 60000 m², la scelta del numero di griglie è ricaduta su 111x88x30 griglie, ognuna dalle dimensioni dx=5 m, dy=5m e dz=3m. Come si può notare, lo spazio coperto da questo numero di griglie è leggermente superiore a quello effettivamente richiesto dalla zona di Prato della Valle: questo per lasciare uno spazio di almeno il doppio dell'altezza dell'edificio più alto del modello tra i bordi della mappa e il perimetro dell'area vera di studio. Questo accorgimento, suggerito dallo stesso team di ENVI-met, permette di dare maggiore stabilità ai modelli matematici sottostanti al software ed evitare che nei risultati finali si presentino valori outlier che possono inevitabilmente sviare le analisi.

Definita la dimensione del modello e quindi il numero di grids, occorre fornire al software le informazioni riguardanti la posizione geografica dell'area di studio, una breve descrizione, il numero di nesting grids, il tipo di terreno delle nesting grids e l'altezza massima degli edifici. In tal caso i dati sono riassunti nella tabella seguente (Tabella 1) e vengono raccolti da ENVI-met con una specifica interfaccia (Figura 21).

<i>Luogo</i>	Padova, Italia
<i>Coordinate geo referenziali</i>	Lat. 45° 23', Long. 11° 52' *
<i>Fuso Orario</i>	CET (Central European Time)
<i>Descrizione</i>	Prato Della Valle
<i>Numero Griglie</i>	111 x 88 x 30
<i>dx, dy, dz (m)</i>	5, 5, 3
<i>Nesting grids</i>	5

<i>Tipo terreno nesting grids</i>	asfalto + terreno argilloso
<i>Metodo generazione griglie verticali</i>	equidistanti
<i>Massima altezza edifici (m)</i>	22

Tabella 1 Dati per l'identificazione dell'area di studio per ENVI-met

* fonte: Google Earth

Figura 21 Rappresentazione delle impostazioni generali per la creazione dell' Area Input File.IN (fonte: ENVI-met)

Il passaggio successivo invece tratta direttamente la rappresentazione dell'area di studio, con la definizione delle informazioni riguardo al terreno, alla disposizione degli edifici ed alla loro altezza, alle aree verdi ed alle strade. Per quanto riguarda il terreno, si è scelto un terreno argilloso (<loamy soil>) per le zone sottostanti le aree verdi, mentre il comune asfalto (<asphalt>) per le strade e la piazza. Sono stati aggiunti inoltre altri due tipi di "superfici", che non erano presenti di default nel database di ENVI-met e che per questo si è provveduto a modellare basandosi su dati reperiti da manuali specialistici di terreni (Busato F., Lazzarin R., Noro M. 2014): sono il porfido (<porphyry>) che lambisce la carreggiata che porta dall'estremità nord della piazza a quella sud-ovest, e la ghiaia (<gravel>) che ricopre invece i due assi pedonali dell'Isola Memmia.

Il database PLANTS.dat, ha permesso di modellare le aree erbose (<grass>), e quelle coperte da alberi (tipicamente aceri rossi, che raggiungono solitamente altezze intorno ai 10 metri, <ds> - Tree 10m dense, distinct crown).

La modellazione degli edifici ha richiesto invece dei rilievi delle altezze di ciascuno attraverso un misuratore laser (*Leica DISTO D2* - Figura 22) visto che il Dipartimento Urbanistico del Comune di Padova non ha a disposizione un portale SIT (Sistema Informativo Territoriale) con cui poter misurare comodamente da un pc, l'intera planimetria della città, ed ottenere così le informazioni riguardo alle altezze, distanze, volumi dei vari edifici. Lo strumento, maneggevole e di rapido utilizzo, permette di calcolare distanze e, grazie ad una calcolatrice integrata, elaborando dei dati in memoria, anche alcune funzioni come superfici, volumi o perimetri e due funzioni di Pitagora.



Dati tecnici

Portata	da 0.05 a 60 m*
Precisione di misura (2 σ)	tipica: ± 1.5 mm**
Unità minima visualizzata	1 mm
Classe laser	2
Tipo di laser	635 nm, < 1 mW
Protezione dall'acqua e dalla polvere	IP 54, protetto dalla polvere, protetto dagli spruzzi d'acqua
Spegnimento automatico: Laser Strumento	dopo 60 s dopo 180 s
Illuminazione del display	✓
Adattatore chiudibile	✓
Durata batterie, tipo 2 x AAA	fino a 5 000 misure
Dimensioni	111 x 43 x 23 mm
Peso	90 g
Valori di temperatura: Conservazione Funzionamento	da -25°C a +70°C da 0°C a +40°C

* utilizzare una piastra segnale con luce ambientale intensa o quando il riflettore non ha buone proprietà riflettenti!
** in condizioni favorevoli (buona superficie, temperatura ambientale) fino a 10 m. In condizioni sfavorevoli, come in piena luce solare, superficie poco riflettente o forti variazioni di temperatura, la deviazione potrebbe raggiungere ± 0.15 mm/m a una distanza superiore a 10 m.

Figura 22 Foto dello strumento Leica DISTO D2 e le sue specifiche tecniche (fonte: www.leica.it)

Le operazioni pratiche di misurazione possono avvenire solitamente con due modalità di esecuzione:

- **Misure dirette:** il valore della misura viene ottenuto con un unico rilievo in maniera diretta, puntando il laser nella direzione di misura, leggendo sul display la lunghezza cercata; es. la misura diretta dell'altezza dell'edificio avviene poggiando a terra il misuratore, e puntando il laser verso l'alto all'indirizzo del cornicione;
- **Misure indirette:** questa procedura è utilizzata quando la distanza da misurare è difficilmente raggiungibile; in tal caso il valore della distanza viene definito attraverso le misure ausiliarie (1) e (2), adottando la funzione di Pitagora (Figura 23).

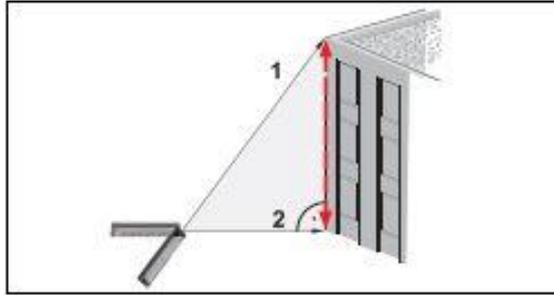


Figura 23 Rilievi di una misura indiretta (fonte: www.leica)

Dal momento che ENVI-met utilizza solo delle quantità intere per l'altezza degli edifici, le misure sono state approssimate all'intero immediatamente precedente se il valore rilevato presentava cifre decimali inferiori a 0.5 m, mentre all'intero successivo nel caso opposto.

Le misure raccolte e organizzate nell'Editor di ENVI-met hanno permesso di realizzare il seguente file di input Area (Figura 24 - Figura 26):



Figura 24 Rappresentazione dell'Area Input File con l'Editor di ENVI-met



Figura 25 Immagine dall'alto della piazza (fonte: Google Earth)

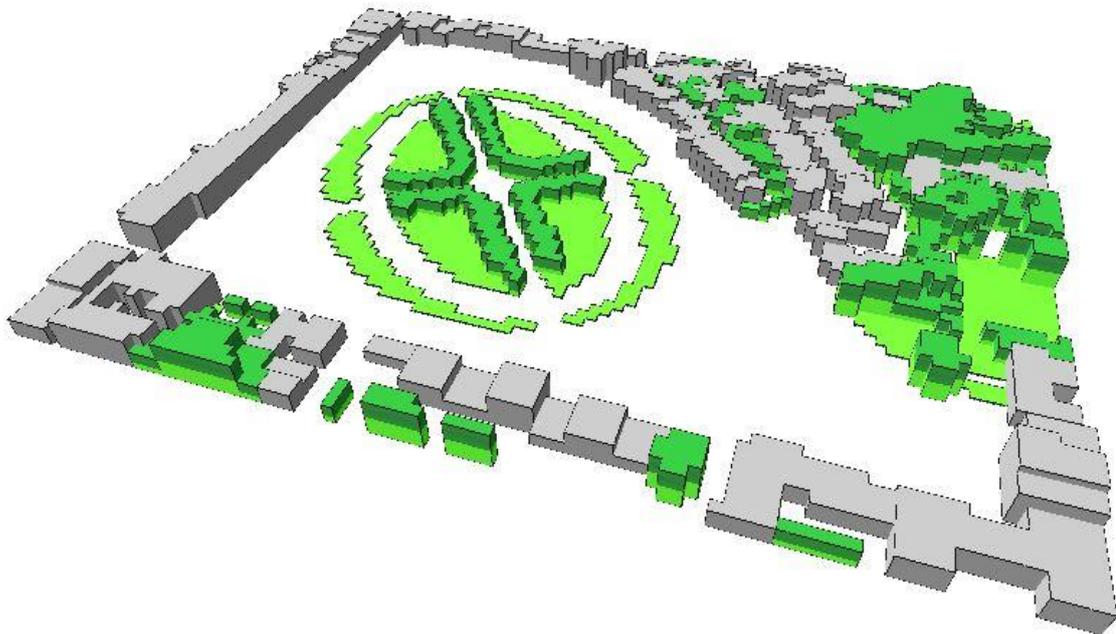


Figura 26 Rappresentazione 3D dell'Area Input File ottenuta con il software tool LEONARDO 14 (Bruse M. e ENVI-met Team 2014)

1.1.2. Config File

Prima di poter essere avviata, la simulazione richiede alcuni valori di input primari, necessari per inizializzare il modello 1D: questi vengono riassunti in un secondo file di

input, il *Config File.CF*, ossia il *file di configurazione*. In esso sono conservati in dettaglio le misure delle principali variabili di partenza della simulazione, come il giorno di inizio della simulazione, la temperatura iniziale dell'aria, l'umidità, la direzione del vento ecc.

Per le simulazioni affrontate in questo studio, sono stati scelti oculatamente i seguenti valori:

VARIABILE	VALORE	MOTIVAZIONE
Giorno inizio simulazione (GG:MM:AA)	27:07:13	Dati precedenti simulazioni ¹
Durata simulazione (h)	72	Dati precedenti simulazioni ¹
Intervallo salvataggio dati (min.)	60	Default
Velocità vento a 10 m (m / s)	2	Media Dati ARPAV Veneto *
Direzione vento (0:N..90:E..180:S..270:W..)	45	Media Dati ARPAV Veneto *
Roughness Length al suolo	0.2	Dati precedenti simulazioni ¹
Temperatura iniziale atmosferica (K)	299.1	Media Dati ARPAV Veneto *
Umidità specifica a 2500 m (g acqua / kg aria)	7	Dati precedenti simulazioni ¹
Umidità relativa a 2 m (%)	76.25	Media Dati ARPAV Veneto *
[BUILDING]: Proprietà edifici		
Temperatura interna (K)	298	Default
Trasmittanza termica muri (W/(m ² K))	1	Default
Trasmittanza termica tetti (W/(m ² K))	2	Default
Riflettanza solare muri (<i>Albedo</i>)	0.2	Default e Dati provenienti da foglio notizie tecniche ²

Riflettanza solare tetti (<i>Albedo</i>)	0.3	<i>Default e Dati provenienti da foglio notizie tecniche²</i>
[PMV]: Impostazioni per il calcolo del PMV		
Velocità di movimento (m/s)	0.3	Default **
Energia attività metabolica (W/m ²)	116	Default **
Fattore lavoro meccanico	0.0	Default **
Resistenza termica del vestiario (clo; 1 clo=0.155 m ² °C/W)	0.5	Default **

Tabella 2 Dati per la creazione del file di configurazione di ENVI-met

¹Busato F., Lazzarin R. & Noro M., 2014

² “Soluzioni tecniche per il contenimento delle isole di calore urbane” – IMPER giugno 2010

* Dati medi giornalieri provenienti dalla Stazione meteorologica di Ca’ Oddo, a una trentina di km da Padova

** Dati presenti di default e confermati da tabelle di Carbonari A., Corso di Tecnica del Controllo Ambientale, IUAV

```

pdvcfasisfinal.cf
% ---- Basic Configuration File for ENVI-met Version 3 -----%
% ---- MAIN-DATA Block -----%
Name for Simulation (Text):           = AsIsFinal
Input file Model Area                 =C:\ENVImet31\input\pdvcfasisnew.in
Filebase name for Output (Text):      =OutFinal
Output Directory:                     =C:\ENVImet Results
Start Simulation at Day (DD.MM.YYYY): =27.07.2013
Start Simulation at Time (HH:MM:SS):  =06:00:00
Total Simulation Time in Hours:       =72.00
Save Model State each ? min          =60
Wind Speed in 10 m ab. Ground [m/s]  =2.0
Wind Direction (0:N..90:E..180:S..270:W..) =45
Roughness Length z0 at Reference Point =0.2
Initial Temperature Atmosphere [K]    =299.1
Specific Humidity in 2500 m [g Water/kg air] =7
Relative Humidity in 2m [%]           =76.25
Database Plants                       =C:\ENVImet31\sys.basedata\Plants.dat

( -- End of Basic Data --)
( -- Following: Optional data. The order of sections is free. --)
( -- Missing Sections will keep default data. --)
( Use "Add Section" in ConfigEditor to add more sections )
( Only use "=" in front of the final value, not in the description)
( This file is created for ENVI-met V3.0 or better )

[BUILDING] Building properties
Inside Temperature [K]           = 298
Heat Transmission Walls [W/m²K]  =1
Heat Transmission Roofs [W/m²K] =2
Albedo Walls                     =0.2
Albedo Roofs                     =0.3

[PMV] Settings for PMV-Calculation
Walking Speed (m/s)              =0.3
Energy-Exchange (Col. 2 M/A)     =116
Mech. Factor                      =0.0
Heattransfer resistance cloths    =0.5

```

Figura 27 Immagine del Config File di ENVI-met utilizzato per la simulazione As-Is (fonte: ENVI-met Configurator)

1.2. I parametri analizzati

ENVI-met genera, ogni ora, un file da cui poter estrarre i valori di ben oltre 60 parametri, per una certa altezza dal suolo scelta dall'utente. Per avvalorare le ricerche risulta conveniente selezionare, per effettuare le analisi, i dati delle sole ultime ventiquattro ore, così da permettere al software di assestare le variabili di calcolo ed evitare possibili valori outlier che potrebbero eventualmente invalidare le analisi. I parametri di studio principali sono stati estratti ad un'altezza di 1.5 metri dal suolo e quelli analizzati sono:

1. *Temperatura Potenziale dell'Aria*
2. *Temperatura Media Radiante*
3. *PMV (Predicted Mean Vote) e PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied)*
4. *UHI Intensity*

1.2.1. Temperatura Potenziale dell'Aria

Come è noto, dal punto di vista molecolare, la temperatura è il risultato del movimento delle particelle che compongono una sostanza. Se valutiamo l'andamento della pressione atmosferica al variare dell'altitudine, si può facilmente notare come la pressione diminuisca all'aumentare dell'altitudine; questo perché ovviamente più alti andiamo, meno aria sopra di noi ci sarà e quindi questa subirà una forza inferiore diretta verso il basso causata dal peso di quest'aria. Dal momento che la pressione atmosferica diminuisce, e poiché l'aria è una sostanza comprimibile, quest'ultima inizierà ad espandersi. L'espansione delle particelle di aria avviene a discapito dell'energia interna, la cui diminuzione significa una diminuzione della temperatura. Per questo l'aria inizia ad espandersi, e espandendosi si raffredda. A questo punto, se assumessimo che l'espansione di queste particelle avvenisse con un processo adiabatico, cioè senza alcun scambio di calore, il calcolo della temperatura dell'aria a tal fine risulterebbe più agevole e immediato.

Per questa ragione, al posto della temperatura "reale", viene introdotto un costrutto matematico molto utile chiamato *temperatura potenziale*: per definizione, è *la temperatura di una particella di aria secca che dalle condizioni iniziali (T_0 e P_0), viene portata ad una quota di riferimento (il livello del mare), a cui corrisponde una pressione $P=1000$ hPa attraverso un processo adiabatico* (Guyot G. 1998). L'espressione di tale temperatura T si ricava a partire dalla formula 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:

$$T = T_0 \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{R}{c_p}}$$

La temperatura potenziale ha il vantaggio di conservarsi nei movimenti verticali della particella d'aria: essa dunque non risente della variazione di quota, la quale genererebbe un gradiente di pressione con conseguente oscillazione della temperatura per diminuzione dell'energia interna, ma solo dei processi di riscaldamento o raffreddamento dovuti a dei fattori esterni come ad esempio l'evaporazione o la condensazione. Dal punto di vista dinamico quindi, è una grandezza molto più importante di quella reale, e per questo motivo la temperatura dell'aria viene espressa da ENVI-met attraverso la temperatura potenziale.

È proprio sulla base dei valori assunti dalla temperatura potenziale dell'aria che è possibile misurare l'intensità di isola di calore urbana come differenza tra la temperatura riscontrata nell'ambiente urbano, e quella di una zona rurale.

1.2.2. Temperatura Media Radiante

La temperatura media radiante è uno tra i più importanti parametri ambientali relativi al bilancio energetico del corpo umano. Essa infatti esprime gli scambi termici per irraggiamento tra corpo umano e superfici di un ambiente, e per questo è utilizzata ai fini della valutazione del comfort termo igrometrico. Tali scambi dipendono, com'è noto, oltre che dalle temperature delle superfici, anche dalla loro posizione reciproca, espressa attraverso i fattori di vista. Dal punto di vista tecnico, la temperatura media radiante (TMR) è definita come *la temperatura uniforme di una cavità nera fittizia che, racchiudendo degli individui, scambia per irraggiamento con essi la stessa potenza termica scambiata dalle superfici reali, generalmente disomogenee, che delimitano l'ambiente in cui gli individui normalmente si trovano* (ASHRAE Handbook Fundamentals 2009, p.179).

I parametri principali responsabili del calcolo della temperatura media radiante si sono già affrontati nella sezione dedicata all'equilibrio energetico del corpo umano e quindi si rimanda al paragrafo (capitolo 1, par. 3 "Le cause") per un ripasso dei termini.

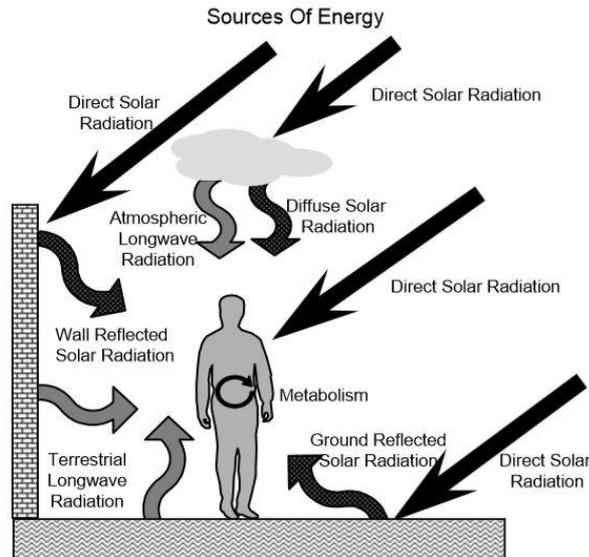


Figura 28 Energy Balance (fonte: Bonan 2002, cap.7 p.4)

Nel calcolare la temperatura media radiante, ENVI-met tiene in considerazione tutti i flussi radianti, sia le radiazioni solari dirette, diffuse e riflesse, sia i flussi della radiazione ad onda lunga provenienti dall'atmosfera, dal terreno e dai muri, ed è in grado di generare i valori di tale parametro per ogni cella del modello, al variare dell'altezza dal suolo (Ali - Toudert F. 2005; Emmanuel R. e Fernando H.J.S. 2007, pp.241-251). Huttner (2012, p.19) spiega come ENVI-met calcoli la TMR per un corpo di forma cilindrica a partire dall'equazione seguente:

$$TMR = \left(\frac{1}{\sigma} \left(Q_{lw,in} + \frac{ak}{\varepsilon} * (Q_{sw-diff,in} + Q_{sw-dir,in}) \right) \right)^{\frac{1}{4}}$$

dove $Q_{lw,in}$ indica la radiazione ad onda lunga ("in" indica che il flusso è in ingresso rispetto al corpo cilindrico considerato), $Q_{sw-dir,in}$ e $Q_{sw-diff,in}$ indicano le quote di radiazione solare ad onda corta diretta e diffusa, il coefficiente di emissione del corpo umano (ε) è posto a 0.97, il coefficiente di assorbimento del corpo umano della radiazione ad onda corta (ak) è scelto pari a 0.7 e σ è la costante di Stefan – Boltzmann ($5.67 * 10^{-8} W/(m^2 K^4)$). Si assume poi che la radiazione ad onda lunga $Q_{lw,in}$ ("in" indica che il flusso è in ingresso rispetto al corpo cilindrico considerato) provenga per il 50 % dal cielo, edifici e vegetazione, e per il restante 50 % dalla superficie del terreno:

$$Q_{lw,in} = 0.5 * (vf_{veg} \varepsilon_{veg}^* \sigma T_{veg}^{*4} + vf_{bldg} \varepsilon_{bldg}^* \sigma T_{bldg}^{*4} + vf_{sky} Q_{lw,sky} + vf_{bldg} (1 - \sigma_{bldg}^*) Q_{lw,sky}) + 0.5 * (\sigma \varepsilon_{ground} T_{ground}^4)$$

I fattori di vista vf danno la percentuale di vegetazione/edifici/cielo che può essere vista da un punto di una griglia specifica. Mentre il corretto approccio fisico richiederebbe di calcolare tutti i flussi radiativi ad onda lunga basandosi sull'emissività e sulle temperature di ogni elemento entro la vista, ENVI-met utilizza i valori medi di emissività (ϵ^*) e di temperatura (T^*) per tutte le piante e gli edifici all'interno dell'area del modello. La radiazione incidente ad onda lunga proveniente dal cielo invece $Q_{lw, sky}$ è calcolata sulla base della temperatura e dell'umidità dell'aria. Per la radiazione ad onda lunga proveniente dal suolo, vengono prese in considerazione solo l'emissività e la temperatura superficiale delle griglie in analisi.

La radiazione incidente ad onde corte diffusa $Q_{sw-diff, in}$ invece viene calcolata secondo:

$$Q_{sw-dir, in} = 0.5 * (vf_{bldg} rf_{bldg}^* Q_{sw-dir, sky} + vf_{sky} Q_{sw-diff, sky}) + 0.5 * (rf_{ground} Q_{sw, ground})$$

dove rf è la riflettanza (o albedo) e $Q_{sw, ground}$ è la radiazione globale ad onde corte alla superficie del suolo della griglia corrispondente. La radiazione incidente diretta ad onda corta, ossia $Q_{sw-dir, in}$, è calcolata a partire dalla radiazione diretta ad onde corte all'interno della griglia, moltiplicata per un *fattore di proiezione* pf : $Q_{sw-dir, in} = pf * Q_{sw-dir}$. Questo fattore di proiezione dipende dall'angolo azimutale del sole θ :

$$pf = 0.42 * \cos \theta + 0.043 * \sin \theta$$

La temperatura media radiante presenta solitamente il tipico andamento rappresentato in Figura 29, dal momento che è strettamente collegata ai flussi radiativi percepiti da un individuo che si trova in piedi: intorno a mezzogiorno si assiste ad un primo lieve calo della TMR, seguito da un aumento nelle ore pomeridiane, e infine da una diminuzione notevole intorno alle ore serali. Questo perché alle ore 12:00 il sole si trova nel punto più alto e mentre ci si potrebbe aspettare i maggiori valori di radiazione su una superficie orizzontale, l'area proiettata sulla superficie dove essa colpisce il corpo umano è relativamente piccola per un individuo che si trova in piedi, essendo limitata alla sola testa e a parte delle spalle. Al contrario, quando il sole si trova più basso all'orizzonte, la radiazione potrebbe anche non essere così forte come quella a mezzodì, ma essa colpisce una superficie maggiore del corpo, dando quindi una sensazione di una temperatura maggiore. L'intensità della TMR infine tende a diminuire considerevolmente quando ormai il sole, nelle ore successive al tramonto (intorno alle 19), scompare oltre l'orizzonte. Per tal motivo la temperatura media radiante è notevolmente differente dalla temperatura potenziale: mentre infatti quest'ultima rappresenta una misura assoluta della temperatura dell'aria e dell'ambiente circostante, la temperatura media radiante è

piuttosto un indicatore del comfort termico, e proprio per questo diventa un parametro chiave nella valutazione dell'isola di calore e della sua incidenza sul benessere degli individui.

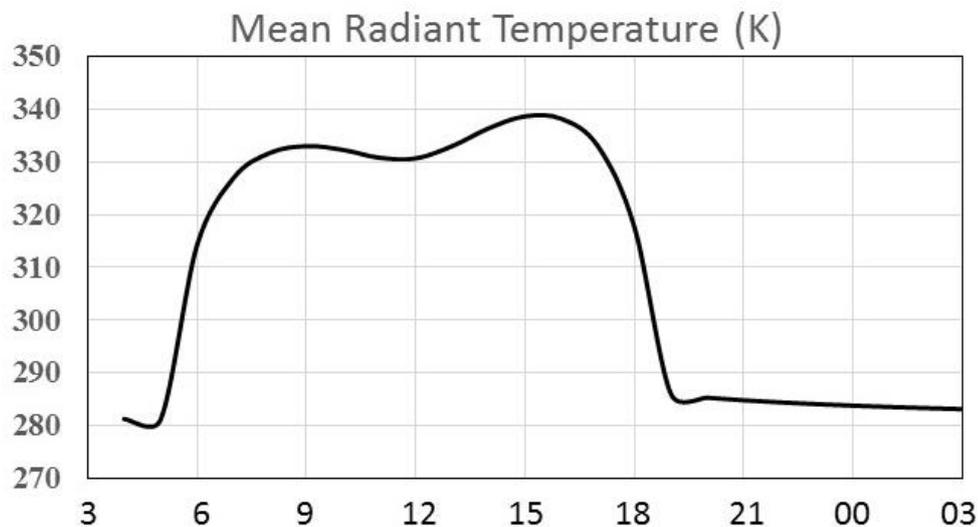


Figura 29 Andamento tipico della Temperatura Media Radiante (fonte: www.envimet.com)

1.2.3. PMV e PPD

Un aspetto fondamentale per la valutazione delle condizioni di benessere per un individuo in un ambiente è la nozione di comfort termico; il *comfort termico* secondo l'ASHRAE, la massima organizzazione mondiale che si occupa di definire gli standard ambientali per il benessere termo-igrometrico, è definito come quello *stato psico-fisico in cui l'individuo esprime soddisfazione riguardo al microclima ambientale, ovvero non avverte sensazione né di caldo né di freddo. Questa condizione è detta anche di neutralità termica* (ASHRAE Handbook Fundamentals 2009, p.170). Tale definizione lascia aperto ovviamente un dibattito su ciò che si indichi con "stato psico-fisico" o "soddisfazione", ma essa correttamente enfatizza che il giudizio di comfort è una valutazione soggettiva che coinvolge fattori influenzati da processi fisici, fisiologici e psicologici differenti da persona a persona.

In generale comunque la sensazione di comfort si percepisce quando la temperatura del corpo viene mantenuta entro un certo range abbastanza stretto, l'umidità della pelle è bassa e lo sforzo di termoregolazione del corpo è minimizzato. I forti connotati soggettivi del comfort emergono invece dai comportamenti che consciamente o inconsciamente un individuo tiene e che sono guidati dalle sensazioni termiche e di umidità percepite in un certo ambiente; alcuni di questi comuni atteggiamenti sono il cambio di vestiario o di attività, lo spostamento da un certo luogo, la correzione della postura, la variazione dei

parametri del sistema di condizionamento, l'apertura di una finestra, o addirittura anche le stesse lamentele.

Per stimare il comfort termico e integrare tra loro i differenti parametri responsabili delle condizioni di benessere termico, sono stati sviluppati nel corso degli anni diversi indici. In questo senso, gli anni di ricerca presso l'Università della Danimarca hanno permesso al Professor Fanger all'inizio degli anni settanta di dar vita ad uno dei più importanti lavori in questo campo; i risultati, raccolti nel suo libro *"Thermal Comfort"* (1970), furono i primi ad affermare l'impossibilità di considerare in maniera indipendente ciascuno dei fattori fisici responsabili del comfort termico: l'effetto delle quattro variabili fisiche (temperatura dell'aria, velocità dell'aria, temperatura media radiante e umidità relativa) e delle due variabili "soggettive" (livello di attività e resistenza termica dei vestiti) dipende inevitabilmente, secondo Fanger, dal livello delle altre e proprio sulla base di questo egli introdusse un nuovo indice che combinasse ognuno di questi parametri e che denominò *Predicted Mean Vote* o *PMV*. Nei suoi esperimenti inoltre, fece indossare ai partecipanti dei normali capi di vestiario e diede loro da svolgere delle semplici attività di routine giornaliera, mentre questi intanto in una camera climatica venivano sottoposti a delle differenti condizioni termiche; in alcuni di questi studi, erano i ricercatori che sceglievano le condizioni termiche e chiedevano ai partecipanti di annotare le proprie sensazioni di caldo o freddo sulla base di una data scala di sensazione termica, basata su sette punti, redatta dall'ASHRAE (Figura 30). In altri casi invece era lasciato alle persone stesse controllare autonomamente i parametri del clima nella stanza, impostando così la temperatura a cui essi raggiungevano uno stato di neutralità termica, punto che sarebbe servito poi a Fanger per individuare il voto "0" sulla scala termica (Charles Kate E. 2003, p.6).

ASHRAE Thermal Sensation Scale						
-3	-2	-1	0	1	2	3
cold	cool	slightly cool	neutral	slightly warm	warm	hot

Figura 30 Scala ASHRAE del comfort Termico (fonte: ASHRAE Handbook Fundamentals 2009)

Il *PMV* o *Predicted Mean Vote* assume quindi la definizione di *indice che predice il giudizio medio di un grande gruppo di persone sulla scala di sensazione termica ASHRAE, che va da -3 (molto freddo), a +3 (molto caldo)* (ASHRAE Handbook Fundamentals 2009, p.186). Esso risulta dal bilancio del calore nell' "equazione del comfort", la quale descrive tutte le combinazioni possibili delle sei variabili che generano

la condizione di neutralità termica; il PMV si presenta perciò come funzione di sei grandezze:

$$PMV = f\left(\frac{H}{A_{DU}}, I_{cl}, t_l, t_{mrt}, e, v_r\right)$$

dove, H/A_{DU} (W / m²) rappresenta la produzione di calore interna per unità di superficie di un corpo comune, I_{cl} (clo) la resistenza termica dell'abbigliamento, t_{mrt} (°C) la temperatura media radiante, t_l (°C) la temperatura dell'aria, e (hPa) la pressione del vapor d'acqua dell'aria e v_r la velocità relativa dell'aria rispetto al corpo umano (VDI 1998).

Essendo un indice medio riferito ad un gruppo di individui, occorre notare che le condizioni termiche ottimali all'interno del gruppo possono probabilmente variare tra i soggetti anche fino ad una unità della scala ASHRAE (Humphreys M.A. e Nicol J. F., 2002, p.563). Perciò, anche se i valori termici in un certo locale sono regolati secondo il modello del PMV, il raggiungimento di un PMV pari a zero non annulla completamente la percentuale di persone insoddisfatte ma la minimizza al 5%. In secondo luogo, è importante ricordare che il modello del PMV si basa su una misura di *come* gli occupanti sentano il freddo o il caldo: concettualmente infatti, la sensazione termica è differente dalle misure di soddisfazione termica, di accettabilità termica, di comfort termico e di preferenza termica. Mentre la sensazione di per sé valuta semplicemente la temperatura che gli occupanti percepiscono, le altre misure implicano che gli occupanti esprimano un parere sul grado di adeguatezza di quella temperatura. Per tale ragione la comunità assume come giudizio di comfort termico non solo il valore di PMV pari a zero, ma l'intero range compreso tra -1 e +1 (Humphreys M.A. e Nicol J. F. 2002, p.571). Capita infine che il valore del PMV, normalmente compreso tra -3 e +3, raggiunga valori ben sopra o al di sotto degli estremi di questo range, dal momento che è calcolato a partire da un bilancio energetico dai connotati fortemente soggettivi.

Un'altra grande differenza tra altri indici di comfort e il PMV è il livello di dettaglio usato per calcolare il bilancio di energia del corpo umano: tutti questi indici biometeorologici presuppongono che la persona per la quale viene calcolato l'indice si trovi in piedi in un ambiente in cui il suo corpo si sia adattato alle condizioni atmosferiche circostanti. In un ambiente urbano però quest'ipotesi è spesso imprecisa dal momento che le condizioni atmosferiche microclimatiche – in particolare vento e temperatura radiante – possono variare drasticamente anche nel giro di pochi metri, per la presenza di un muro che protegge dal vento o per la presenza di un edificio che genera ombra e che diminuisce il fattore di vista del cielo (Huttner S. 2012, p.18). Ebbene il PMV considera questa

condizione, e ciò lo rende uno degli indici più favorevoli per il calcolo del benessere termico.

ENVI-met è in grado di eseguire questo bilancio e stabilire statisticamente il valore del PMV di una persona presente all'interno del modello simulato. In questo genere di simulazione tuttavia il PMV non risulta sempre compreso fra -4 e +4 (estremi considerati da ENVI-met), ma può assumere spesso valori inferiori o superiori che identificano dunque maggiore discomfort ambientale per il soggetto. È importante notare anche come il modello del PMV utilizzato da ENVI-met sia uno speciale adattamento al clima degli ambienti esterni del modello originale di Fanger, inizialmente destinato a valutare le sole condizioni in un ambiente chiuso: il merito di questa rielaborazione è assegnato a Jendritzky e a Nübler che nel 1981 aggiunsero delle complesse equazioni di bilancio energetico riferite all'ambiente alla preesistente struttura di Fanger, dando vita al modello chiamato "*Klima-Michel-Model*", noto con la sigla *KMM*. Nel loro studio della città di Friburgo, essi implementarono anche una mappa con la distribuzione del PMV da cui potevano essere facilmente osservati gli effetti dell'isola di calore urbana (Jendritzky G. e Nübler W. 1981; Honjo T. 2009, p.45).

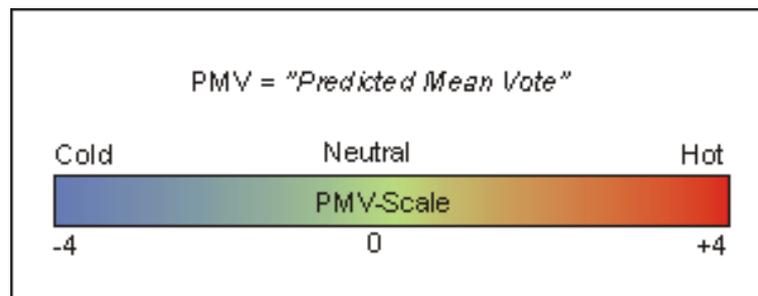


Figura 31 La scala del PMV utilizzata da ENVI-met (fonte: www.envimet.com)

Dopo aver definito il PMV, Fanger sviluppa anche un ulteriore indice, strettamente legato al primo, il *PPD* (*Predicted Percentage of Dissatisfied*): esso misura la percentuale di persone insoddisfatte delle condizioni ambientali in cui si trovano. La relazione che Fanger instaura tra il PMV e il PPD (Figura 32), è così stretta che l'uno risulta calcolabile dall'altro e viceversa a partire dalla seguente relazione:

$$PPD = 100 - 95 \exp[-(0.03353 PMV^4 + 0.2179 PMV^2)]$$

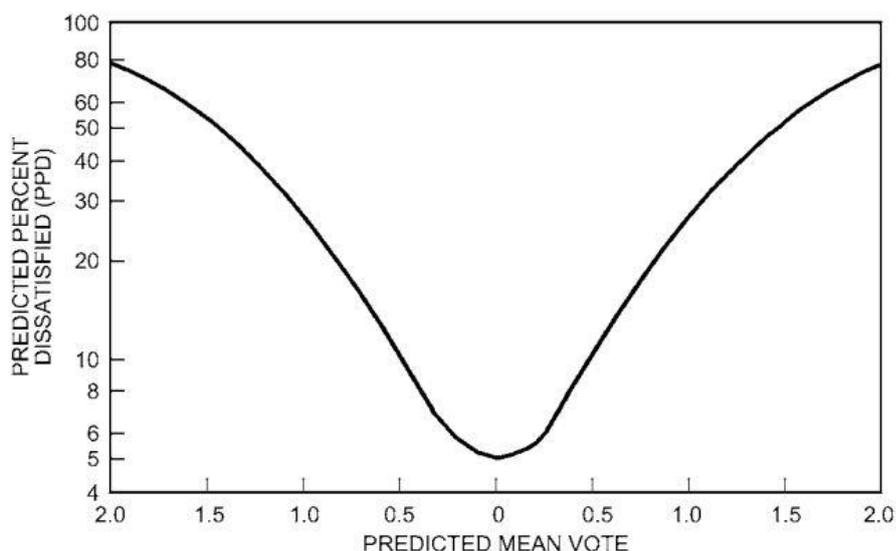


Figura 32 Relazione tra l'andamento del PMV e PPD (fonte: ASHRAE Handbook Fundamentals 2009)

Relativamente ancora pochi studi sono stati compiuti sul clima degli ambienti esterni, rispetto all'ambiente indoor, sebbene l'importanza rivolta all'analisi degli indici per il comfort esterno stia notevolmente aumentando negli ultimi anni. La difficoltà nel valutare la condizione climatica esterna sta nel fatto che le variabili in gioco sono soggette a cambiamenti continui e repentini. Indici come il PMV e il PPD sono molto diffusi per la stima dell'indoor thermal comfort, ma il loro utilizzo sull'ambiente esterno spezza in due la comunità scientifica (Honjo T. 2009, pp. 43-47). Molti ricercatori, come per esempio de Dear R. e Spagnolo J. (2003, pp.721-738) hanno recensito degli studi sul benessere termico in ambienti aperti e si sono chiesti se la teoria sviluppata per gli ambienti chiusi possa essere applicata a quelli esterni senza alcuna modifica. Come molti altri colleghi, essi hanno notato che per il comfort outdoor occorre preferire l'utilizzo di indici alternativi a quelli del PMV e del PPD, dal momento che l'intervento per trasformare il Predicted Mean Vote da un indice di comfort indoor ad uno per quello outdoor compiuta da Jendritzky G. e Nübler W. non è ancora ampiamente accettata. Inoltre, per parte della comunità scientifica, il PMV non dovrebbe essere utilizzato per altri due motivi: il primo è che l'EN ISO 7730, norma emanata dall'ISO (International Standard Organization, vale a dire l'organizzazione internazionale che si occupa di elaborare gli standard per tutti i settori della tecnica), lo riconosce come un indice da utilizzare propriamente per gli ambienti interni¹. Il secondo emerge dalla discrepanza tra il PMV e ASV (Actual

¹ Il passo in cui si parla del PMV come indice per la valutazione delle condizioni nell'ambiente interno è presente nella parte riferita allo scopo e al campo di applicazione: "This International Standard presents methods for predicting the general thermal sensation and degree of discomfort (thermal dissatisfaction) of people exposed to moderate thermal environments. It enables the analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of PMV (predicted mean vote) and PPD (predicted percentage of dissatisfied) and local thermal comfort criteria,

Sensation Vote), nel caso di valutazioni sul micro clima all'esterno degli edifici, dimostrata in numerosi studi (Baker N. et al. 2001, pp. 227–235; Thorsson et al. 2004, pp.149-156; JuYoun Kwon e Parsons K. 2009, p.5): l'ASV rappresenta l'effettiva risposta di un gruppo di individui sul comfort termico in un certo ambiente raccolta attraverso delle interviste; i risultati in tal caso mostrano spesso come, per oltre il 50% degli intervistati, il valore di comfort predetto dal PMV sovrastimi quello espresso dai soggetti intervistati.

In quanto a indici alternativi per la valutazione del comfort outdoor, molto diffusi sono la *PET (Physiological Equivalent Temperature)* e l'*UTCI (Universal Thermal Climate Index)*. La PET, introdotta da Höpfe nel 1999 - "*The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment*" -, è preferita ad altri indici (per esempio il PMV) per il fatto che essa è espressa in °C, il che rende i risultati molto più comprensibili e immediati per coloro che non sono molto pratici con la terminologia della moderna biometereologia (Iziomon M.G. et al. 1999, p.76). L'Universal Thermal Climate Index invece si sta affermando con grande rapidità in gran parte della comunità scientifica dal momento che si basa su una serie di conoscenze molto approfondite della termo-fisiologia e della teoria dello scambio di calore provenienti da recentissime scoperte, addirittura anche nel campo della medicina. Questo tipo di indice è stato sviluppato dalla Commissione 6, scelta appositamente dall'ISB per unificare tutto il bagaglio di nozioni note fino ad ora, e proprio per questo motivo sta riscuotendo un notevole successo negli studi sul benessere termico per ambienti esterni.

Nonostante pareri discordanti comunque, ENVI-met mette a disposizione dell'utente l'indice PMV per quantificare la sensazione di discomfort percepita da un generico individuo, modificato tuttavia dalla teoria di Jendritzky G. e Nübler W.. Per le simulazioni svolte nell'ambito di questo lavoro è stato utilizzato l'indice PMV, tuttavia va ribadito che parte della comunità scientifica preferisce utilizzare altri indici che non sono però forniti dal software.

1.2.4. UHI Intensity (UHII)

L'intensità dell'isola di calore urbana è tipicamente misurata come *la differenza di temperatura tra l'aria all'interno dell'Urban Canopy Layer, e quella misurata in una zona*

giving the environmental conditions considered acceptable for general thermal comfort as well as those representing local discomfort. *It is applicable to healthy men and women exposed to indoor environments where thermal comfort is desirable, but where moderate deviations from thermal comfort occur, in the design of new environments or the assessment of existing ones.*" - ISO 7730: Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. (2005, p.1)

rurale al di fuori dell'area cittadina (ΔT_{u-r}). Notoriamente, ogni insediamento urbano genera un'isola di calore che varia a seconda della sua dimensione. Osservazioni condotte da vari studi hanno comunque evidenziato delle caratteristiche comuni: la differenza di temperatura si manifesta sempre come una sorta di "nuvola" di aria calda che presenta i valori maggiori proprio in prossimità del centro urbano. Nelle zone periferiche della città, quelle che formano la zona suburbana, si osserva invece che le temperature cambiano in maniera molto più rapida e per questo il ΔT_{u-r} aumenta più lentamente. L'intensità dell'isola di calore è solitamente indicata come la massima delle differenze di temperature registrate; tale situazione tende a verificarsi quasi sempre di notte, in condizioni di cielo limpido e poco vento. Quindi mentre i siti rurali si raffreddano rapidamente dopo il tramonto, le aree urbane si raffreddano più lentamente. Non solo, ma la differenza delle temperature tra le zone urbane e rurali cresce anche nel tempo dopo il tramonto, raggiungendo il massimo gradiente dopo circa 4 ore (Mills G. 2004, pp.15-18).

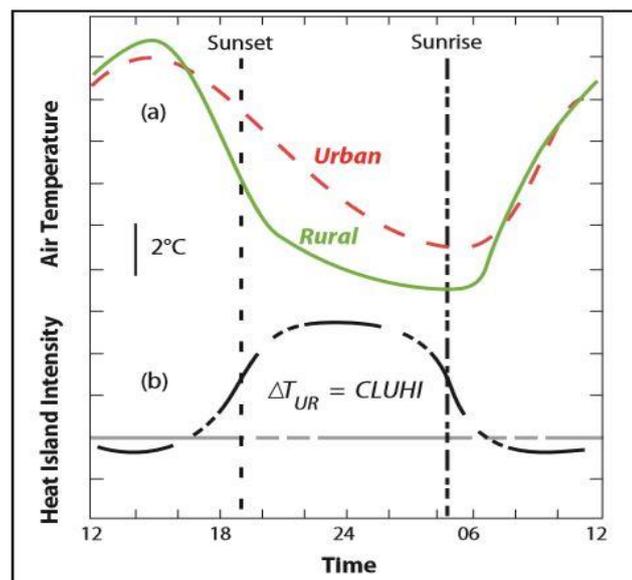


Figura 33 (a) Tipica variazione temporale tra temperatura della zona urbana e zona rurale, in condizioni di cielo sgombro e vento debole. L'intensità di UHI è prodotta dalla differenza nella velocità di raffreddamento delle due aree, che è molto più pronunciata nelle notti serene e con vento debole, quando le aree rurali si raffreddano più velocemente di quelle urbane. L'intensità (b) dell'UHI cresce tipicamente a partire dal medio-tardo pomeriggio, e raggiunge il massimo alcune ore dopo il tramonto (Chow e Roth 2006, p.26), anche se in alcuni casi il picco massimo viene raggiunto appena dopo l'alba (Wilby 2003, p.58) (fonte: EPA Compendium Basics 2008)

Dal momento che la letteratura riguardo ai fenomeni di isola di calore nelle città medio-piccole come Padova (che, dati di gennaio 2014, conta 209839 abitanti, <http://demo.istat.it/bilmens2014gen/index.html>) risulta molto scarsa, occorre fare riferimento a valori indicativi di altri studi. Oke T. R. (1987) afferma che *la temperatura*

media su base annua di una città di un milione di abitanti può risultare da 1 a 3 °C più elevata rispetto alle campagne circostanti e, durante le notti caratterizzate da poco vento, questa differenza di temperatura è in grado di salire fino a 12 °C. Altre osservazioni hanno invece permesso di stimare, in mancanza di dati di riferimento, dei valori approssimativi di intensità dell'isola di calore ricercando una relazione empirica con la popolazione della città: ipotizzando costanti alcuni parametri, come il clima, la topografia, le aree rurali, le condizioni meteo (giornata tipicamente estiva, cielo sereno), l'ora del giorno (notte), e l'altezza dal suolo della valutazione della temperatura (tra 1.5 e 2 metri), si è notata una proporzionalità tra il $\log_{10} P$ e l'UHI Intensity (Oke T. R. 1976). Per le città del Nord America, la relazione proposta è:

$$\Delta T_{u-r \text{ Max}} = 3.06 \log(P) - 6.79$$

Tale equazione esprime una varianza pari a 0.7 con un errore standard di ± 0.7 °C. In Europa invece vale, in linea di massima:

$$\Delta T_{u-r \text{ Max}} = 2.01 \log(P) - 4.06$$

che esprime una varianza di circa il 74 % con un errore di ± 0.9 °C. Il legame tra P e ΔT_{u-r} viene rappresentato dalle regressioni lineari in figura (Oke T. R. 1973); il primo grafico (Figura 34), presenta le modifiche avanzate da Matzarakis alle valutazioni di Oke del 2001; il secondo (Figura 35) quelle di Chow e Roth (2006).

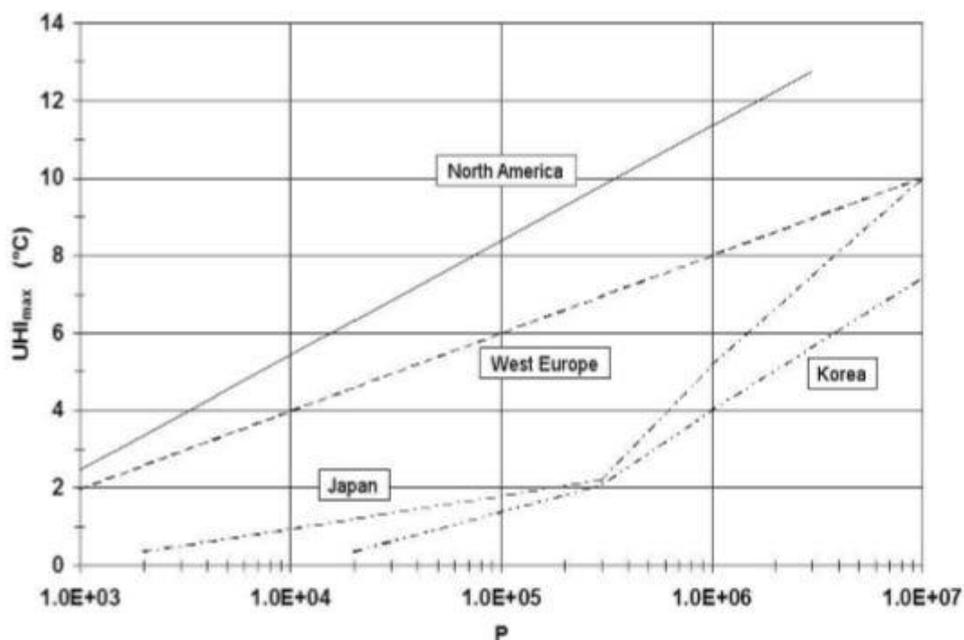


Figura 34 Correlazione tra il massimo effetto di isola di calore urbana (UHI_{max}) e la popolazione P delle città in Nord America, Europa occidentale, Giappone e Corea (di Matzarakis 2001, modificato dopo Oke 1973, 1982; Park 1986) (fonte: Review Progetto UHI 2013)

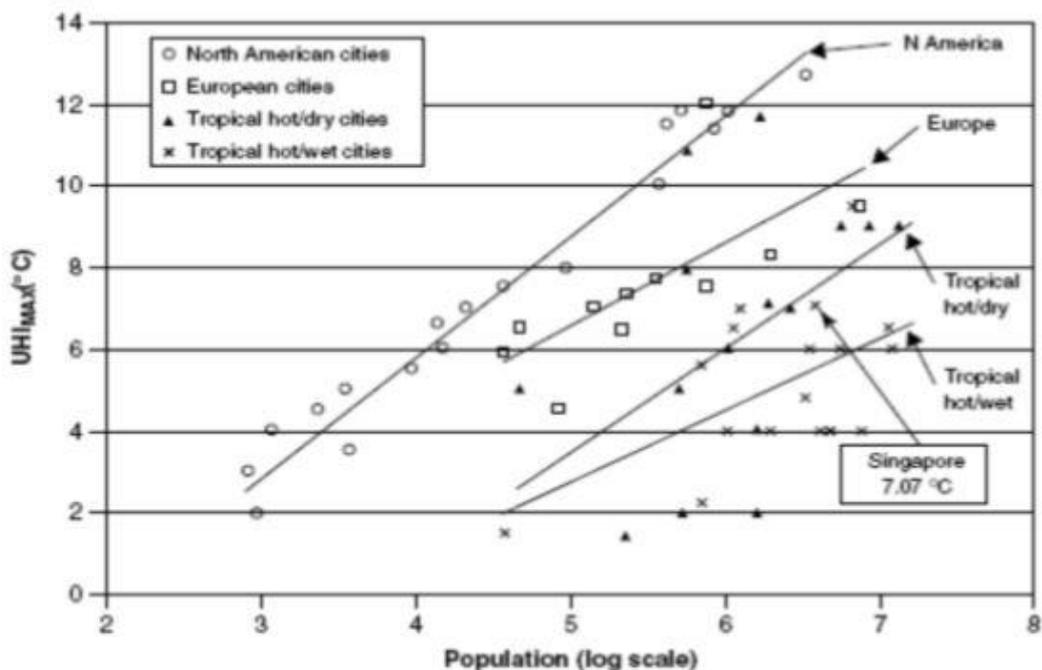


Figura 35 Correlazione tra il massimo effetto di isola di calore urbana (UHI_{max}) e la popolazione P . Simboli diversi sono usati per le città in diverse zone climatiche. Le linee continue sono le corrispondenti linee di regressione (fonte: Chow W. T. L. e Roth M. 2006)

La pendenza delle rette cambia a seconda delle varie parti del mondo: questo è in parte dovuto alle differenze nella natura delle città (geometria delle strade, spazi verdi), e in parte anche alle differenze nel potenziale di raffreddamento delle zone rurali circostanti (alcune di queste infatti possono essere deserti, terre coltivate, risaie, aree innevate ecc.) (Roth M. 2002, p.4).

I risultati raccolti invece da Argigiou A. et al. (2001, p.202) comprendono studi in tutto il mondo: essi notano che le intensità delle isole di calore per le città europee spaziano tra i 2.5 °C di Londra ai 14 °C di Parigi, mentre a livello mondiale i valori vanno da 10.1 °C (Calgary, Alberta), a 4 °C (Il Cairo) e fino a 2 °C (Johannesburg e San Paolo). Nel centro delle aree metropolitane si assiste ai picchi di intensità maggiori, anche superiori ai 10 °C (Asimakopoulos et al. 2001).

La letteratura italiana su questo fronte è molto ridotta: alcune analisi sono state effettuate a Roma, ed esse hanno mostrato come nella capitale vi sia la presenza di un'isola di calore dall'intensità di circa 5 °C (Carnielo E. et al. 2012, p.2). Nel caso di Modena, l'area urbana si mostra più calda rispetto all'area rurale: le differenze di temperatura più marcate si verificano di notte, soprattutto nella stagione estiva quando il ΔT atmosferico rimane spesso tra 2 °C e 5 °C ma raggiunge eccezionalmente valori di 8 °C (Dipartimento di statistica dell'Università di Bologna, 2005).

Bonan G. (2002, cap.14 p.3-4) definisce da suoi studi un'altra relazione tra il logaritmo della popolazione e l'intensità dell'isola di calore:

$$\Delta T_{u-r \text{ Max}} = 5.21 \log(P) - 11.24 \quad \text{Nord America}$$

$$\Delta T_{u-r \text{ Max}} = 3.02 \log(P) - 3.29 \quad \text{Europa}$$

Nel caso di Padova quindi, la letteratura fornisce indicativamente i seguenti valori di riferimento di UHI:

Studio	Valore Previsto*
Bonan G. (2002)	12.7 °C
Chow e Roth (2006)	7.7 °C
Matzarakis A. (2001)	6.8 °C
Oke T. R. (1976)	6.6 ± 0.9 °C

Tabella 3 Dati previsionali sull'intensità dell'isola di calore a Padova

* per i dati vedere APPENDICE

1.3. I punti scelti per l'analisi

Data la diversità delle superfici e l'estensione dell'area di studio di Prato della Valle, risulta conveniente individuare sette punti caratteristici per posizione e tipologia di terreno nella piazza, al fine di indentificare le differenze microclimatiche (Figura 36).

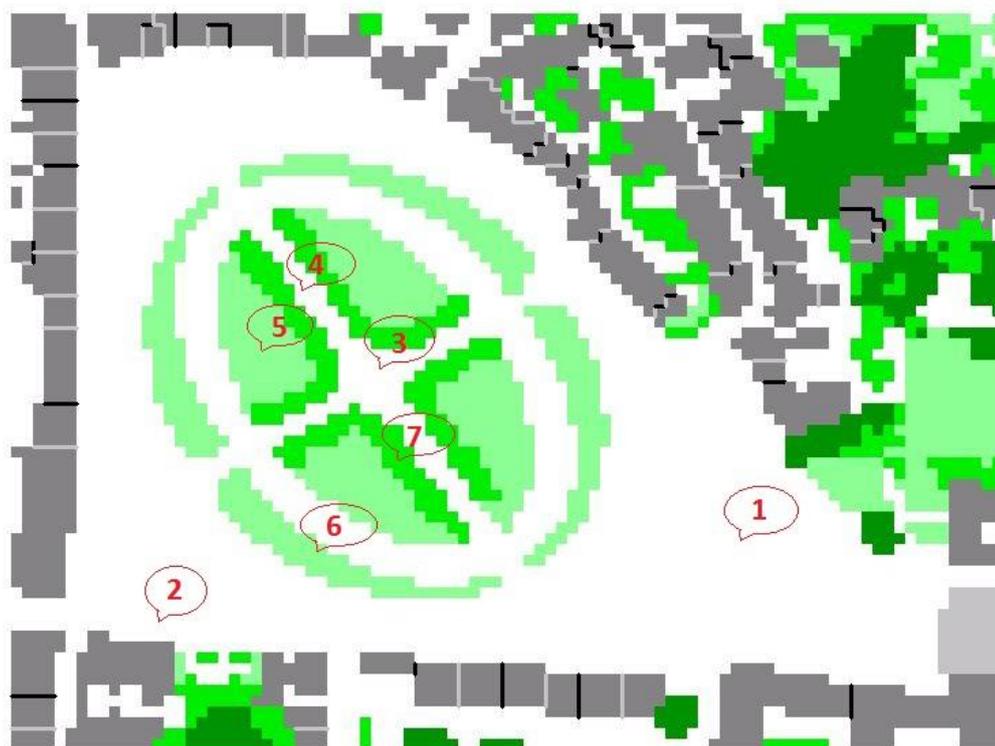


Figura 36 Punti scelti per l'analisi. Immagine di base da ENVI-met

Posizione 1	Asfalto - lontano dagli edifici
Posizione 2	Asfalto - vicino agli edifici
Posizione 3	Ghiaia - vicino all'acqua
Posizione 4	Ghiaia - lontano dall'acqua
Posizione 5	Prato - lontano dall'acqua
Posizione 6	Prato - vicino all'acqua
Posizione 7	Prato - Alberi

Tabella 4 Caratteristiche dei sette punti scelti per l'analisi

2. La simulazione di *Via Roma*

2.1. Introduzione

Per poter confrontare le condizioni climatiche che si realizzano nella zona urbana con quelle di un ambiente rurale e quantificare effettivamente le differenze in termini di temperatura e comfort occorre raccogliere i dati relativi ad un'area di campagna. Per l'occasione viene scelta *via Roma*, che si addentra nel territorio agricolo poco fuori Padova, nella periferia sud est della città, tra Ponte San Nicolò e Legnaro. In tal caso, per rendere i dati più confrontabili con quelli delle altre tre simulazioni (Scenario As Is, Scenario Green e Scenario Cool Pavements) risulta necessario realizzare una quarta simulazione che riguarda proprio il territorio di *via Roma*. L'area presenta una strada sterrata, sulla quale si è deciso di rilevare le temperature, ed è contraddistinta dalla scarsità di edifici, dall'adiacenza di un corso d'acqua e dalla vicinanza di terreni coltivati.



Figura 37 Punto scelto per l'analisi della temperatura presso *Via Roma* (fonte: Google Earth)



Figura 38 *Via Roma* (fonte: Google Earth)

Per quanto riguarda i dati di input con cui inizializzare il modello in ENVI-met, sono stati adottati interamente i valori di partenza per la configurazione di tutte e tre le simulazioni da svolgere a Prato della Valle, con l'unica eccezione della temperatura iniziale: è ragionevole supporre infatti che la temperatura iniziale (che, come suggerito dal team di ENVI-met, è bene sia posta pari alla temperatura giornaliera media del giorno precedente l'inizio della simulazione), sia leggermente minore di quella rilevata nel centro città; per questo motivo, le analisi dei dati dal 1992 al 2011 della stazione ARPAV di Legnaro hanno indicato, per il giorno 27 luglio, una temperatura media di 24 °C, contro i 26 utilizzati nelle simulazioni di Prato della Valle. Si è deciso di non far variare gli altri dati per due ragioni: in primo luogo le variazioni sarebbero minime e non comporterebbero alcuna miglioria ad un file di inizializzazione già approfonditamente studiato e adeguato per il clima di Padova; in secondo luogo, in questo modo i risultati finali saranno determinati dall'effettiva risposta data dagli scenari e non da una differenza nel file di configurazione.

2.2. I risultati

Dal momento che non sono presenti ostacoli, il fattore di vista del cielo nel punto scelto è prossimo ad uno e quindi gli scambi termici avvengono con notevole facilità. In aggiunta all'effetto legato all'elevato SVF, ulteriori elementi contribuiscono ad abbassare la temperatura dell'aria nell'ambiente rurale rispetto ai siti urbani: l'assenza di asfalto che assorbe una notevole quantità di radiazione solare, la mancanza di edifici che permette al vento di compiere la sua azione mitigatrice e la maggiore emissività, la minor inerzia termica e la maggior capacità di accumulo idrico delle superfici agricole; tali proprietà inoltre permettono anche di raggiungere delle migliori condizioni notturne di benessere. I dati relativi all'andamento della temperatura giornaliera nella giornata del 29 luglio sono mostrati nella Figura 39. Essi mostrano che la temperatura dell'aria oscilla tra i 20 e i 30 °C, raggiungendo valori intorno ai 22 / 24 °C, nelle 3 / 5 ore successive al tramonto, quando l'intensità dell'isola di calore dovrebbe farsi sentire in maniera maggiore.

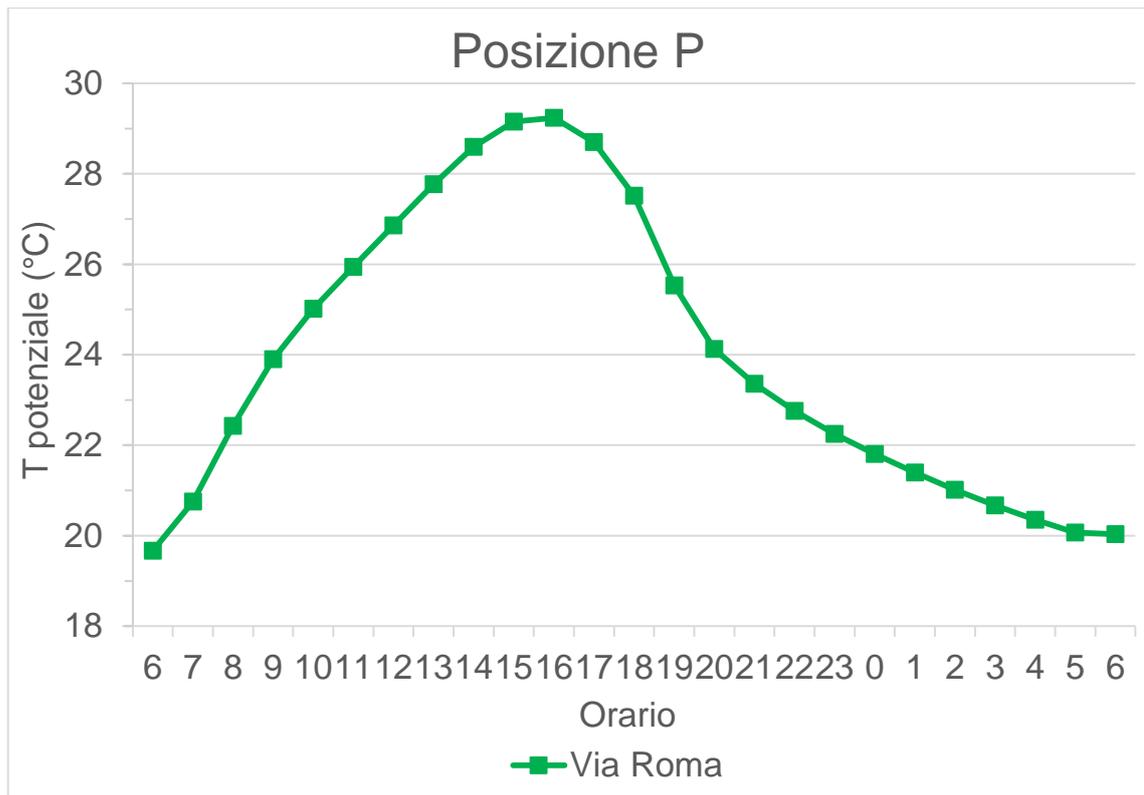


Figura 39 Andamento temperatura giornaliera dell'aria a 1.5 m dal suolo

3. La simulazione dello *Scenario Stato di Fatto*

3.1. Introduzione

La prima simulazione riguarda lo “stato di fatto”, vale a dire la situazione così come si presenta nella realtà. L'utilità di questa simulazione, definita *Scenario As Is*, verte nella possibilità di calcolare i dati riguardanti la realtà esistente, e ottenere perciò l'intera serie di informazioni sulla Temperatura Potenziale, la Temperatura Media Radiante e gli indici PMV e PPD che serviranno a misurare l'intensità dell'isola di calore presso Prato della Valle. I risultati provenienti dallo Scenario As Is, infatti, saranno utilizzati come termine di paragone per dimostrare l'efficienza dei due scenari di mitigazione proposti per migliorare le condizioni e il comfort termo-igrometrico nella piazza.

3.2. I risultati

Un primo dato indicativo della temperatura potenziale che si può registrare nella piazza proviene dalle mappe termiche (Figura 40) che LEONARDO 14 fornisce:

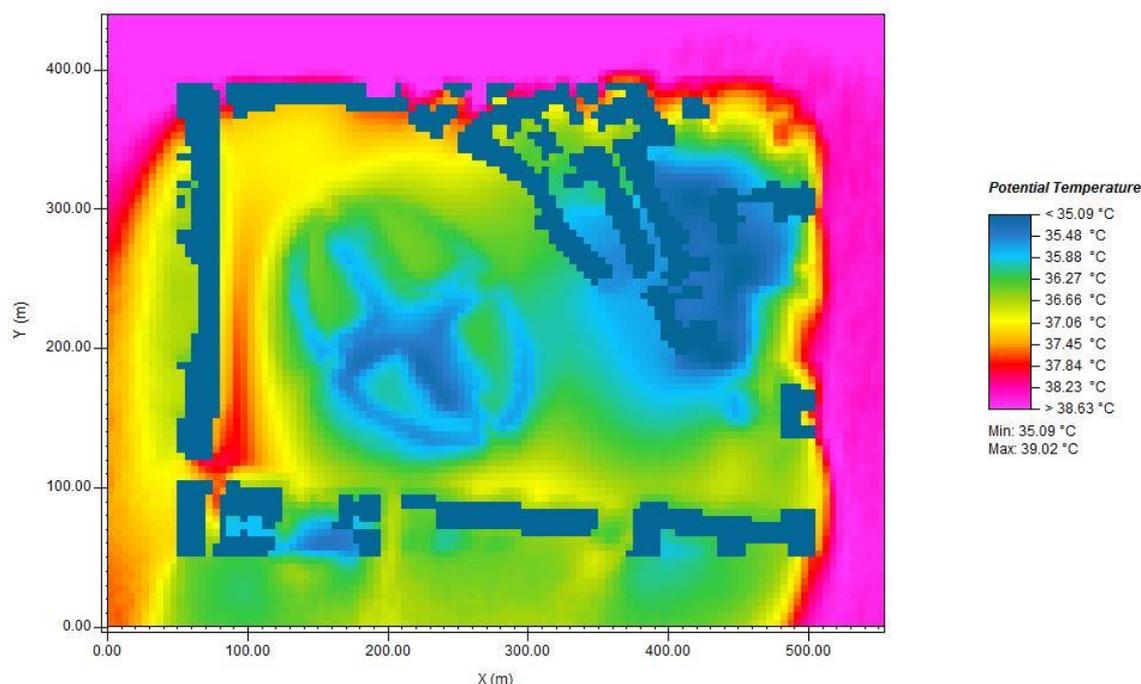


Figura 40 Mappa termografica della temperatura potenziale dell'aria a 1.5 m dal suolo (29 luglio, ore 15:00 - Simulazione As Is); (fonte: LEONARDO 14)

Come si può notare dalla legenda, la temperatura risulta molto alta in tutta la piazza (ore 15:00): le differenze maggiori si riscontrano comunque tra le aree dell'isola e quelle ricoperte da asfalto che raggiungono, a 1.5 metri d'altezza dal suolo, temperature che sfiorano i 38 °C, contro i 36 °C delle zone erbose (quasi 35 °C sotto gli alberi).

La situazione vede un abbassamento generalizzato di circa 8-9 °C della temperatura nel corso della notte, per effetto della scomparsa della radiazione solare, anche se rimane comunque poco marcato il gradiente termico tra zone verdi e asfalto. La leggera differenza tra le due aree, dell'ordine del grado, è spiegabile a partire dal loro comportamento differente: le prime si raffreddano anche grazie ai processi di evapotraspirazione, mentre l'asfalto subisce un raffreddamento molto più lento per effetto dello scambio radiativo con la volta celeste dell'energia assorbita in quantità maggiore durante il giorno.

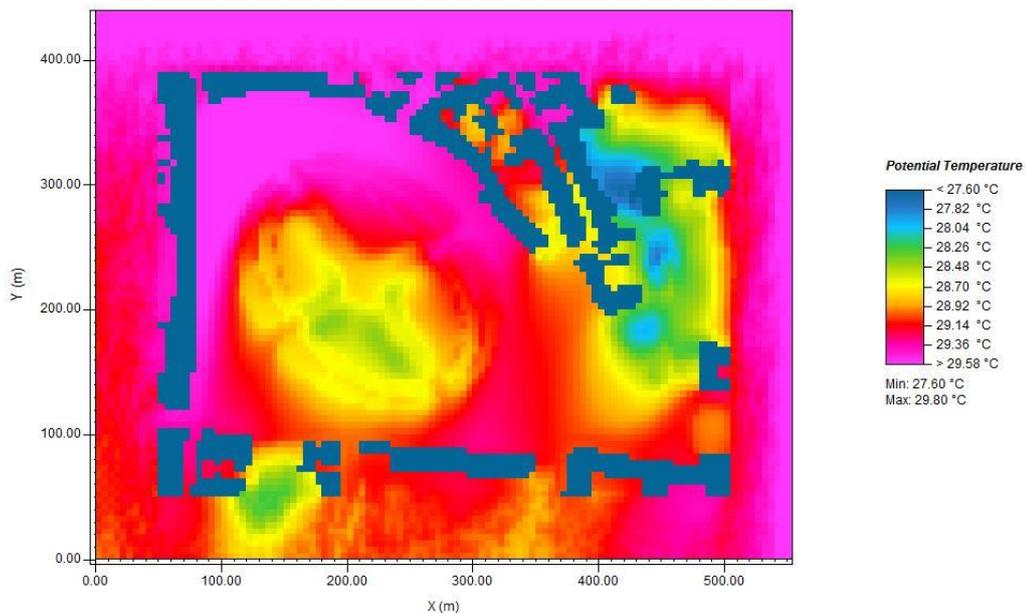


Figura 41 Mappa termografica della temperatura potenziale dell'aria a 1.5 m dal suolo (30 luglio, ore 3:00 - Simulazione As Is); (fonte: LEONARDO 14)

Singolarmente i vari punti mostrano dei valori di temperatura in cui le differenze non risultano molto accentuate; nonostante si tratti di punti disposti in zone diverse della piazza e soprattutto con tipologie di terreno differenti (asfalto, erba, ghiaia), la temperatura potenziale differisce al massimo di circa un grado.

	Pos.1	Pos.2	Pos.3	Pos.4	Pos.5	Pos.6	Pos.7
Data	29-lug	29-lug	29-lug	29-lug	29-lug	29-lug	29-lug
Orario	15:00	15:00	15:00	15:00	15:00	15:00	15:00
T potenziale (°C)	36.1	36.9	35.8	36.0	36.2	35.7	35.4
UHI Intensity (°C)	6.9	7.7	6.6	6.9	7.0	6.5	6.2
T media radiante (°C)	80.2	40.9	70.9	70.9	81.3	65.0	36.8

PMV	6.7	3.6	5.9	6.1	6.8	5.3	3.1
PPD (%)	100	100	100	100	100	100	99.5

Tabella 5 Dati ottenuti dalla simulazione As Is, nei sette punti scelti, alle ore 15:00. Gli indici di comfort si riferiscono ad un soggetto in abiti estivi (0.5 clo), in leggera attività (116 W)

	Pos.1	Pos.2	Pos.3	Pos.4	Pos.5	Pos.6	Pos.7
Data	30-lug	30-lug	30-lug	30-lug	30-lug	30-lug	30-lug
Orario	3:00	3:00	3:00	3:00	3:00	3:00	3:00
T potenziale (°C)	29.1	29.3	28.8	29.0	28.8	28.7	28.6
UHI Intensity (°C)	8.4	8.6	8.1	8.4	8.1	8.1	8.1
T media radiante (°C)	23.0	22.5	18.5	18.4	19.6	17.5	18.8
PMV	1.1	1.1	0.8	0.8	0.8	0.7	0.8
PPD (%)	28.8	30.5	17.4	18.5	19.6	15.2	17.1

Tabella 6 Dati ottenuti dalla simulazione As Is, nei sette punti scelti, alle ore 3:00. Gli indici di comfort si riferiscono ad un soggetto in abiti estivi (0.5 clo), in leggera attività (116 W)

In un giorno tipicamente estivo è normale che le temperature abbiano al massimo un grado di differenza: valori analoghi sono stati riscontrati da Iziomon Moses G. et al. (1999, p.77) negli studi effettuati nella città di Friburgo (Germania), dove la temperatura giornaliera registrata sotto un albero è risultata molto prossima (<1 °C) a quella misurata su una superficie coperta da asfalto, proprio come nel caso delle temperature delle posizioni 1 e 7.

Il comportamento delle aree coperte dai prati, poi, risulta pressoché simile a quello dell'asfalto per la quasi totalità delle ventiquattro ore analizzate: non è una novità nemmeno questa, dal momento che anche altre analisi realizzate con ENVI-met hanno riscontrato la medesima situazione. Bruse M. et al. (2009, p.2) mostrano proprio come l'effetto sul microclima del terreno naturale sia esattamente lo stesso dell'asfalto in un caso molto particolare, vale a dire quando l'erba non viene irrigata durante le ondate di caldo. Non appena infatti la terra si secca, il coefficiente di trasferimento di calore si riduce, determinando un maggior riscaldamento degli strati più superficiali. Inoltre a causa della variazione dell'albedo del terreno (e anche dell'erba), una quota maggiore di radiazione solare viene riflessa nell'ambiente, comportando una temperatura radiante maggiore per un individuo che si trovi su quella superficie (Bruse M. et al. 2009, p.2).

Piuttosto che l'allineamento dei dati della simulazione As-Is con quelli di altre simulazioni della letteratura, sembra opportuno far notare soprattutto come l'aspetto dell'irrigazione non possa essere lasciato in secondo piano per quanto riguarda l'azione benefica della vegetazione urbana sul clima. Occorre ricordare infatti come più del 99 % dell'acqua assorbita dalle piante venga traspirato o incorporato nei vacuoli, mentre solo il restante 1 % venga utilizzato per il noto processo di fotosintesi. Ciò significa che in una giornata molto calda, quando parecchia acqua è disponibile nel terreno, la pianta può traspirare molto. Quest'azione fa variare ovviamente gli scambi di calore, dal momento che, se la quantità d'acqua che evapora è maggiore, maggiore sarà l'energia scambiata sotto forma di calore latente, e meno sotto forma di calore sensibile: questo processo induce la pianta a raffreddarsi maggiormente e a raffreddare anche l'ambiente circostante. Quando invece il suolo inizia a seccarsi, non ci sarà più acqua da far evaporare e quindi la pianta inizierà a chiudere gli stomi delle proprie foglie interrompendo gli scambi con l'ambiente. In tal caso il calore sensibile aumenterà nuovamente e non ci sarà più alcun effetto di mitigazione rilevante se non grazie all'ombrosità da esse prodotta (Trimmel H. 2008, p.26).

L'impossibilità però di simulare un terreno irrigato fa parte dei limiti del software: esso infatti è in grado di sviluppare autonomamente l'andamento diurno di tutte le variabili atmosferiche in gioco. Questo andamento viene ricreato sulla base della posizione geografica del sito da simulare, dei dati di input e di alcune condizioni al contorno che ENVI-met utilizza. Mentre tale metodo offre un facile approccio all'utente, esso non permette né di convalidare le simulazioni con delle misure reali, né di simulare specifici scenari meteorologici e ambientali, come per esempio l'impatto sul modello di un cambiamento improvviso nel clima (forte temporale estivo) o l'irrigazione del terreno. ENVI-met infatti non implementa la totale possibilità per l'utente di utilizzare il meccanismo di "forzatura" delle variabili: "forzare" alcune variabili significa definire manualmente la variazione diurna di tutti i parametri meteorologici più rilevanti del sistema (Huttner S. 2012, p.61). Le sole variabili che possono essere forzate in ENVI-met² sono: la velocità e la direzione del vento, la temperatura potenziale dell'aria, l'umidità specifica, la radiazione solare, la copertura delle nuvole e la concentrazione di particelle nell'aria. Manca quindi la possibilità di agire sull'umidità del suolo e sul

² Si fa riferimento in tal caso alla sola versione ENVI-met 3.1 beta 5 per sviluppatori; per il pubblico la possibilità di forzare le variabili sarà data solo con la versione V 4.0, disponibile a partire da ottobre 2014 - per approfondimenti www.envimet.com, Sezione: User Forum > ENVI-met 3.1 > Beginner's Corner > Name of Topic: "User-defined ABC".

contenuto d'acqua del terreno che invece darebbe l'opportunità di simulare l'irrigazione di un prato.

A fronte di tali limitazioni del modello, si è voluto evidenziare, dai dati della simulazione, come una maggiore quantità di acqua nel terreno permetta un effetto di evapotraspirazione maggiore, con conseguente abbassamento della temperatura dell'aria. Se infatti confrontiamo i dati riguardanti il contenuto d'acqua nel terreno (espresso in m³ di acqua per m² di terreno) del giorno 28/07 alle ore 23 (quando ormai i dati sono già stabili, dal momento che sono passate ormai 41 ore dall'inizializzazione) con quelli, alla medesima ora, del giorno seguente, notiamo come il primo sia maggiore per il fatto che la radiazione solare non ha ancora fatto evaporare l'intera quantità d'acqua presente nel terreno. Si nota dai dati come, per effetto dell'evaporazione più accentuata, la temperatura superficiale della zona coperta dall'erba sia inferiore di almeno 0.4 °C rispetto a quella della stessa zona nel giorno seguente.

	Posizione 5	
Data	28-lug	29-lug
Orario	23:00	23:00
Contenuto d'acqua (m ³ /m ²)	0.0639	0.0385
T superficiale (°C)	24.6	25.6
T potenziale (°C)	29.9	30.3

Tabella 7 Dati relativi al contenuto d'acqua nel terreno, alla temperatura superficiale e quella dell'aria, nella posizione 5

Sulla base di questo, l'irrigazione delle aree verdi assume una notevole importanza, dal momento che, qualora il terreno non venisse regolarmente innaffiato, il suo comportamento, molto simile a quello dell'asfalto, risulterebbe controproducente per la qualità della vita e il comfort urbano. Non solo, ma i costi di piantumazione della vegetazione e relativa manutenzione non sarebbero ripagati in termini di vantaggi per il benessere termico e, nel caso dei *green roofs*, per la riduzione dei consumi energetici per il condizionamento. Dello stesso avviso sono Bruse M. et al. (2008, p.311) che fanno notare come le simulazioni sul micro-clima di ENVI-met possano essere usate per stimare l'effetto del cambiamento delle condizioni climatiche sul comfort termico umano nelle città. Queste simulazioni - continuano - mostrano anche che gli spazi verdi, che sono elementi della pianificazione urbana normalmente installati per migliorare le

condizioni di comfort termico riducendo la temperatura e la radiazione diretta, possono reagire al contrario se non irrigate regolarmente durante le ondate di calore.

Si ricorda poi come specificatamente la temperatura potenziale della posizione 3, quella sulla ghiaia vicino alla fontana, si presenti certamente sovrastimata. Questo è dovuto al fatto che ENVI-met non è in grado di simulare sistemi d'acqua in movimento come fiumi o fontane (Bruse M. e Fleer H. 1998a, pp.216-221): per tale ragione, anche se la simulazione non lo mostra, occorre ricordare che la presenza di una fontana porta con sé anche una componente di acqua nebulizzata che entra direttamente nell'aria abbassando la temperatura circostante e rendendo maggiormente gradevole lo stazionamento di un individuo nei pressi di essa, con conseguenze quindi sia sui valori della temperatura media radiante, sia del PMV (Bisson M. 2010, pp.53-54).

Nella notte la temperatura più alta dei sette punti risulta quella della posizione 2; il motivo è legato al fatto che durante le ore notturne i muri degli edifici rilasciano il calore accumulato durante la giornata per effetto della radiazione solare. La differenza con la temperatura sull'asfalto lontano dagli edifici risulta comunque di soli 0.2 °C.

Per quanto riguarda l'andamento della temperatura media radiante, intorno alle 15:00 la distribuzione è pressoché totalmente uniforme sulla piazza, mentre presenta valori nettamente differenti sulle diverse zone dell'isola Memmia, subito individuabili dalla mappa termica (Figura 42). Non marcata è la differenza tra la TMR misurata sull'asfalto e quella sul prato, mentre per le altre aree risulta un gradiente più accentuato. Questo è dovuto al fatto che la temperatura media radiante è fortemente influenzata dall'ombrosità prodotta dagli alberi e dagli edifici. Rispetto ai valori massimi (che si registrano intorno alle 15:00 sulle aree completamente soggette alla radiazione solare), attorno agli 80 °C, le zone che vanno in ombra, vale a dire le posizioni 2 e 7 e in seguito 4, presentano valori inferiori di ben 40 °C. Non è raro che si misurino valori oltre i 30 °C di differenza della TMR: a conferma di questo, sono presenti le simulazioni di Iziomon Moses G. et al. (1999, p.77) effettuate in una strada di Friburgo fiancheggiata da due file di alberi, e da Mayer H. (1993, pp. 957-963) che a Monaco rileva la medesima riduzione causata dall'effetto oscurante delle fronde di alcuni pioppi in una calda giornata estiva.

Non è nemmeno raro registrare questo tipo di valori giornalieri così alti della temperatura media radiante: un'ulteriore analisi effettuata presso Friburgo attraverso ENVI-met ha mostrato valori di TMR che sfiorano gli 80 °C, nella giornata del 21 giugno, in condizioni di terreno molto secco, temperature oltre i 35 °C e vento pari a 2.0 m/s a 10 m dal suolo, vale a dire nelle medesime circostanze in cui si svolge la simulazione As-Is (Bruse M. et al. 2008, pp.307-312).

Nella notte la differenza tra le varie zone della piazza resta consistente; ciò dipende da un diverso assorbimento della radiazione solare nelle ore diurne: le aree più sottoposte alla radiazione ad onde corte, quella solare, per effetto di una minor albedo, o solo semplicemente perché ne sono sottoposte per un tempo più lungo durante la giornata (perché non vanno in ombra), acquistano maggiore energia e raggiungono una temperatura superficiale maggiore. Durante la notte poi, quando la radiazione solare non è più presente, le superfici irradiano un'energia ad onde lunghe tanto maggiore quanto maggiore la loro temperatura (proporzionalità con fattore esponenziale 4 - legge di Stefan-Boltzmann). Per tal ragione la TMR nella notte assume valori maggiori in certe zone rispetto ad altre.

Per la temperatura media radiante dei punti scelti, essa presenta l'andamento tipico rappresentato in Figura 29. Le sole eccezioni si riscontrano per la posizione 2, che subisce una flessione nel valore a partire da mezzogiorno quando inizia ad andare in ombra. Valori generalmente più bassi per l'intera giornata si riscontrano invece per la posizione 7 dal momento che si trova sempre investita dall'ombrosità generata dall'albero. Da non dimenticare invece è l'andamento della temperatura media radiante della posizione sul prato vicino all'acqua: l'effetto rinfrescante del canale attorno all'isola Memmia viene percepito per il fatto che, nel confronto con la TMR della posizione 5, che si trova anch'essa sul prato ma lontana dall'acqua, la temperatura è costantemente inferiore nelle 24 ore prese in analisi. Subisce invece un calo intorno alle 17:00, la temperatura media radiante della postazione sulla ghiaia lontano dall'acqua (4), per il fatto che, trovandosi tra due file di alberi, raggiunge in quell'ora uno stato di ombra.

In aggiunta ai normali dati meteorologici, ENVI-met fornisce anche delle informazioni biometeorologiche attraverso gli indici di comfort PMV e PPD. L'andamento generale del primo risulta molto interessato dall'esposizione alla radiazione solare che già dalle prime ore della mattina si mostra molto consistente. Su tutta la piazza, il valore sale molto rapidamente col passare delle ore superando nettamente il valore massimo della scala utilizzata da ENVI-met (Figura 31). Questo fatto è comune nelle simulazioni di ENVI-met in cui si analizza il comfort termico urbano nella stagione estiva e in condizioni di stress termico: occorre ricordare infatti che qualunque valore superiore all'estremo della scala indicatrice, oltre il quale si delinea una percezione di caldo molto accentuata (*“extreme hot”*), perde qualunque validità puramente numerica, ed assume solo un connotato indicativo della situazione di stress termico estremo (Bruse M. 1998). Questo equivale a dire che qualunque valore che eccede 4 possiede la stessa importanza dal momento che qualsiasi misura al di sopra dell'estremo corrisponde ad una condizione climatica di caldo quasi insopportabile, tipico delle giornate estremamente torride che fanno segnare

i rischi per la salute maggiori per la popolazione nelle città italiane ed europee. A tal proposito infatti il livello fatto segnare dal PPD nelle occasioni in cui l'indicatore di Fanger risulta fuori range è pressoché sempre posto al 100 %.

Bruse M. (2005, pp.139-140) mostra come il 75 % delle grids della sua simulazione, che rappresenta un'area racchiusa tra 4 edifici e quindi più soggetta all'ombrosità da essi prodotta, registri valori di PMV maggiori di 4 alle ore 14:00.³ Dati riferiti al Predicted Mean Vote fuori dai range ASHRAE e della scala di ENVI-met sono stati riscontrati anche da Candidi P. et al. (2006, p.4): analizzando uno scenario che ricostruisce un quartiere di Roma con caratteristiche simili a quelle della simulazione As-Is, l'equipe dell'Università La Sapienza individua per le ore 15:00 del 25 luglio valori oltre 4.8 per il PMV per le zone asfaltate (non viene citato alcun valore massimo, viene solo accennato il fatto che i dati superano questo limite); spaziano invece tra 2.8 e 3.5 i dati per quelle coperte da alberi, in assoluta linea con quelli per la posizione 7 (3.1). Da notare però che lo stress termico nella simulazione romana risulta meno incisivo per il fatto che i dati si basano su valori di input leggermente differenti: velocità del vento di 3 m/s, invece che 2 m/s, umidità specifica di 3.5 g/kg invece che 7 g/kg, e temperatura iniziale di 298 K invece che 299.1 K. Honjo T. (2009, p.45) riporta come Thorsson et al. (2004) abbiano registrato valori del PMV addirittura fino a 9, a significare quindi che i valori al di fuori del range della scala hanno tutti il medesimo peso; nell'analisi essi poi si sono concentrati maggiormente sulla discrepanza tra il dato calcolato e l'effettiva insoddisfazione di una serie di persone intervistate. Anche Baker N. et al. (2001, p.232) hanno presentato risultati simili, registrando valori fino a 7.

Nella notte invece la situazione si presenta notevolmente diversa, mostrando un deciso calo del valore del PMV a partire dalle prime ore della sera e assicurando alle varie aree del modello condizioni molto più favorevoli al comfort, sebbene la predominanza della sensazione sia quella di leggero caldo. Condizioni di benessere (al di sotto del valore 1) possono essere percepite solo sull'erba e sotto gli alberi dove la quota dell'indicatore di comfort si aggira tra 0.65 e 0.95, a cui corrispondono invece percentuali di persone insoddisfatte tra il 15.2 e 19.6 %.

L'intensità dell'isola di calore si presenta in maniera generalizzata molto elevata su tutta la piazza e raggiunge il valore massimo di 8.4 °C alcune ore dopo il tramonto e tale si mantiene durante la notte, proprio come suggerisce in unanime accordo la letteratura. Rispetto all'intensità massima prevista sulla base di tre dei quattro modelli proposti nel

³ Maggiori informazioni possono essere trovate a riguardo nell'articolo "Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. Environmental Modelling and Software" - Bruse M. e Fleer H., 1998b, pp.373-384

paragrafo 1.2.4, i valori misurati da ENVI-met risultano leggermente più alti, mostrando comunque però il tipico innalzamento della differenza tra la temperatura urbana e quella delle zone rurali intorno alle ore serali. Risultano comunque pienamente concordi con la letteratura generale e ottimamente inseriti nello scenario dello studio dell'isola di calore delle città europee e italiane. Nelle analisi effettuate da Busato F., Lazzarin R. e Noro M. (2014) attraverso l'ausilio di un termo-igrometro nel centro storico e dintorni di Padova, e poi proprio presso Prato della Valle, l'intensità si è mostrata spaziare genericamente tra 1 e 7 °C nei mesi di luglio e agosto, mentre più specificatamente tra i 3 e i 6 °C nella piazza. Da notare però in questo caso come l'intensità faccia riferimento a misurazioni effettivamente svolte sul campo, soggette a una diversissima serie di parametri meteorologici peculiari dello stato della temperatura nel preciso giorno del rilievo e ad una determinata ora. Il motivo per cui la differenza di temperatura misurata da ENVI-met sia maggiore è semplicemente spiegata dal fatto che le condizioni utilizzate dal software sono quelle "perfette" per cui si formi l'intensità massima dell'isola di calore, vale a dire in presenza di cielo limpido, poco vento, in una situazione di stress termico che si prolunga da più giorni, e per di più in una zona con tanto asfalto e molto riparata dal vento dagli edifici. I valori ottenuti quindi rappresentano l'estremo superiore, preciso quanto più possibile, del valore registrabile che quantifica il fenomeno dell'isola di calore nel centro di Padova.

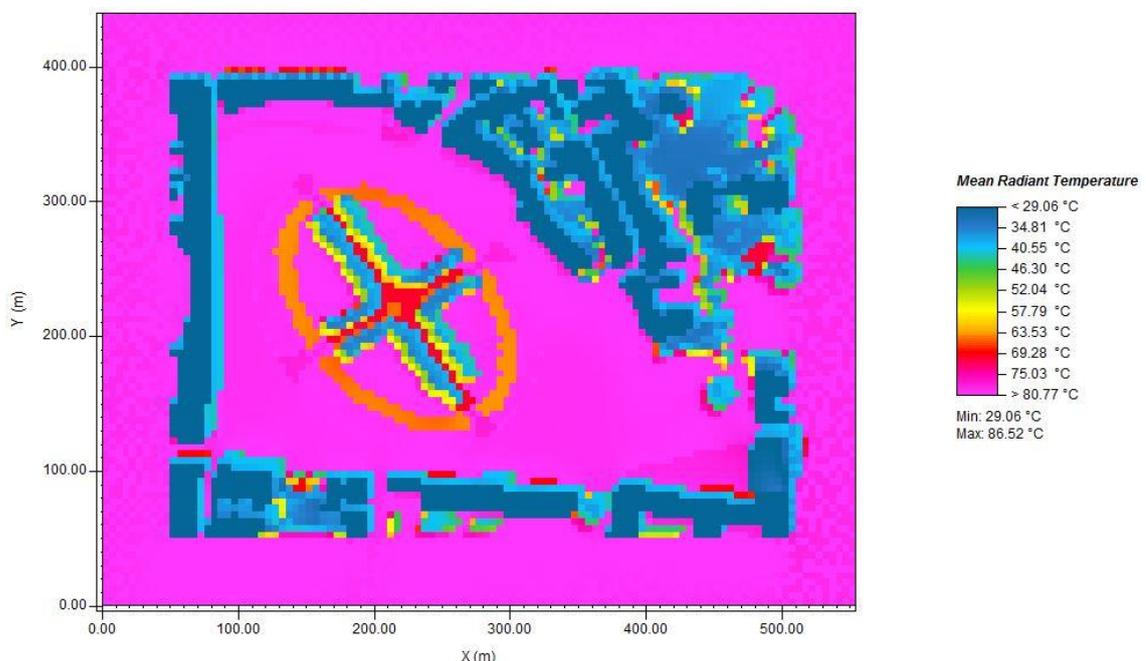


Figura 42 Mappa termografica della temperatura media radiante a 1.5 m dal suolo (29 luglio, ore 15:00 - Simulazione As Is); (fonte: LEONARDO 14)

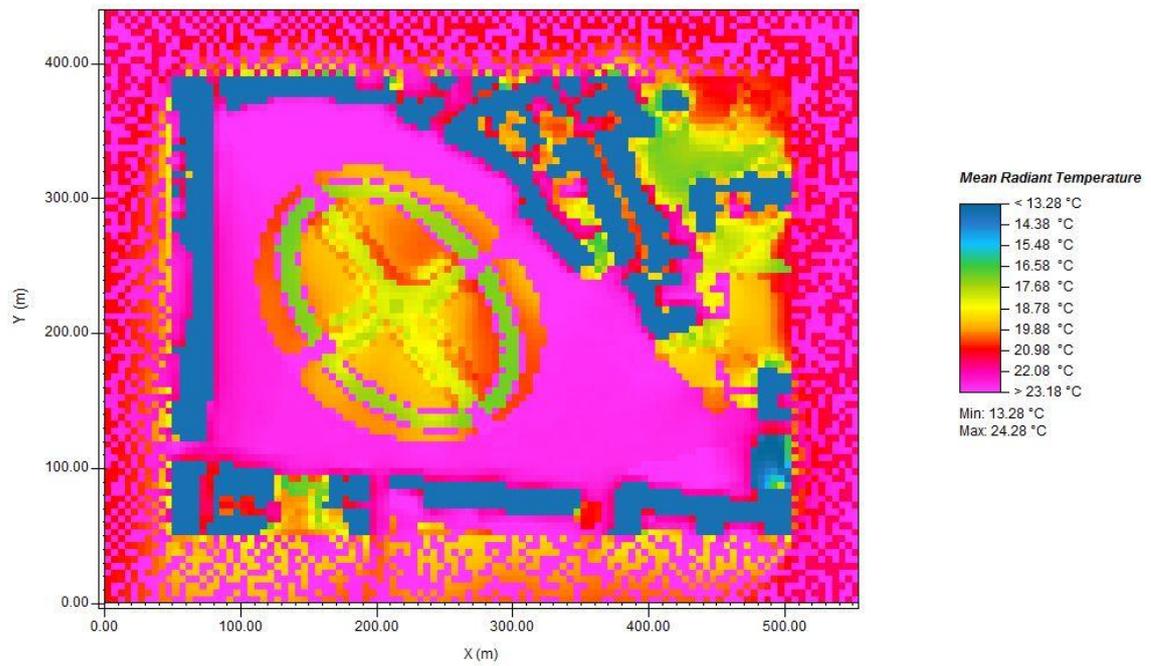


Figura 43 Mappa termografica della temperatura media radiante a 1.5 m dal suolo (30 luglio, ore 3:00 - Simulazione As Is); (fonte: LEONARDO 14)

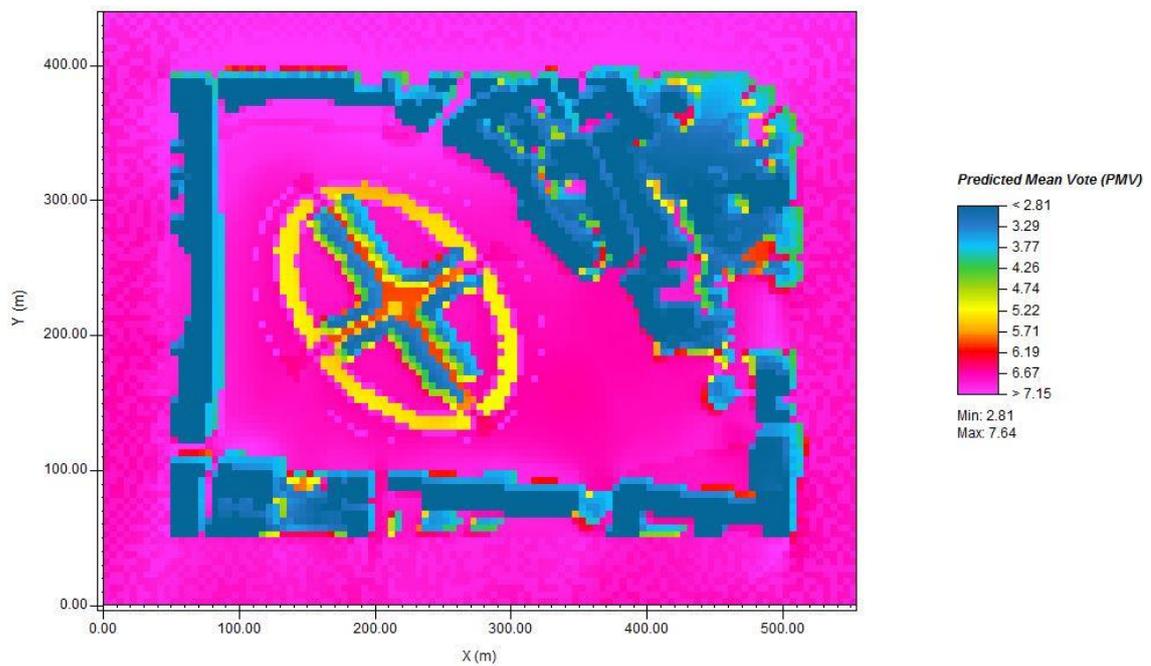


Figura 44 Mappa termografica del PMV a 1.5 m dal suolo (29 luglio, ore 15:00 - Simulazione As Is); (fonte: LEONARDO 14)

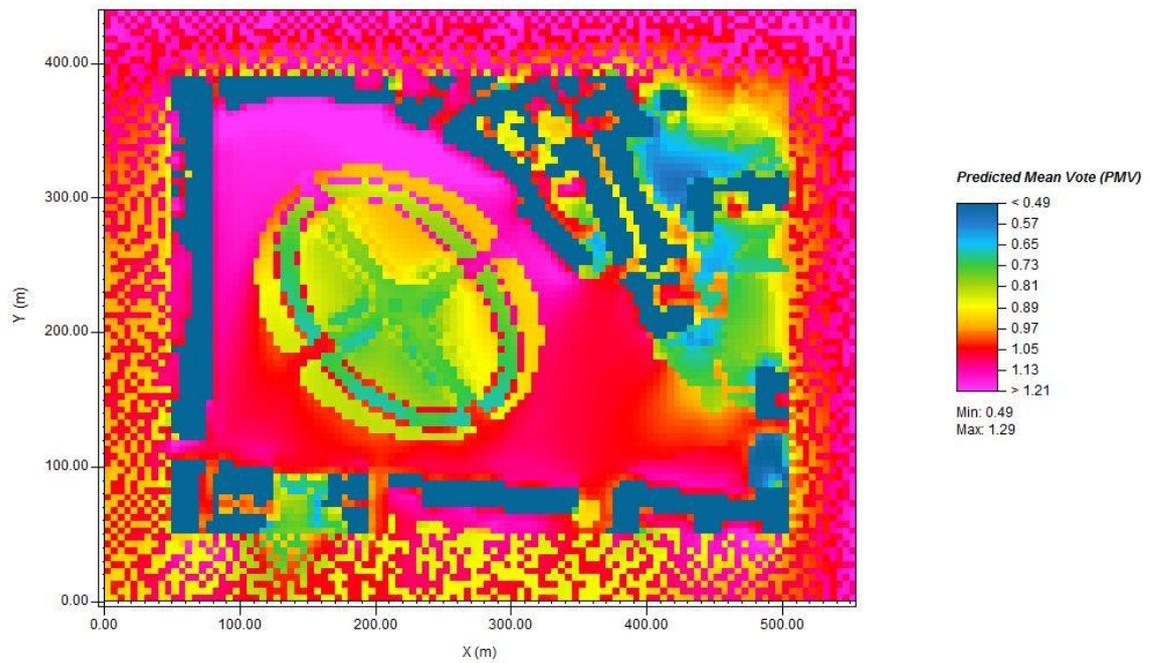


Figura 45 Mappa termografica del PMV a 1.5 m dal suolo (30 luglio, ore 3:00 - Simulazione As Is); (fonte: LEONARDO 14)

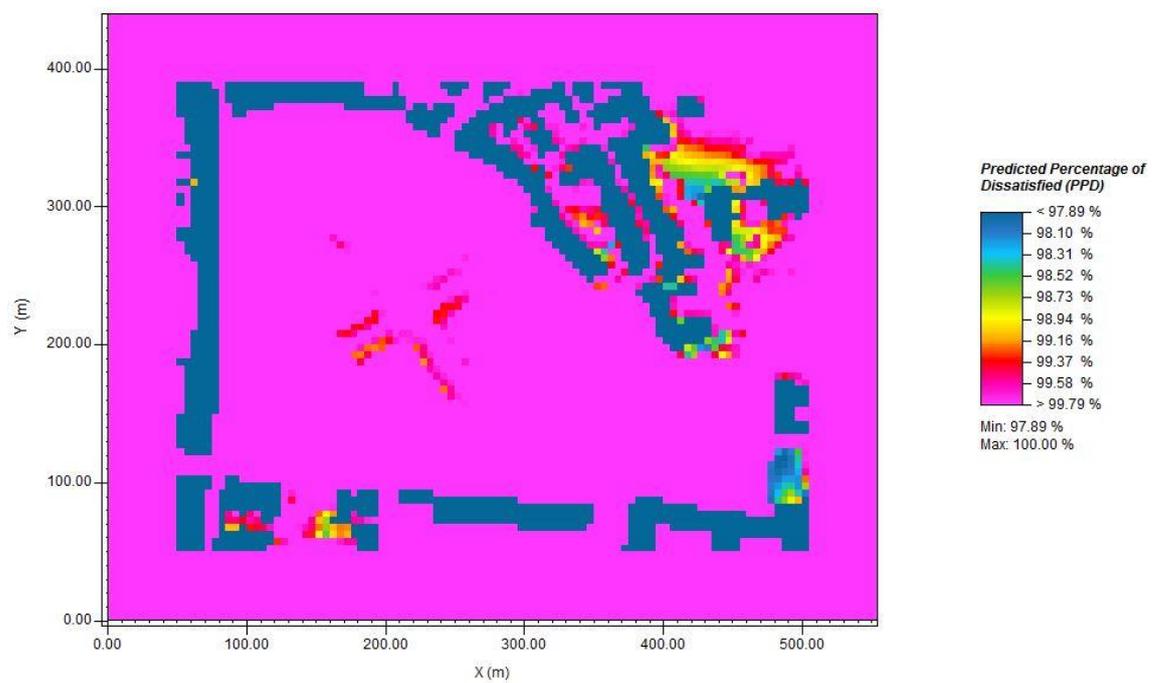


Figura 46 Mappa termografica del PPD a 1.5 m dal suolo (29 luglio, ore 15:00 - Simulazione As Is); (fonte: LEONARDO 14)

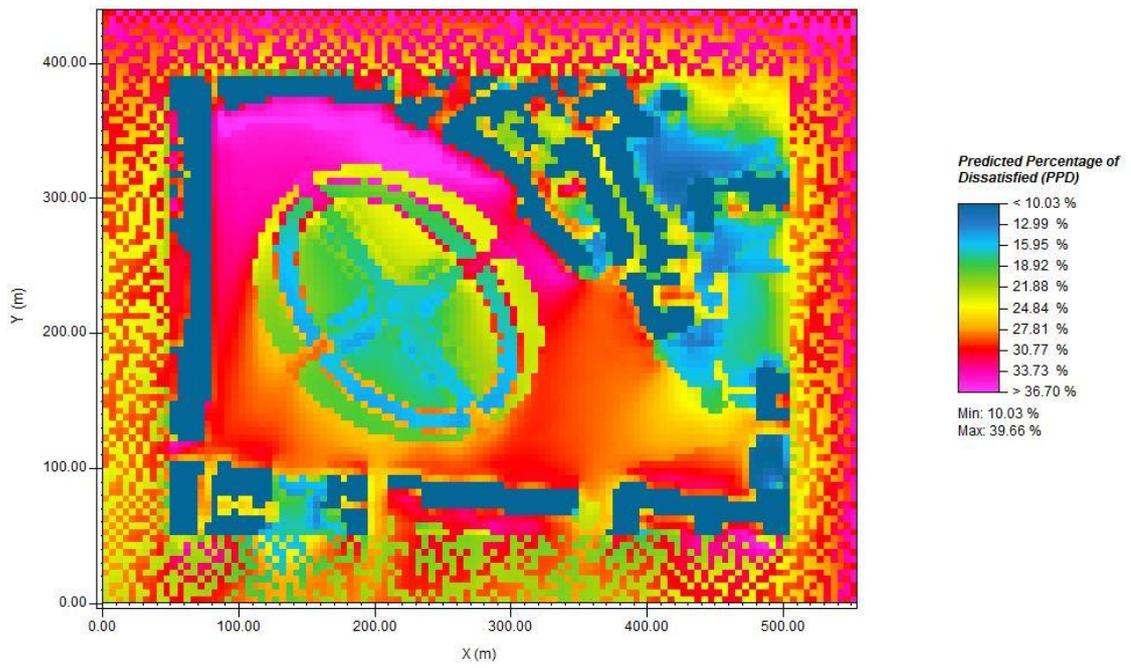


Figura 47 Mappa termografica del PPD a 1.5 m dal suolo (30 luglio, ore 3:00 - Simulazione As Is); (fonte: LEONARDO 14)

4. La simulazione dello *Scenario Green*

4.1. Introduzione

Lo scopo, in questa seconda simulazione, è quello di mostrare come un nuovo scenario con l'aggiunta della vegetazione possa far diminuire la temperatura dell'aria e aumentare così la sensazione di comfort nell'ambiente urbano. Sebbene sia difficile realizzare questo tipo di intervento, si è voluto tentare di ipotizzare un aumento dell'estensione delle aree verdi a Prato della Valle per conferire una maggior efficacia all'azione mitigatrice della vegetazione nel contrastare il fenomeno dell'isola di calore. Infatti quando alberi e terreno lasciano il posto a edifici e superfici pavimentate, il bilancio energetico nei pressi del suolo subisce un cambiamento: meno radiazione solare in entrata viene dissipata sotto forma di calore latente e una quota maggiore va in calore sensibile. Il conseguente aumento di questo secondo contributo genera un incremento delle temperature superficiali, il che concorre alla formazione dell'effetto "isola di calore urbana" (Bruse M. e Skinner C. J. 1999)

La presenza di un terreno coperto da vegetazione quindi può contribuire all'abbassamento della temperatura epidermica urbana grazie all'evapotraspirazione e, in caso di alberi ad alto fusto, all'ombrosità.

Ombrosità. Le foglie e i rami riducono l'ammontare della radiazione solare che raggiunge l'area al di sotto dell'albero o della pianta. In estate, generalmente dal 10 al 30 % dell'energia proveniente dal sole raggiunge l'area sottostante a un albero, mentre il rimanente in parte viene assorbito dalle foglie e usato per la fotosintesi e in parte riflesso indietro nell'atmosfera. In inverno invece la quota di radiazione che raggiunge il terreno è maggiore e oscilla tra il 10 e l'80 %, dal momento che le piante nel periodo invernale presentano un fogliame differente e meno denso (Akbari H. et al. 1990). L'ombrosità riduce la temperatura del terreno al di sotto dell'albero. Queste superfici più fresche, a loro volta, riducono il calore trasmesso verso gli edifici e verso l'atmosfera.

Evapotraspirazione. Gli alberi e la vegetazione assorbono acqua attraverso le proprie radici e la emettono attraverso le foglie - questo movimento dell'acqua prende il nome di "traspirazione". L'"evaporazione", vale a dire il passaggio dell'acqua dallo stato liquido allo stato gassoso, avviene a partire dal terreno che circonda le piante e dagli alberi stessi ogniqualevolta essi intercettano l'acqua piovana con le proprie foglie e coi rami. Insieme questi due processi, prendono il nome di evapotraspirazione. Questa raffredda l'aria utilizzando il calore presente in essa per far evaporare l'acqua.

L'evapotraspirazione e l'ombrosità possono aiutare a ridurre i picchi di temperatura dell'aria nella stagione estiva. Akbari H. et al. (1990) e Akbari H. et al. (1994) hanno misurato le seguenti riduzioni:

- La temperatura rilevata in un bosco si è presentata di ben 5 °C più bassa delle zone libere da alberi.
- La temperatura dell'aria registrata su un terreno agricolo irrigato è emersa essere inferiore di 3 °C rispetto ad uno non coltivato.
- Le aree suburbane che presentano alberi si sono mostrate più fresche di 2-3 °C rispetto a quelle prive di vegetazione.
- La temperatura dell'aria su un prato è risultata inferiore di 1-2 °C rispetto a quella registrata in zone con scarsa vegetazione.

L'evapotraspirazione poi è solitamente efficace nelle situazioni in cui sia presente una significativa irrigazione. In un contesto urbano, quindi, l'effetto della vegetazione dipende in primo luogo dalla quantità d'acqua messa a disposizione attraverso i sistemi d'innaffiamento; in secondo luogo, anche dalla quantità di superficie occupata dal verde in relazione all'abitato urbano. Infine, dipende anche dalla dimensione e la posizione degli alberi, in particolare dall'indice di area fogliare⁴ (*LAI - Leaf Area Index*) e dalla densità di area fogliare⁵ (*LAD - Leaf Area Density*), che sono indicatori del potenziale ombreggiamento dell'albero (Bryan H. e Rosheidat A. 2010, p.3).

Gli alberi e la vegetazione sono più utili da un punto di vista delle strategie di mitigazione se vengono piantati in posizioni specifiche attorno agli edifici; le ricerche hanno dimostrato che piantare degli alberi verso ovest è solitamente più efficace per il raffreddamento di un edificio, specialmente se questi coprono con la propria ombra delle finestre o parte del tetto. Si è verificato anche come adombrare il lato est di una struttura possa far ridurre i consumi per il condizionamento dell'ambiente interno (Figura 48).

⁴ L'indice di area fogliare (LAI, Leaf Area Index) è un parametro strutturale chiave delle coperture forestali e rappresenta la superficie fogliare totale che insiste sull'unità di superficie del suolo (Duce P. et al. 2011, pp.956).

⁵ La densità di area fogliare (LAD, Leaf Area Density) è un parametro strutturale che misura la superficie fogliare presente nell'unità di volume suolo (Duce P. et al. 2011, pp.957).

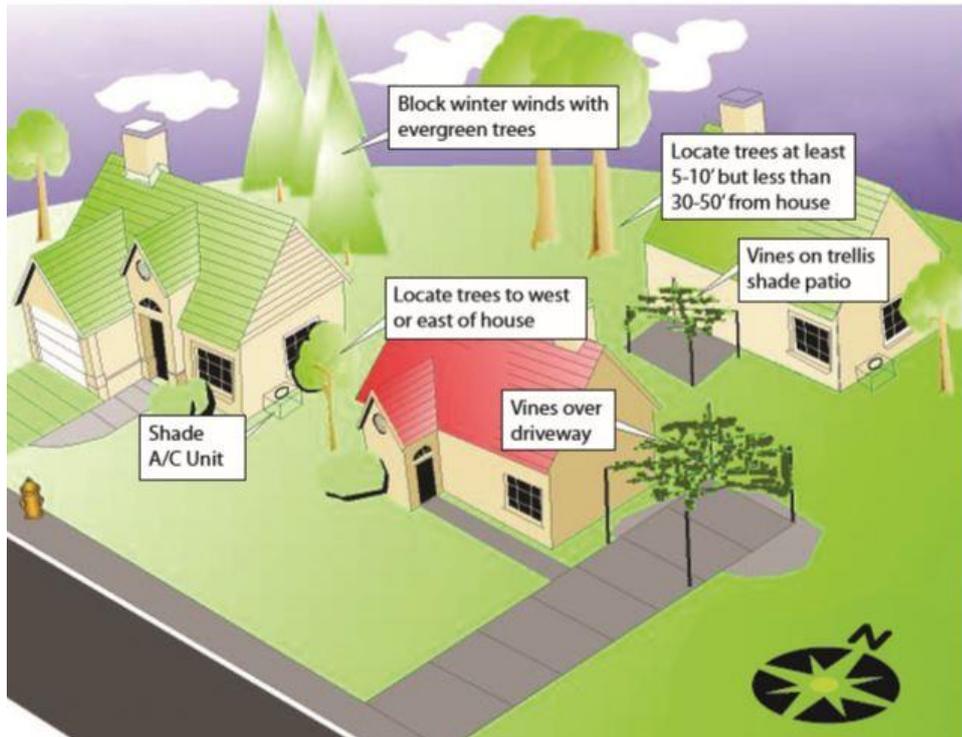


Figura 48 Posizionare dei nuovi alberi vicino alla parete ovest degli edifici può massimizzare la loro capacità di adombrare la struttura e bloccare i venti nel corso dell'inverno (fonte: EPA Compendium Trees and Vegetation 2008)

L'utilizzo quindi della vegetazione nell'ambiente urbano può portare numerosi vantaggi che includono il minor consumo di energia, la riduzione dell'inquinamento dell'aria, la protezione dall'esposizione ai raggi ultravioletti, una potenziale riduzione della manutenzione del manto stradale e altri benefici riguardanti la qualità della vita. Nello stesso tempo però occorre tenere in considerazione anche i costi che un programma di ripianificazione dell'assetto urbano attraverso l'introduzione di nuovi alberi e prati può comportare.

Volendo passare in rassegna i benefici che l'inserimento di nuove aree verdi può determinare, si possono citare:

Riduzione del consumo di energia. Gli alberi che permettono di adombrare alcune parti di un edificio fanno ridurre il fabbisogno di energia per condizionare gli ambienti. I guadagni variano in relazione all'orientazione e alla taglia dell'albero stesso, così come alla distanza dall'edificio: alberi grandi piantati vicino alla parete ovest di un'abitazione producono un risparmio energia per il condizionamento dell'ambiente maggiore di qualsiasi altra pianta. Si calcola che i risparmi si aggirino intorno ad un range molto variabile che va dal 7 al 47 % per alberi di dimensioni notevoli, piantati ad ovest e sud-ovest delle strutture (Akbari H. et al. 1997, pp.139-148).

Riduzione dell'inquinamento dell'aria e miglioramento della salute. In aggiunta ai risparmi energetici, la vegetazione ottiene dei vantaggi nel campo della qualità dell'aria dal momento che le foglie rimuovono vari inquinanti dall'aria che, reagendo con l'acqua sulla superficie degli stomi, vengono scissi e trasformati in acidi o altri composti chimici. Riducendo questi inquinanti vengono ridotte anche le conseguenze negative sulla salute dovute alla cattiva qualità dell'aria. L'ombrosità generata dagli alberi poi permette di ridurre il guadagno in calore degli edifici, che quindi presentano temperature interne inferiori, minimizzando così l'impatto delle ondate di calore estive sul benessere. Un terzo beneficio è dato dal fatto che le piante sono coinvolte anche nella riduzione dell'esposizione ai raggi UV, che hanno effetti dannosi sulla pelle e sugli occhi.

Potenziale riduzione della manutenzione del manto stradale. L'ombra generata dalle piante può diminuire il deterioramento della pavimentazione, con un'incisività che varia dal 15 al 60 % di risparmio a seconda del tipo di alberi utilizzato (McPherson E.G. e Muchnick J. 2005, p.31).

Per quanto riguarda i costi invece, occorre considerare quelli per la piantumazione degli alberi e la manutenzione come la potatura, i trattamenti anti-parassiti e anti-malattie e l'irrigazione. È stato calcolato come, in tutti i casi in cui sia stato avviato un progetto per favorire questo tipo di interventi, i benefici abbiano sempre superato i costi connessi. Lo studio compiuto da Maco S. E. et al. (2005, pp.411-416) su cinque città americane ha stimato infatti che, per ogni dollaro investito in questo tipo di progetti, la comunità ha ottenuto dei benefici quantificabili tra \$1.5 e \$3, per ogni albero piantato.

Come si può ben capire ovviamente, risulta di fondamentale importanza ricordare che gli alberi crescono molto lentamente e che quindi per vedere gli effettivi benefici, come per esempio il risparmio energetico, occorre attendere almeno 5 anni. A questo si deve sommare certamente il fatto che l'intervento deve avvenire su vasta scala, avanzando dei progetti sull'intero suolo urbano, non solo in un piccolo quartiere. Ciò nonostante, sebbene la nostra simulazione coinvolga una minima parte della città di Padova, il tentativo ha cercato di mostrare i vantaggi sul breve termine ed una quantificazione dei benefici in termini di riduzione dell'intensità dell'isola di calore, dimostrando quindi la netta vantaggiosità di questo tipo di interventi di mitigazione che, programmati con una buona pianificazione territoriale, possono indubbiamente migliorare le condizioni di vita nelle nostre città.

4.2. Il modello

Sulla base di quanto detto, la seconda simulazione prevede di trasformare Prato della Valle e ridistribuire le aree verdi, ampliandole per mettere in atto la prima azione di

mitigazione dell'isola di calore. L'aggiunta di terreno coperto da alberi e prati è avvenuta sostituendo quello asfaltato, il cui comportamento genera tipicamente temperature superficiali più alte durante il giorno e rilascia una maggiore quantità di calore di notte.

Solitamente però l'introduzione delle aree verdi comporta uno stravolgimento dell'assetto urbanistico, non sempre facile da affrontare. Nuovi alberi o nuovi prati possono prendere il posto di parcheggi, bordi-strada o passaggi pedonali e tali interventi necessitano di una riprogettazione della viabilità cittadina ed un piano di adattamento che permetta le normali attività commerciali e lo spostamento delle persone da un capo all'altro della città. Nel caso di Prato della Valle, si è voluto trasformare le superfici asfaltate in zone verdi, lasciando comunque completamente inalterata la carreggiata che perimetralmente delimita la piazza, non intaccando perciò in alcun modo la viabilità. Lo stile che ha dato forma al nuovo modello è stato mosso dai tipici parchi cittadini di Londra: immerse nella caotica metropoli inglese, le aree verdi si ritagliano dello spazio tra il gomitolo di strade percorse ogni giorno da centinaia di migliaia di auto, taxi e bus. Questi parchi, che nella città sono ben nove, hanno notevoli dimensioni e sono solitamente adibiti ai momenti ricreativi dei turisti e dei londinesi. Molto spesso, attorno all'area è sistemato un percorso in ghiaia, dove la gente può praticare diverse attività che vanno dalla semplice passeggiata al jogging. Al centro di solito, un piccolo lago si snoda tra gli alberi, circondato qua e là da fontane e monumenti con sculture che non smettono di mostrare il fascino di Londra e la sua cultura secolare. La vista è molto piacevole e la presenza importante di verde fa assumere alla zona una temperatura gradevole per quasi tutto il corso dell'anno.



Figura 49 Vista dall'alto di Kensington Gardens e di Hyde Park, a pochi passi da Buckingham Palace, sede della Regina; Londra (UK) (fonte: www.wikipedia.com)



Figura 50 Scorcio di una delle fontane con sculture di Kensington Garden; Londra (UK) (fonte: www.wikipedia.com)

Il tentativo per la simulazione dello scenario Green è stato quello di replicare in piccolo a Prato della Valle queste caratteristiche; certamente consiste in un intervento massiccio che modifica completamente la struttura della piazza. L'attenzione tuttavia è stata posta soprattutto alla fattibilità dell'intervento: la carreggiata infatti è stata lasciata inalterata non causando quindi alcun stravolgimento nella viabilità, che sarebbe stato invece il problema maggiore. Il valore artistico della piazza, racchiuso nelle 78 statue che cingono con un doppio anello la canaletta e negli splendidi palazzi altomedievali, quattrocenteschi e settecenteschi che circondano l'isola, non perde alcuna visibilità dal momento che gli alberi sono piantati con attenzione ai particolari e valorizzando ogni punto: l'altezza della vegetazione non è eccessiva (10 m) ed essa è posta ad una certa distanza dai monumenti principali. La fontana al centro viene mantenuta e anzi valorizzata grazie alla presenza di file di alberi lungo i quattro assi dell'isola Memmia. Tutt'attorno una stradella di ghiaia circonda la piazza per permettere alla cittadinanza di svolgere attività sportive anche nelle ore più calde del giorno grazie agli alberi che, posti ai lati del passaggio, consentono di avere condizioni d'ombra lungo tutto il percorso. I prati conservano la loro estensione originaria, seppur spostati all'esterno dell'isola rispetto alla posizione originaria e permettono comunque di godere di momenti di tranquillità e riposo. A sud-est, una piccola piazzetta è riservata agli incontri collettivi, in mezzo a prati e alberi.

Per quanto riguarda la questione relativa allo spazio che non verrebbe più destinato al famoso mercato che settimanalmente ivi si svolge, la proposta prevederebbe di spostarlo oltre il lato sud della piazza, alle spalle dell'edificio dell'ex-foro boario, in una zona dedicata al momento a parcheggio a raso (Piazza Rabin). In tal caso, l'idea avanzata dal modello trova uno sbocco reale pressoché perfetto: a breve infatti un progetto di trasformazione e riqualificazione si occuperà di restaurare la facciata dell'ex foro boario e le mura cinquecentesche con porta Santa Croce. Il progetto, che prende il nome di

*Progetto Crotti*⁶, prevede anche la realizzazione di un parcheggio sotterraneo con ben 600 posti auto proprio sotto Piazza Rabin, che verrà lasciata libera, e l'abbattimento delle tribune dello Stadio Appiani sul lato est e la sostituzione con una più piccola struttura in legno per mantenere intatta la funzione sportiva del campo; infine è prevista anche la copertura del velodromo Monti adiacente alla Piazza.

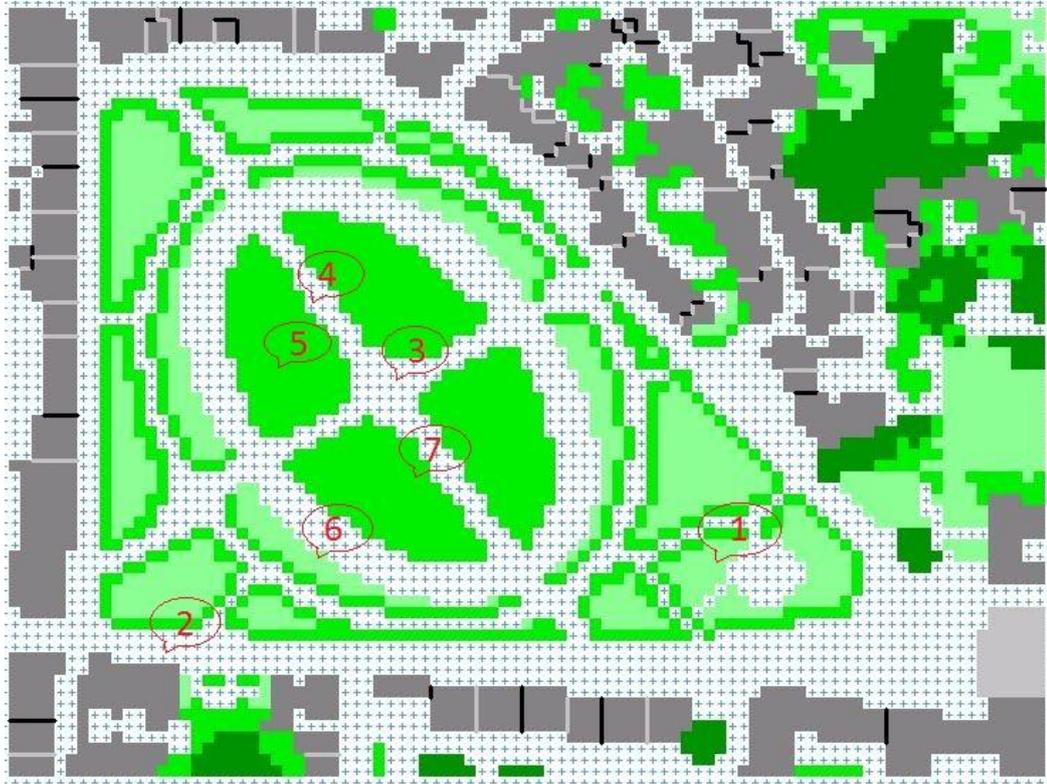


Figura 51 Modello del file Area dello scenario Green con ENVI-met Editor

⁶ L'architetto milanese Sergio Crotti ha ridisegnato l'area tra il «frontone» dell'ex Foro boario, che sarà completamente restaurato, e le mura cinquecentesche con porta Santa Croce. Per il parcheggio, circa 600 posti auto con accesso da via 58° Fanteria e via Carducci, è stato deciso un solo piano interrato. Dal sito "<http://mattinopadova.gelocal.it/foto-e-video/2008/07/24/fotogalleria/parcheggio-in-prato-della-valle-il-progetto-di-sergio-crotti-1.1123661?p=4>"

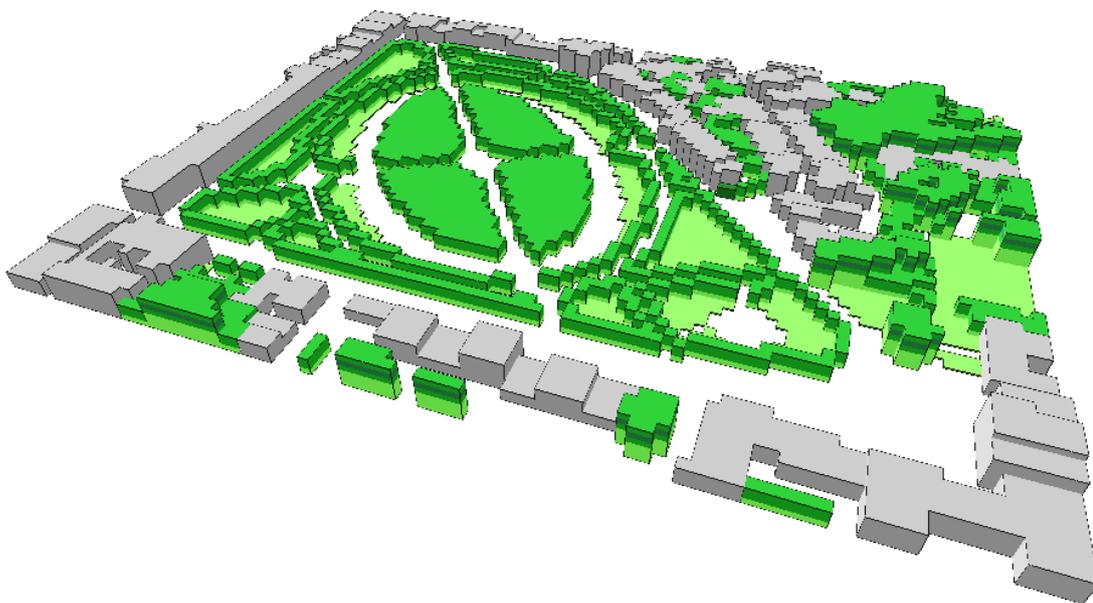


Figura 52 Modello 3D dello scenario Green da ENVI-met

L'attenzione posta in maniera molto precisa a questi particolari si è ben amalgamata con la necessità di adottare un intervento massiccio per favorire le aree verdi. Questo per dare la possibilità ad ENVI-met di registrare l'effettivo miglioramento delle condizioni ambientali e termiche nella piazza e quantificare così l'effetto di mitigazione introdotto dalla vegetazione. I cambiamenti apportati nel modello hanno modificato nettamente la percentuale relativa delle diverse coperture. Esprimendo l'estensione delle differenti superfici in m², note le dimensioni della piazza di 88620 m², sono avvenuti i seguenti cambiamenti:

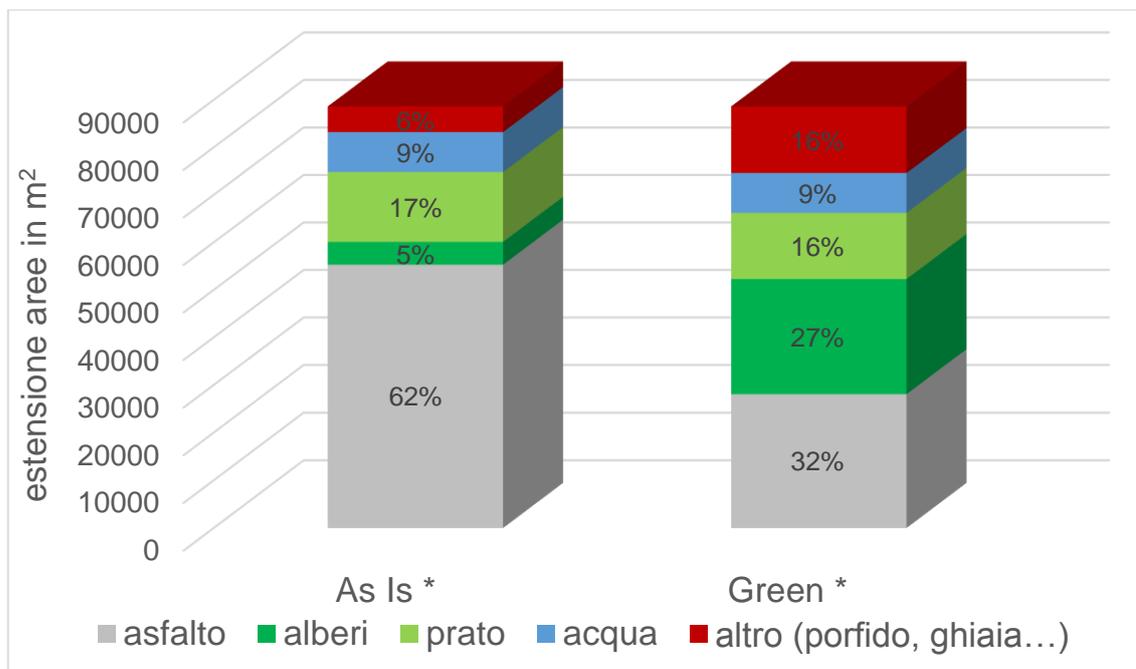


Figura 53 La variazione della presenza di asfalto, prato, zone coperte da alberi e da altro tra le due simulazioni (quantità espresse in m²) su un totale di 88620 m²

* Dati calcolati sulla base del numero di griglie occupate nel modello di ENVI-met

L'introduzione di nuova vegetazione nello scenario induce anche alcune variazioni nella tipologia di copertura dei sette punti scelti precedentemente per l'analisi. La tabella seguente raccoglie le novità risultanti:

	Scenario As - Is	Scenario Green
Posizione 1	Asfalto - lontano dagli edifici	Prato – lontano dagli edifici
Posizione 2	Asfalto - vicino agli edifici	Asfalto - vicino agli edifici
Posizione 3	Ghiaia - vicino all'acqua	Ghiaia – vicino all'acqua
Posizione 4	Ghiaia - lontano dall'acqua	Ghiaia – lontano dall'acqua
Posizione 5	Prato - lontano dall'acqua	Alberi - lontano dall'acqua
Posizione 6	Prato - vicino all'acqua	Alberi - vicino all'acqua
Posizione 7	Prato - Alberi	Prato - Alberi

Tabella 8 Variazione delle caratteristiche dei sette punti scelti tra lo scenario As Is e lo scenario Green

4.3. I risultati

Dal punto di vista generale, la temperatura si attesta intorno ai 34-35 °C su tutta la piazza nella fascia oraria più torrida (quella dalle 14 alle 15), quindi già con una differenza di 2

°C circa rispetto alla medesima ora nello stato di fatto. Questo mostra subito l'efficacia dell'intervento di mitigazione che è trainato soprattutto dall'ombrosità prodotta dagli alberi: lo si nota molto bene dalla forma che assumono le aree meno calde, che seguono quasi perfettamente le zone sulla mappa occupate dagli alberi, quasi permettendo di riconoscerne la disposizione precisa solo guardando la termografia della piazza.

Nella notte, l'assenza della radiazione solare fa raggiungere per buona metà della piazza temperature al di sotto dei 28 °C, chiaro miglioramento delle condizioni termiche rispetto al modello originale dal momento che la temperatura più bassa in assoluto misurata su tutta la piazza si aggirava intorno ai 28.3 °C.

	Pos.1	Pos.2	Pos.3	Pos.4	Pos.5	Pos.6	Pos.7
Data	29-lug	29-lug	29-lug	29-lug	29-lug	29-lug	29-lug
Orario	15:00	15:00	15:00	15:00	15:00	15:00	15:00
T potenziale (°C)	34.6	34.6	34.4	34.6	34.1	34.1	34.2
UHI Intensity (°C)	5.4	5.5	5.3	5.5	5.0	5.0	5.0
T media radiante (°C)	70.2	39.7	70.5	70.9	35.3	65.4	35.5
PMV	5.7	3.2	5.7	5.8	2.8	5.2	2.8
PPD (%)	100	99.7	100	100	97.8	100	98.0

Tabella 9 Dati ottenuti dalla simulazione Green, nei sette punti scelti, alle ore 15:00. Gli indici di comfort si riferiscono ad un soggetto in abiti estivi (0.5 clo), in leggera attività (116 W)

	Pos.1	Pos.2	Pos.3	Pos.4	Pos.5	Pos.6	Pos.7
Data	30-lug	30-lug	30-lug	30-lug	30-lug	30-lug	30-lug
Orario	3:00	3:00	3:00	3:00	3:00	3:00	3:00
T potenziale (°C)	28.3	28.3	28.2	28.2	27.8	27.9	28.1
UHI Intensity (°C)	7.6	7.6	7.5	7.6	7.1	7.3	7.4
T media radiante (°C)	18.3	21.9	12.7	19.3	18.0	18.3	18.1
PMV	0.7	0.9	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6
PPD (%)	14.2	23.6	14.5	16.3	12.2	12.9	13.2

Tabella 10 Dati ottenuti dalla simulazione Green, nei sette punti scelti, alle ore 3:00. Gli indici di comfort si riferiscono ad un soggetto in abiti estivi (0.5 clo), in leggera attività (116 W)

La diminuzione generalizzata della temperatura dell'aria trova immediata conferma dai risultati dell'analisi dei sette punti selezionati; un calo cospicuo nei valori, sia pomeridiani che notturni, viene registrato per i tre siti (posizione 1, 5, 6) che hanno cambiato tipologia di superficie nel passaggio dallo stato di fatto allo scenario green, a significare l'efficacia *diretta* dell'intervento di mitigazione condotto grazie all'aggiunta di vegetazione: tra i tre, la differenza maggiore si registra nella posizione 5, che nella seconda simulazione viene coperta da un albero, con un abbassamento di ben 2.1 °C. Il beneficio però non è solo diretto ma l'azione mitigatrice si fa sentire anche nel tessuto urbano limitrofo alle aree direttamente interessate dal cambiamento del tipo di superficie; ne sono esempio le variazioni della temperatura delle altre 4 posizioni. Tuttavia, mentre i punti 3, 4 e 7 subiscono un cambiamento *direttamente* indotto dalla presenza nelle immediate vicinanze di nuovi alberi (la cui ombra, coprendo le tre postazioni, genera un abbassamento netto della temperatura rispetto alla simulazione As Is), la posizione 2, quella sull'asfalto vicino agli edifici, non viene interessata da questo contributo diretto degli alberi. La posizione 2 infatti è emblematica dell'abbassamento della temperatura che l'introduzione di nuova vegetazione in una certa area genera *uniformemente in tutte le zone circostanti*. Essa infatti, registra una diminuzione assai consistente della temperatura dell'aria pari a 2.3 °C (alle ore 15:00) e tale miglioramento effettivo è da imputare esclusivamente all'azione benefica *generale/indiretta* messa in atto dal massiccio aumento di aree verdi nella piazza, e non a un qualche effetto di una più favorevole ombrosità creata dagli alberi. Per la posizione 2, nessuna condizione varia tra la simulazione dello stato di fatto e quella dello scenario Green: essa si trova, proprio come nel caso As-Is, in ombra già dalle ore 14:00 (quando si assiste alla diminuzione netta della temperatura media radiante) per la vicinanza all'edificio, e non subisce nessuna modifica diretta per mano della nuova vegetazione.

Non vi sono più dubbi quindi che la vegetazione modifichi la temperatura dell'aria della zona circostante e contribuisca quindi a migliorare le condizioni termiche dell'area urbana, soprattutto nel periodo estivo. Molti studiosi quindi hanno analizzato quale influenza possa avere un parco sul clima urbano. In primo luogo è emerso che l'area di influenza di una zona verde dipende dall'estensione della zona verde stessa e soprattutto dalla distanza tra due zone verdi limitrofe. Infatti aree verdi piccole ma vicine tra loro sono preferibili, in termini di variazioni di condizioni ambientali nell'intorno, rispetto ad un'unica zona verde molto grande (Candidi P. et al. 2006). Jauregui E. (1990, pp.457-463) nei suoi studi a Città del Messico ha verificato che la presenza del Chapultepec Park (500 ha) genera una variazione di temperatura avvertita nella zona limitrofa dal raggio di 2 km. In altri studi più recenti Abu E.M. et al. (1998, pp.83-92)

hanno visto come il New Town's Central Park modifichi le condizioni ambientali nell'intorno per una distanza di 1 km nella direzione in cui il vento ha generalmente un'intensità maggiore. Similmente alla ridotta dimensione dell'intervento dello scenario Green rispetto all'estensione di Padova, si può affermare che anche in micro scala l'effetto della vegetazione sulle condizioni ambientali è comunque importante. Gaj E. et al. (1998) trovano una differenza di ben 2.5 °C nel confronto tra una zona di Valencia dove ci sono delle piccole aree verdi e una in cui non sono presenti. Cubasch U. et al. (2012, pp.61-64) mostrano con ENVI-met come l'introduzione di nuovi alberi possa far abbassare la temperatura di circa 2 °C in tutta l'area attorno, proprio come accade per lo scenario Green. Analogamente, una riduzione molto uniforme di ben 2.4 °C viene registrata da Bruse M. e Skinner C. J. (1999, p.4) nella messa a punto di un nuovo piano che prevede la sostituzione dell'asfalto e della pavimentazione con aree verdi nei pressi di un mercato di Melbourne (Australia); le loro analisi inoltre si sono spinte anche a dimostrare come l'aggiunta di nuova vegetazione possa ridurre la temperatura dell'ambiente, ma soprattutto migliorare le condizioni di comfort degli individui che passeggiano nel mercato. Il miglioramento notato nella percezione del calore delle persone in tal caso emerge abbastanza nettamente dallo studio della temperatura media radiante. Quest'ultima è la principale responsabile della sensazione di stress termico per un soggetto e quindi un netto cambiamento nel suo valore può comportare un miglioramento/peggioramento immediato, a seconda della tendenza del cambiamento, nei due indici di comfort, PMV e PPD. Come già anticipato nella precedente simulazione, il legame tra la TMR e l'ombreggiamento prodotto dagli alberi è assai stretto: un'ulteriore conferma la si ottiene guardando la mappa termica della temperatura media radiante alle ore 15:00. Si riconosce perfettamente la disposizione delle piante solo analizzando i valori di temperatura. Essa varia all'interno di un range molto ampio su tutta la piazza, mettendo in luce sensazioni abbastanza diverse per quanto riguarda il comfort termico: alle 15:00, si passa da un indice di "molto caldo" nelle zone dalle medesime caratteristiche delle posizioni 5 e 7 (PMV = 2.8), al "caldo estremo" di quelle rimanenti. Come si nota, le due postazioni maggiormente "vivibili" (5 e 7), corrispondono a dei punti che si trovano sotto o in mezzo agli alberi.

In maniera analoga a questo caso, Hoffman M. E. e Shashua-Bar L. (2000, pp.221-235) hanno studiato l'azione temperante dell'ombra degli alberi di una piccola area verde cittadina. Essi hanno concluso che, qualunque sia l'entità della mitigazione (nel loro caso compresa tra 1 e 3 °C, proprio come emerso per la simulazione Green), essa è per l'80% dovuta all'effetto di ombreggiamento creato dalle piante. Per tal ragione, come si nota dalla mappa termica, l'uso più efficace della vegetazione è proprio la sua capacità di

adombrare le superfici sottostanti e ridurre quindi la quantità di radiazioni solari incidenti sui materiali ad alta capacità termica della strada.

L'effetto della vegetazione come appena accennato si fa sentire sulla temperatura media radiante che si distacca maggiormente da quella misurata nello stato di fatto soprattutto nelle ore serali e notturne. Assieme a quest'abbassamento, si assiste anche ad una netta diminuzione del PMV a partire da poco dopo il tramonto, quando tutti i sette punti raggiungono valori prossimi a uno. Occorre aspettare però fino alle 3:00 per registrare una condizione che nella simulazione As-Is non si era mai realizzata: tutti i valori si trovano al di sotto del valore unitario del Predicted Mean Vote, che indica un netto avvicinamento alla condizione di neutralità, e quindi benessere. Tuttavia già dalle ore 21:00 tutte le posizioni facevano segnare una situazione di "leggero caldo" percepito e nulla di più (<1.5). L'azione benefica delle nuove aree verdi si fa sentire quindi soprattutto con una riduzione assai visibile degli indici di comfort che, in termini di valor medio tra tutte le postazioni, vede un abbassamento di oltre il 20%, passando da 0.9 a 0.7. Il dato più importante è quello relativo alla posizione 1 che, passando dall'asfalto all'erba, fa registrare un calo del PMV di ben 0.4 (da 1.1 a 0.7).

Quanto all'analisi del livello diurno del PMV, i valori certamente non si presentano all'interno del range del comfort termico, ma comunque fanno segnare tutti un calo; è quello su cui Abu E.M. et al. (1998, pp.83-92) intendono porre l'attenzione: il PMV calcolato per una persona che passeggia in una zona dove prima non vi era un parco e poi vi è stato introdotto, passa da 3.2 a 2.8. Certo, il valore finale non si trova nel range di neutralità, ma bisogna apprezzarne la diminuzione dovuta alla presenza della nuova area verde che comporta comunque un miglioramento del clima urbano.

Per quel che riguarda infine l'intensità dell'isola di calore, i commenti appena fatti soprattutto sulla temperatura potenziale sono emblematici: lo scenario Green genera un abbassamento dell'intensità in tutti e sette i punti, tale che la massima differenza che si registra con la temperatura della zona rurale nel corso della notte è di 7.6 °C, contro gli 8.6 °C dello stato di fatto. E' nel corso del pomeriggio però che si assiste alla diminuzione più consistente dell'intensità dell'isola di calore (da una media di 6.8 °C a 5.2 °C): questo fatto è tipico delle aree verdi con elevata presenza di alberi. Roth M. (2002, p.11) infatti fa notare come, a seconda delle dimensioni del parco, il raffrescamento sia tipicamente tra 1-2 °C durante la notte, ma possa arrivare fino a 5-6 °C in condizioni ideali e per alcune città; a questo aggiunge anche che l'entità effettiva della diminuzione dipende: dal tipo di parco (presenza di alberi dalla folta chioma: massimo raffreddamento nel pomeriggio, presenza di ampi spazi erbosi: raffreddamento massimo intorno all'alba),

dall'intensità dell'irrigazione, dalla natura del paesaggio e del clima circostante. Infine egli nota che solitamente la zona che risente dell'abbassamento della temperatura dell'aria associata alla presenza del parco si estende oltre i suoi confini di circa una "larghezza di parco" tutt'intorno.

Con l'intervento a favore delle aree verdi quindi l'azione mitigatrice risulta assolutamente presente e genera un miglioramento generale intorno a 0.8-1 °C nelle ore notturne che rivela la bontà e l'efficacia delle modifiche apportate nella simulazione di Prato della Valle.

Ulteriori considerazioni a commento finale dei risultati di questa simulazione:

- la quasi totalità dell'azione mitigatrice è data dall'ombrosità prodotta dagli alberi;
- anche in questo caso l'impossibilità di simulare dei terreni irrigati riduce al minimo la possibilità di quantificare il contributo al raffrescamento operato dall'evapotraspirazione, che comunque darebbe risultati leggermente ancor più mitigati rispetto a quanto già ottenuto;
- risulta comprensibile però come una densità di alberi troppo elevata possa generare un'azione limitata nei confronti della mitigazione, se non addirittura controproducente; infatti, se da un certo punto di vista la grande quantità di fronde permette ovviamente di fornire più ombra durante il giorno, dall'altro questa sovrabbondanza di fogliame può ridurre il fattore di vista del cielo nelle ore notturne, riducendo a sua volta la quota di radiazioni scambiate col cielo stesso (Bryan H. e Rosheidat A. 2010, p.3). Dal momento quindi che la causa principale dell'UHI rimane il materiale della pavimentazione urbana che di notte tende a raffreddarsi con un fattore proporzionale alla vista del cielo, una densità maggiore di alberi non può far altro che diminuire il tasso con cui questi materiali "perdono" il loro calore immagazzinato, contribuendo con questo a riscaldare in parte l'aria anche nei momenti successivi al tramonto, ottenendo perciò un effetto contrario alla mitigazione sperata;
- infine, al momento della sostituzione di certe aree asfaltate con delle zone erbose o alberate, occorre valutare attentamente i costi di manutenzione ed i vantaggi in termini energetici e di qualità della vita. Potrebbe accadere infatti che l'area verde studiata sia troppo piccola per i benefici che si vogliono perseguire, magari perché la zona è troppo poco ventilata, o perché la disposizione degli edifici fa percepire i benefici solo in una certa ristretta area adiacente ecc. Le variabili da valutare in questo senso sono tantissime e sono necessari degli studi approfonditi per ogni specifico sito in cui si intenda attivare un qualche progetto

di ripianificazione territoriale ed urbana. Non ci sono dubbi però che tutte queste analisi debbano servirsi necessariamente anche di software come ENVI-met per poter analizzare al meglio i minimi particolari con cui perseguire gli obiettivi prefissati e migliorare la qualità della vita di tutti i cittadini.

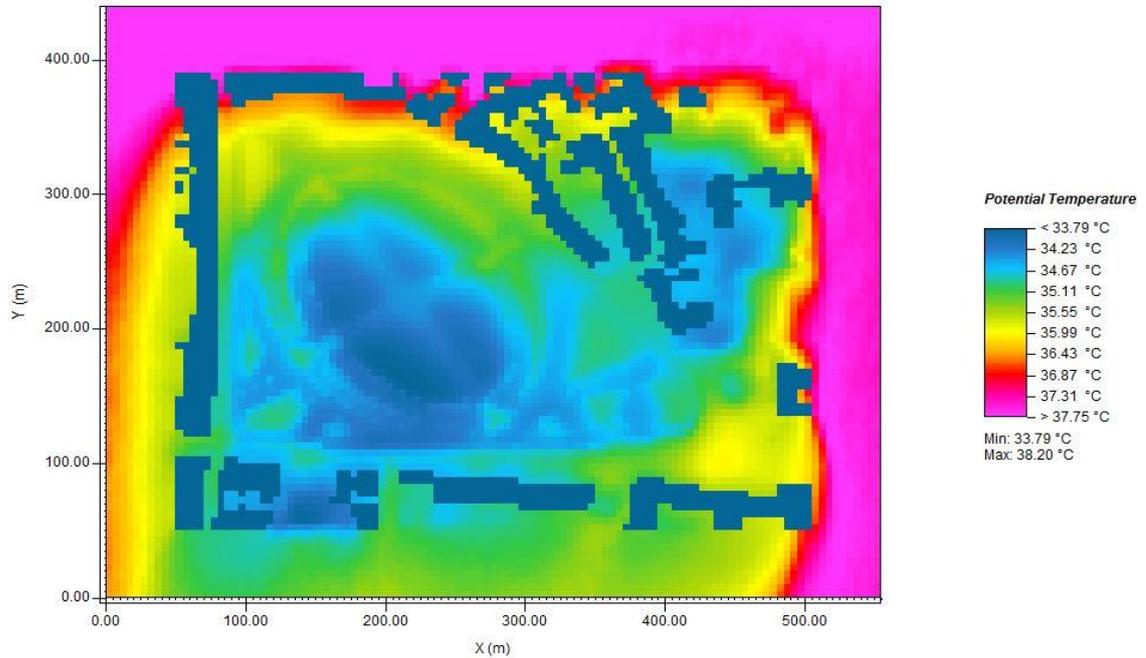


Figura 54 Mappa termografica della temperatura potenziale dell'aria a 1.5 m dal suolo (29 luglio, ore 15:00 - Simulazione Green); (fonte: LEONARDO 14)

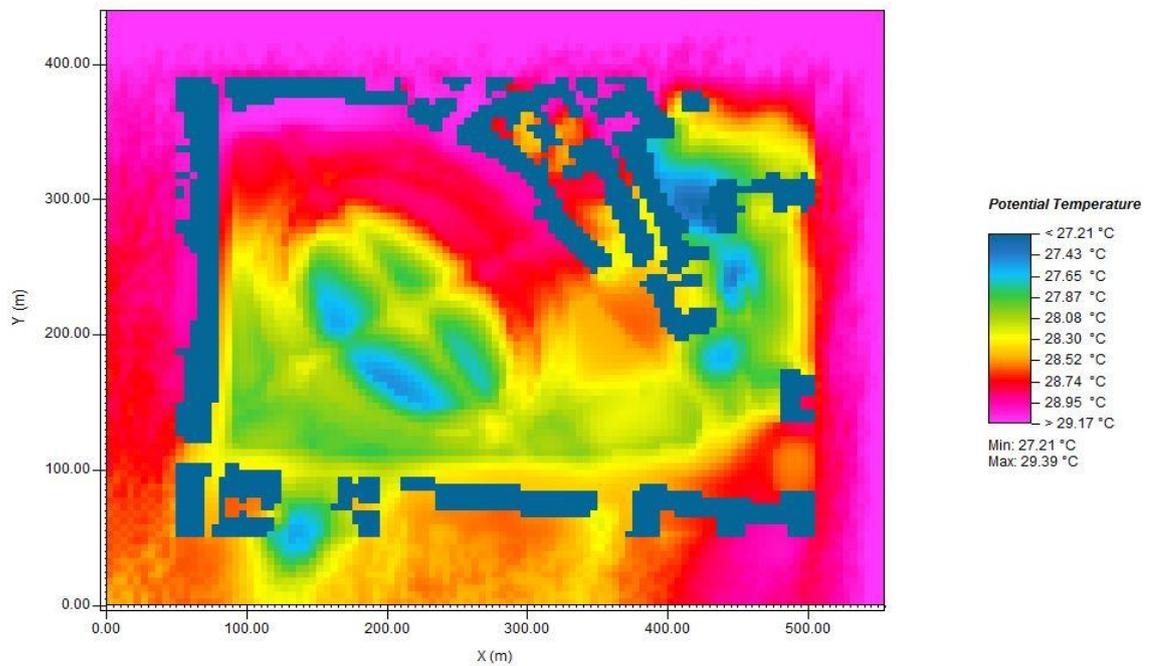


Figura 55 Mappa termografica della temperatura potenziale dell'aria a 1.5 m dal suolo (30 luglio, ore 3:00 - Simulazione Green); (fonte: LEONARDO 14)

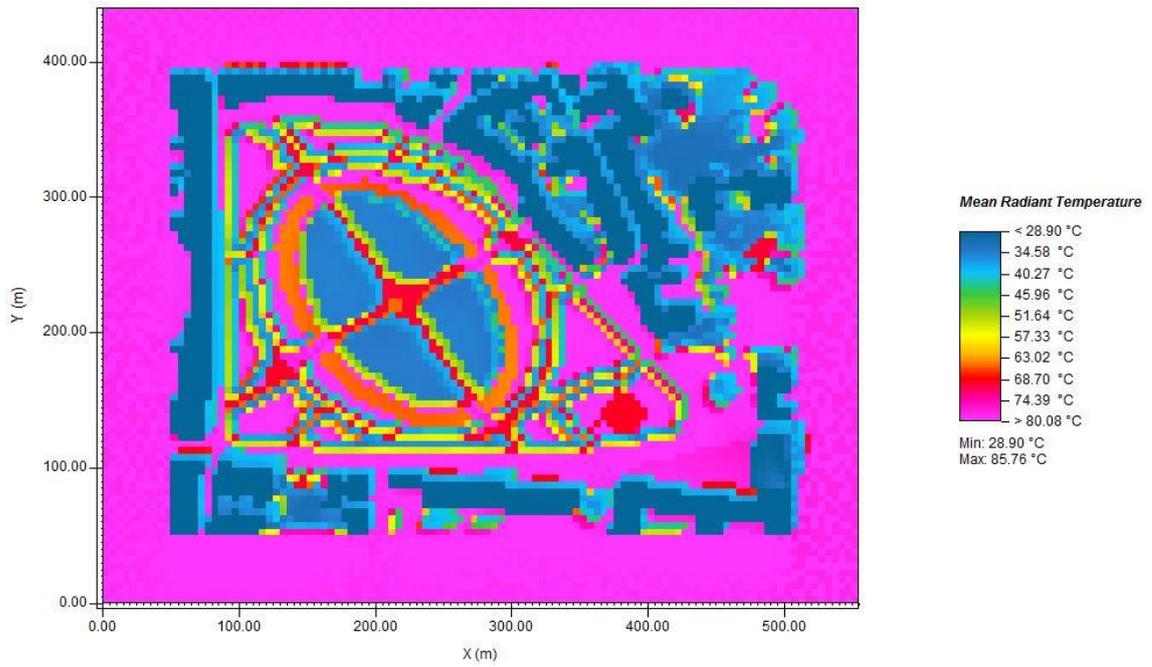


Figura 56 Mappa termografica della temperatura media radiante a 1.5 m dal suolo (29 luglio, ore 15:00 - Simulazione Green); (fonte: LEONARDO 14)

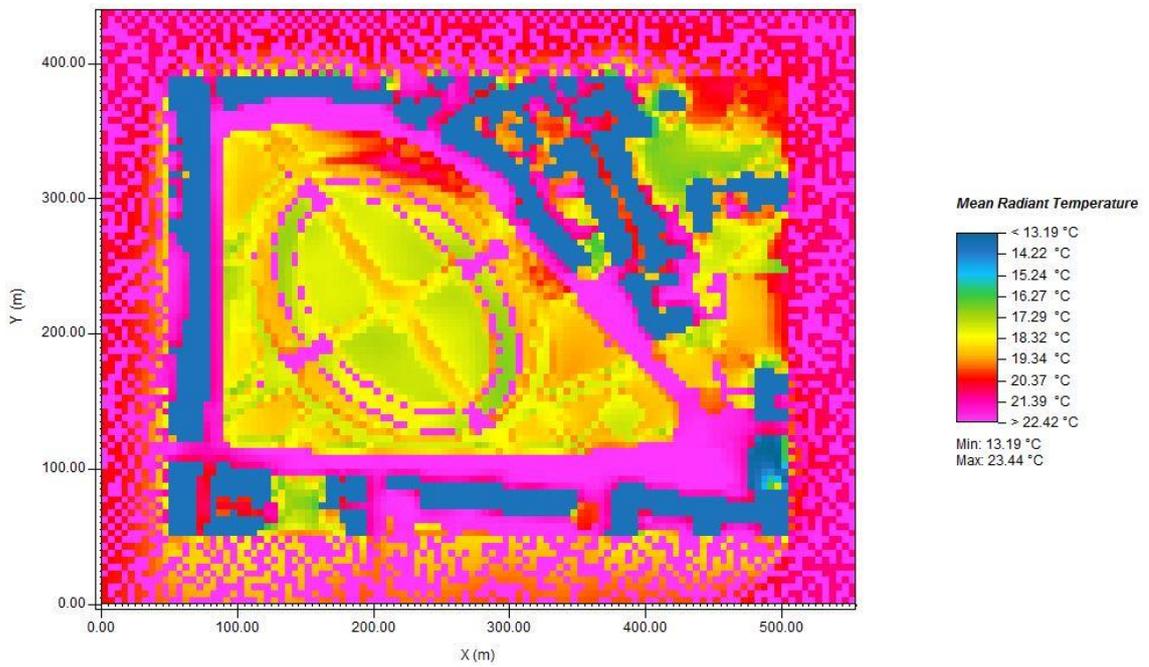


Figura 57 Mappa termografica della temperatura media radiante a 1.5 m dal suolo (30 luglio, ore 3:00 - Simulazione Green); (fonte: LEONARDO 14)

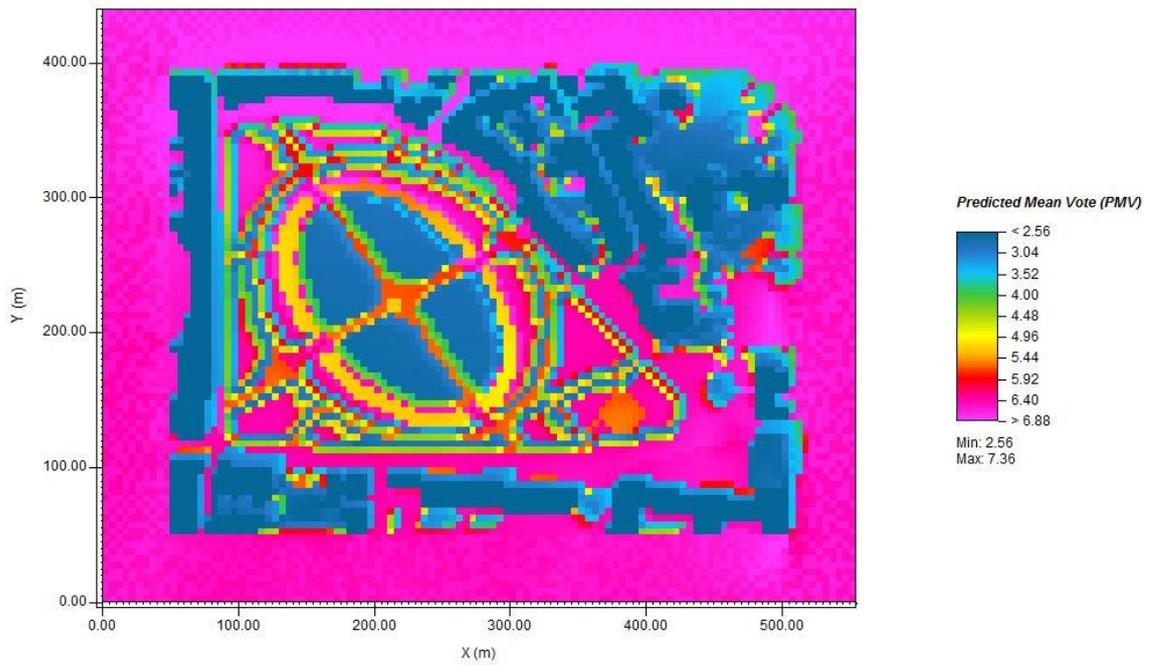


Figura 58 Mappa termografica del PMV a 1.5 m dal suolo (29 luglio, ore 15:00 - Simulazione Green);
(fonte: LEONARDO 14)

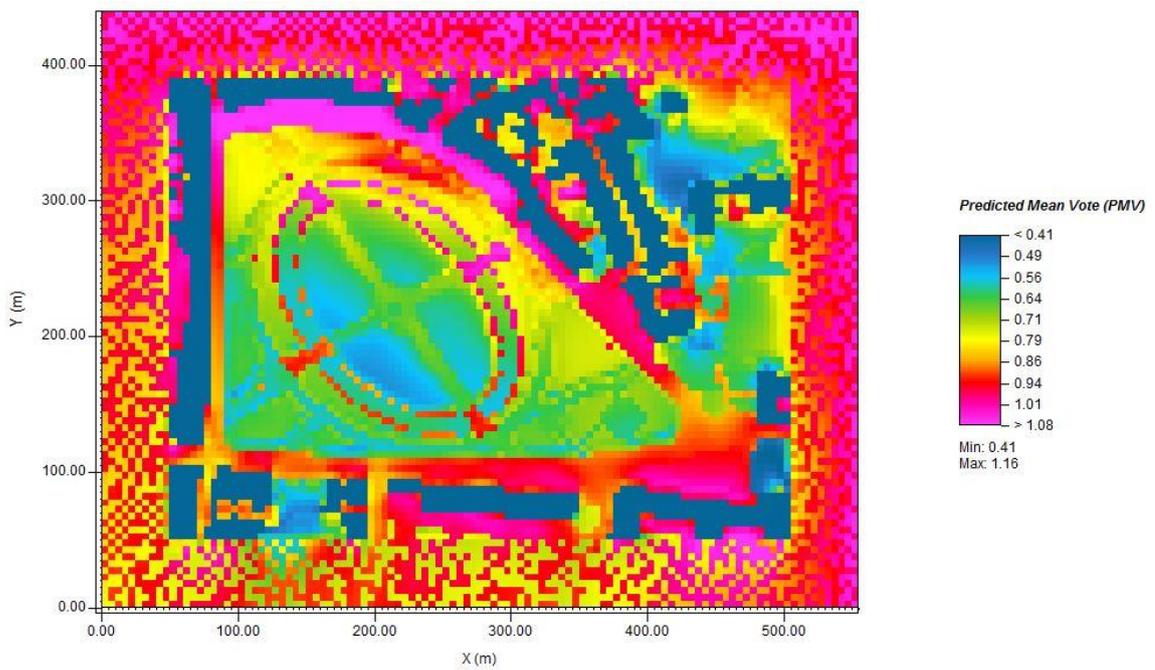


Figura 59 Mappa termografica del PMV a 1.5 m dal suolo (30 luglio, ore 3:00 - Simulazione Green);
(fonte: LEONARDO 14)

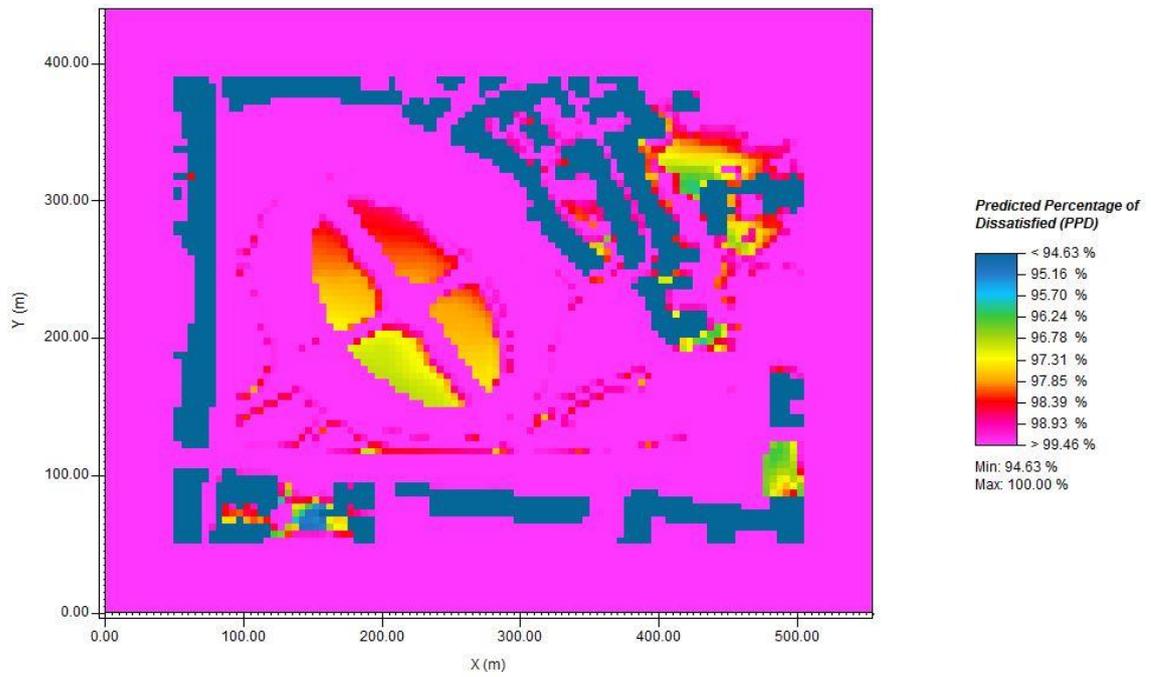


Figura 60 Mappa termografica del PPD a 1.5 m dal suolo (29 luglio, ore 15:00 - Simulazione Green);
(fonte: LEONARDO 14)

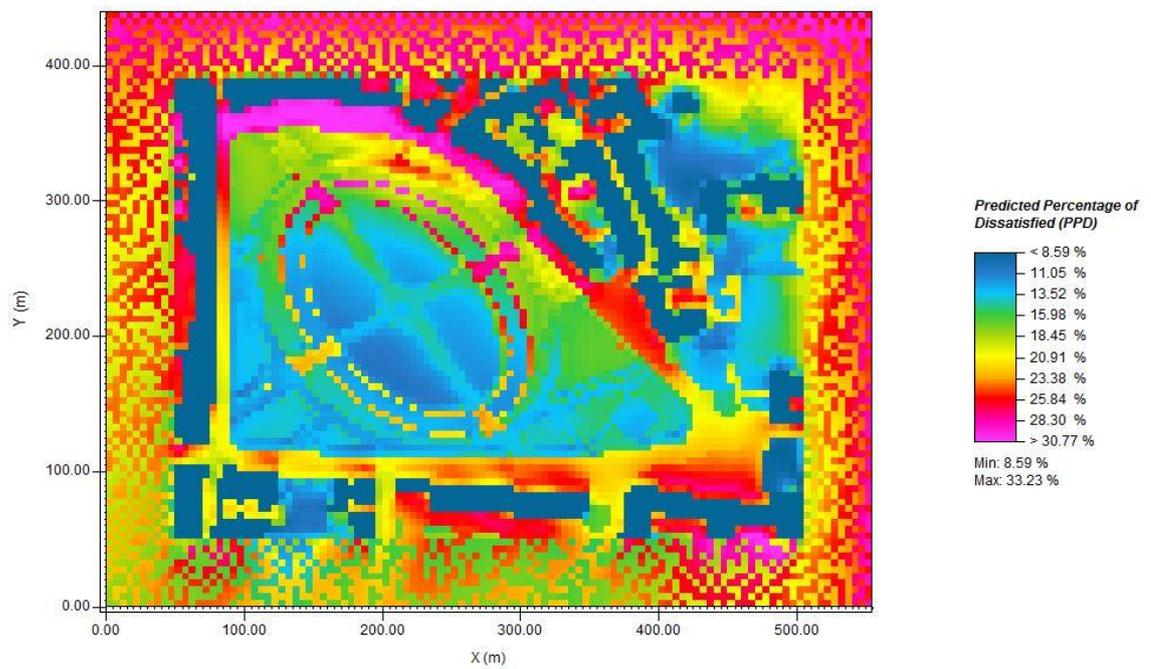


Figura 61 Mappa termografica del PPD a 1.5 m dal suolo (30 luglio, ore 3:00 - Simulazione Green); (fonte: LEONARDO 14)

5. La simulazione dello *Scenario Cool Pavements*

5.1. Introduzione

La terza simulazione riguarda lo scenario Cool Pavements ed ha lo scopo di mostrare l'effetto di mitigazione dell'intensità dell'isola di calore ottenuto grazie all'introduzione di nuovi materiali chiamati appunto *cool materials* (lett. "materiali freddi"), che sono in grado di assorbire una minor quantità di energia solare e quindi di raggiungere temperature inferiori a quelle delle superfici dello stato di fatto.

Una delle cause principali dell'isola di calore è rappresentata infatti dal calore che le pavimentazioni convenzionali assorbono quando sono sottoposte alla radiazione solare. I materiali usati nella costruzione degli edifici e delle strutture urbane giocano un ruolo molto importante nel bilancio termico urbano: essi durante il giorno assorbono e accumulano energia solare, che viene smaltita nella notte attraverso i processi di raffreddamento convettivo e radiativo verso l'ambiente, incrementando così la temperatura dell'aria. La quantità di calore che queste superfici dissipano è direttamente proporzionale alla temperatura superficiale che asfalto e cemento riescono a raggiungere, e a sua volta questa temperatura risulta tanto più alta quanto più questi materiali assorbono l'energia proveniente dal sole. Nel bilancio termico finale la temperatura ambiente risulta quindi aumentata: questo aumento ovviamente è responsabile del discomfort termico ed anche dell'innalzamento del consumo di energia per il raffrescamento, della domanda di energia e dei prezzi dell'energia stessa (Dandou A. et al. 2008, p.2847).

Una soluzione a questo problema prevede l'utilizzo di materiali ad alta riflettanza solare ed elevata emissività termica nell'infrarosso, i cosiddetti "cool materials". L'utilizzo di "espedienti" di questo genere non è assolutamente nuovo dal momento che dall'antichità ci sono giunti eccellenti esempi di architettura vernacolare che testimoniano l'utilizzo di finiture di colore bianco in abitazioni in area mediterranea per diminuire l'impatto termico delle radiazioni solari: il concetto, quindi, non è certamente nuovo, ma i materiali disponibili oggi sul mercato lo sono (Carnielo E. e Fanchiotti A. 2011, pp.12-15). Lo scopo di questi materiali è duplice: innanzitutto l'alta riflettanza, o albedo, permette loro di assorbire una minore quantità di calore durante il giorno e quindi di raggiungere temperature superficiali minori; queste sono molto inferiori a quelle dei tipici materiali da costruzione e, se usati su scala urbana, determinano un minore scambio termico tra le superfici e l'aria esterna, contribuendo a diminuire la temperatura di quest'ultima. L'elevata emissività invece consente di restituire all'atmosfera più facilmente il calore comunque accumulato, così da diminuire, in una sola volta, sia la temperatura degli strati

più esterni attraverso l'incremento delle radiazioni emesse ad onda lunga, sia la pur presente quantità di calore immagazzinata che sarebbe rilasciata durante la notte.

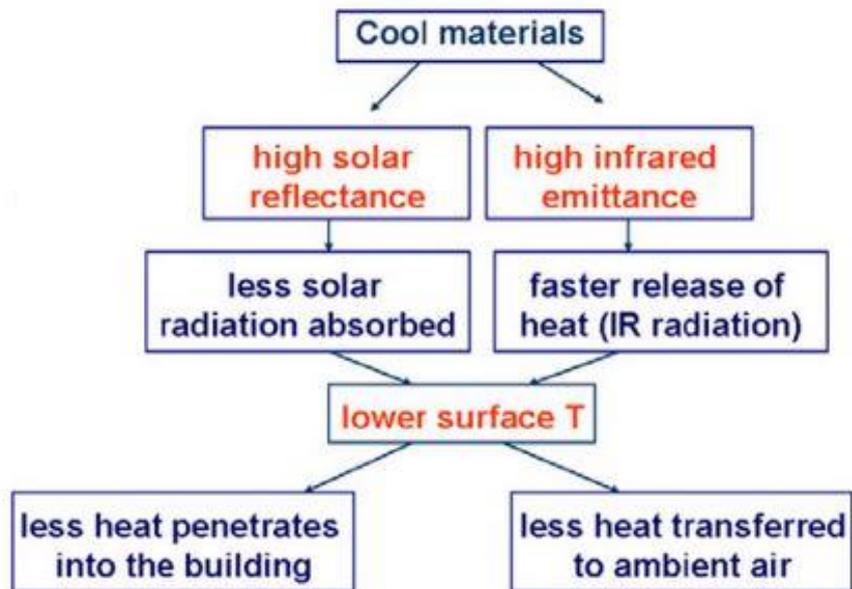


Figura 62 I principi base dei cool materials (fonte: Karlessi T. et al. 2011)

Risulta perciò che, mentre il riscaldamento per effetto della radiazione solare è inversamente proporzionale alla riflettanza, il raffreddamento radiativo è proporzionale all'emissività termica. Il principio del funzionamento dei "materiali freddi" quindi può essere ben spiegato dicendo che aumentando il valore dell'albedo in modo da limitare l'innalzamento termico in presenza di un elevato carico solare durante le ore diurne, si abbassa la quota di energia assorbita; se diminuisce la temperatura, per la legge di Stefan - Boltzmann, l'emissione ad onda lunga si abbassa e quindi ne gioverà l'ambiente. Se poi si incrementa l'emissività, la radiazione ad onda lunga, soprattutto durante il giorno permette di smaltire ancor più in fretta la frazione di radiazione comunque assorbita dalla pavimentazione. Aumentando l'emissione ad onda lunga si aumenta il calore dissipato e si incentiva maggiormente la temperatura ad abbassarsi. In questo modo durante la notte il calore che viene ri-emesso sotto forma di radiazione ad onda lunga dalle superfici è minore sia perché nelle ore diurne è stato assorbito in minor quantità (effetto di un'albedo più alta), sia perché, grazie alla maggiore emissività, il calore immagazzinato è inferiore e quindi è inferiore anche la temperatura superficiale. Ma se la temperatura superficiale di notte è minore, minore sarà, nonostante l'alta emissività (visto che la temperatura ha un esponente 4), anche il calore riemesso nella notte e quindi minore risulterà la temperatura dell'aria. Questo contribuisce a diminuire l'effetto dell'isola di calore e fa dei cool materials i principali strumenti, assieme alle aree verdi, di mitigazione di questo fenomeno.

I normali materiali da costruzione, a parte i metalli, hanno tutti un'elevata emissività ma generalmente anche un elevato assorbimento solare che provoca un notevole innalzamento della temperatura del materiale, ben oltre i valori della temperatura dell'aria: non è raro infatti che zone asfaltate e cemento raggiungano, nel periodo estivo, valori compresi tra 48-67 °C. L'elevata emissività nell'infrarosso è legata al fatto che per ben il 52% la radiazione solare è costituita da radiazione infrarossa appunto e, proprio quest'ultima, viene percepita come calore. Del rimanente 48%, il 5% è costituita da raggi ultravioletti (UV), mentre il 43% dalla luce visibile. Tuttavia, anche se l'emissività termica è un'importante proprietà, ci sono solo poche opzioni di adottare pratiche per l'installazione di cool pavements che la modifichino perché quasi tutti i materiali hanno già di per sé valori di emissività alti (Akbari H. et al. 2002, p.2). Nonostante però questi materiali vengano identificati soprattutto con queste due proprietà sopracitate, vi sono anche degli altri fattori che influenzano quanto prontamente le pavimentazioni assorbano o cedano calore (EPA Cool Pavements 2008, p.9). Essi sono:

- Convezione: la modalità di scambio del calore tra le pavimentazione e l'aria soprastante è quella della convezione; il grado di convezione dipende dalla velocità e dalla temperatura dell'aria, ma anche dalla rugosità e dall'estensione della superficie esposta all'aria stessa.
- Conduttività termica: le pavimentazioni con una bassa conduttività termica possono scaldarsi maggiormente sulla superficie senza trasferire il calore agli strati più bassi o ad altre pavimentazioni adiacenti.
- Capacità termica: i materiali con un'elevata capacità termica possono immagazzinare una quantità maggiore di energia solare; ciò contribuisce ovviamente a creare le isole di calore quando il materiale durante la notte tende a rilasciare il calore accumulato.
- Spessore: pavimenti con uno spessore maggiore sono in grado di assorbire una quota maggiore di radiazioni.

Dal momento però che sono stati effettuati ancora pochissimi studi per determinare l'esatto impatto che delle variazioni di questi tre fattori possono avere sul comportamento delle pavimentazioni sulla temperatura e sull'effetto di isola di calore urbana, e per il fatto che, come già accennato, l'emissività di tutti i materiali sia già pressoché alta, l'unica via praticabile per realizzare dei materiali che possano essere definiti *cool*, fa notare in maniera diffusa la letteratura stessa, è quella di agire sull'albedo.

Le due modalità di intervento maggiori per innalzare l'albedo delle città possono essere rivolte o ad una *totale sostituzione delle superfici esistenti con delle nuove coperture*, oppure a degli interventi di manutenzione ordinaria in cui si provveda a *convertire le pavimentazioni esistenti in cool pavements*. Per quanto riguarda questa seconda opportunità, essa è condivisa da molti come la strategia meno invasiva e soprattutto meno costosa (Levine K. K. 2011, p.2). Addirittura Akbari H. et al. (1996) calcola che il costo addizionale, da aggiungere a quello della manutenzione ordinaria, potrebbe essere di soli 29 \$ ogni 100 metri quadri (per copertura di 6 mm di spessore) qualora la nuova copertura fatta da granulato chiaro fosse reperibile abbastanza facilmente nella zona in cui operare l'intervento; non solo il costo in tal caso potrebbe essere contenuto, ma questo tipo di procedura potrebbe altresì allungare la vita utile del manto stradale e indubbiamente migliorarne le performance termiche.

Per quanto riguarda la *“riabilitazione” delle superfici urbane*, gli interventi principali prevedono di ricoprire con delle particolari sostanze la base asfaltata/cementata già preesistente, senza ricostruire l'intera strada o parcheggio. In molti casi questi interventi possono far parte della normale manutenzione e quindi sono solitamente abbastanza veloci; essi possono comprendere:

1. Chip Seals (Granulati Chiari): viene utilizzato un granulato abbastanza fine di colore chiaro, tenuto insieme da un legante di tipo polimerico o da una resina, in sostituzione delle sostanze derivate dal petrolio, da poggiare sulla aree da lavorare. Utilizzato per aree pedonali e piste ciclabili (Figura 63).
2. Riasfaltatura colorata: all'asfalto vengono aggiunti dei pigmenti coloranti, o un aggregato dal colore chiaro, fissati poi con leganti a base di resine naturali o sintetiche (es. NATURALPAVE). Tipicamente utilizzato per piste ciclabili e marciapiedi (Figura 64).
3. Verniciatura delle superfici: si tratta di un intervento limitato che consente di depositare uno strato di colore sulle superfici già esistenti; viene spesso impiegato sulle aree piccole come zone di transito pedonali nei parcheggi o marciapiedi (Figura 64).
4. Whitetopping e Ultra-thin Whitetopping: viene depositato sulla superficie uno strato di cemento chiaro (dai 5 ai 10 cm di spessore), con dei filamenti che ne aumentano la resistenza alle sollecitazioni; sono molto usati nelle aree di sosta e presentano diversi vantaggi: sono i più rapidi da stendere e permettono una riapertura a velocità record del traffico, sono facili da maneggiare e si possono

poggiare su qualsiasi superficie preesistente, sono molto poco sensibili alle variazioni stagionali e per questo molto più duraturi dell'asfalto (Figura 65).

5. **Microsurfacing**: consiste nel depositare un sottilissimo strato di materiale colorato sulla base esistente per incrementarne l'albedo; si tratta però di materiali sviluppati in laboratorio che presentano altresì delle caratteristiche volte ad incrementare l'aderenza degli pneumatici per la sicurezza dei veicoli in caso di manto stradale bagnato. Prodotti, come *Emerald Cool Pavements*, sono disponibili sul mercato.



Figura 63 Chip Seals (fonte: Kaloush K. 2010)



Figura 64 A sinistra una pavimentazione con utilizzo di resine colorate, a destra esempio di veniciatura delle superfici (fonte: De Carolis L. 2012)



Figura 65 Whitetopping (fonte: Kaloush K. 2010)

Gli interventi che prevedono invece una *costruzione completa di nuove superfici* si muovono verso la realizzazione di terreni ampiamente innovativi che non solo mirano ad abbassare la temperatura superficiale sfruttando l'innalzamento dell'albedo, ma anche favorendo il raffreddamento evaporativo. Questo tipo di procedure sono molto più invasive e richiedono certamente tempi, costi e investimenti maggiori dal momento che i lavori coinvolgono una parte di terreno molto maggiore, visto che la sede stradale deve essere rifondata fin dalla profondità del suolo. Tali strategie prevedono l'installazione di:

1. Asfalti permeabili: sono asfalti che contengono delle piccole cavità create attraverso l'utilizzo di un aggregato dalle dimensioni leggermente più grandi di quelle delle tipiche coperture tradizionali e che permettono all'acqua di drenare e raggiungere gli strati più profondi del manto (Figura 67). Gli asfalti tradizionali infatti sono troppo densi per permettere la permeabilità dell'acqua, e questo limita enormemente lo scambio termico nella forma latente (Bryan H. e Rosheidat A. 2010, pp.2-3). Questi materiali hanno la stessa integrità strutturale degli asfalti convenzionali, ma la loro permeabilità permette di trattenere dell'acqua al di sotto di essi che può evaporare per effetto della radiazione solare, abbassando così la temperatura epidermica della pavimentazione. Questi asfalti inoltre consentono di "scaricare" dalla carreggiata in un tempo maggiore la pioggia, aumentando la sicurezza degli automobilisti e danno anche la possibilità di raccogliere più facilmente l'acqua piovana e indirizzarla verso falde acquifere o bacini di irrigazione (Golden J. e Kaloush K. 2007). Anche secchi questi pavimenti possono dare il loro contributo: il fatto che abbiano molti vuoti incrementa la loro superficie disponibile. L'area maggiore può aiutare ad incrementare il movimento

dell'aria (convezione) sul pavimento favorendo il trasferimento del calore dal pavimento all'aria. Se quindi durante il giorno il pavimento immagazzina meno calore, durante la notte il rilascio di calore viene ridotto, apportando significativo contributo alla diminuzione dell'isola di calore sperimentata in molte città nel periodo notturno (Queste superfici drenanti tuttavia comportano una manutenzione più frequente per impedire a polvere e ad altre particelle di ostruire le porosità, ma nel contempo riducono anche il rumore prodotto dal transito di auto e camion. (Es. asfalti drenanti, autobloccanti, asfalti gommati)

2. Pavimentazioni permeabili con vegetazione: sono pavimentazioni a griglie, costituite da asfalto o molto più spesso da cemento, negli interstizi delle quali viene fatta crescere dell'erba (Figura 68); sebbene la loro resistenza strutturale sia stata dimostrata simile a quella degli asfalti comuni, questo tipo di copertura viene utilizzata nelle aree dove sono presenti ridotti volumi di traffico (ad es. parcheggi) per non danneggiare troppo la vegetazione. Spesso il cemento trattato in modo da fargli assumere un elevato valore di albedo: nello stesso tempo anche l'erba contribuisce ad abbassare la temperatura se supportata ovviamente da piccoli impianti di irrigazione che aiutino a mantenere un certo grado di umidità nel terreno degli interstizi. Questo tipo di applicazione è notevole dal punto di vista sia delle performance sia dal lato estetico, ma richiede una manutenzione costante.
3. PCM (Phase Change Materials): sono applicazioni di ultima generazione dal momento che sono delle coperture che contengono al proprio interno, micro incapsulati in una sottile pellicola polimerica ad alto peso molecolare (per permettere l'espansione nel processo di cambiamento di stato), dei nano materiali che sono in grado di immagazzinare calore nella forma latente attraverso il loro cambiamento di fase; i materiali di questo tipo offrono una grande densità di energia immagazzinata e inducono la realizzazione di un processo di natura isotermica, che si realizza proprio quando avviene il passaggio da solido a liquido e viceversa (Apostolakis K. et al. 2011, pp.570-576). Durante il giorno i PCM assorbono parte del calore attraverso il processo di fusione mentre di notte lo rilasciano nel processo di solidificazione. L'effetto è che la temperatura diurna tende a diminuire non solo perché parte della radiazione viene dissipata nella forma latente, ma anche perché tale passaggio di fase avviene a temperatura costante. Esistono più tipi di PCM, a seconda della temperatura di fusione (18, 24, 28 °C), e possono avere anche differenti concentrazioni. Questi materiali molto particolari quindi non fanno altro che

ritardare il riscaldamento delle superfici immagazzinando calore sotto forma di calore latente e abbassando quindi la temperatura superficiale. Rispetto alle coperture comuni, la temperatura superficiale dei pavimenti trattati con PCM varia a seconda del tipo (dai 2.9 agli 8.3 °C inferiori) (Karlessi T. et al. 2011, p.573). L'effetto maggiore si percepisce con i materiali che hanno la temperatura di fusione maggiore. Ulteriormente, nel confronto con gli altri materiali cool, le temperature delle aree trattate con PCM sono risultate inferiori per valori in un range tra 0.6 e 2.6 °C (Apostolakis K. et al. 2011, p.573). In altri casi si è riscontrato un calo delle temperature superficiali fino a 8 °C e un abbassamento generalizzato della temperatura dell'aria del 12 % (Karlessi T. et al. 2011, p.575-576).



Figura 66 Asfalti drenanti (fonte: Kaloush K. 2010)



Figura 67 Asfalti permeabili (fonte: Golden J. e Kaloush K. 2007)



Figura 68 Pavimentazione permeabile con vegetazione (fonte: De Carolis L. 2012)

5.2. Il modello

Per mantenere una certa aderenza con la realtà, occorre realizzare una simulazione che utilizzi il più possibile terreni e pavimentazioni che si adattino alle caratteristiche emerse dagli studi effettuati sui cool materials. In tal caso però si manifestano tutti i limiti del software: innanzitutto non è possibile simulare la presenza di *pavimentazioni porose o permeabili*; l'unico tipo di "soil" a cui ENVI-met dà la possibilità di essere permeabile è il suolo terroso che si trova solo al di sotto delle aree verdi. Ovviamente tale tipo di superficie è completamente diverso da quello da simulare e quindi la possibilità di riprodurre il comportamento di questo tipo di cool pavement viene meno.

Non vi è alcuna speranza nemmeno di modellare la *pavimentazione permeabile con vegetazione*: in tal caso l'unica opportunità di identificare una soluzione a questo problema potrebbe consistere nel simulare questo tipo di copertura attraverso una griglia alternata di zone con asfalto e zone con erba. Le difficoltà però emergono dal fatto che, anche riducendo al minimo il passo delle grids, esso non potrebbe essere inferiore a 0.5 m, assolutamente troppo grande per poter pensare di assimilare questo tipo di modello, alle pavimentazioni con vegetazione, solitamente delle dimensioni di al massimo 20 cm.

Per quanto riguarda invece i *PCM*, da un lato le conoscenze sulle effettive potenzialità di questo tipo di copertura sono ancora limitate, dall'altro comunque anche in questo caso ENVI-met non consente in alcun modo di ricreare le stesse condizioni che le coperture con questo tipo di materiali presentano. Non vi è nemmeno la possibilità di

forzare la quantità di calore latente scambiato dall'asfalto così da simulare in qualche modo il comportamento sulla superficie di una sorta di PCM.

Ancora pochissimi studi sono stati condotti sulla *conduttività termica* dei cool materials: spesso le variazioni di questo parametro nei materiali in questione vengono fatte includendo nella mistura dell'asfalto piccole particelle di ceramica o di metallo (Golden J. S. et al. 2010, pp.13-22). Questo tipo di azioni non sono assolutamente praticabili con ENVI-met e nello stesso tempo non si riescono a reperire dati sufficienti che possano supportare delle simulazioni numeriche affidabili. Da questo punto di vista quindi occorre attendere uno sviluppo della conoscenza trainata ovviamente da approfonditi studi e ricerche in laboratorio.

Molto diffusa è la pratica della *riafaltatura con l'aggiunta di pigmenti colorati chiari* che tendono ad aumentare la quantità di radiazione solare riflessa verso l'ambiente. Pur essendo un'applicazione comune e di assai semplice svolgimento nella pratica, si tratta di una procedura che il software non può simulare: non c'è alcuna possibilità infatti, di modificare la lunghezza d'onda delle radiazioni riflesse dai terreni. Come sappiamo sono le porzioni di radiazione riflessa ed assorbita ad essere responsabili della percezione del colore. A meno di oggetti incandescenti (quelli con temperatura superficiale superiore a 1000 K) infatti, il colore è dovuto ad assorbimenti e riflessioni selettivi della radiazione visibile incidente (naturale o artificiale che sia) da parte della superficie degli oggetti. A seconda della lunghezza d'onda, all'interno del campo del visibile, che gli oggetti assorbono e riflettono, questi assumono ai nostri occhi colori differenti. Per tale ragione, un corpo risulterà rosso per esempio perché tra le varie lunghezze d'onda dello spettro del visibile della radiazione solare, quelle relative al rosso (tra i 620 e i 750 nm) non vengono assorbite ma vengono riflesse dalla sua superficie colpendo così i recettori dell'occhio umano. I diversi colori assumeranno le varie tonalità a seconda delle lunghezze assorbite e riflesse, con le uniche eccezioni dei due "non colori", ovvero il nero e il bianco. Infatti la tinta nera deriva dal fatto che la superficie assorbe tutte le lunghezze del visibile; quella bianca, al contrario, sta ad indicare che tutto il visibile viene riflesso. Proprio per tale motivo, è preferibile utilizzare colori molto chiari o bianchi perché in tal modo tutte le radiazioni dello spettro del visibile vengono riflesse dalla superficie. Così facendo, la quantità di radiazione solare assorbita risulterà minore, minore sarà quindi la temperatura superficiale delle pavimentazioni, e questo influirà sull'abbassamento della temperatura dell'aria circostante. Tuttavia, come già precedentemente notato, non è possibile introdurre alcun parametro in ENVI-met che permetta di modificare la lunghezza d'onda nel campo del visibile a cui avvenga la

riflessione delle radiazioni luminose da parte dei corpi, e quindi il colore di questi. Anche in questo caso quindi il software non consente una corretta simulazione.

Per quanto riguarda l'*emissività*, che è uno dei parametri caratteristici dei cool materials, è necessario fare due distinte considerazioni.

- Innanzitutto, occorre fare i conti con l'impossibilità imposta da ENVI-met di agire sul valore del parametro in questione variando la lunghezza d'onda a cui avviene l'emissione di radiazioni termiche. Volendo misurare l'emissività di una superficie reale, occorre considerare che questa varia, a sua volta, al variare della lunghezza d'onda delle radiazioni emesse. Tuttavia, ENVI-met considera tutte le superfici del modello come *superfici grigie*, vale a dire superfici le cui proprietà, e quindi anche l'emissività, sono considerate costanti rispetto alla lunghezza d'onda (Figura 69). Così facendo, non vi è alcuna possibilità di simulare efficacemente i cool materials, che invece presentano alti valori di emissività nel range di lunghezze d'onda del vicino infrarosso (tra 0.75 e i 5 μm). In mancanza perciò di questa possibilità, il vincolo dell'emissività elevata nel range sopradescritto non può essere rispettato.

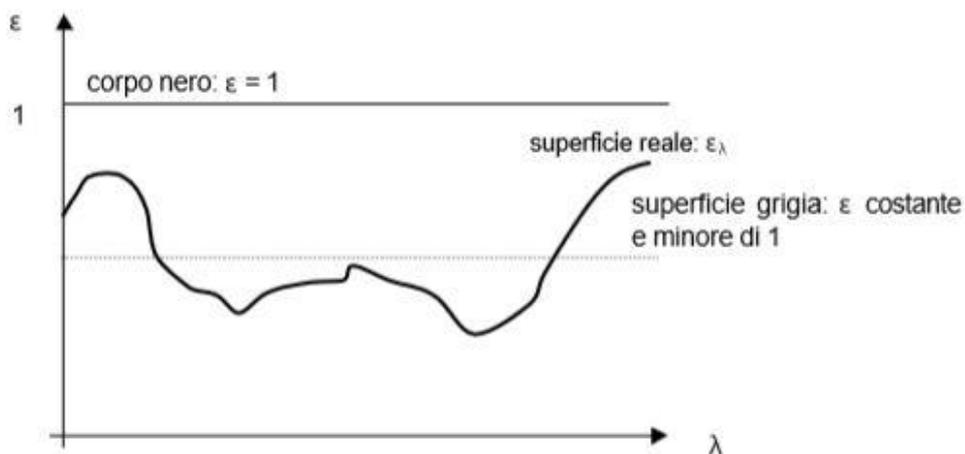


Figura 69 Confronto delle emissività di diversi tipi di superficie al variare della lunghezza d'onda (fonte: Peron F. 2000 / 2001)

- In aggiunta a questo limite imposto da ENVI-met, si è scelto di non apportare alcuna modifica nemmeno al valore costante delle diverse pavimentazioni; questo perché esso si presenta già molto alto (0.90) e proprio per questo motivo ulteriori aumenti non darebbero alcun riscontro di miglioramento netto, come peraltro già fatto notare precedentemente da Akbari H. et al. (2002, p.2).

L'ultimo parametro da poter modificare per simulare la presenza di cool pavements nell'area di studio è l'*albedo* delle superfici. Come già si è mostrato in precedenza, il mercato propone una discreta varietà di questo tipo di materiali, ognuno con proprietà e campi di azione differenti. Per realizzare quindi la simulazione di questo scenario, si è deciso di raccogliere i valori della riflettanza solare delle diverse applicazioni (Tabella 11), attraverso i dati provenienti da numerosi articoli o riviste specializzate. Sulla base di tali risultati, si è calcolato un valor medio che potesse rappresentare in maniera generica tutti questi tipi di "materiali freddi"; quindi, la media di questi valori, 0.5, è stata utilizzata per realizzare la simulazione, modificando sia l'albedo dell'asfalto che quello del cemento. La variazione ha comportato per l'asfalto un salto da 0.2 a 0.5, mentre per il cemento da 0.4 a 0.5.

In ENVI-met però, non solo è possibile modificare l'albedo dell'asfalto e delle pavimentazioni, ma anche quello dei muri e dei tetti degli edifici: per lo scenario Cool Pavements tuttavia, la scelta è ricaduta sulla variazione dei soli parametri delle superfici della strada e dei marciapiedi, lasciando inalterati i valori per tutte le altre strutture. La maggior parte di queste infatti è rappresentata dai magnifici palazzi che cingono la piazza e che spiccano per l'enorme valore artistico delle loro facciate: risulta impensabile quindi qualunque intervento su questo tipo di costruzioni che conservino immutati i valori di albedo delle simulazioni precedenti.

Nonostante tra i vari dati raccolti vi siano dei valori molto alti (0.8-0.9), alcuni studiosi fanno notare che spesso elevati indici di riflettanza possono causare problemi di abbagliamento. Non è raro infatti, affermano Karlessi T. et al. (2011), che la grande capacità riflettente di questi materiali possa disturbare la vista di coloro che si trovano alla guida; per tale motivo sono già da anni allo studio diversi materiali con cui risolvere questo fastidioso problema: Kinouchi T. et al. (2004) per esempio hanno sviluppato una particolare vernice con cui ricoprire gli asfalti preesistenti dotata sia di un'elevata albedo che di una bassa luminosità. Il suo potere riflettente nella parte visibile dello spettro è stato ridotto al 23%, mentre quello nel range del vicino infrarosso aumentato fino all'86%. Azioni di questo tipo ovviamente non possono essere effettuate con ENVI-met, dal momento che, come accade per l'emissività, non è possibile variare le proprietà dei materiali in funzione della lunghezza d'onda delle radiazioni riflesse od emesse.

<i>Tipo</i>	<i>Valore Albedo</i>	<i>Autore</i>
Riasfaltatura colorata	0.6 ÷ 0.75 0.6 0.27 ÷ 0.55 (beige e verde) 0.61 ÷ 0.68 (grigio e giallo) 0.35	Akbari H. et al. (2002) EPA Cool Pavements 2008 Santamouris M. et al. (2011) Santamouris M. et al. (2011) Sailor D. J. (1994)
Pavimentazione con polimeri	0.72 0.7 ÷ 0.78 0.7 (bianco)	Taha H. (1997) Akbari H. et al. (2002) Muscio A. (2014)
Pavimentazione con resine	0.7	Levine K. K. (2011)
Verniciatura delle superfici	0.4 ÷ 0.6 0.8 ÷ 0.9 (bianco)	Akbari H. et al. (2002) Muscio A. (2014)
Granulati chiari su base asfaltata (chip seals)	0.6 0.3 ÷ 0.5 0.3 0.45 0.35 0.3 (grigio - giallognolo)	Muscio A. (2014) Akbari H. et al. (2002) Santamouris M. et al. (2011) Yang X. et al. (2013) Carnielo E. et al. (2012) Akbari H. et al. (2007)
Whitetopping	0.3 ÷ 0.45 0.4 ÷ 0.7	Santamouris M. et al. (2011) EPA Cool Pavements 2008
Microsurfacing	0.35	EPA Cool Pavements 2008
Pavimentazioni con cemento trattato	0.4 ÷ 0.7 0.6 ÷ 0.77	EPA Cool Pavements 2008 Santamouris M. et al. (2011)
Media	~ 0.5*	

Tabella 11 Riassunto dei valori di albedo dei diversi tipi di Cool Materials, provenienti dalla letteratura

* tale valore (0.51 ~ 0.5) è ottenuto dalla media tra la media dei valori minimi (0.47) e quella dei valori massimi (0.57).

5.3. I risultati

Come si può notare dalla Figura 70, la temperatura dell'aria intorno alle ore 15:00 si presenta tra i 32 e i 34 °C, sinonimo della notevole diminuzione che comporta questo nuovo scenario Cool. Per la maggior parte delle aree asfaltate la temperatura risulta inferiore rispetto a quella misurata nello stato di fatto di almeno 3 - 3.5 °C. Flessioni di questa entità sono state rilevate da Taha H. (2005) che, con un cospicuo aumento dell'albedo assimilabile a quello effettuato in questa simulazione mostra una diminuzione generale della temperatura di 3.5 °C. Altri test compiuti in laboratorio confermano che in tal caso le diminuzioni si dovrebbero attestare proprio tra i 2 e i 4 °C (EPA Cool

Pavements 2008, p.24). Anche nelle ore notturne la temperatura dell'ambiente risente di questo calo e si abbassa fino a raggiungere i 27 - 28 °C.

Inoltre, in confronto alle temperature rilevate nella notte nello stato di fatto, quelle della simulazione coi materiali cool denotano un abbassamento generale quantificabile tra 1.5 e 2 °C. Da notare, in questo caso, che l'abbassamento si presenta in maniera generalizzata su tutta la piazza con la stessa intensità: questo dimostra che l'aumento della riflettanza solare non solo imprime il proprio potere mitigante sulle zone asfaltate in maniera diretta, ma anche in maniera indiretta su tutta l'area circostante. Lo dimostra il fatto che le superfici sull'Isola Memmia, per la maggior parte coperte da prati e alberi, assistano ad una diminuzione generale della temperatura della stessa quantità di quella mostrata dalle zone pavimentate, vale a dire intorno ai 1.5 - 2 °C.

È dai valori puntuali però che si possono trarre le considerazioni più immediate: la temperatura potenziale subisce la diminuzione più consistente, di ben 3.9 °C nel pomeriggio, nella posizione 2, che si trova sull'asfalto; nel corso della notte la differenza si riduce fino a raggiungere i 1.7 °C. Non da meno è la risposta di tutti gli altri punti che mediamente assistono ad un raffrescamento di 3.6 °C alle 15:00, e di 1.6 °C alle 3:00 rispetto allo stato di fatto.

	Pos.1	Pos.2	Pos.3	Pos.4	Pos.5	Pos.6	Pos.7
Data	29-lug	29-lug	29-lug	29-lug	29-lug	29-lug	29-lug
Orario	15:00	15:00	15:00	15:00	15:00	15:00	15:00
T potenziale (°C)	32.3	33.0	32.2	32.6	32.5	32.2	31.9
UHI Intensity (°C)	3.1	3.8	3.1	3.4	3.4	3.0	2.7
T media radiante (°C)	85.3	35.6	68.1	68.2	77.7	62.2	32.4
PMV	6.0	2.6	5.0	5.0	5.6	4.5	2.2
PPD (%)	100	95.5	100	100	100	100	85.4

Tabella 12 Dati ottenuti dalla simulazione Cool Pavements, nei sette punti scelti, alle ore 15:00. Gli indici di comfort si riferiscono ad un soggetto in abiti estivi (0.5 clo), in leggera attività (116 W)

	Pos.1	Pos.2	Pos.3	Pos.4	Pos.5	Pos.6	Pos.7
Data	30-lug	30-lug	30-lug	30-lug	30-lug	30-lug	30-lug
Orario	3:00	3:00	3:00	3:00	3:00	3:00	3:00

T potenziale (°C)	27.4	27.6	27.2	27.4	27.2	27.2	27.1
UHI Intensity (°C)	6.7	6.9	6.5	6.7	6.5	6.5	6.4
T media radiante (°C)	20.7	20.2	16.8	16.9	17.5	15.9	16.8
PMV	0.6	0.7	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4
PPD (%)	12.5	15.1	8.0	8.8	8.8	6.9	7.7

Tabella 13 Dati ottenuti dalla simulazione Cool Pavements, nei sette punti scelti, alle ore 3:00. Gli indici di comfort si riferiscono ad un soggetto in abiti estivi (0.5 clo), in leggera attività (116 W)

In letteratura spesso capita di quantificare l'efficacia dei cool pavements registrandone la temperatura superficiale piuttosto che quella dell'aria circostante. Volendo quindi mostrare, analogamente ad altri studi, gli effetti diretti dell'elevata riflettanza di queste superfici, si è scelto di analizzare anche la temperatura superficiale della posizione 1, che si trova in mezzo ad un'ampia zona asfaltata. I risultati nella tabella seguente (Tabella 14) indicano le differenze riscontrate alla stessa ora tra lo scenario As Is e quello in analisi: la temperatura dell'aria nel caso cool si presenta inferiore di ben 3.8 °C, mentre quella superficiale cala di 9.3 °C! Risultati analoghi a questi sono stati riscontrati in diversi studi: un incremento di 0.25 nel valore dell'albedo delle pavimentazioni, è coinciso con una riduzione di 10 °C della temperatura del suolo (Akbari H. et al. 2001, pp.305-306). In altri casi, con l'introduzione di materiali cool di riflettanza compresa tra 0.4 e 0.85, la temperatura superficiale è risultata ridursi di una quantità variabile tra i 7.5 e i 15 °C (Berdahl P. e Bretz S. E. 1997; Livada I. et al. 2006). Queste diminuzioni - continuano Livada I. et al. (2006, p.980) - corrispondono a variazioni nella temperatura dell'aria intorno ai 4 °C, misurabili nelle ore pomeridiane, e di circa 2 °C nella notte. Anche questi dati sono perfettamente in linea con quelli ottenuti dalla simulazione.

	Posizione 1	
Simulazione	AsIs	Cool
Data	29-lug	29-lug
Orario	15:00	15:00
T potenziale (°C)	36.1	32.3
T media radiante (°C)	80.2	85.3
T superficiale (°C)	51.9	42.6

$$\Delta T \text{ superficiale} = 9.3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Tabella 14 Dati sulla temperatura media radiante, temperatura superficiale e temperatura dell'aria per la posizione 1, negli scenari As Is e Cool Pavements

Per ciò che riguarda la temperatura media radiante, si può notare come alle ore 15:00 essa raggiunga un valore superiore a quello fatto registrare nello stato di fatto solo nella posizione 1, che si trova sull'asfalto (passa da 80.2 °C a 85.3 °C). Questo fatto potrebbe sembrare un dato fuorviante o errato, dal momento che si sta affrontando la simulazione di uno scenario di mitigazione e quindi chiunque si aspetterebbe di vedere un abbassamento generale nei valori dei parametri analizzati. Tuttavia occorre notare che quest'innalzamento è assolutamente in regola con l'azione dei cool pavements: come detto in precedenza infatti, la temperatura media radiante in ENVI-met viene calcolata sulla base dei flussi di calore che investono un generico soggetto posizionato al centro della grid presa in considerazione del modello. Tra queste radiazioni ovviamente vi sono anche quelle solari riflesse dal terreno; dal momento che è stata aumentata però la riflettanza dell'asfalto, la quantità di radiazioni solari riflesse dalla superficie risulta aumentata e quindi una quota maggiore di essa entra nel bilancio energetico per il calcolo della temperatura media radiante. È questo quindi il motivo per cui nel punto 1, che si trova sull'asfalto, la temperatura media radiante è superiore al valore registrato nello scenario As Is.

I vantaggi del cambiamento dell'albedo però si fanno sentire nella notte quando la TMR si abbassa più dello scenario As Is: quando scompare infatti la radiazione solare, l'unico fattore che interessa il bilancio energetico per il calcolo della temperatura media radiante diventa il flusso di energia ad onde lunghe emesso dal terreno. Questa radiazione, proporzionale alla temperatura superficiale, risulta minore di quella alla stessa ora della simulazione dello stato di fatto: l'aumento dell'albedo, infatti, ha fatto aumentare la capacità riflettente dell'asfalto, che ha assorbito meno energia durante le ore diurne, permettendogli di raggiungere una temperatura superficiale inferiore. Conseguenza di questa minore temperatura è la diminuzione dell'emissione di radiazioni ad onde lunghe nella notte, la quale incide perciò sull'abbassamento della TMR.

L'effetto benefico dell'abbassamento della temperatura dell'aria e di quella media radiante fa in modo che si abbassi anche il valore del PMV. Pur restando comunque oltre il valore 4 per parte della giornata nei vari punti, (basti guardare le figure da Figura 108 a Figura 114) alle ore 15:00 tutte le posizioni registrano un sensibile calo rispetto allo stato di fatto: mentre alcuni punti però fanno segnare differenze notevoli, anche superiori all'unità (pos. 4, 5, 6), la posizione 1 è quella che registra la diminuzione meno intensa,

di soli 0.7. Sulla tendenza alla riduzione incide ovviamente la diminuzione consistente della temperatura dell'aria, ma a causare un abbassamento meno intenso degli altri punti è proprio la temperatura media radiante che, come già mostrato, invece aumenta. Nella notte il PMV scende molto sotto l'unità in tutte le posizioni, ad indicare una sensazione di benessere termico su tutta la piazza. La conferma di questo avviene guardando sia la mappa termica alle ore 3:00 (Figura 75), sia focalizzandosi sull'analisi dei sette punti scelti. Anche in questo caso, risulta doveroso far notare come la differenza tra i valori registrati nello stato di fatto e quelli dello scenario Cool Pavements non coinvolga solo le zone direttamente interessate dal cambiamento della riflettanza, ma sia comune a tutta la piazza, a sottolineare ancora una volta che l'effetto mitigante portato dai cool pavements si fa sentire anche nelle aree limitrofe.

Trova infine un notevole miglioramento l'effetto dell'isola di calore: alle ore 15:00 si può registrare il primo grande calo, passando da un valor medio tra i vari punti di 6.8 °C, ai soli 3.2 °C della simulazione Cool Materials. Nella notte, quando il fenomeno si rende maggiormente significativo, la sua intensità si aggira intorno ai 6.6 °C, registrando una diminuzione media di 1.7 °C dal valore dello stato di fatto.

È indubbia quindi la capacità di questo tipo di materiali di mitigare l'isola di calore. Con essi, però, si possono perseguire anche altri vantaggi tipici degli scenari di mitigazione: l'abbassamento della temperatura dell'aria comporta ovviamente un miglioramento della qualità dell'aria e una diminuzione dei consumi di energia elettrica per l'alimentazione dei sistemi di condizionamento degli edifici; si è calcolato addirittura che se l'albedo dell'area urbana di Los Angeles aumentasse da 0.1 a 0.35, i risparmi in tal senso si potrebbero quantificare in novanta milioni di dollari l'anno (EPA Cool Pavements 2008, p. 23). In aggiunta, i risultati possono avere ancora maggior rilievo se i cool materials vengono introdotti non solo sulle superfici stradali o sulle zone pedonali, ma anche sulle coperture degli edifici e sui muri, i cosiddetti *cool roofs* (lett. "tetti freddi"). Progetti pilota sono stati avviati in Grecia, dove il fenomeno dell'isola di calore è molto intenso, con risultati ottimi: l'adozione di cool roofs dalla riflettanza di 0.63 ha segnato una diminuzione della temperatura compresa tra 0.8 e 1.6 °C, ad un'altezza di 2 m dal suolo, alle ore 15:00 di una tipica giornata estiva (15 agosto), nel centro di Atene (Dandou A. et al. 2006, p.5). Altre simulazioni compiute a Roma hanno evidenziato l'efficacia dell'azione congiunta di questi due tipi di interventi: con l'albedo dell'asfalto portato a 0.35 e quello delle pareti orizzontali e verticali degli edifici rispettivamente a 0.7 e 0.6, il modello ha fatto registrare un abbassamento della temperatura dell'aria di quasi 3.5 °C (Carnielo E. e Fanchiotti A. 2011, p.15).

Occorre infine fare un'ultima considerazione sui Cool Pavements: ad oggi, per le potenzialità dimostrate, queste pavimentazioni sono ancora troppo poco diffuse. I motivi sono maggiormente legati al fatto che, a differenza dei cool roofs, gli elementi da considerare sono molti, non ultimo il concetto legato al fatto che materiali di questo genere devono comunque coniugare in sé le proprietà di riflettanza con quelle di resistenza all'usura, per il semplice motivo che hanno il compito principale di sostenere ogni giorno il transito di migliaia e migliaia di automobili. Per giunta entra anche in gioco il fattore dello sporco: quanto infatti potrebbe diminuire l'efficienza di questi materiali a causa dei residui solidi dei gas di scarico dei veicoli è, per esempio, ancora tutto da studiare (EPA Cool Pavements 2008). La maggior parte degli studi compiuti finora quindi, tranne qualche eccezione, risulta basata ancora sulla simulazione numerica attraverso dei software. Mentre queste analisi hanno lo scopo soprattutto di quantificare i benefici e il potenziale impatto sull'ambiente, portati con l'adozione dei cool pavements, c'è sempre di più la necessità di piani di intervento reali con cui ottenere dei risultati concreti (Levine K. K. 2011, p.5). Nello stesso tempo, la spinta verso l'utilizzo di questi nuovi materiali deve provenire da dei progetti maggiormente "pratici": è quello che auspicano da tempo Akbari H. et al. (1995, p.263-264). Secondo loro, innanzitutto devono essere effettuati delle procedure di test per classificare ed etichettare i vari tipi di materiali esistenti, con lo scopo di creare una sorta di database generale dei cool materials: in questo modo le industrie, gli architetti, gli enti pubblici e gli stessi cittadini hanno la possibilità di conoscere tale tipo di materiali e poterli effettivamente sperimentare nelle loro attività quotidiane. Solo l'informazione e la chiarezza a riguardo possono essere gli elementi che permettono la diffusione di questi cool pavements. Per ognuno di essi, un'etichetta dovrebbe definire univocamente le caratteristiche tecniche principali, come:

- 1- Un valore indicativo della temperatura superficiale a mezzogiorno, in un giorno tipicamente estivo, in un luogo ad una latitudine nota; questo fungerebbe da termine di confronto tra diversi materiali.
- 2- Un indicatore della longevità dell'alta riflettanza solare della superficie, che tende a diminuire nel corso degli anni per effetto dell'usura e dello sporco (ad esempio il valore dopo tre anni di esercizio su una strada mediamente trafficata potrebbe essere una valida informazione).
- 3- La temperatura superficiale se sottoposto alle fiamme, dal momento che questi materiali offrono solitamente una buona protezione dal fuoco, e per questo potrebbero venire utilizzati nella sicurezza delle abitazioni.

- 4- Un indice che quantifichi la vita utile, così da permettere di ripartire i costi da sostenere per l'installazione negli anni di attività.

Solo in questo modo quindi gli sforzi della ricerca possono trovare uno sbocco nella vita reale e permettere così alla comunità di godere dei benefici introdotti da questo tipo di materiali. Le simulazioni numeriche al computer devono essere quindi il punto di partenza per interventi concreti che mirino a migliorare la qualità di vita di ognuno nelle città, e non il capolinea di un'infruttifera ricerca.

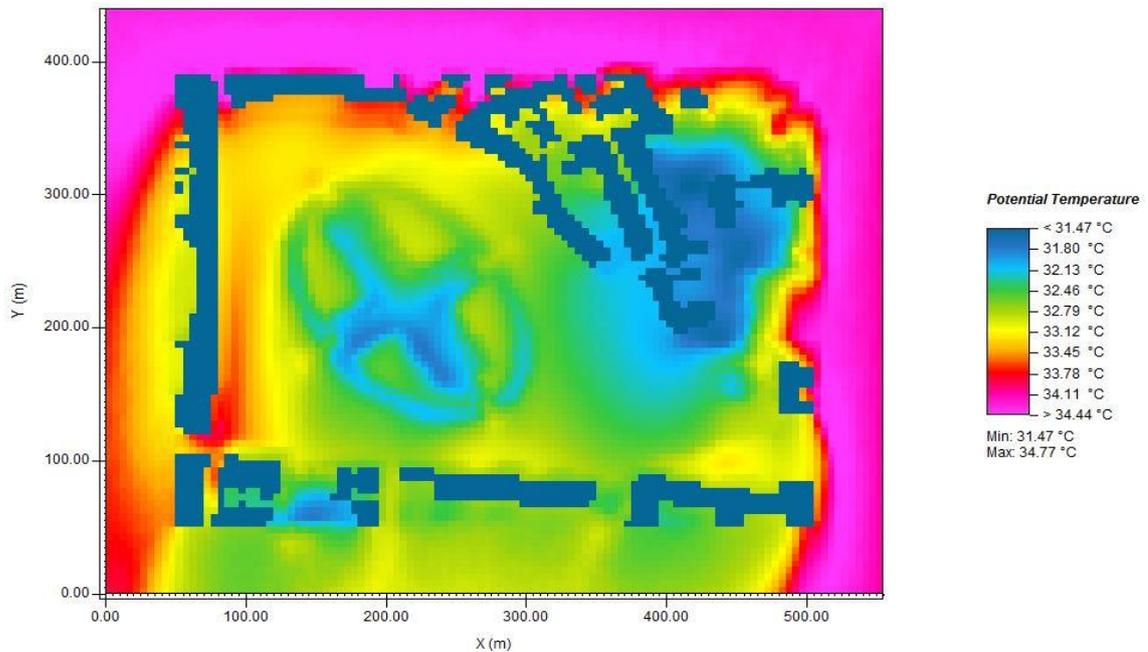


Figura 70 Mappa termografica della temperatura potenziale dell'aria a 1.5 m dal suolo (29 luglio, ore 15:00 - Simulazione Cool Pavements); (fonte: LEONARDO 14)

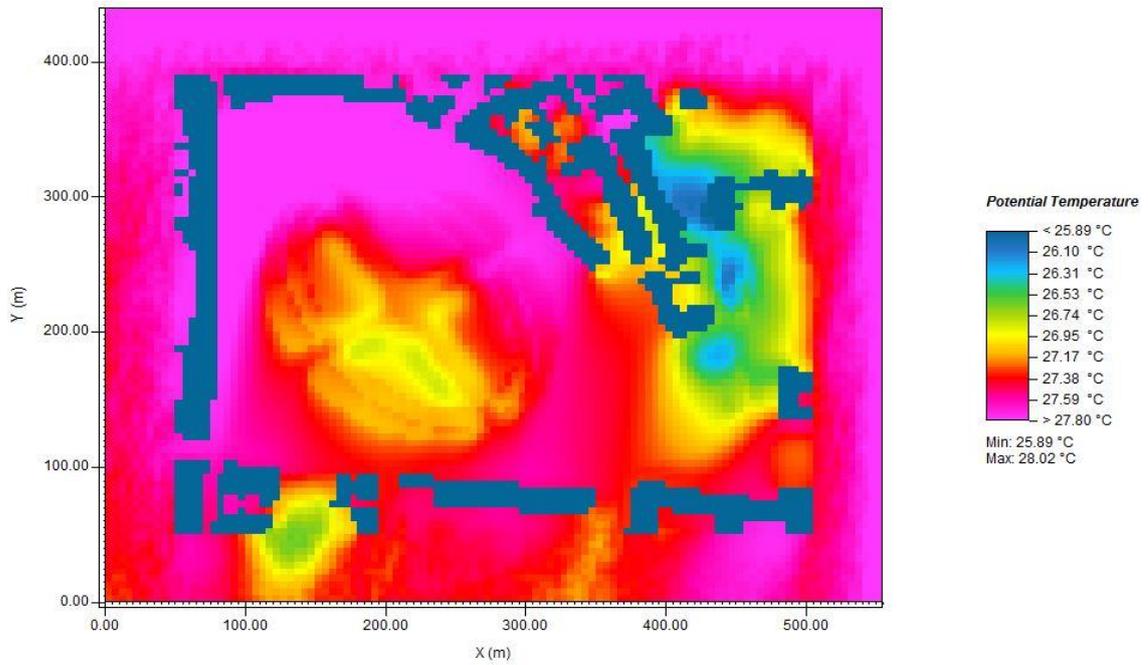


Figura 71 Mappa termografica della temperatura potenziale dell'aria a 1.5 m dal suolo (30 luglio, ore 3:00 - Simulazione Cool Pavements); (fonte: LEONARDO 14)

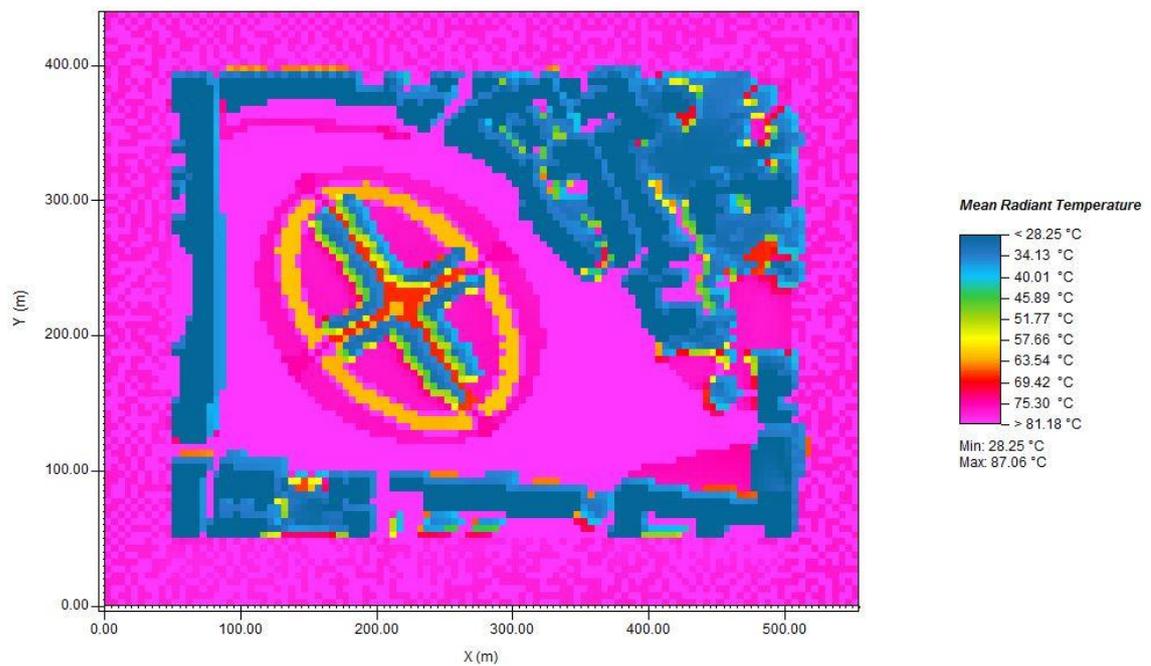


Figura 72 Mappa termografica della temperatura media radiante a 1.5 m dal suolo (29 luglio, ore 15:00 - Simulazione Cool Pavements); (fonte: LEONARDO 14)

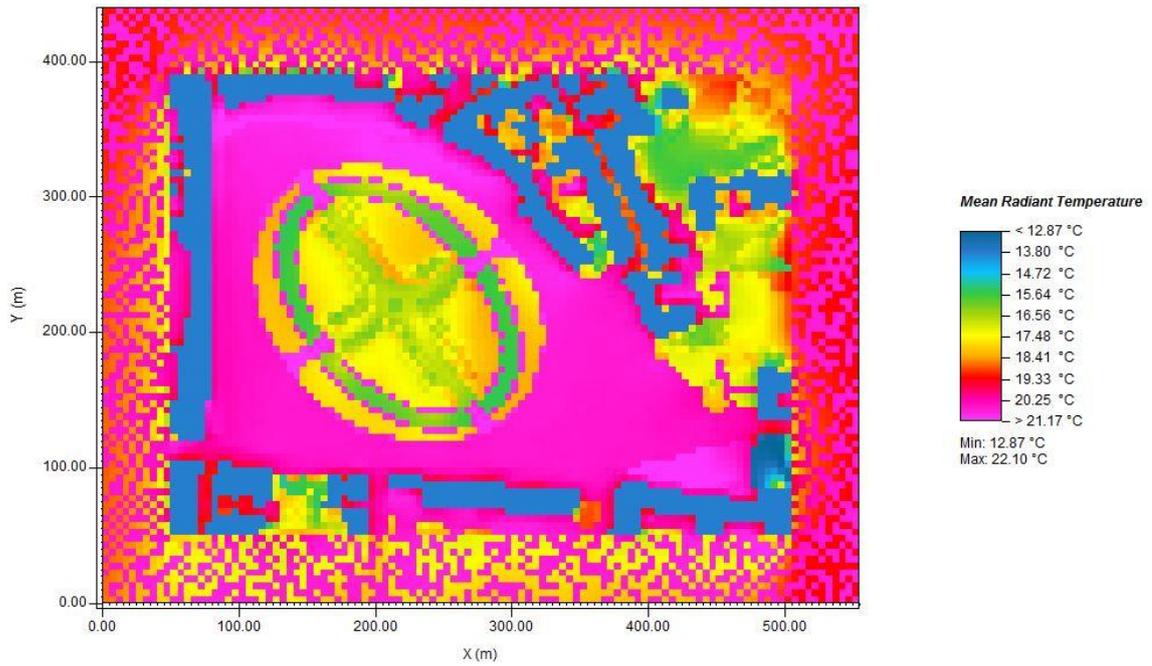


Figura 73 Mappa termografica della temperatura media radiante a 1.5 m dal suolo (30 luglio, ore 3:00 - Simulazione Cool Pavements); (fonte: LEONARDO 14)

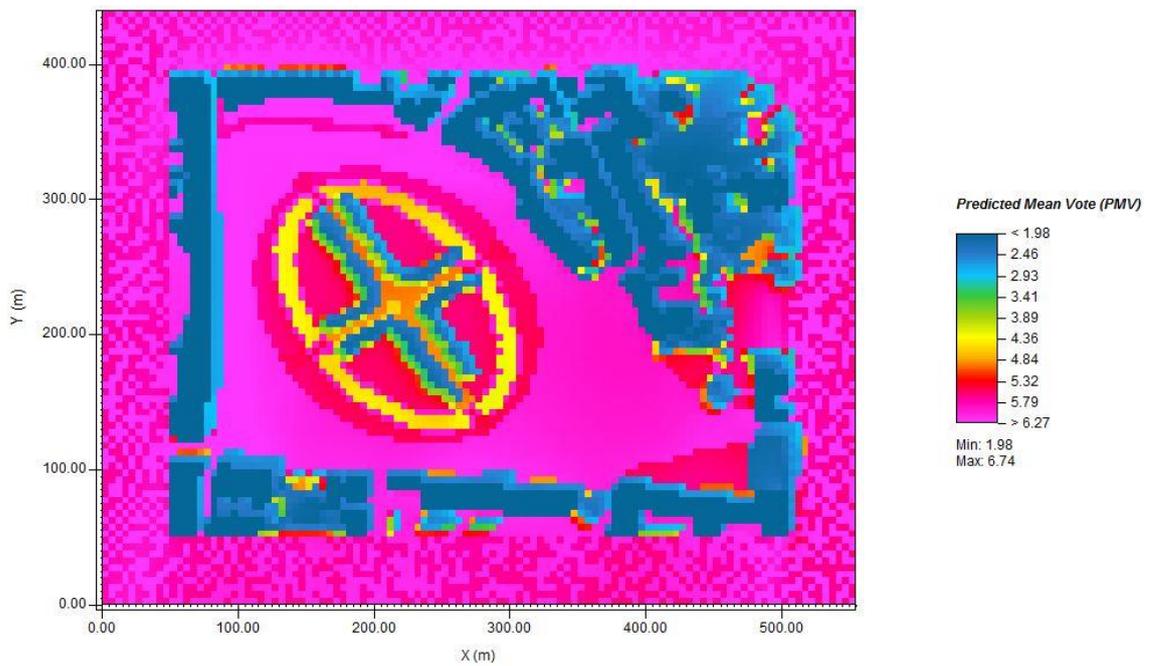


Figura 74 Mappa termografica del PMV a 1.5 m dal suolo (29 luglio, ore 15:00 - Simulazione Cool Pavements); (fonte: LEONARDO 14)

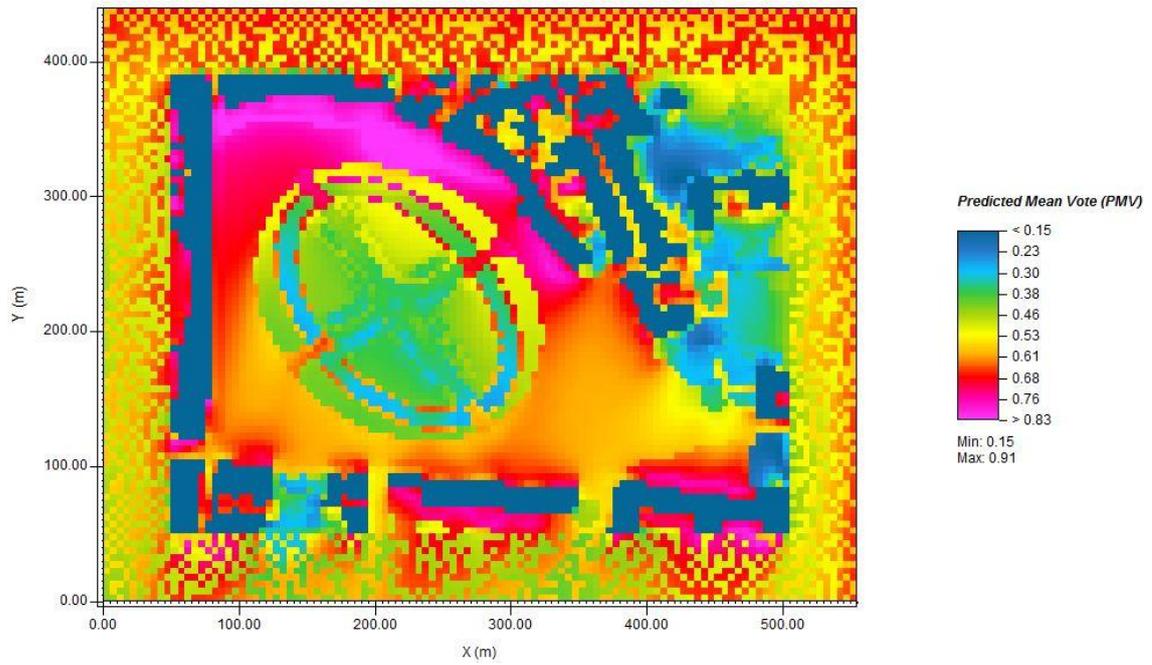


Figura 75 Mappa termografica del PMV a 1.5 m dal suolo (30 luglio, ore 3:00 - Simulazione Cool Pavements); (fonte: LEONARDO 14)

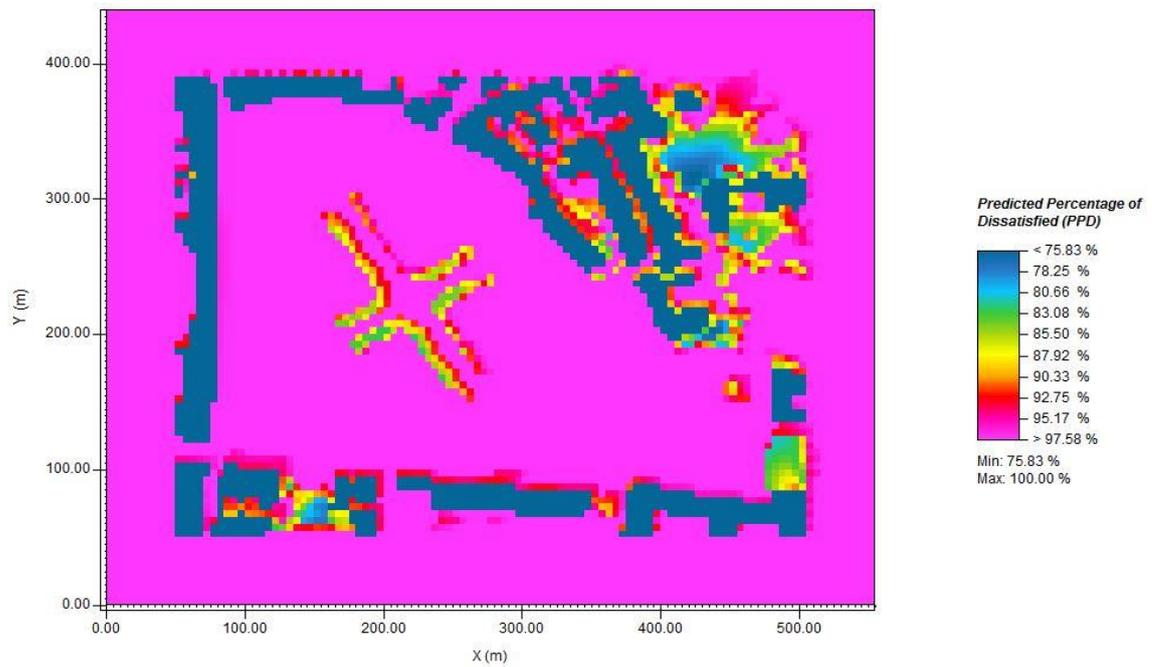


Figura 76 Mappa termografica del PPD a 1.5 m dal suolo (29 luglio, ore 15:00 - Simulazione Cool Pavements); (fonte: LEONARDO 14)

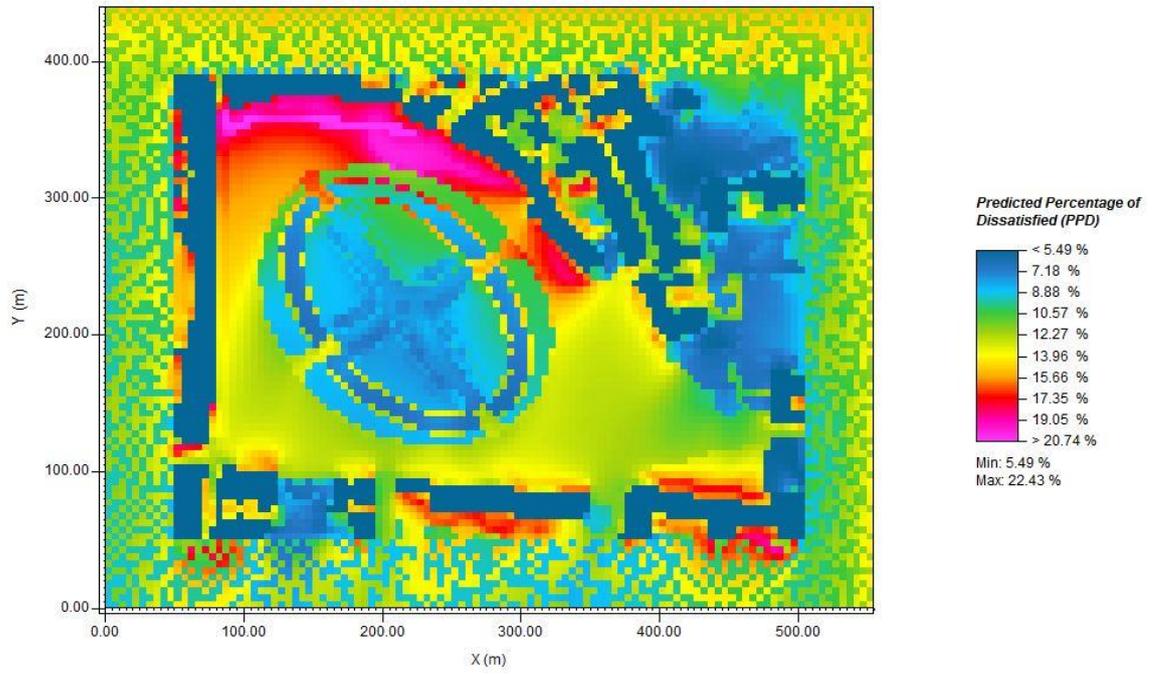


Figura 77 Mappa termografica del PPD a 1.5 m dal suolo (30 luglio, ore 3:00 - Simulazione Cool Pavements); (fonte: LEONARDO 14)

CONCLUSIONI

L'analisi effettuata sul microclima di Prato della Valle ha mostrato la presenza dell'effetto dell'isola di calore nel centro di Padova. La simulazione dello scenario As Is ha permesso di determinare l'entità del fenomeno in maniera preliminare, di osservarne le dinamiche temporali e di stabilire le posizioni maggiormente interessate da esso. Il valore di intensità di isola di calore per lo stato di fatto si è dimostrato molto alto, ma comunque in linea con le previsioni della letteratura per città dalle dimensioni come quelle di Padova. Occorre ricordare anche che la simulazione ha scelto di valutare l'isola di calore nelle peggiori condizioni possibili (quelle di una giornata tipicamente estiva, in presenza di cielo sereno e bassa ventosità), così da misurare l'effetto *massimo* di questo fenomeno sull'area e sulle persone. L'allineamento con i dati raccolti da altri studi invece, ha permesso di affermare la bontà del modello utilizzato da ENVI-met e soprattutto di confermare le ottime aspettative sul software: nonostante infatti le note limitazioni, la sua risposta è stata molto buona ed è riuscita ad inquadrare bene la situazione ambientale e climatica dell'area studio.

I valori ottenuti a riguardo della temperatura potenziale, della temperatura media radiante e dei due indici di comfort hanno dato, inoltre, la possibilità di rintracciare le cause di questo effetto e pensare a degli scenari di mitigazione con cui ridurre le conseguenze sulla vivibilità della piazza e sui consumi energetici per gli edifici del centro adiacenti.

In tal caso gli obiettivi sono stati pienamente raggiunti:

- Con l'introduzione di nuove aree verdi (*Scenario Green*), la temperatura si è abbassata su tutta la piazza. L'effetto maggiore, però, si è potuto notare sulle aree coperte dagli alberi dove, per effetto dell'ombreggiamento, la temperatura è scesa anche più di 3 °C. L'abbassamento della temperatura media radiante ha avuto un profondo effetto sul PMV e ha mostrato come la diminuzione delle temperatura dell'aria sia stata profondamente dettata dalla presenza di nuovi alberi, che hanno permesso di intercettare la radiazione solare e abbassare così il carico energetico diretto. Lo si può notare perché, nelle mappe termografiche, le aree maggiormente interessate dall'abbassamento della temperatura potenziale sono proprio quelle in cui la TMR ha avuto la flessione maggiore grazie all'ombrosità. I dati raccolti in questa simulazione mostrano che il Predicted Mean Vote raggiunge un valore, nelle ore diurne, ancora ampiamente oltre il range di accettabilità restando oltre all'indice di caldo estremo per buona parte della piazza. Nella notte però, l'abbassamento della temperatura dà la

possibilità di verificare la bontà dell'azione di mitigazione sul comfort termico: in tutti e sette i punti scelti per l'analisi, il PMV scende al di sotto del valore 1, entrando nel range di benessere termico e quasi neutralità. L'entità dell'abbassamento si può notare soprattutto dalla Figura 83 che mostra, senz'alcun dubbio, l'efficacia dell'introduzione delle nuove aree verdi. Infine, l'abbassamento registrato nel valore di UHI Intensity si può semplicemente ricavare dalla mappa della temperatura potenziale Figura 79, dal momento che l'intensità di isola di calore è calcolata per differenza con la temperatura misurata presso via Roma per entrambi gli scenari: alcune aree vedono addirittura una diminuzione dell'effetto dell'isola di calore quantificabile in 1.3-1.4 °C. Anche le zone non *direttamente* interessate dall'azione mitigatrice risentono, ovviamente in maniera minore, dall'abbassamento di temperatura: è il caso della posizione 2 che, nonostante rimanga sull'asfalto, subisce una diminuzione netta della temperatura giornaliera (Figura 95). Questo fa ben sperare per il fatto di poter ottenere dei benefici su un'area leggermente più vasta dell'area su cui si agisce direttamente attraverso la piantumazione di alberi e / o l'introduzione di nuove coperture verdi: i vantaggi infatti non solo si potrebbero ottenere sulle nuove zone verdi, ma anche nelle immediate vicinanze ad esse. Non solo, esso mostra anche che l'azione raggiungerebbe risultati ancora maggiori se l'introduzione delle aree verdi venisse fatta in piccole ma tante zone della città.

L'importanza rappresentata da questa simulazione va al di là della sola quantificazione del potenziale impatto dell'introduzione di nuove aree verdi sull'isola di calore, ma scopre delle diverse prospettive di azione per favorire l'attività delle amministrazioni che, d'ora in poi, dovranno adoperarsi per contrastare questo fenomeno: i dati mostrano infatti che i risultati migliori non si ottengono con i grandi parchi, difficili da inserire nel tessuto urbano, ma servono tante aree verdi, sparse nella città, anche piccole.

- Con l'introduzione dei cool materials (*Scenario Cool Pavements*), i risultati hanno mostrato un abbassamento generale ancora migliore di quello ottenuto con lo scenario Green, merito dell'elevata capacità riflettente di questi materiali. L'azione mitigatrice dei cool pavements è stata sintetizzata nel modello attraverso il solo innalzamento dell'albedo, nonostante vi siano altre caratteristiche peculiari di questi materiali (l'elevata emissività nel campo dell'infrarosso e la notevole capacità termica) ed esistano molti tipi di queste coperture: purtroppo, i limiti del software non hanno permesso di simulare specificatamente un tipo di cool pavements, e nemmeno di incrementare l'emissività, né la capacità termica, ma la scelta di analizzare il comportamento

di un generico materiale dall'albedo di 0.5, contro i 0.2 dell'asfalto comune, ha mostrato tutta l'efficacia di queste applicazioni. La temperatura è diminuita tra i 3 °C e i 4 °C nel pomeriggio e fino a 1.7-1.8 °C nella notte (Figura 86, Figura 87). Queste diminuzioni hanno permesso di registrare valori del PMV molto più bassi dello stato di fatto: basti guardare i grafici dei sette punti analizzati (da Figura 108 a Figura 114), dove si potrà verificare l'entità di questo miglioramento (fino a 1.2 durante il giorno, mentre di circa 0.5 nella notte). In controtendenza l'andamento della temperatura media radiante, che invece di diminuire, si ritrova ad aumentare durante il giorno. È il caso dei punti 1 e 2, la cui temperatura media radiante supera quella dello scenario As Is, di circa 5 °C. Tale comportamento è tuttavia prevedibile: la maggior riflettanza dei materiali che hanno sostituito l'asfalto dello stato di fatto fa aumentare la quota di energia riflessa, che quindi aumenta il bilancio energetico con cui si calcola la TMR. L'aumento delle radiazioni riflesse fa diminuire il calore assorbito e quindi permette alle superfici di raggiungere temperature inferiori che, nella notte, garantiscono livelli di comfort maggiori e effetti sull'isola di calore ridotti. L'entità di quest'ultima infatti, cala sensibilmente, facendo segnare i valori più bassi tra le azioni di mitigazione. La simulazione Cool Pavements ha dimostrato la potenzialità di questi materiali, e i risultati, soddisfacenti e completi, ne sono stati la prova. Manca, in questo caso, la possibilità di simulare meglio le caratteristiche intrinseche di questi materiali, ma comunque l'azione di mitigazione si è presentata efficace e maggiormente incisiva di quella messa in atto con lo scenario Green.

I propositi di questo lavoro, quindi, sono stati tutti raggiunti: l'obiettivo era quello di identificare, innanzitutto, l'entità dell'isola di calore a Prato della Valle, e poi di avanzare delle proposte di mitigazione, efficaci ma non così invasive da stravolgere completamente l'immagine della piazza.

Lo studio è stato effettuato su una piccola scala come quella di Prato della Valle, anche per dimostrare che interventi dalle dimensioni ridotte possono dare comunque dei risultati molto soddisfacenti, anche nelle zone vicine: dev'essere uno stimolo, questo, a capire come, se ognuno compie nel proprio piccolo un'azione a favore dell'ambiente, i benefici possano essere molto più estesi e più grandi delle aspettative.

Infine, l'auspicio maggiore è quello che ricerche di questo genere continuino ad essere implementate e incentivate soprattutto dalle amministrazioni: solo la ricerca può essere il punto d'inizio di un cambiamento dell'assetto urbano che possa portare dei veri vantaggi alla cittadinanza. Le simulazioni attraverso dei software di computational fluid

dynamic come ENVI-met sono fondamentali, se svolte correttamente e con una grande attenzione alla realtà, per comprendere l'entità dell'impatto delle azioni di mitigazione: ma gli studi non devono rimanere solo simulazioni. Il passo successivo deve essere quello dell'*azione*, con dei progetti pilota che consistano in interventi sul campo da cui ricavare dati veri. E infine da questi, le amministrazioni dovrebbero capire come indirizzare al meglio la pianificazione territoriale e urbana. Il crescente processo di urbanizzazione ci mette davanti alle conseguenze del problema delle isole di calore che, col passare del tempo, saranno sempre maggiori e più incisive sulla vita di tutti i giorni. Le nostre città chiedono aiuto: la ricerca e la pianificazione territoriali possono darglielo.

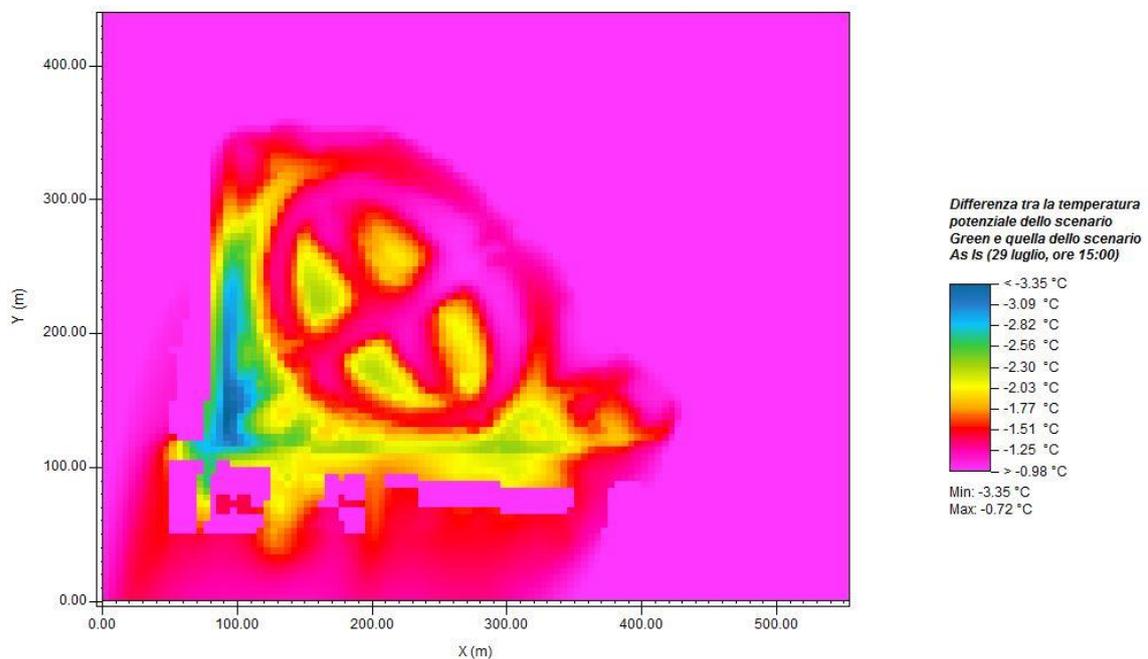


Figura 78 Mappa termografica della variazione tra la temperatura potenziale dello scenario Green e quella dello scenario As Is, a 1.5 m dal suolo (29 luglio, ore 15:00); (fonte: LEONARDO 14)

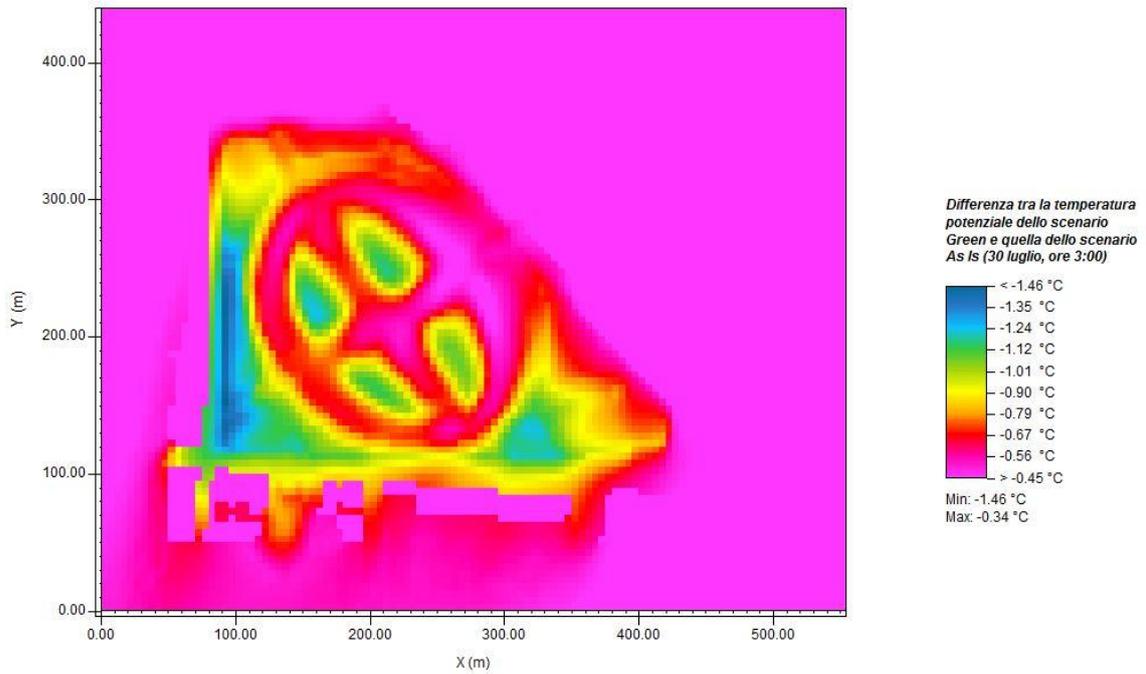


Figura 79 Mappa termografica della variazione tra la temperatura potenziale dello scenario Green e quella dello scenario As Is, a 1.5 m dal suolo (30 luglio, ore 3:00); (fonte: LEONARDO 14)

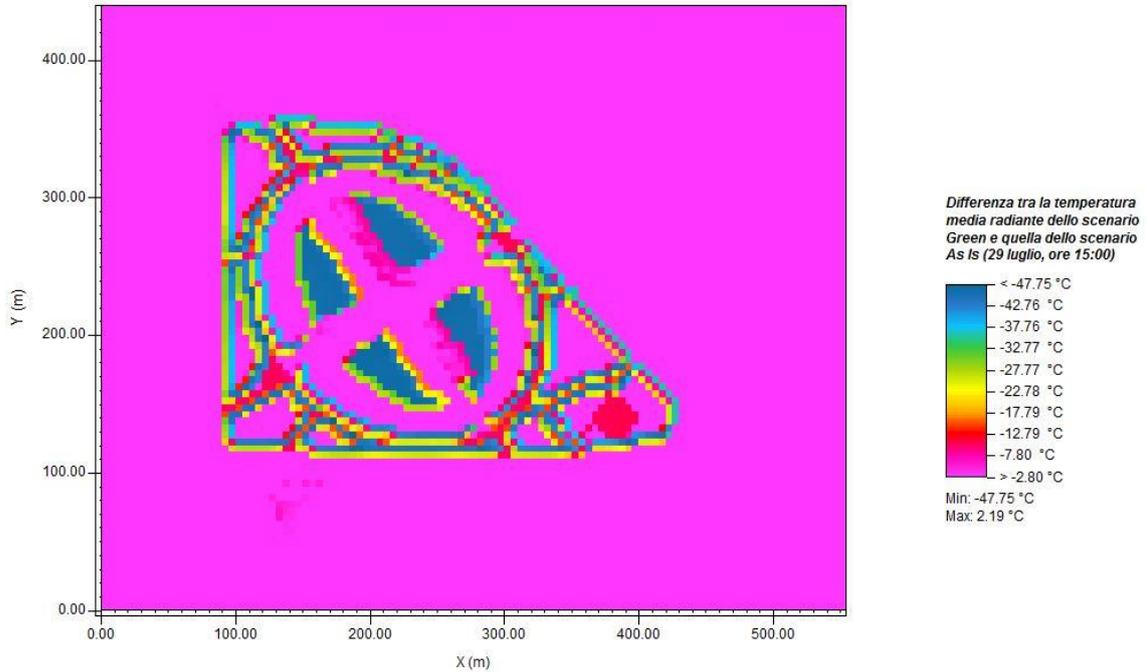


Figura 80 Mappa termografica della variazione tra la temperatura media radiante dello scenario Green e quella dello scenario As Is, a 1.5 m dal suolo (29 luglio, ore 15:00); (fonte: LEONARDO 14)

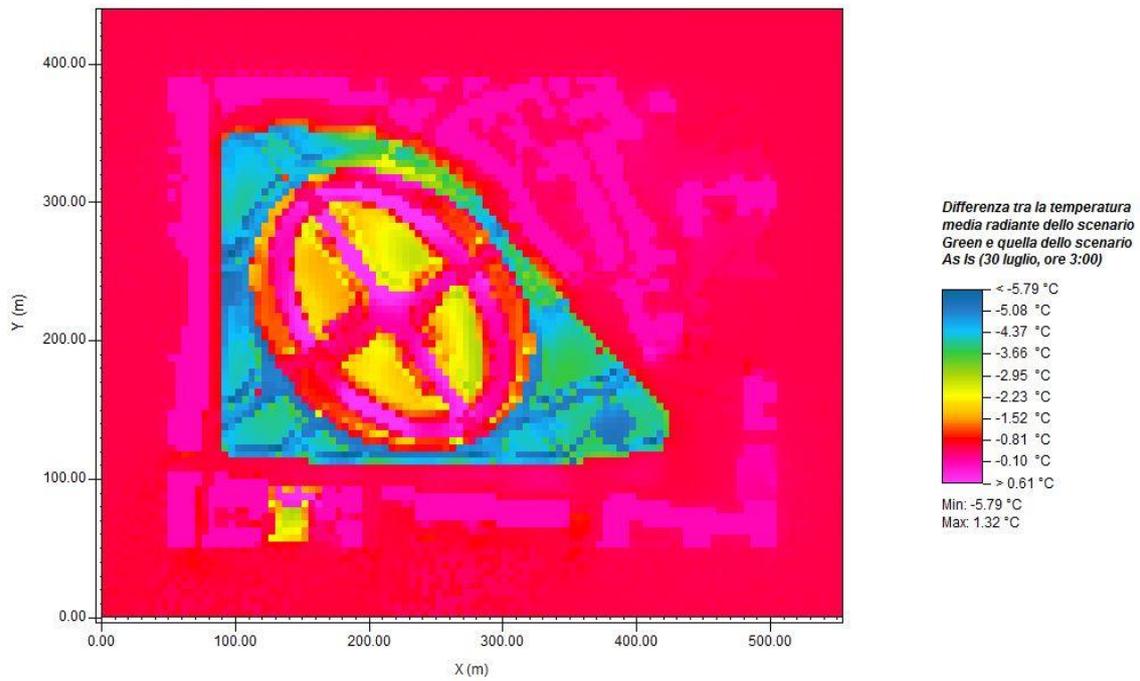


Figura 81 Mappa termografica della variazione tra la temperatura media radiante dello scenario Green e quella dello scenario As Is, a 1.5 m dal suolo (30 luglio, ore 3:00); (fonte: LEONARDO 14)

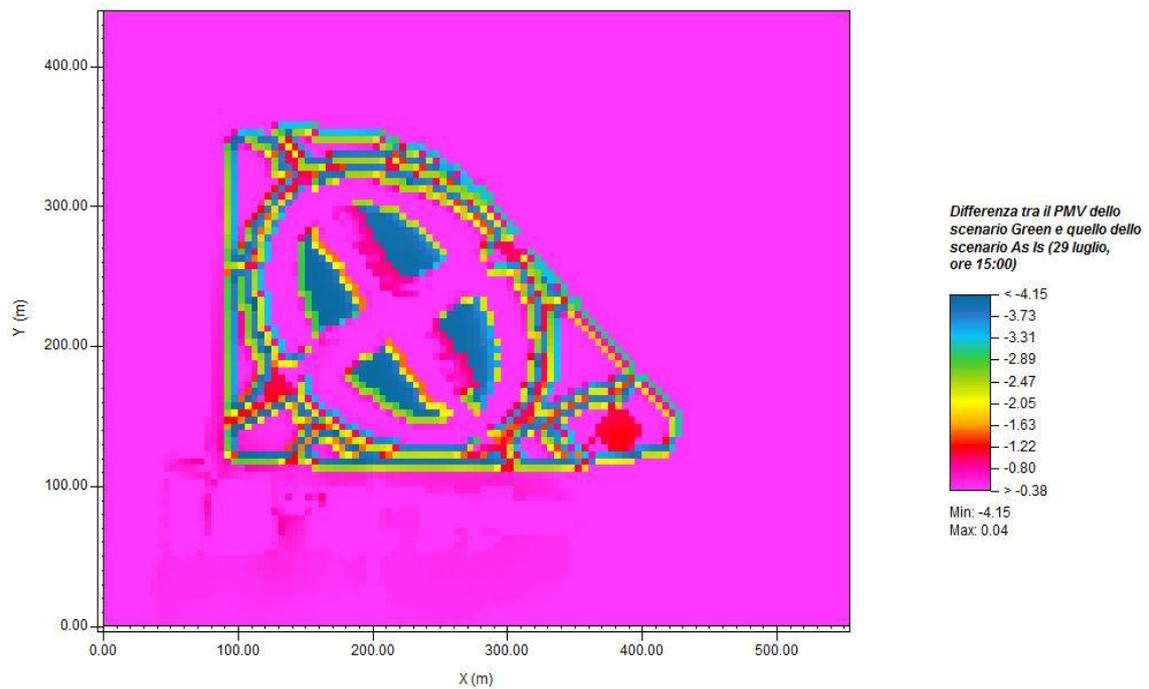


Figura 82 Mappa termografica della variazione tra il PMV dello scenario Green e quello dello scenario As Is, a 1.5 m dal suolo (29 luglio, ore 15:00); (fonte: LEONARDO 14)

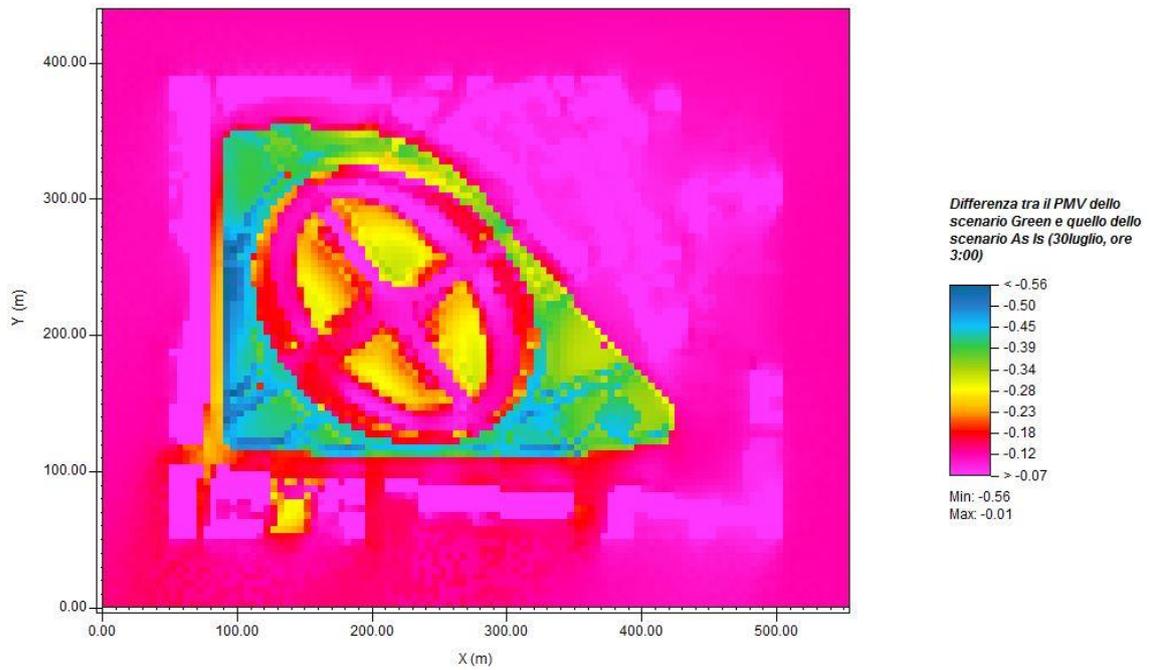


Figura 83 Mappa termografica della variazione tra il PMV dello scenario Green e quello dello scenario As Is, a 1.5 m dal suolo (30 luglio, ore 3:00); (fonte: LEONARDO 14)

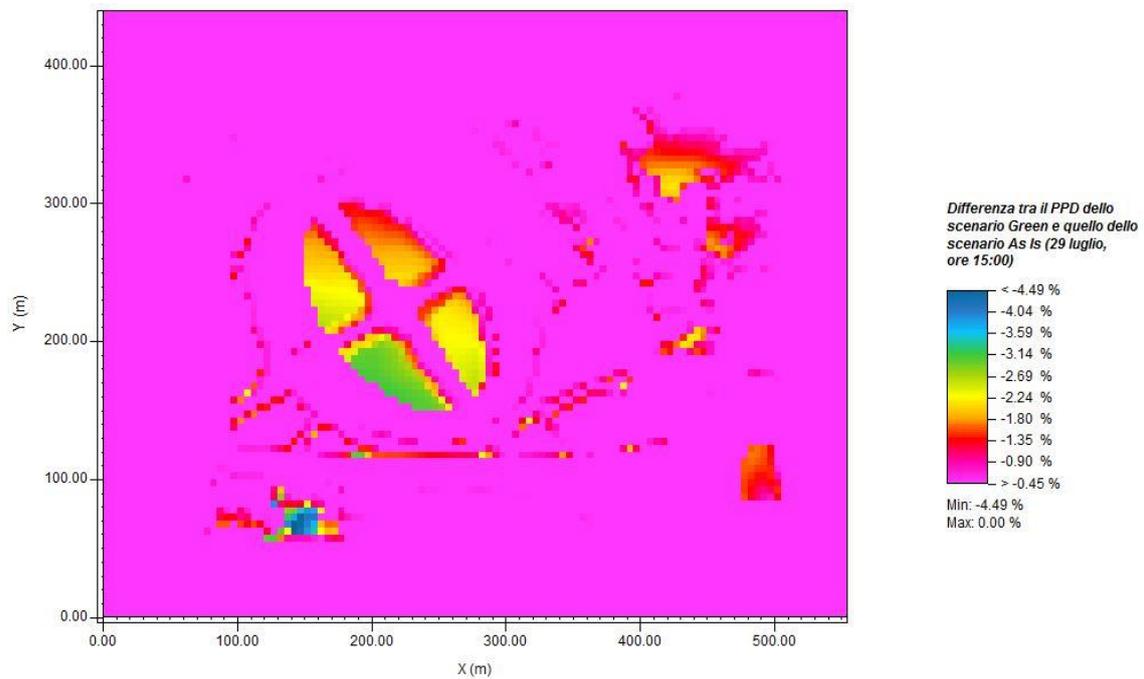


Figura 84 Mappa termografica della variazione tra il PPD dello scenario Green e quello dello scenario As Is, a 1.5 m dal suolo (29 luglio, ore 15:00); (fonte: LEONARDO 14)

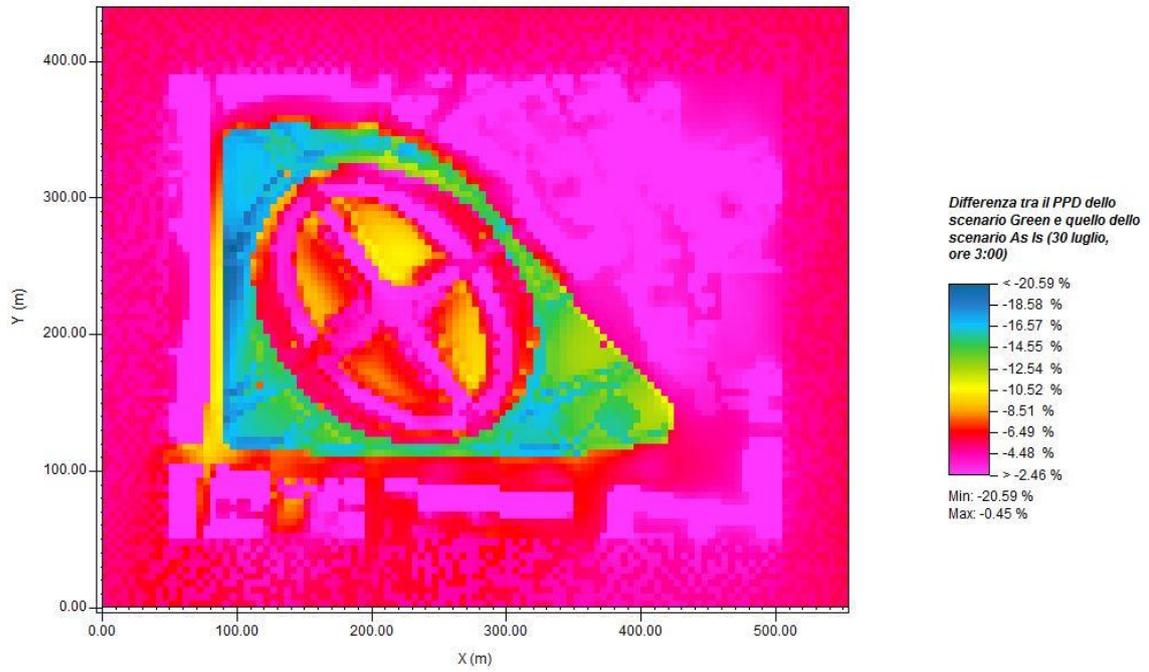


Figura 85 Mappa termografica della variazione tra il PPD dello scenario Green e quello dello scenario As Is, a 1.5 m dal suolo (30 luglio, ore 3:00); (fonte: LEONARDO 14)

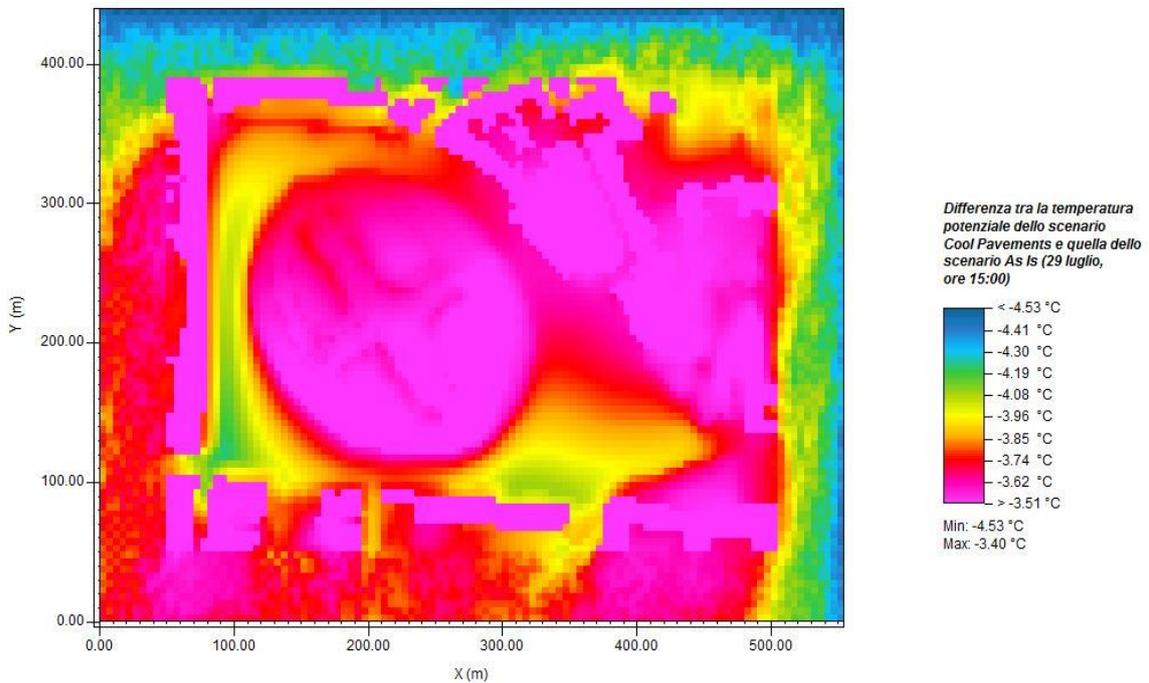


Figura 86 Mappa termografica della variazione tra la temperatura potenziale dello scenario Cool Pavements e quella dello scenario As Is, a 1.5 m dal suolo (29 luglio, ore 15:00); (fonte: LEONARDO 14)

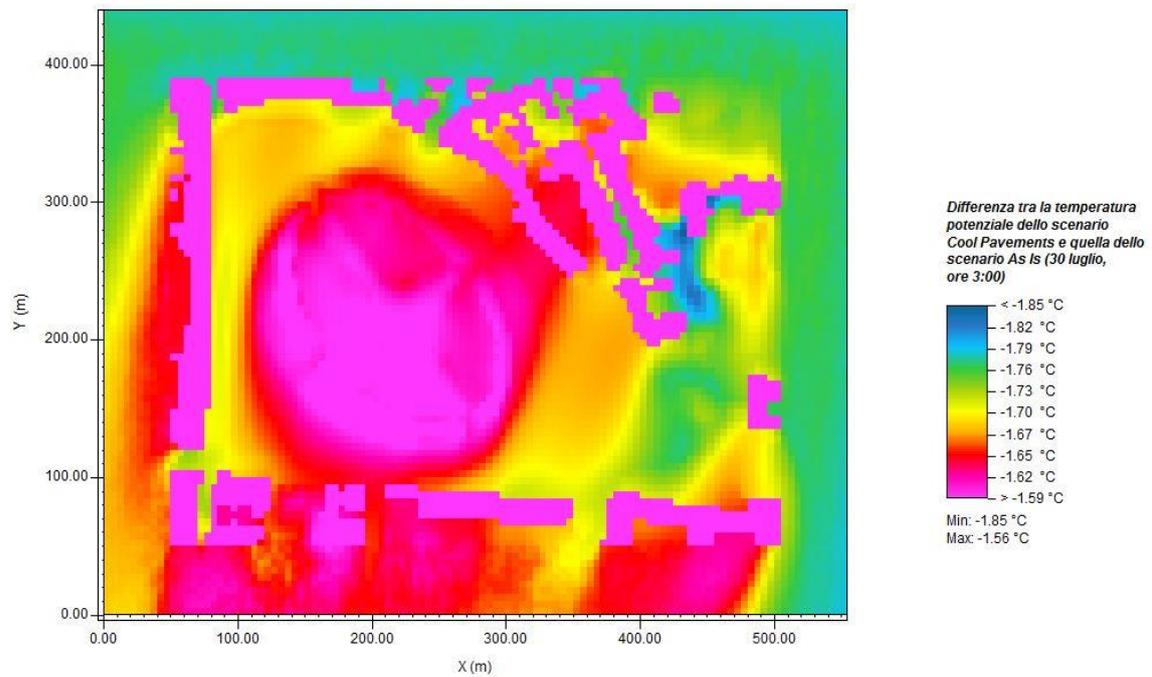


Figura 87 Mappa termografica della variazione tra la temperatura potenziale dello scenario Cool Pavements e quella dello scenario As Is, a 1.5 m dal suolo (30 luglio, ore 3:00); (fonte: LEONARDO 14)

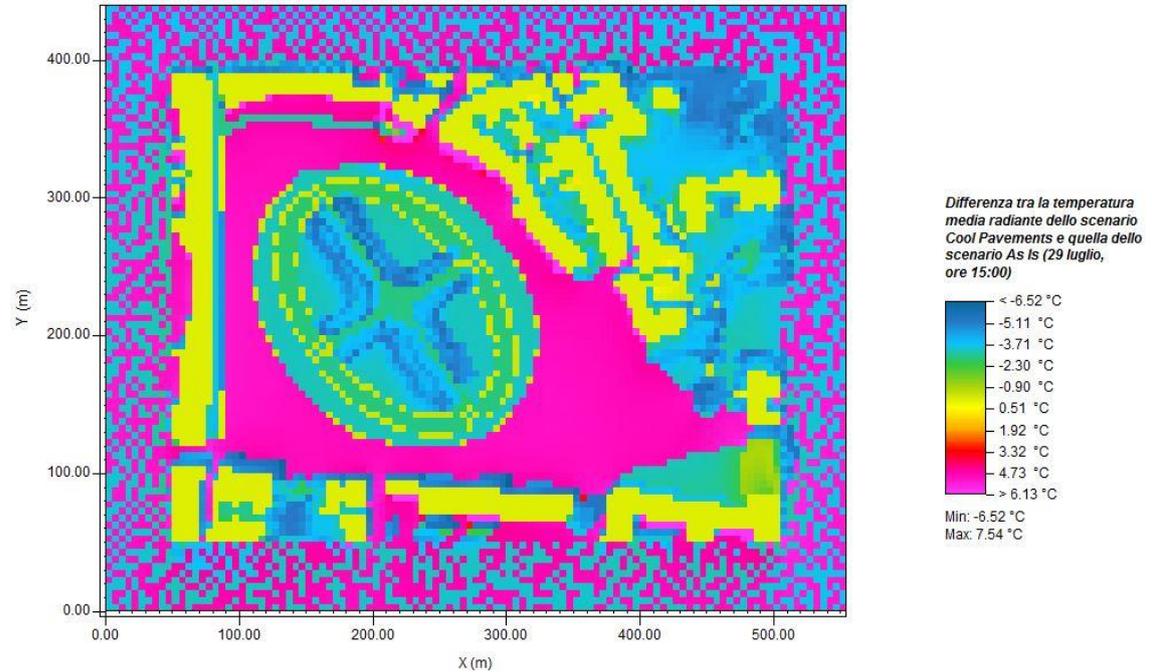


Figura 88 Mappa termografica della variazione tra la temperatura media radiante dello scenario Cool Pavements e quella dello scenario As Is, a 1.5 m dal suolo (29 luglio, ore 15:00); (fonte: LEONARDO 14)

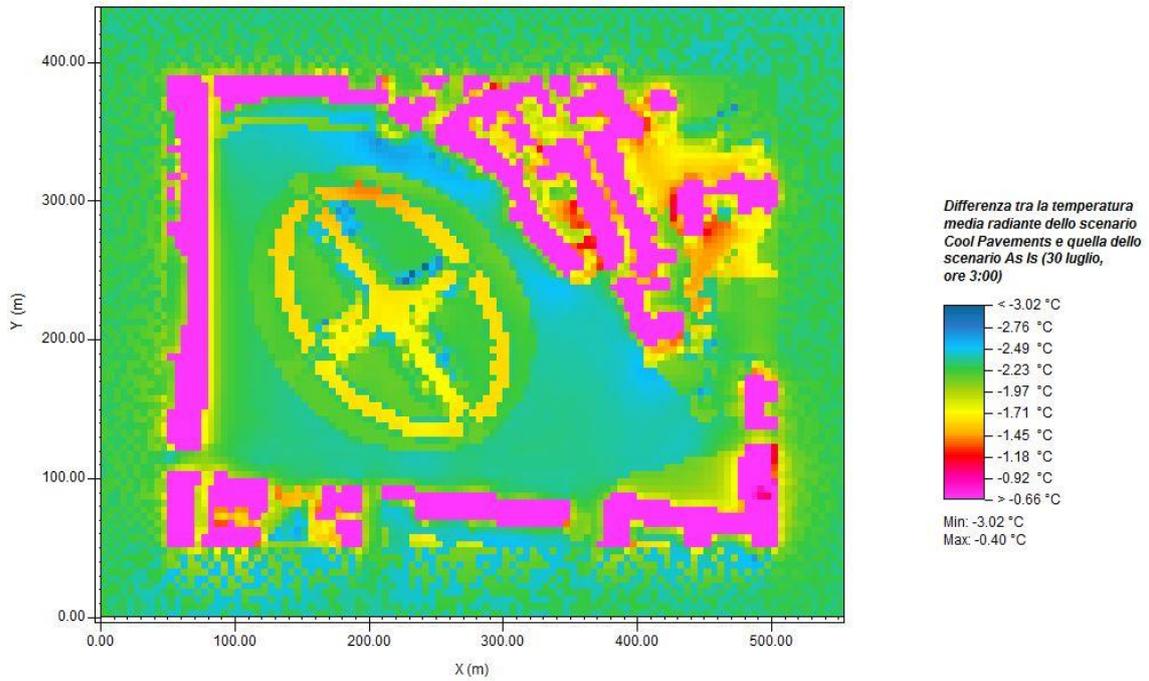


Figura 89 Mappa termografica della variazione tra la temperatura media radiante dello scenario Cool Pavements e quella dello scenario As Is, a 1.5 m dal suolo (30 luglio, ore 3:00); (fonte: LEONARDO 14)

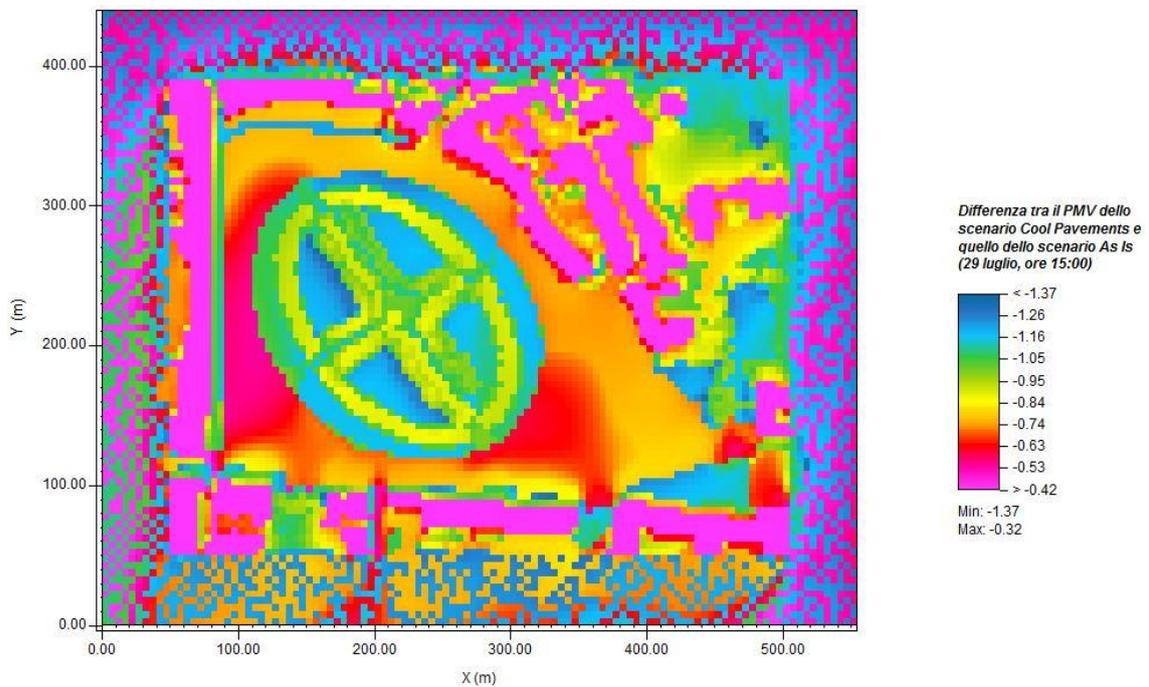


Figura 90 Mappa termografica della variazione tra il PMV dello scenario Cool Pavements e quello dello scenario As Is, a 1.5 m dal suolo (29 luglio, ore 15:00); (fonte: LEONARDO 14)

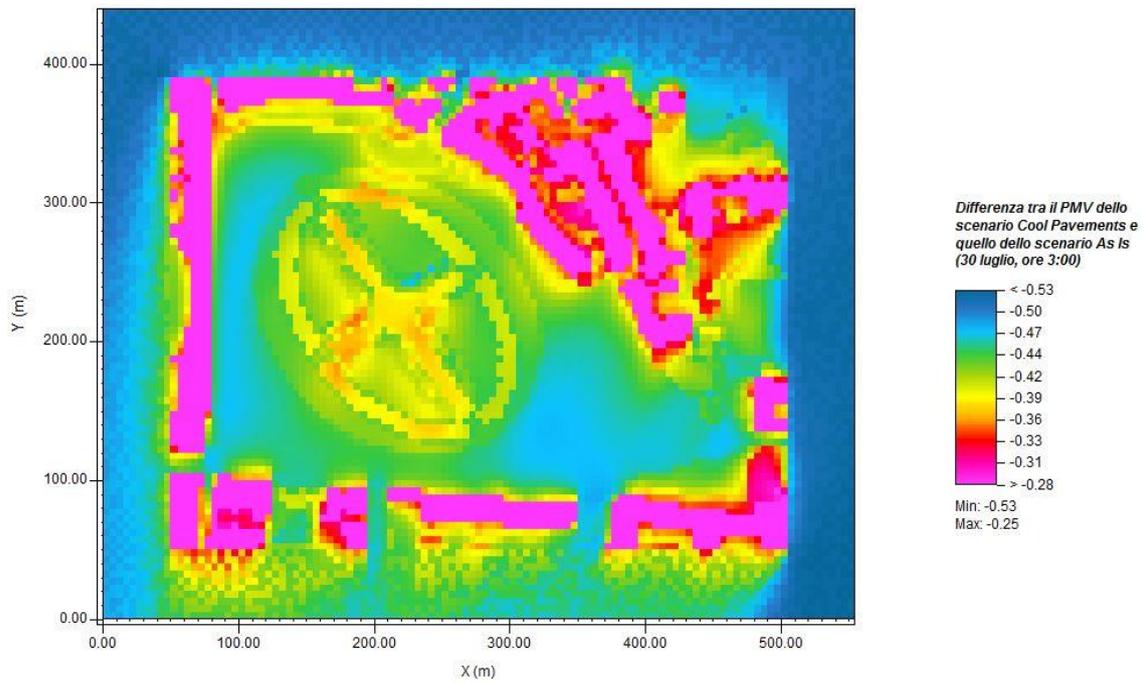


Figura 91 Mappa termografica della variazione tra il PMV dello scenario Cool Pavements e quello dello scenario As Is, a 1.5 m dal suolo (30 luglio, ore 3:00); (fonte: LEONARDO 14)

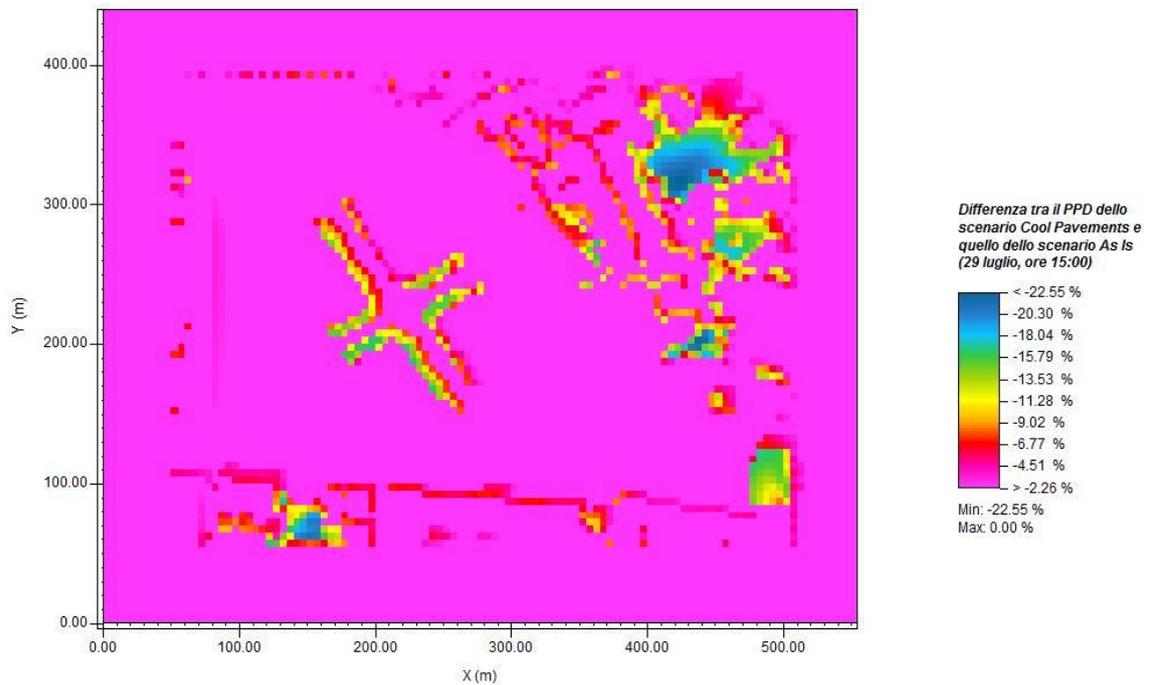


Figura 92 Mappa termografica della variazione tra il PPD dello scenario Cool Pavements e quello dello scenario As Is, a 1.5 m dal suolo (29 luglio, ore 15:00); (fonte: LEONARDO 14)

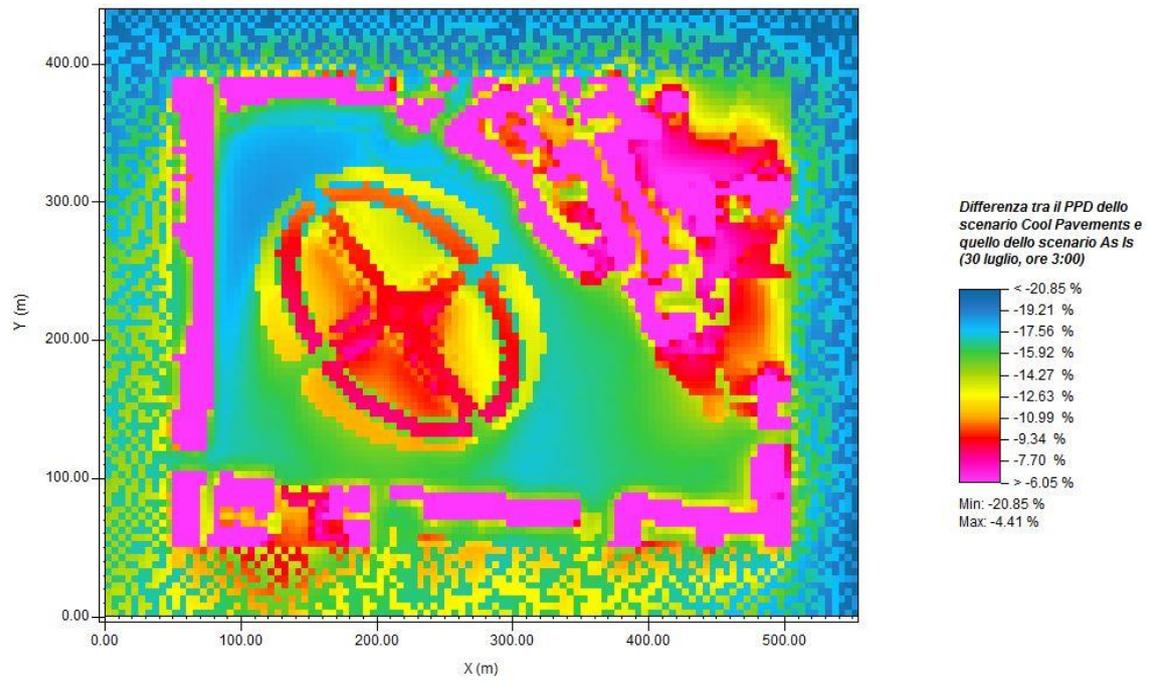


Figura 93 Mappa termografica della variazione tra il PPD dello scenario Cool Pavements e quello dello scenario As Is, a 1.5 m dal suolo (30 luglio, ore 3:00); (fonte: LEONARDO 14)

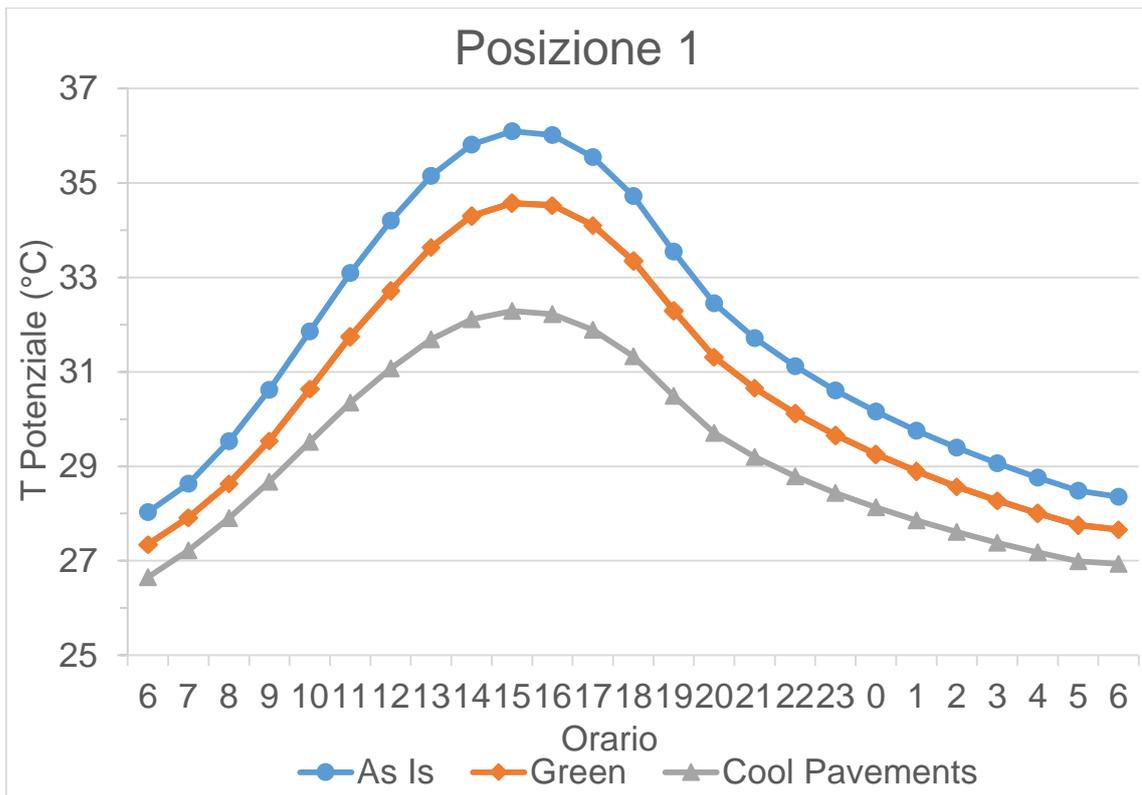


Figura 94 Confronto dell'andamento giornaliero della temperatura potenziale della posizione 1, nei tre scenari

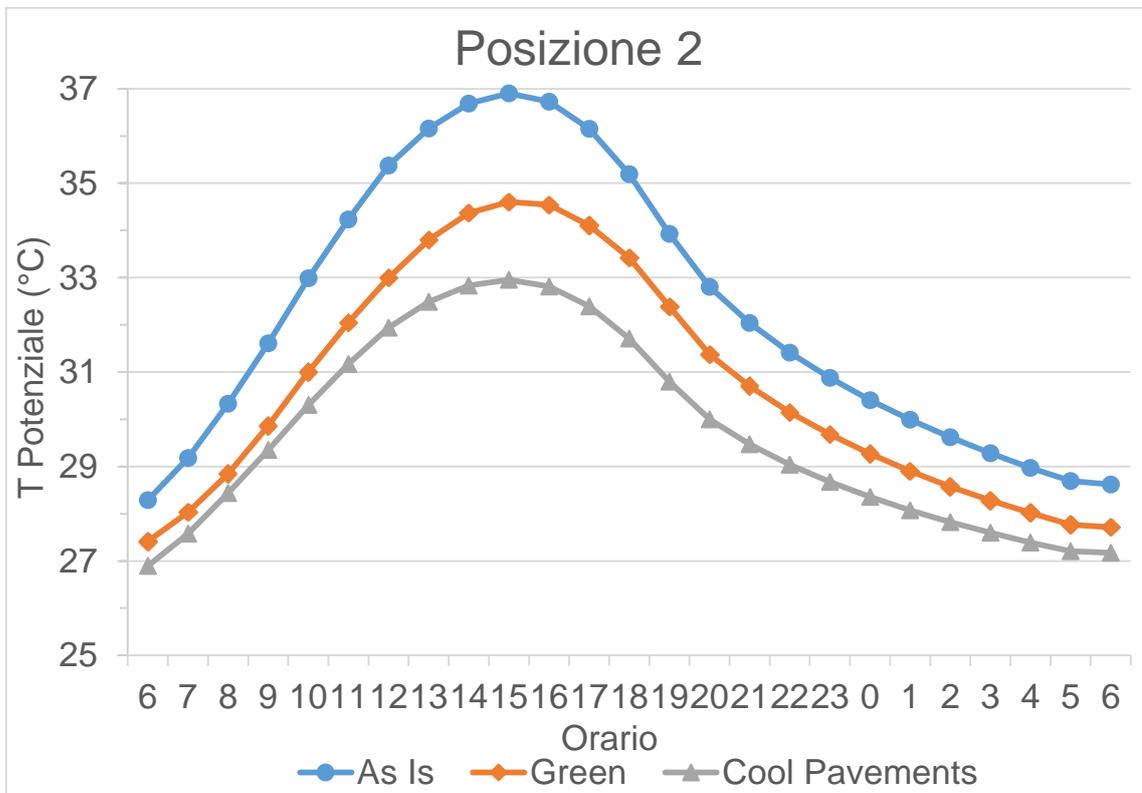


Figura 95 Confronto dell'andamento giornaliero della temperatura potenziale della posizione 2, nei tre scenari

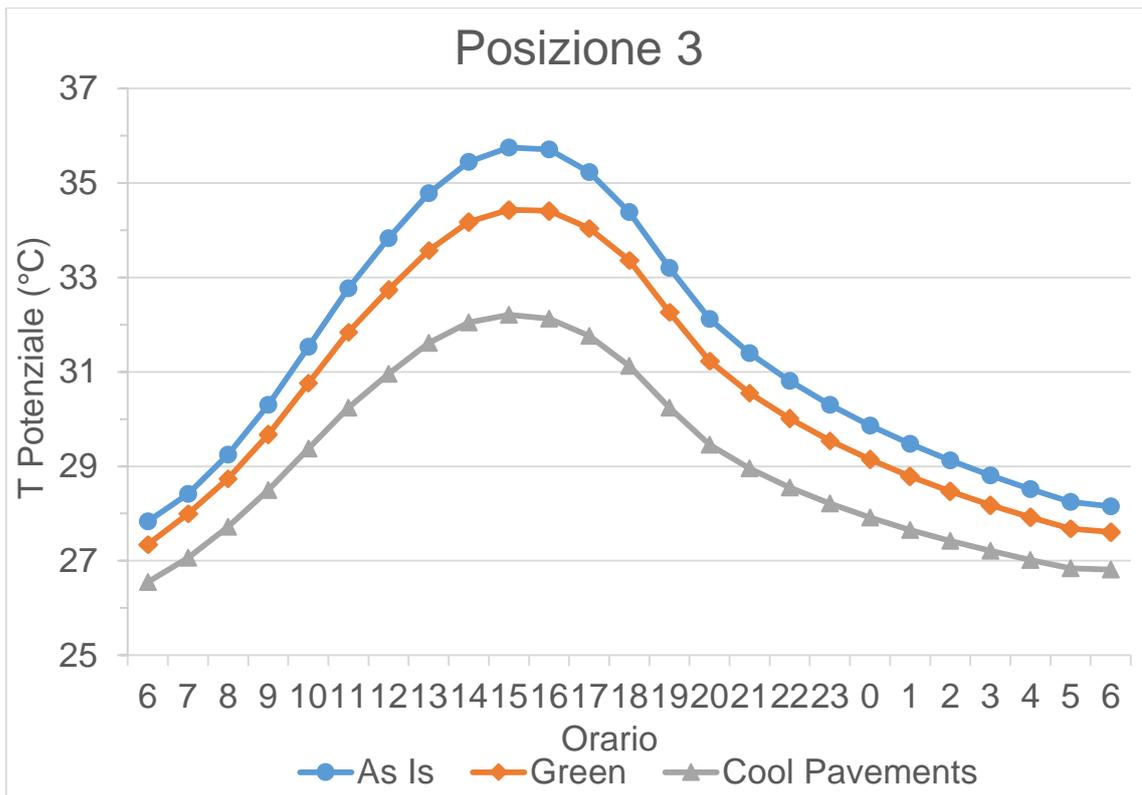


Figura 96 Confronto dell'andamento giornaliero della temperatura potenziale della posizione 3, nei tre scenari

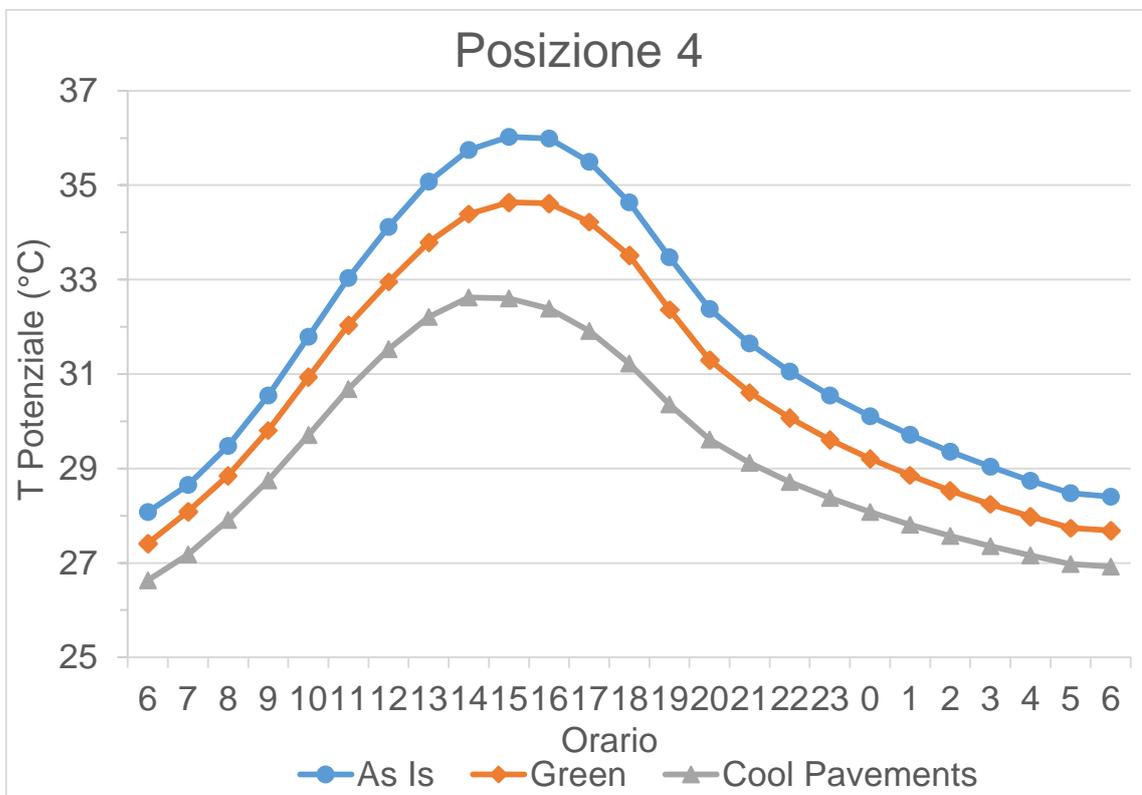


Figura 97 Confronto dell'andamento giornaliero della temperatura potenziale della posizione 4, nei tre scenari

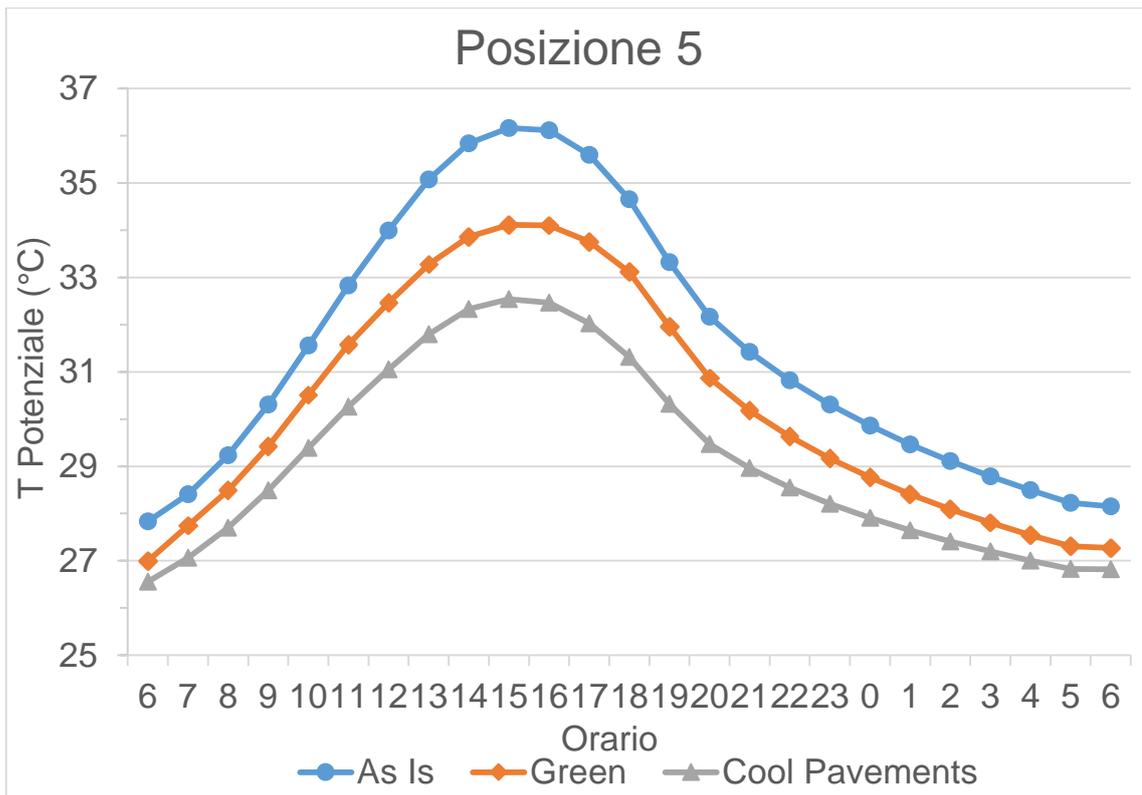


Figura 98 Confronto dell'andamento giornaliero della temperatura potenziale della posizione 5, nei tre scenari

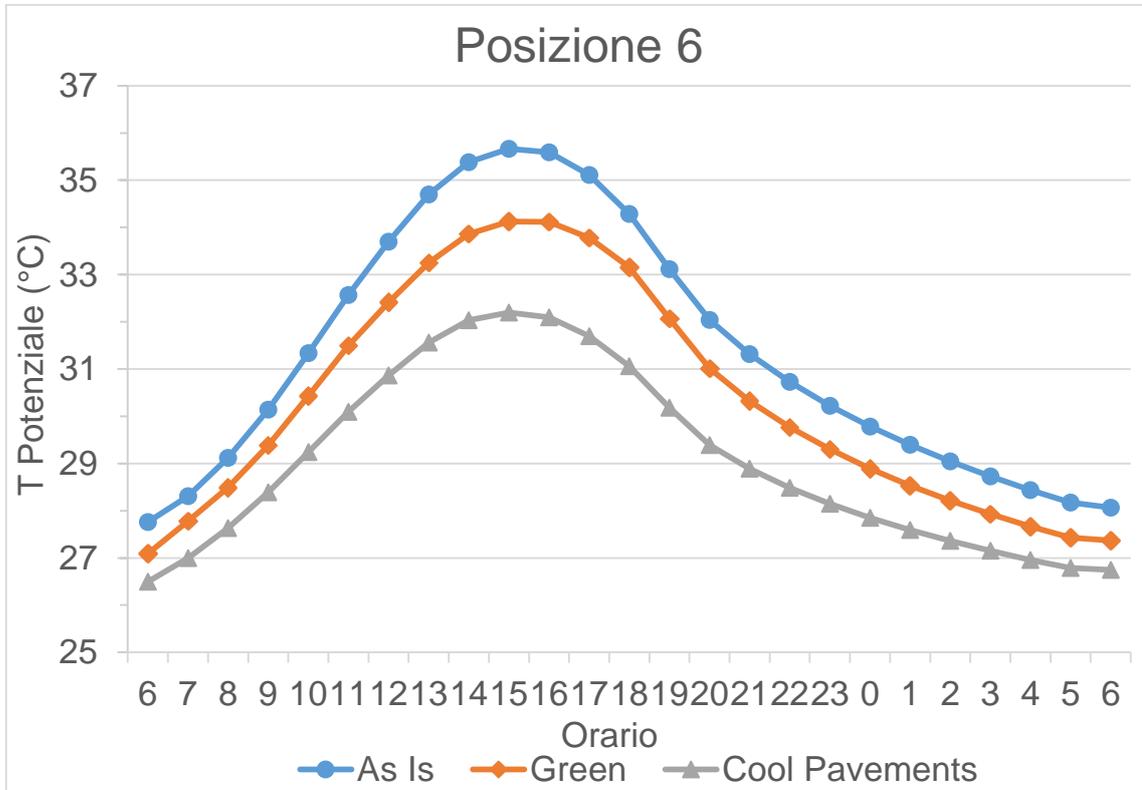


Figura 99 Confronto dell'andamento giornaliero della temperatura potenziale della posizione 6, nei tre scenari

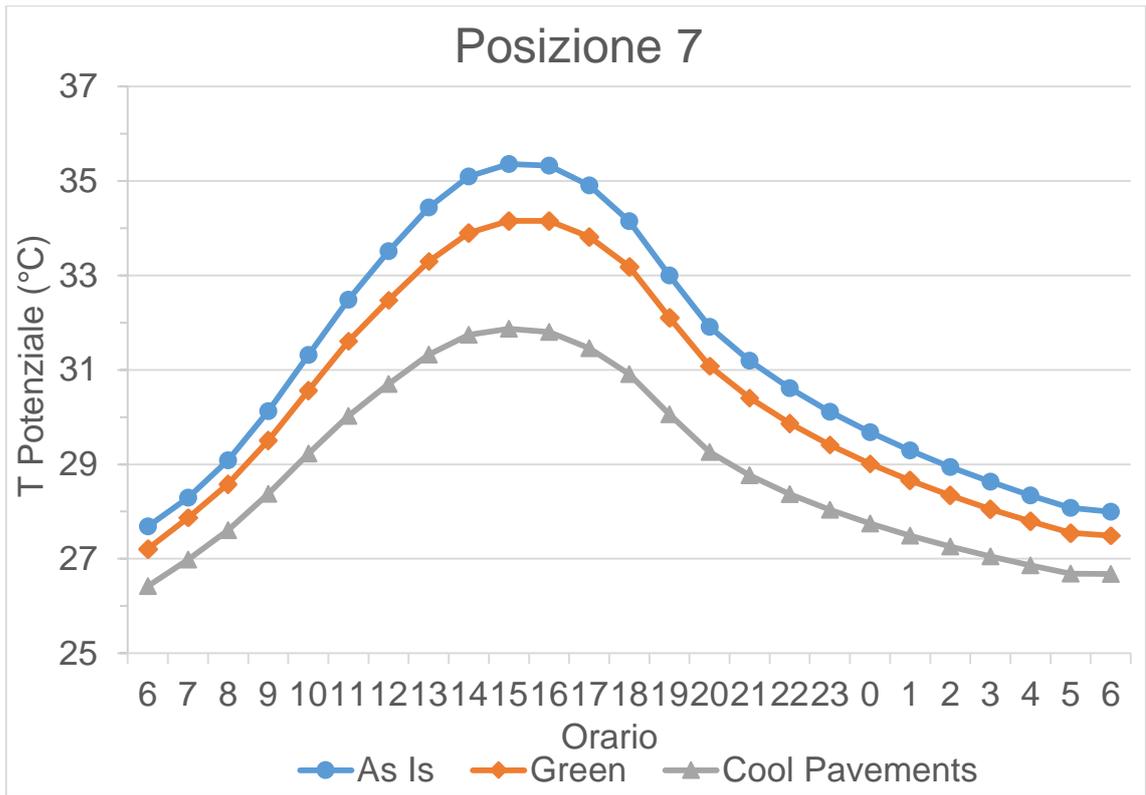


Figura 100 Confronto dell'andamento giornaliero della temperatura potenziale della posizione 7, nei tre scenari

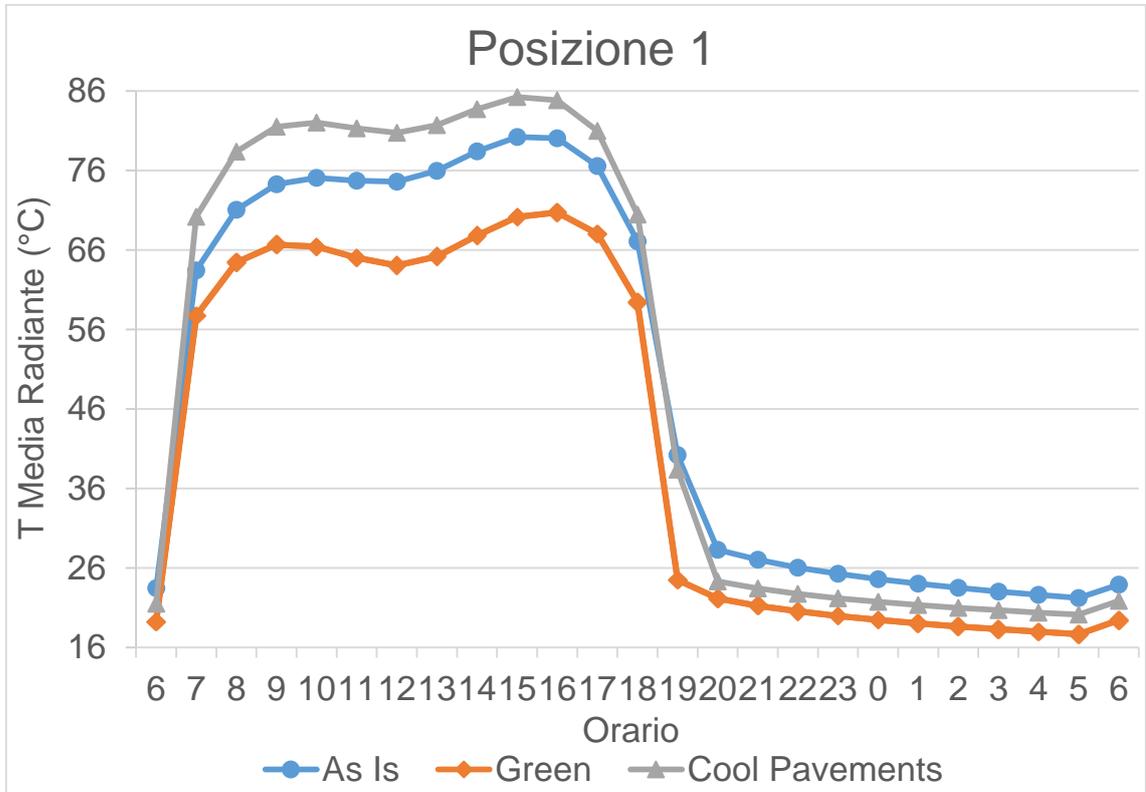


Figura 101 Confronto dell'andamento giornaliero della temperatura media radiante della posizione 1, nei tre scenari

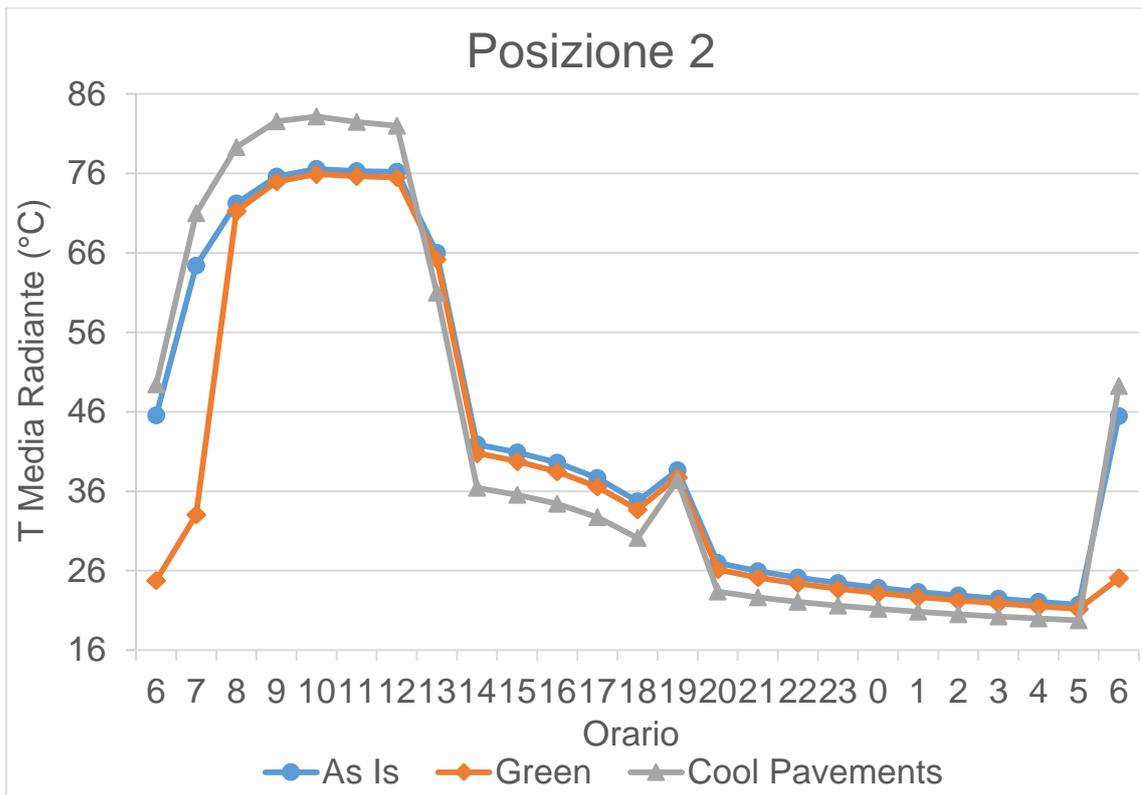


Figura 102 Confronto dell'andamento giornaliero della temperatura media radiante della posizione 2, nei tre scenari

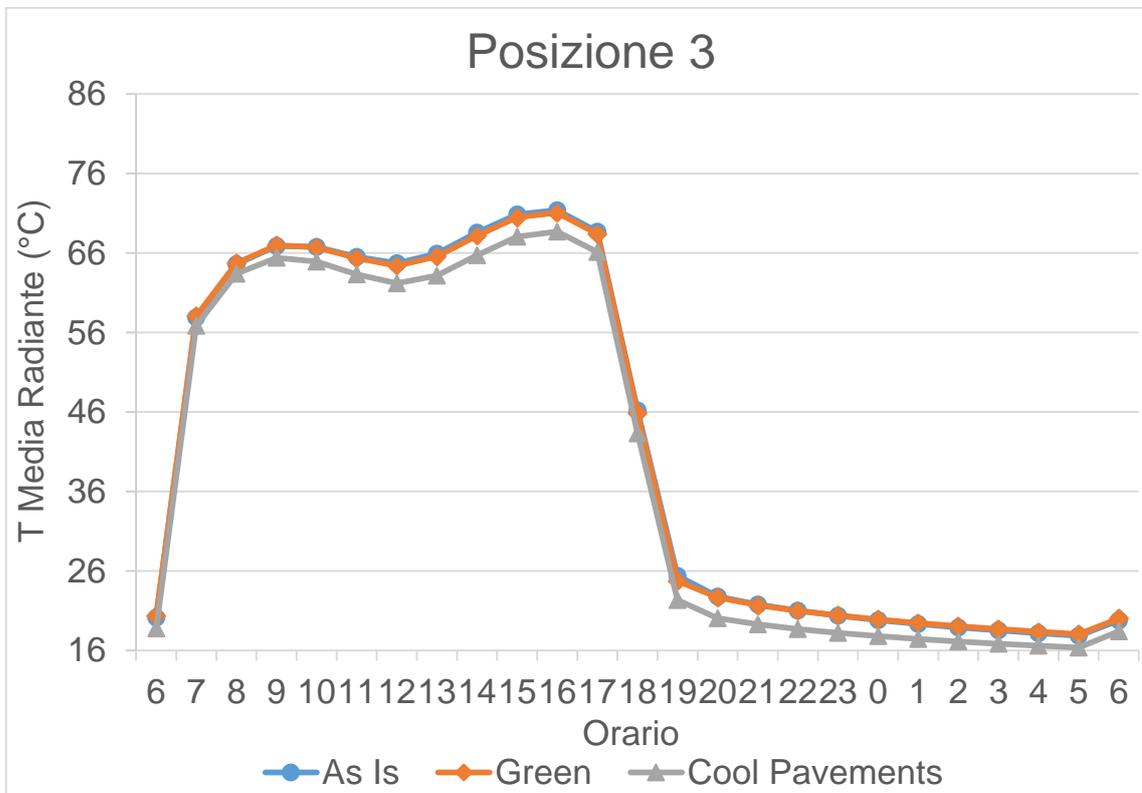


Figura 103 Confronto dell'andamento giornaliero della temperatura media radiante della posizione 3, nei tre scenari

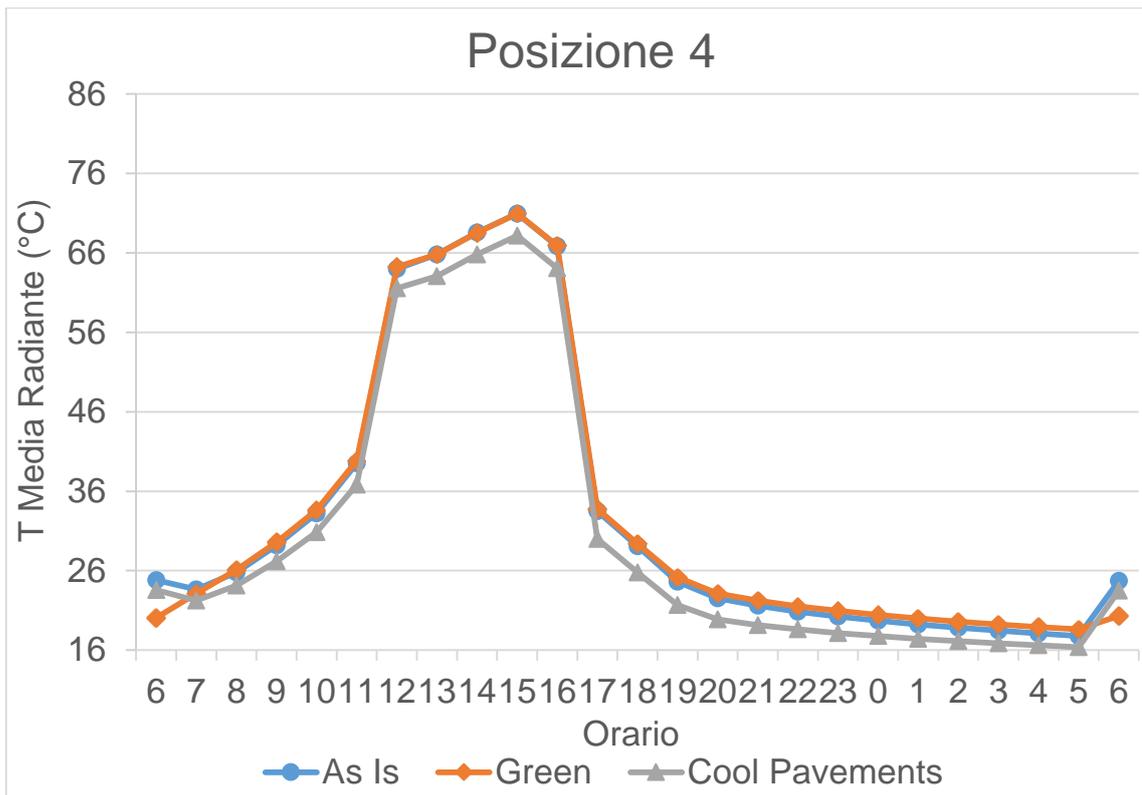


Figura 104 Confronto dell'andamento giornaliero della temperatura media radiante della posizione 4, nei tre scenari

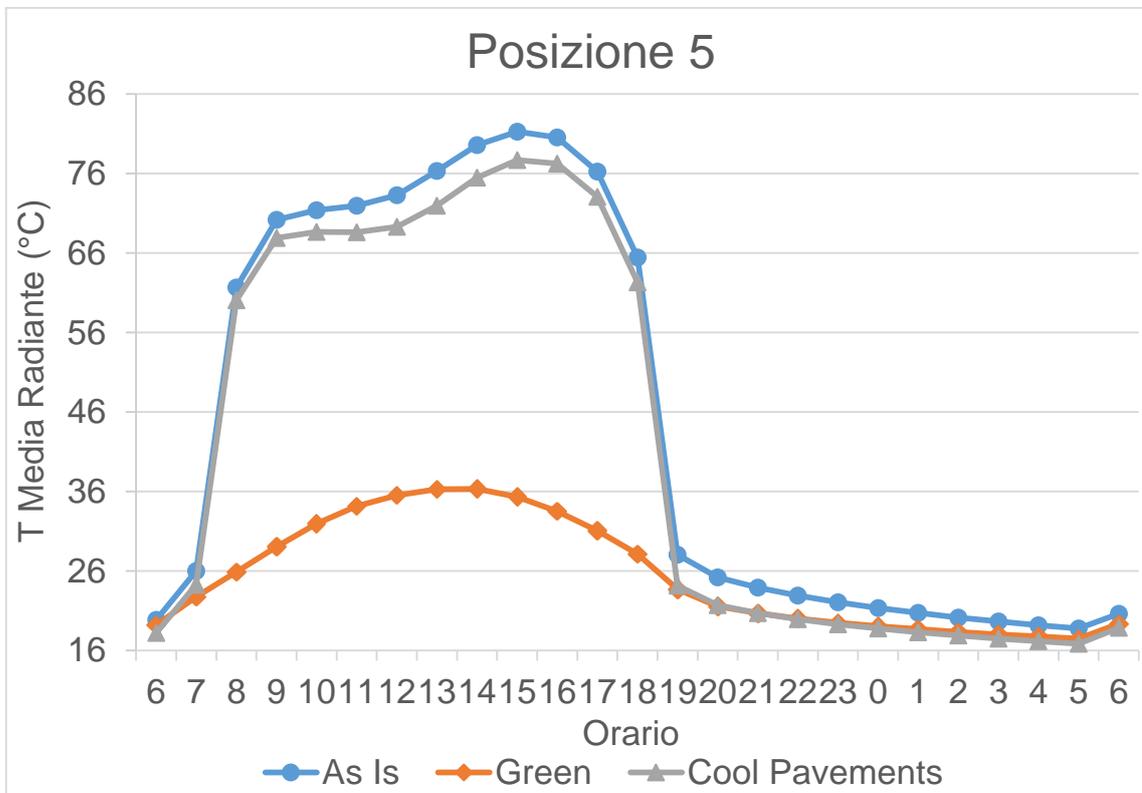


Figura 105 Confronto dell'andamento giornaliero della temperatura media radiante della posizione 5, nei tre scenari

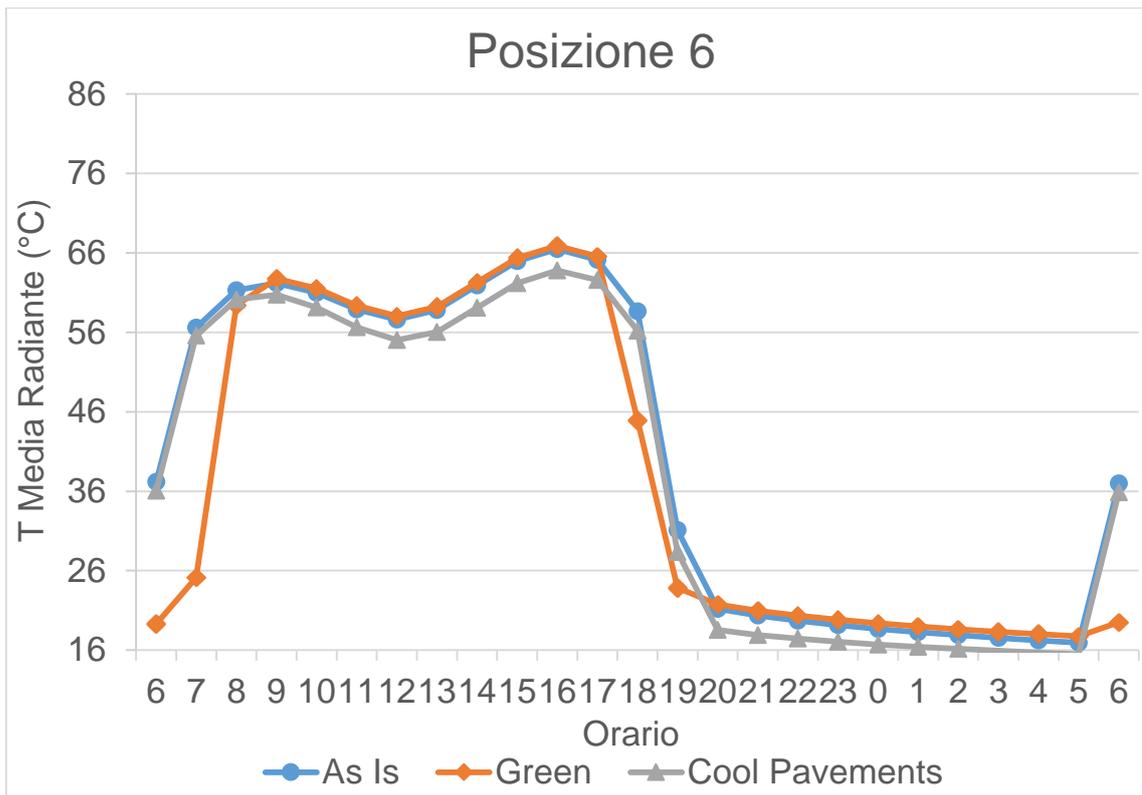


Figura 106 Confronto dell'andamento giornaliero della temperatura media radiante della posizione 6, nei tre scenari

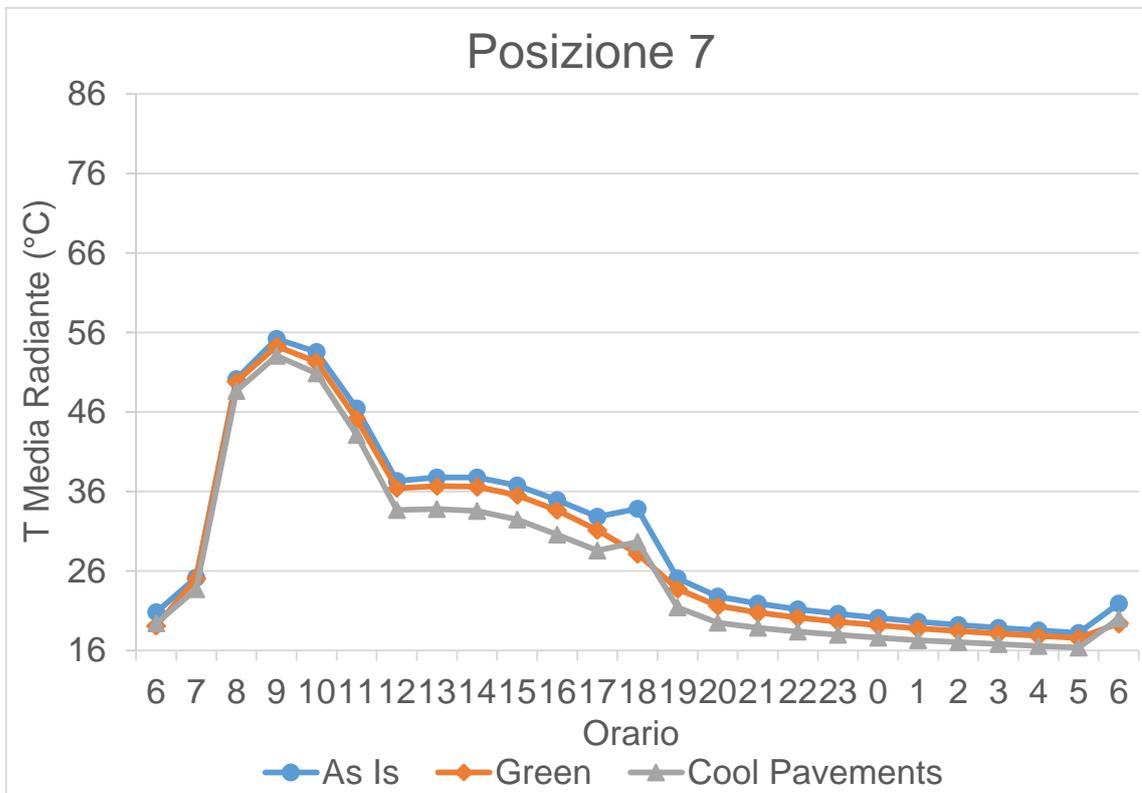


Figura 107 Confronto dell'andamento giornaliero della temperatura media radiante della posizione 7, nei tre scenari

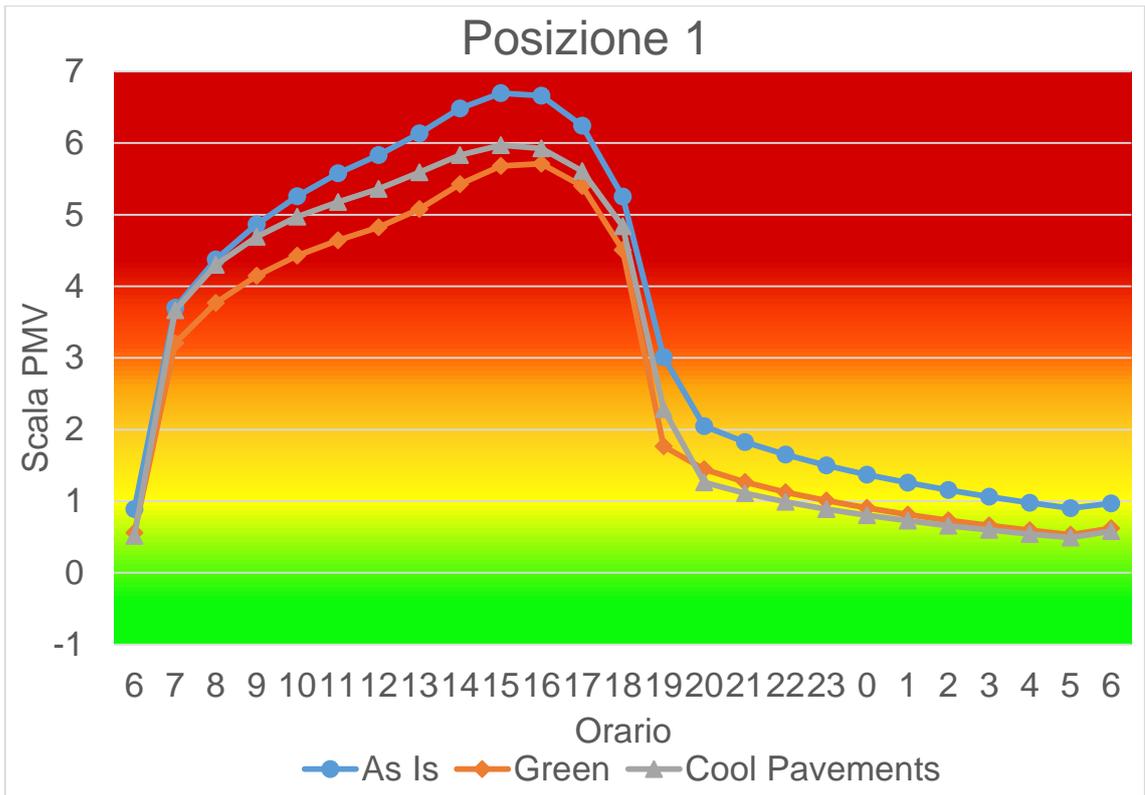


Figura 108 Confronto dell'andamento giornaliero del PMV della posizione 1, nei tre scenari

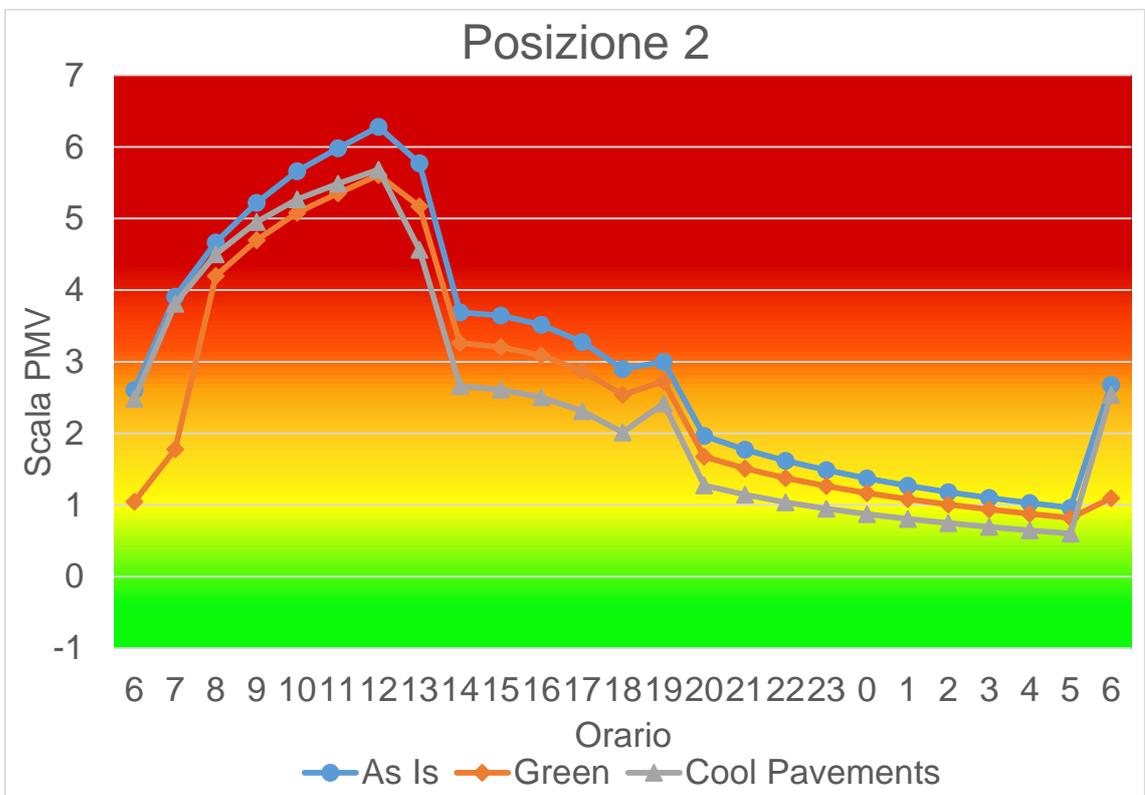


Figura 109 Confronto dell'andamento giornaliero del PMV della posizione 2, nei tre scenari

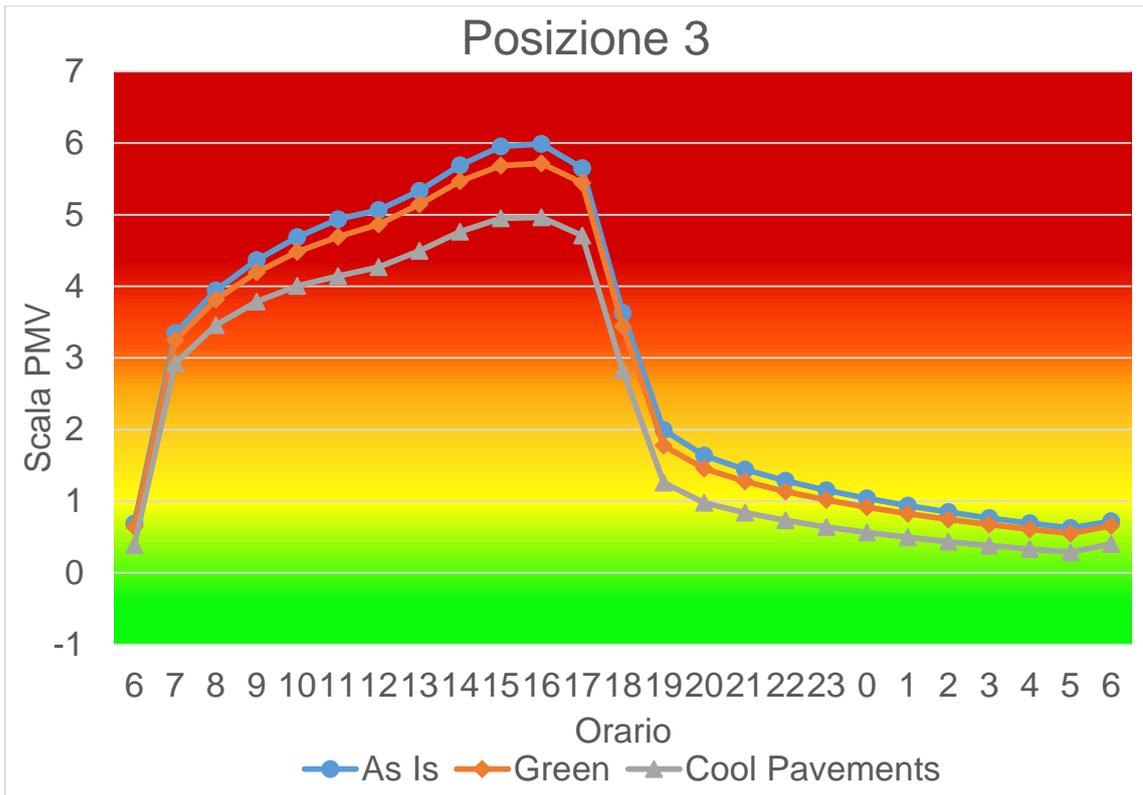


Figura 110 Confronto dell'andamento giornaliero del PMV della posizione 3, nei tre scenari

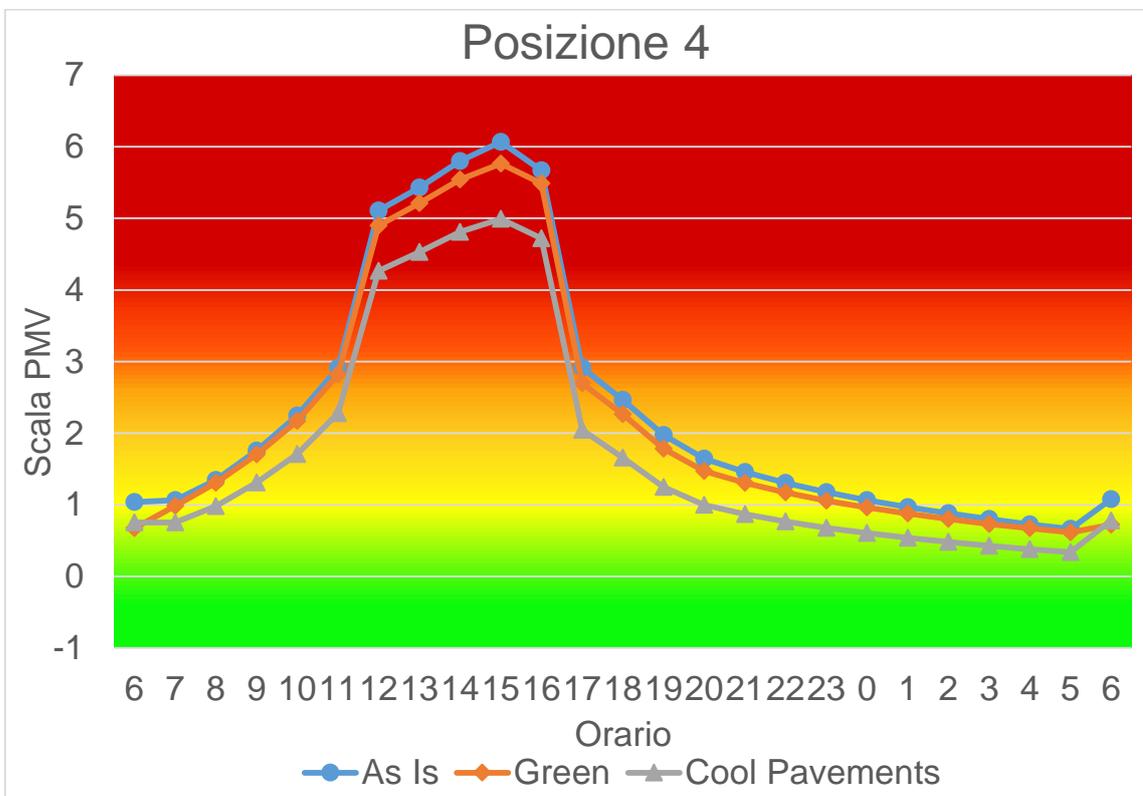


Figura 111 Confronto dell'andamento giornaliero del PMV della posizione 4, nei tre scenari

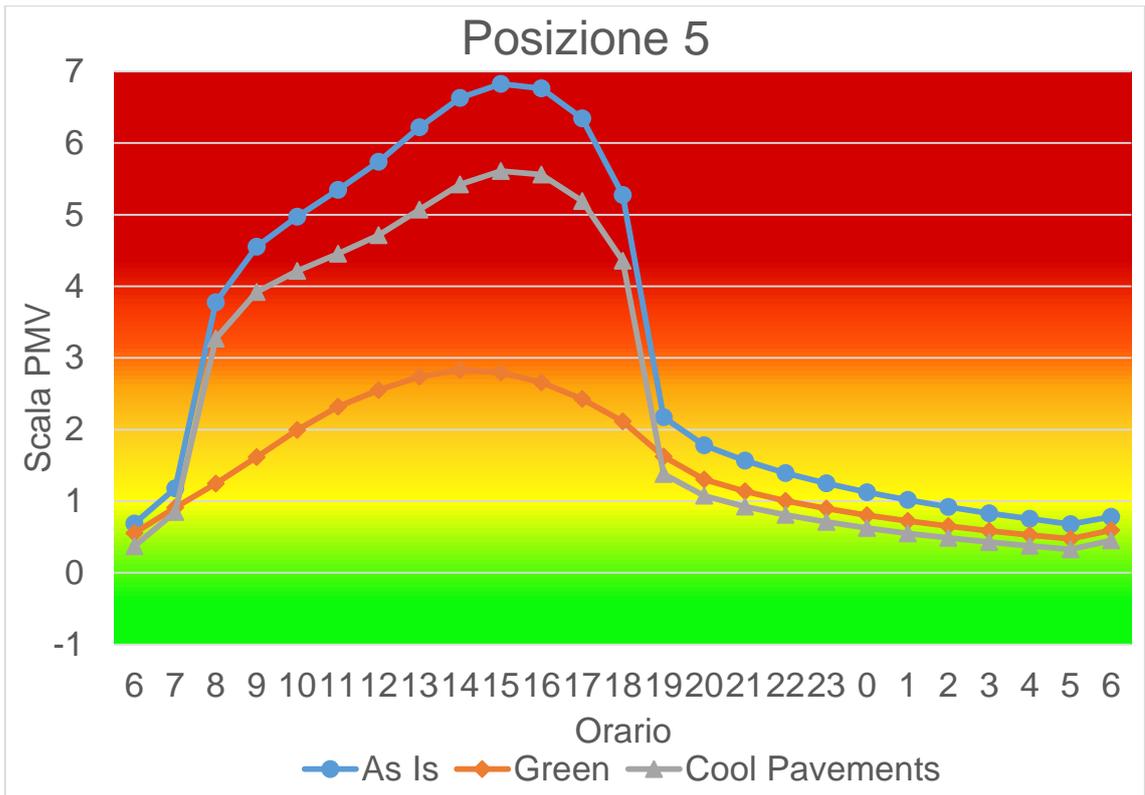


Figura 112 Confronto dell'andamento giornaliero del PMV della posizione 5, nei tre scenari

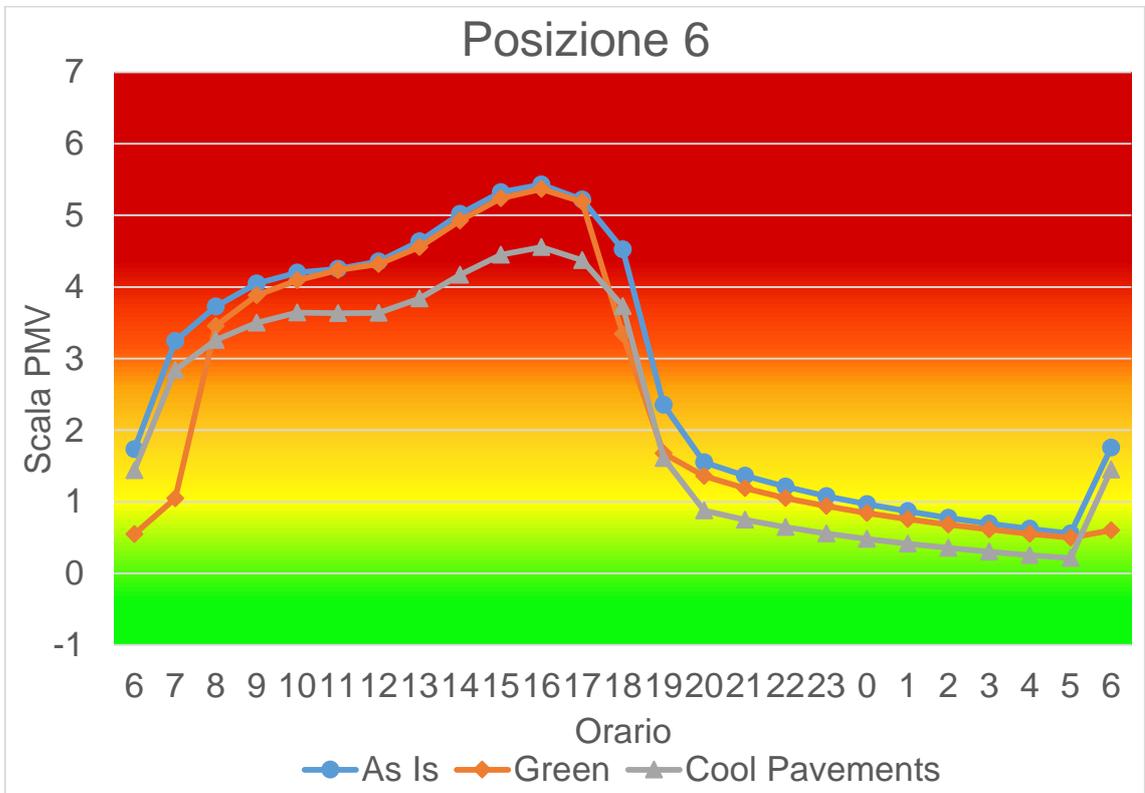


Figura 113 Confronto dell'andamento giornaliero del PMV della posizione 6, nei tre scenari

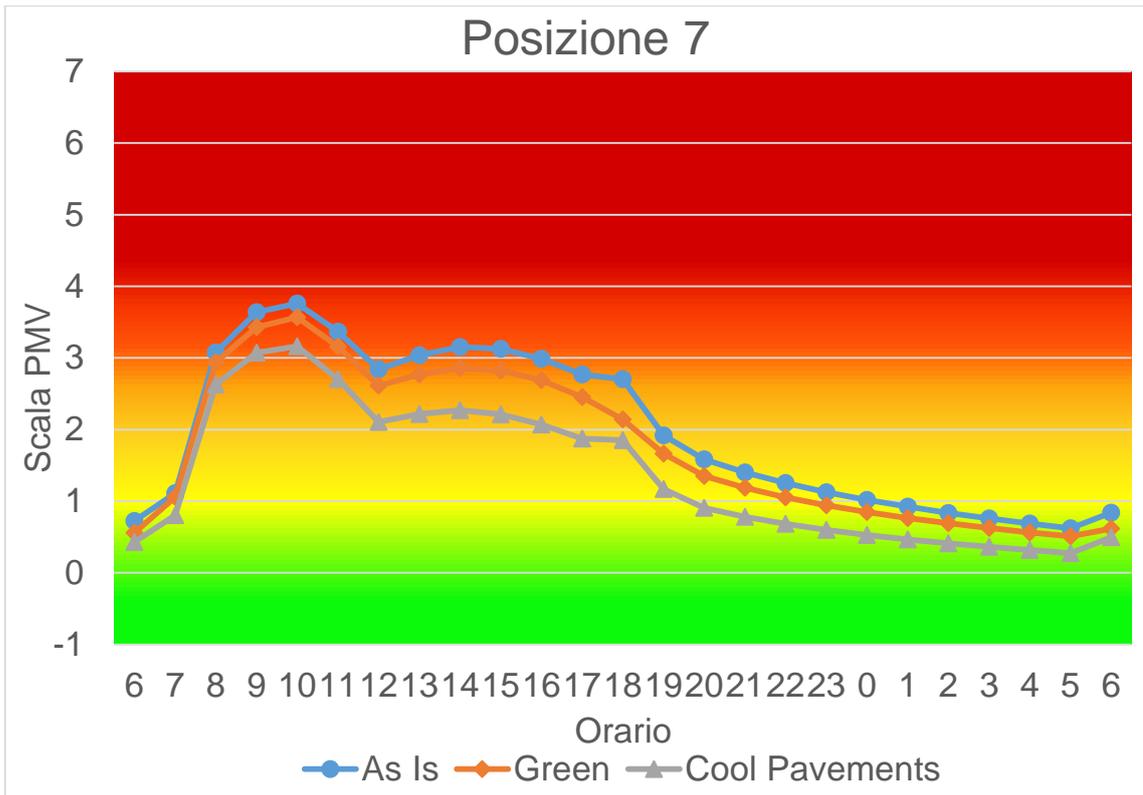


Figura 114 Confronto dell'andamento giornaliero del PMV della posizione 7, nei tre scenari

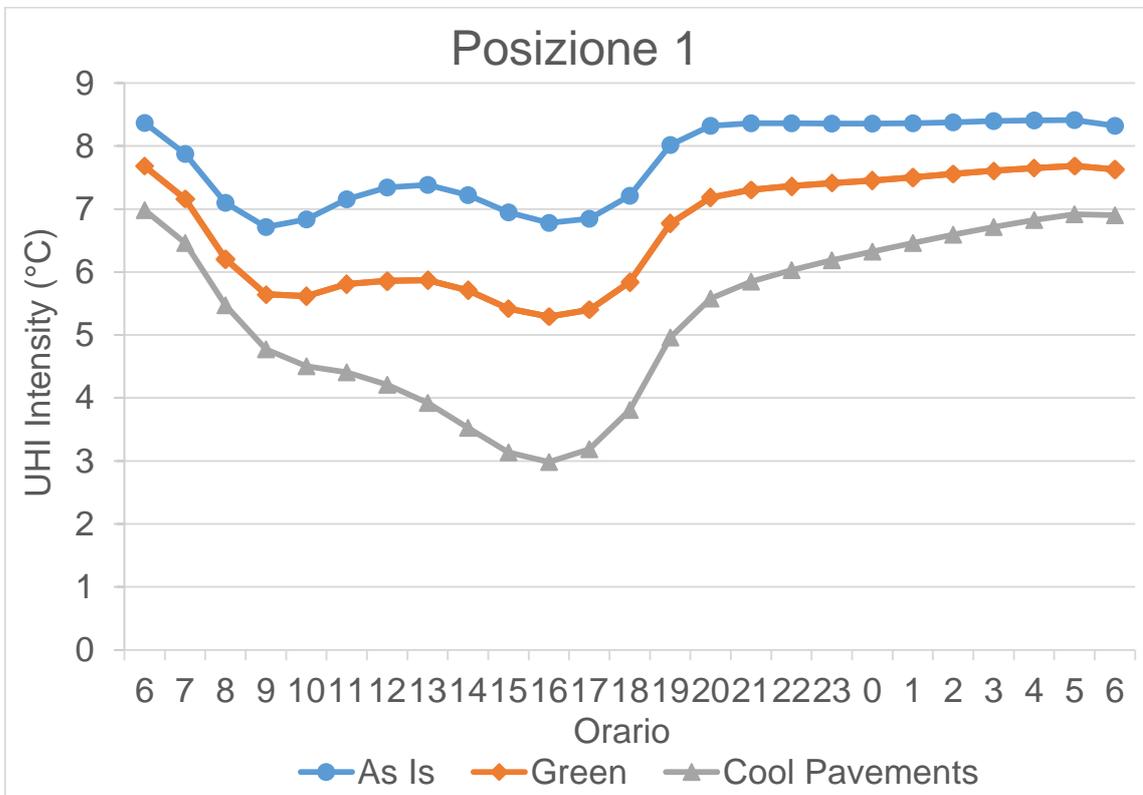


Figura 115 Confronto dell'andamento giornaliero dell'UHII della posizione 1, nei tre scenari

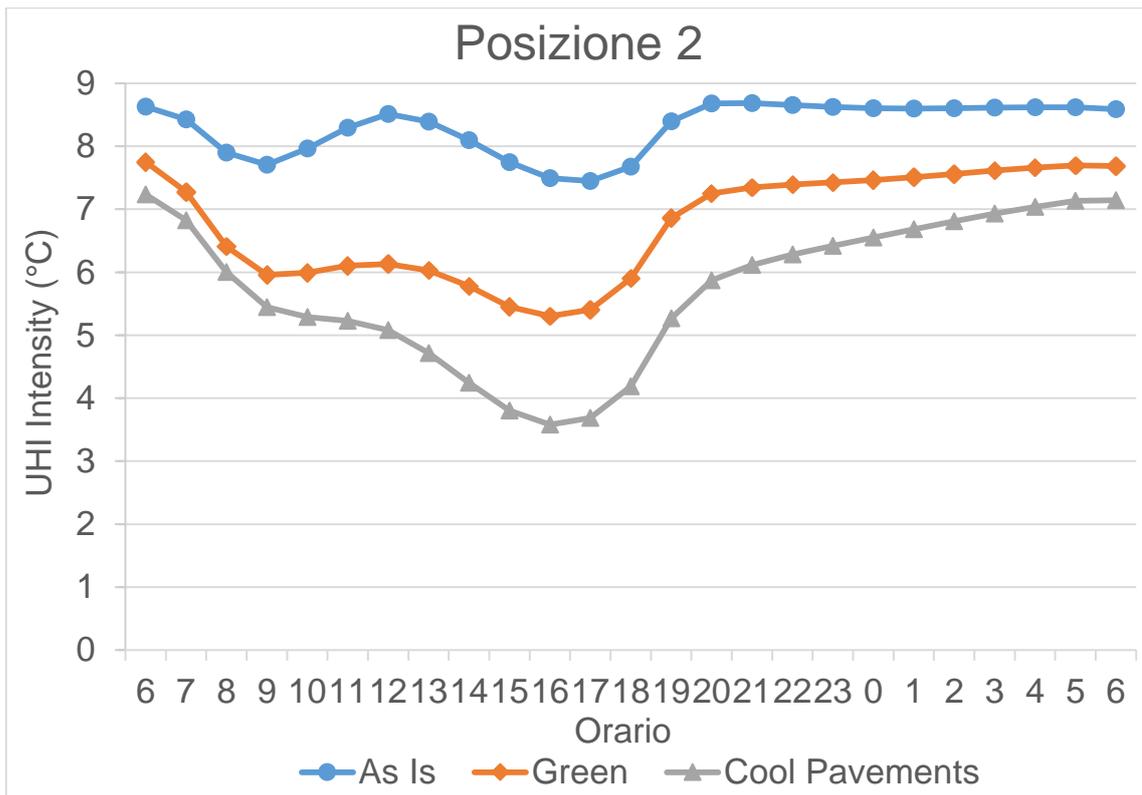


Figura 116 Confronto dell'andamento giornaliero dell'UHI della posizione 2, nei tre scenari

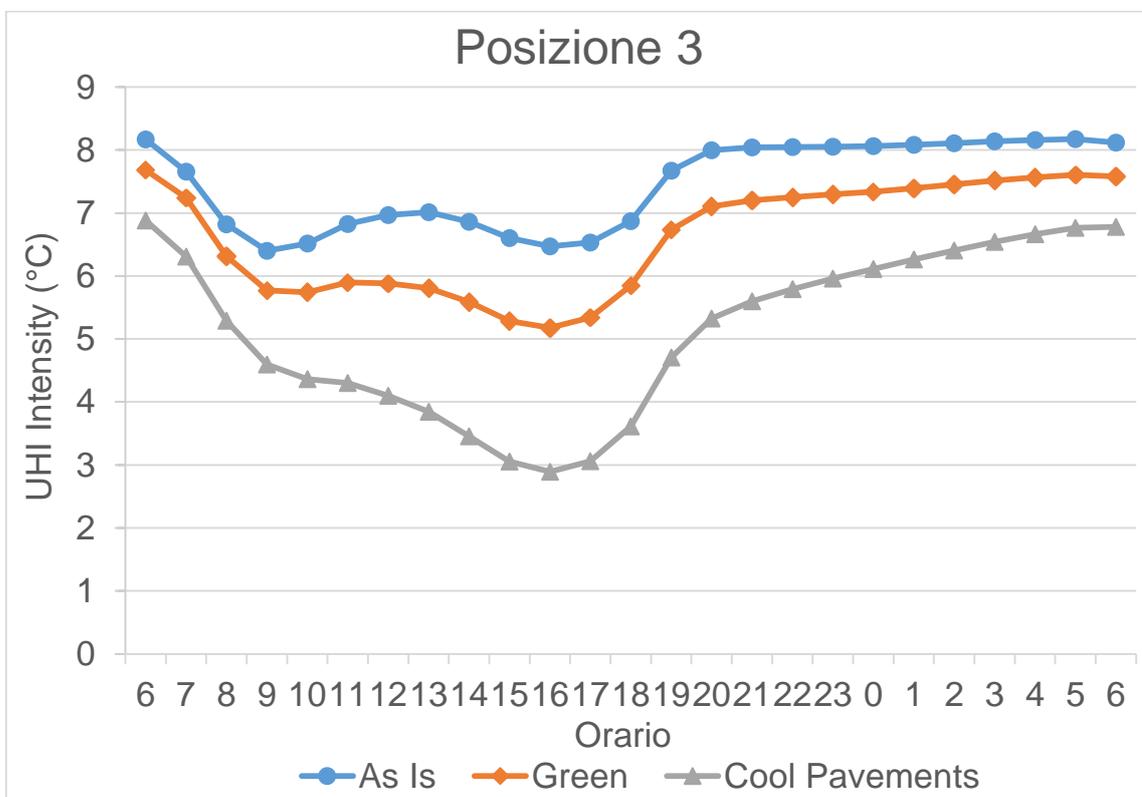


Figura 117 Confronto dell'andamento giornaliero dell'UHI della posizione 3, nei tre scenari

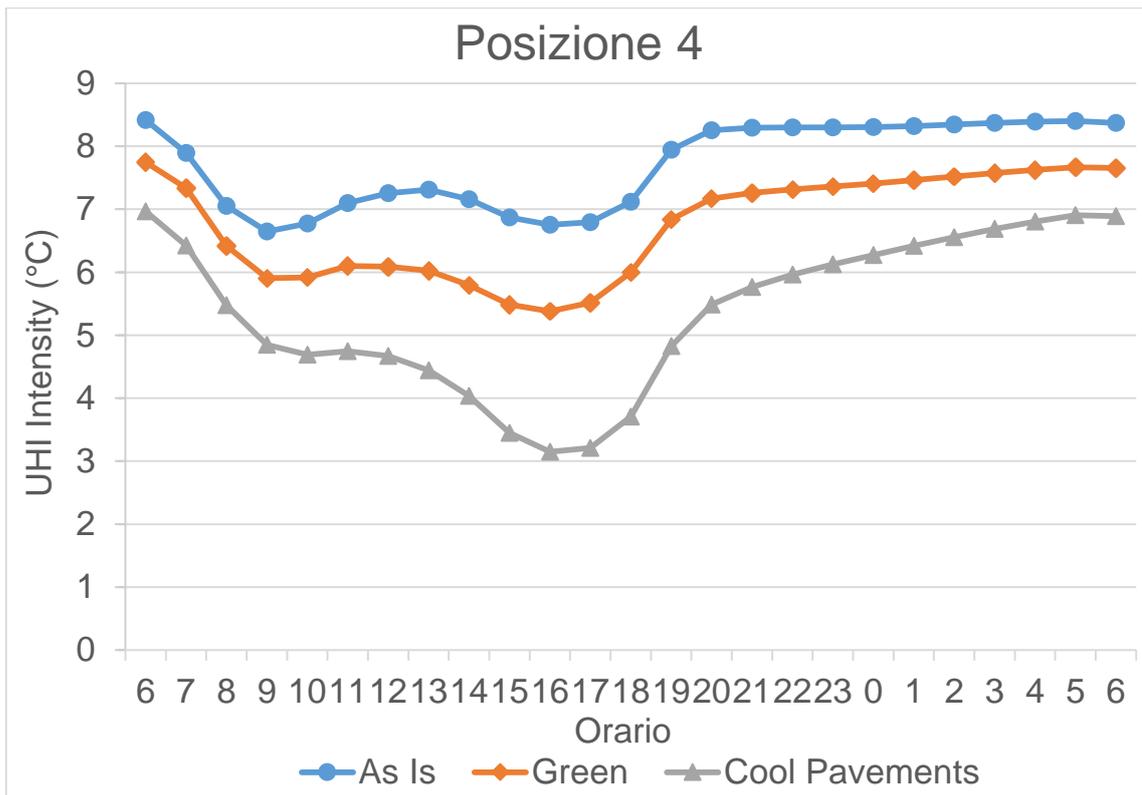


Figura 118 Confronto dell'andamento giornaliero dell'UHII della posizione 4, nei tre scenari

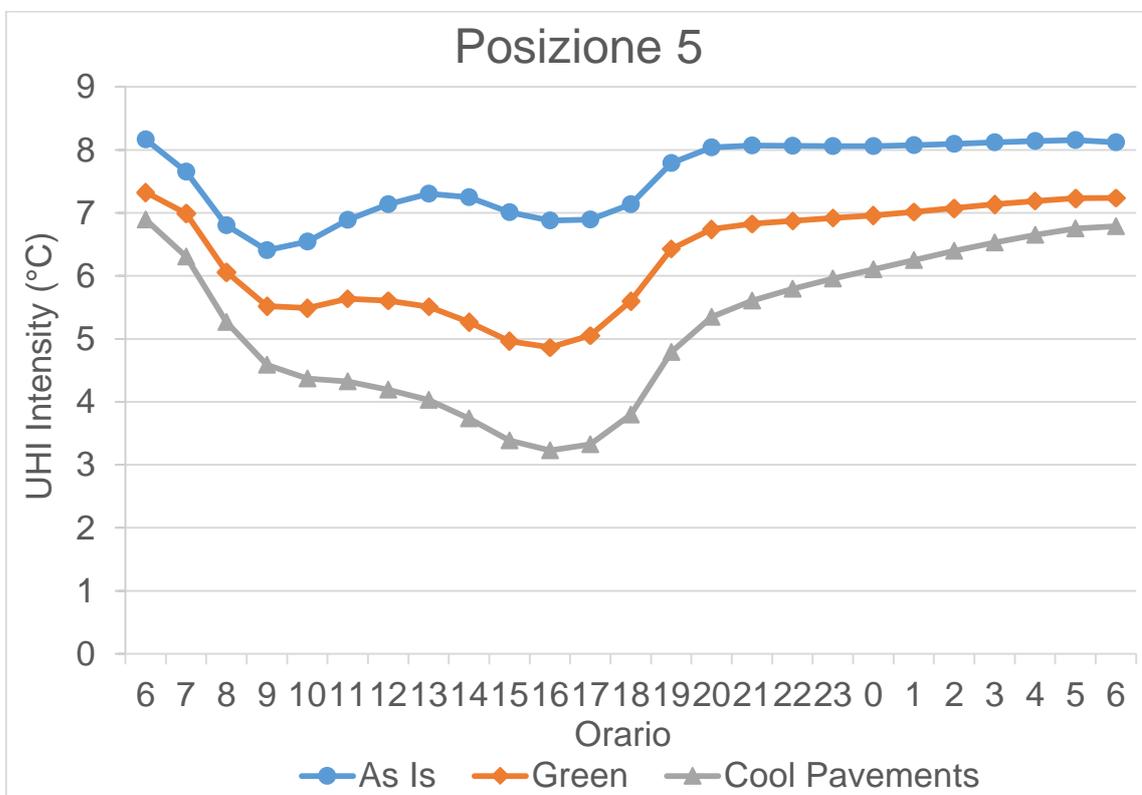


Figura 119 Confronto dell'andamento giornaliero dell'UHII della posizione 5, nei tre scenari

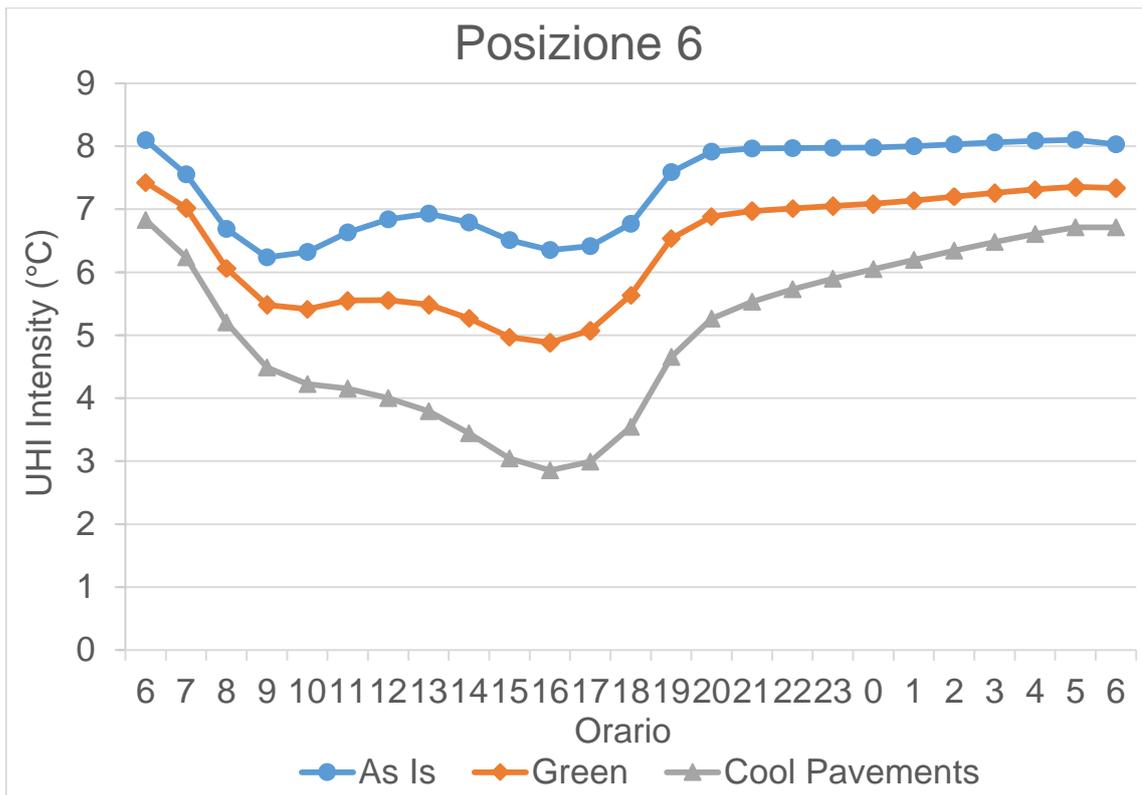


Figura 120 Confronto dell'andamento giornaliero dell'UHII della posizione 6, nei tre scenari

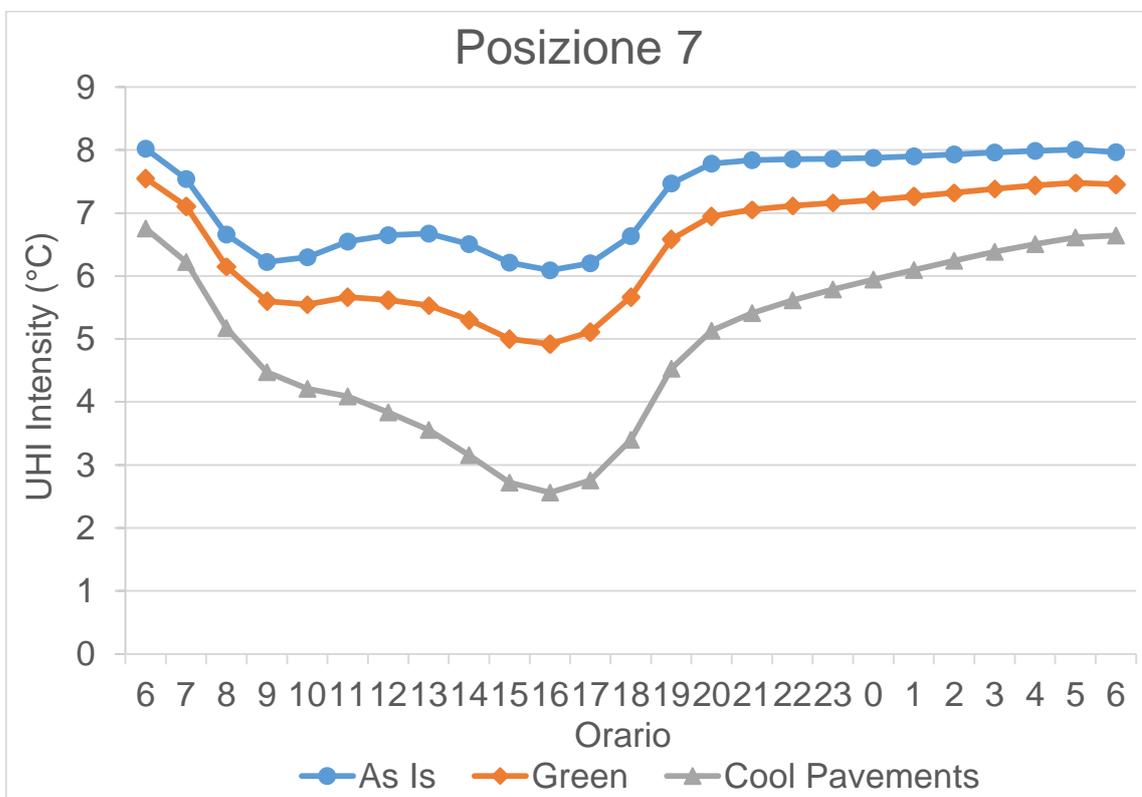


Figura 121 Confronto dell'andamento giornaliero dell'UHII della posizione 7, nei tre scenari

BIBLIOGRAFIA

- Abu E.M., Asaeda T., V.T. Ca, 1998, "Reduction in air conditioning energy caused by a nearby park", *Journal of Energy and Buildings*, vol 29, pp.83–92
- Akbari H., Berdahl P., Jacobs J., Klink F., 2007, "Surface roughness effects on the solar reflectance of cool asphalt shingles", *LBNL-62322*
- Akbari H., Bretz S., Fishman B.L., Kurn D.M., Rosenfeld A.H., Sailor D., Taha H., 1995, "Mitigation of urban heat island: materials, utility programs, updates", *Energy and Buildings*, vol 22, pp.255-265
- Akbari H., Bretz S., Hanford J., Kurn D., 1997, "Peak power and cooling energy savings of shade trees", *Energy and Buildings*, vol 25, pp.139-148.
- Akbari H., Bretz S., Huang B., Kurn D., 1994, "The potential for reducing urban air temperatures and energy consumption through vegetative cooling", *ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, American Council for an Energy Efficient Economy. Pacific Grove, CA.*
- Akbari H., Bretz S., Konopacki S., Levinson R., 2002, "Inclusion of Cool Roofs in Nonresidential Title 24 Prescriptive Requirements", *Paper LBNL-50451: Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA*
- Akbari H., Chen A., Pomerantz M., Taha H., Rosenfeld A.H., 1996, "Paving Materials for Heat Island Mitigation", *Lawrence Berkeley National Laboratory report, LBL-38074*
- Akbari H., Huang J., Taha H. 1990, "The Wind-Shielding and Shading Effects of Trees on Residential Heating and Cooling Requirements", ASHRAE Winter Meeting, Atlanta, Georgia
- Akbari H., Pomerantz M., Taha H., 2001, "Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas", *Solar Energy*, vol 70 (3), pp.295–310.
- Ali - Toudert F., 2005, "Dependence of outdoor thermal comfort on street design in hot and dry climate", *Freiburg: Meteorologisches Instituts der Albert-Ludwigs-Universität*
- Apostolakis A., Santamouris M., Synnefa A., 2007, "On the development, optical properties and thermal performance of cool colored coatings for the urban environment", *Solar Energy*, vol 81, pp.488-497

- Apostolakis K., Assimakopoulos D., Didaskalopoulos P., Karlessi T., Santamouris M., Synnefa A., 2011, "Development and testing of PCM doped cool colored coatings to mitigate urban heat island and cool buildings" *Building and Environment*, vol 46, pp. 570-576
- Argigiou A., Assimakopoulos D.N., Georgakis C., Koronakis I., Livada I., Papanikolaou N., Santamouris M., 2001, "On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings", *Solar Energy* vol 70, pp.201–216
- ASHRAE, 2009, *Handbook: Fundamentals*, Inch-Pound Edition, 1791 Tullie Circle, N.E., Atlanta, GA 30329: Mark S. Owen
- Baker N., Nikolopoulou M., Steemers K., 2001, "Thermal comfort in outdoor urban spaces: understanding the human parameter", *Solar Energy*, vol. 70, n. 3, pp. 227–235
- Bayer P., Blum P., Menberg K., Rumohr S., Zosseder K., 2013, "Subsurface urban heat islands in German cities ", *Science of the Total Environment*, vol 442, pp.123–133
- Berdahl P. e Bretz S. E., 1997, "Preliminary survey of the solar reflectance of cool roofing materials", *Energy and Buildings*, vol 25, pp.149– 158.
- Bisson M., A.A. 2009/2010, "Simulazione del microclima urbano di Milano mediante il software ENVI-met: studio degli effetti dell'inserimento di aree verdi sulla sollecitazione termica degli edifici", Tesi di Laurea Magistrale, Relatore Prof. Luca Pietro Gattoni, Politecnico di Milano
- Bonan G., 2002. *Ecological Climatology*, pp.678, cap 14 pag 3, cap 7 pag 3-7: Cambridge University Press
- Bruse M. e Fleer H., 1998a, "On the simulation of surface-plant-air interactions inside urban environment", pp.216-221
- Bruse M. e Fleer H., 1998b, "On the Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model", *Environmental Modelling and Software*, vol 13, pp. 373-384
- Bruse M. e Skinner C. J., 1999, "Rooftop Greening and local climate: A case study in Melbourne" *Proceedings International Conference on Urban Climatology + International Congress of Biometeorology, Sydney, 8-12. Nov, Australia, Biometeorology and Urban Climatology at the Turn of the Millennium, WMO/TD*, n.1026, World Meteorological Organization, Geneva, CH
- Bruse M., 2004, "ENVI-met 3.0: Updated Model Overview"

- Bruse M., 2004, "ENVI-met implementation of the Jacobs A-gs Model to calculate the stomata conductance (Working paper)"
- Bruse M., 2005, "Assessing urban microclimate from the user's perspective - Multi-Agent systems as a new tool in urban biometeorology", *Annalen der Meteorologie*, vol 41, pp. 137-140
- Bruse M., 2007, "Simulating human thermal comfort and resulting usage patterns of urban open spaces with a Multi- Agent System", PLEA2007 - The 24th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Singapore, 22-24 November 2007
- Bruse M., Dostal P., Huttner S., 2008, "Using ENVI-met to simulate the impact of global warming on the microclimate in central European cities", *Berichte des Meteorologischen Instituts der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg Nr. 18*: Helmut Mayer e Andreas Matzarakis (eds.): 5th Japanese-German Meeting on Urban Climatology, October 2008, pp. 307-312
- Bruse M., Dostal P., Huttner S., Katzschner A., 2009, "Strategies For Mitigating Thermal Heat Stress In Central European Cities: The Project Klimes", *The seventh International Conference on Urban Climate*, 29 June - 3 July 2009, Yokohama, Japan
- Bryan H. e Rosheidat A., 2010, "Optimizing the Effect of Vegetation for Pedestrian Thermal Comfort and Urban Heat Island Mitigation in a Hot Arid Urban Environment", pp.1-8
- Bryan H., Hoffman D., Rosheidat A., 2008 Third National Conference of IBPSA-USA Berkeley, California July 30 – August 1, 2008, pp.198-205
- Busato F., Lazzarin R., Noro M., 2014, "Three years of study of the UHI in Padua: Experimental results", *Sustainable Cities and Society*, vol 10, pp.251-258
- Candidi P., Galli G., Vallati A., 2006, "Studio dell'influenza di diversi materiali di rivestimento sul microclima di aeree urbane in piccola scala", 61° Congresso Nazionale ATI – Perugia 12-15 Settembre 2006
- Carbonari A., A.A. 2009/2010, "Tabelle del Corso di Tecnica del Controllo Ambientale", IUAV
- Carnielo E., Fanchiotti A., 2011, "Impatto di cool materials sulla mitigazione dell'isola di calore urbana e sui livelli di comfort termico negli edifici", Report Ricerca di Sistema Elettrico Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica Progetto: Studi e valutazioni sull'uso razionale dell'energia: Tecnologie per il risparmio elettrico nel settore

Carnielo E., Fanchiotti A., Zinzi M., 2012, "Impact of cool materials on urban heat islands and on buildings comfort and energy consumption"

Charles Kate E., 2003, *Fanger's Thermal Comfort and Draught Models*, Institute for Research in Construction National Research Council of Canada, Ottawa, K1A 0R6, Canada: IRC Research Report RR, pp.162

Chow W.T.L. e Roth M., 2006, "Temporal dynamics of the urban heat island of Singapore", *International Journal of Climatology*, vol 26, pp.2243-2260

Christen A. e Vogt R., 2004, "Energy and radiation balance of a central european city", *International Journal of Climatology*, vol 24, pp.1395-1421

Cubasch U., Langer I., Sodoudi S., 2012, "Using the ENVI-MET program to simulate the micro climate in new Town HASHTGERD", The International Conference on Computing, Networking and Digital Technologies (ICCN2012) - Bahrain, pp.61-64

Dandou A., Santamouris M., Synnefa A., Soulakellis N., Tombrou M., 2008, "On the Use of Cool Materials as a Heat Island Mitigation Strategy" *Journal Of Applied Meteorology And Climatology*, vol 47, pp.2846-2856

Dandou A., Santamouris M., Synnefa A., Soulakellis N., Tombrou M., 2006 "Assessment of the Potential of Cool Materials to Contribute to the Mitigation of the Heat Island Effect in Athens"

Davolio S., "dispensa CNR radiazione"

De Carolis L., 2012, "The Urban Heat Island Effect in Windsor", ON: An Assessment of Vulnerability and Mitigation Strategies Report Prepared for the City of Windsor August

de Dear R. e Spagnolo J., 2003, "A field study of thermal comfort in outdoor and semi-outdoor environments in subtropical Sydney, Australia", *Building and Environment*, vol 38, pp.721-738

Duce P., Ferrara R., Arca B., 2011, "Applicazione dei laser scanner terrestri in campo agro-forestale e ambientale", Atti 15a Conferenza Nazionale ASITA - Reggio di Colorno, 15-18 novembre 2011

Emmanuel R. e Fernando H.J.S., 2007, "Urban Heat Islands in humid and arid climates: role of urban form and thermal properties in Colombo, Sri Lanka and Phoenix, USA", *Climate Research*, vol 34, Issue 3, pp.241- 251.

EPA 2008, *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies Cool Pavement* by the Climate Protection Partnership Division in the U.S. Environmental Protection Agency's Office of Atmospheric Programs

EPA 2008, *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies Cool Roofs* by the Climate Protection Partnership Division in the U.S. Environmental Protection Agency's Office of Atmospheric Programs

EPA 2008, *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies Green Roofs* by the Climate Protection Partnership Division in the U.S. Environmental Protection Agency's Office of Atmospheric Programs

EPA 2008, *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies Heat Island Reduction Activities* by the Climate Protection Partnership Division in the U.S. Environmental Protection Agency's Office of Atmospheric Programs

EPA 2008, *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies Trees and Vegetation* by the Climate Protection Partnership Division in the U.S. Environmental Protection Agency's Office of Atmospheric Programs

EPA 2008, *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies UHI Basics* by the Climate Protection Partnership Division in the U.S. Environmental Protection Agency's Office of Atmospheric Programs

Fanger P. O., 1970, *Thermal comfort, analysis and application in environment engineering*, Copenhagen - Denmark: Danish Technical Press

Fröhlich D. e Matzarakis A., 2013, "Modeling of changes in thermal bioclimate: examples based on urban spaces in Freiburg, Germany", *Theoretical and Applied Climatology*, vol 111, pp.547–558

Gabersek S., Konopacki S., Taha H., 1999, "Impacts of large-scale surface modifications on meteorological conditions and energy use: a 10-region modeling study", *Theoretical and Applied Climatology*, vol 62 (3-4), pp.175-185.

Gaj E., Gomez F., Reing A., 1998, "Vegetation and climatic changes in a city", *Ecological Engineering*, vol 10, pp. 355–360

Golden J. e Kaloush K., 2007, "Alternative Pavements Ease Urban-Heat Effect", <http://sos.asu.edu/news/greentalk/alternative-pavements-ease-urban-heat-effect>

- Golden J.S., Phelan P.E., Silva H.R., 2010, "Modeling effects of urban heat island mitigation strategies on heat-related morbidity: a case study for Phoenix, Arizona, US", *International Journal of Biometeorology*, vol 54: pp.13-22
- Guyot G., 1998, *Physics of the environment and climate*, Paris: Praxis Publishing, Chichester and Dunod editeur
- Hoffman M. E. e Sashua-Bar L., 2000, "Vegetation as a climatic component in the design of an urban street: An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees", *Energy and Buildings*, vol 31, pp.221-235
- Honjo T., 2009, "Thermal Comfort in Outdoor Environment" pp. 43-47
- Humphreys M. A. e Nicol J. F., 2002, "Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings", *Energy and Buildings*, vol 34, n. 6, pp.563-572
- Huttner S., 2012, *Further development and application of the 3D microclimate simulation ENVI-met*, Fachbereich Chemie, Pharmazie und Geowissenschaften der Johannes Gutenberg-Universität in Mainz, pp.147
- IMPER, 2010, "Soluzioni tecniche per il contenimento delle isole di calore urbane"
- INTERNATIONAL STANDARD ISO 7730 2005-11-15, *Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*, Third edition
- Iziomon Moses G., Matzarakis A., Mayer H., 1999, "Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature", *International Journal of Climatology*, vol 43, pp.76-84
- Jauregui E., 1990, "Influence of a large urban park on temperature and convective precipitation in a tropical city", *Journal of Energy and Buildings*, voll15–16, pp.457– 463
- Jendritzky G. e Nübler W., 1981, "A Model Analysing the Urban Thermal Environment in Physiologically Significant Terms", *Archives For Meteorology, Geophysics, And Bioclimatology*, Ser. B, vol 29, pp.313-326
- JuYoun Kwon e Parsons K. 2009, "Evaluation of the pmv thermal comfort index in outdoor weather conditions", *Environmental Ergonomics Research Centre*, Loughborough University, Loughborough, Leicestershire, U.K. LE11 3TU
- Kaloush K., 2010, "Pavements and the Urban Heat Island Effect", *EPA's Cool Pavements Webcast 1/28/2010*, Arizona State University

- Karlessi T., Santamouris M., Synnefa A., 2011, "Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions", *Solar Energy* vol 85, pp.3085–3102
- Kiesel K., Vuckovic, M., Mahdavi A. 2013, "Re-presentation of Weather Conditions in Building Performance Simulation: A Case Study of Micro-climatic Variance in Central Europe", IBPSA, 13th International Conference of the International Building Performance Simulation Association, August 25 - 28, France.
- Kinouchi T., Tamotsu Yoshinaka, Noriyuki Fukae, Manabu Kanda, 2004, "Development of cool pavement with dark colored high albedo coating" *Fifth Conference for the Urban Environment, Vancouver 2004*
- Lazzarin Renato M. (2011), "Le isole di calore nelle aree urbane", *Casa&Clima*, n. 34, pp.34-40
- Levine K. K., 2011, "Cool pavements research and technology", *Preliminary investigation: caltrans division of research and innovation*, pp.17
- Livada I., Santamouris M., Synnefa A., 2006, "A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment", *Solar Energy*, vol 80, pp.968–981
- Maco S.E., McPherson E.G., Peper P.J., Simpson J.R., and Xiao Q., 2005, "Municipal Forest Benefits and Costs in Five US Cities", *Journal of Forestry*, vol 103, n. 8, pp.411-416.
- Mahdavi A., Kiesel K., Vuckovic M., 2013, "A framework for the evaluation of urban heat island mitigation measures", *SB13 Munich Conference, April 23-26, Germany*
- Mayer H., 1993, "Urban bioclimatology", *Experientia*, vol 49, pp.957–963
- McPherson E.G. e J. Muchnick, 2005, "Effects of Street Tree Shade on Asphalt Concrete Pavement Performance", *Journal of Arboriculture*, vol 31, n. 6, pp.303-310
- McPherson E.G., 2002, "Green Plants or Power Plants? Center for Urban Forest Research", Davis, CA
- Mills G., 2004, "The Urban Canopy Layer Heat Island", IAUC (International Association for Urban Climate) Teaching Resources
- Mirzaei P. A. e Haghghat F., 2010, "Approaches to study Urban Heat Island – Abilities and limitations", *Building and Environment*, vol 45, Issue 10, pp. 2192–2201

- Muscio A., 2014, *Tecnologia per la mitigazione dell'isola di calore urbana: materiali cool per tetti, pareti e pavimentazioni*, Modena
- Nunez M. e Oke T. R., 1977, "The energy balance of an urban canyon", *Journal of Applied Meteorology*, vol 16, pp.11-19
- Oke T. R., 1973, "City size and the urban heat island" *Atmospheric Environment*, vol 7, pp.769–779
- Oke T. R., 1976, "The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands", *Atmosphere*, vol 14, issue 4, pp.268-277
- Oke T. R., 1987, "Boundary layer climates", Londra: Routledge
- 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
- Peron F., Romagnoni P., Vio M., IUAV Corsi di Fisica Tecnica A.A. 2000-2001
- Puppi L., Toffanin G., 1983, *Guida di Padova. Arte e storia tra vie e piazze*, Trieste, p. 163
- Rosheidat A., 2014, "Optimizing the effect of vegetation for pedestrian thermal comfort and urban heat island mitigation in a hot arid urban environment: a dissertation presented in partial fulfillment of the requirements for the degree doctor of philosophy", *Arizona State University*
- Roth M., 2002, "Effects of Cities on Local Climates", *Proceedings of Workshop of IGES/APN Mega-City Project 23-25 January 2002 (Rihga Royal Hotel Kokura, Kitakyushu Japan)*
- Sailor D. J., 1994, "Simulated urban climate response to modifications in surface albedo and vegetative cover", *Journal of applied Meteorology*, vol 34, pp.1694-1704
- Taha H., 1997, "Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat", *Energy and Buildings*, vol 25, pp. 99-103
- Taha H., 2005, "Urban surface modification as a potential ozone air- quality improvement strategy in California-Phase one: Initial mesoscale modeling". *Altostratus, Inc., for the California Energy Commission, PIER Energy-Related Environmental Research Rep. CEC-500-2005-128*, pp.132

Thorsson S., Lindqvist M., Lindqvist S., 2004 “Thermal bioclimatic conditions and patterns of behaviour in an urban park in Göteborg, Sweden” *International Journal of Biometeorology*, vol 48, pp.149-156

Trimmel H., 2008, *Using Microscale Climatological Simulation in Landscape Planning - an ENVI-met 3 User's Perspective*, Institute of Meteorology - University of Applied Life Sciences - BOKU Wien

UHI - “Development and application of mitigation and adaptation strategies and measures for counteracting the global Urban Heat Islands phenomenon” - WORK PACKAGE 3 - Activity 3.1 “Review of the present knowledge on urban heat island (UHI) - possible adaptation and mitigation measures” 2007 - 2013

UHI PROJECT, 2012, Newsletter n.1

UHI PROJECT, 2013, Newsletter n.2

UHI PROJECT, 2014, Newsletter n.3

VDI Verein Deutscher Ingenieure, 1998, *Handbuch Reinhaltung der Luft Band 1. Umweltmeteorologie. Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt und Regionalplanung*, 3787 Blatt2 /Part2, Düsseldorf

Voogt J., 2006, “How Researchers Measure Urban Heat Islands Department of Geography”, University of Western Ontario London ON Canada

Wilby R.L., 2003, “Past and projected trends in London’s urban heat island”, *Weather*, vol 58, pp.251-260.

Yang Xiaoshan, Lihua Zhao, Bruse M., Qinglin Meng 2013 “Evaluation of a microclimate model for predicting the thermal behavior of different ground surfaces”, *Building and Environment*, vol 60, pp.93-104

Nella stesura di questa tesi sono stati consultati anche i seguenti documenti:

Akbari H., Pomerantz M., Romm J. J., Rosenfeld A. H., 1998, “Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction”, *Energy and Buildings*, vol 28, pp.51-62

Astolfi A., Corrado V., 1997, “Sul calcolo puntuale della temperatura media radiante in ambienti di forma irregolare”, 52° congresso nazionale ATI, pp.111- 127

Beretta S., A.A. 2011/2012, “Gli effetti del verde sulla mitigazione dell’isola di calore urbana”, Tesi di Laurea, Relatore Prof.ssa Grazia Concilio, Politecnico di Milano

- Bonafè G., 2006, "Microclima urbano: impatto dell'urbanizzazione sulle condizioni climatiche locali e fattori di mitigazione", Area Meteorologia Ambientale Servizio Idrometeorologico ARPA Emilia-Romagna
- Brazel A. J., Heisler G. M., 2010, *The Urban Physical Environment: Temperature and Urban Heat Islands, Agronomy Monograph 55, Urban Ecosystem Ecology*. J. Aitkenhead-Peterson and A. Volder (ed.)
- Brazel A., Gober P., Grimmond S., Grossman Clarke S., Miller A. Q., Myint S., Quay R., Rossi S., 2013, "Mitigating Urban Heat Island Effects with Water- and Energy-Sensitive Urban Designs"
- Campostrini P., 2013, "UHI – urban heat island and its mitigation in the Veneto region", Prague, October 23th, 2013
- Docenti Università di Napoli, "Cenni su benessere termico e qualità dell'aria in ambienti confinati ad uso civile", <https://www.docenti.unina.it/download>, pp.1-18
- Ching J., 2008, "Investigation to Mitigate Heat Island Intensity using Models and the National Urban Database and Access Portal Tools", *EPA Climate Protection Partnership Division Urban Heat Island Webcast*, November 12, 2008
- Chow D. H. C., Darkwa J., Shen T., 2013, "Simulating the influence of microclimatic design on mitigating the Urban Heat Island effect in the Hangzhou Metropolitan Area of China", *International Journal of Low-Carbon Technologies Advance Access*, December 28, 2013
- Chow W. T. L., 2011, *Microscale modeling of the canopy-layer urban heat island in Phoenix, Arizona: validation and sustainable mitigation scenarios*, A Dissertation Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy, Arizona State University
- Conry P., Fernando H.J.S., Hellmann J., Potosnak M., Sharma A., 2014, "Multi-scale study of chicago heat island and the impacts of climate change", 94th American Meteorological Society Annual Meeting - 11th Symposium on the Urban Environment, February 2-6, 2014, Atlanta, Georgia
- Dina A., A.A. 2010/2011, *Isole di calore urbane: contributi antropogenici e valutazione annuale*, Tesi di Laurea Magistrale, Relatore Prof. Renato Lazzarin, Università degli Studi di Padova

Georgiadis F., Margelli F., Rossi F., Rossi S., 2011, "L'isola di calore: l'uomo e il microclima urbano in cui vive", [http:// www.vivaighilotti.com/ component/ docman/ doc_view/ 9-lisola-di-calore.raw?tmpl=component](http://www.vivaighilotti.com/component/docman/doc_view/9-lisola-di-calore.raw?tmpl=component)

Hakala T., Manninen T., Peltoniemi J., Puttonen E., Riihelä A., Suomalainen J., 2010, "Land surface albedos computed from BRF measurements with a study of conversion formulae", *Remote Sensing*, vol 2, pp.1918-1940

Harman I. N., 2003, *The energy balance of urban areas*, Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy, Relatori Prof. S. E. Belcher e Prof. M. J. Best, The University of Reading

Jendritzky G., Maarouf A., Fiala D., Staiger H., 2002, "An update on the development of a universal thermal climate index", in 15th Conference on Biometeorology/Aerobiology e 16th International Congress of Biometeorology - 29 Ottobre 2002, Kansas City, Missouri

Nikolopoulou M., Steemersb K., 2003, "Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces", *Energy and Buildings*, vol 35, pp.95-101

Sailor D. J., 2007, "The Urban Heat Island (UHI), The Urban Heat Island (UHI) - Causes, Impacts, and Mitigation Strategies", State Clean Energy-Environment Technical Forum, U.S. EPA, 10 maggio 2007

Shahmohamadi P., A. I. Che-Ani, Ramly A., Maulud K. N. A., M. F. I. Mohd-Nor, 2010, "Reducing urban heat island effects: A systematic review to achieve energy consumption balance", *International Journal of Physical Sciences*, vol 5 (6), pp. 626-636

Sottana M., A.A. 2011/2012, *Analisi sperimentale del fenomeno "isola di calore" nella città di Padova*, Tesi di Laurea Magistrale, Relatore Prof. Renato Lazzarin, Università degli Studi di Padova

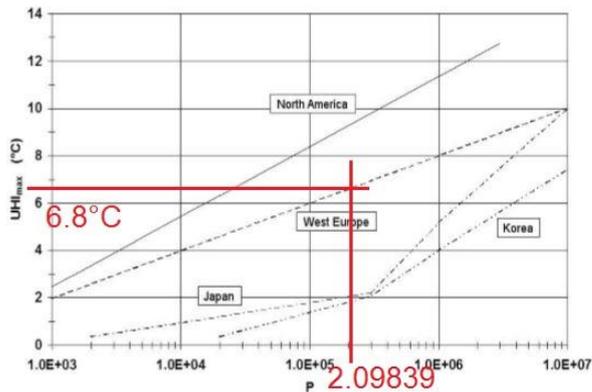
APPENDICE

Calcolo valori di riferimento per UHI a Padova:

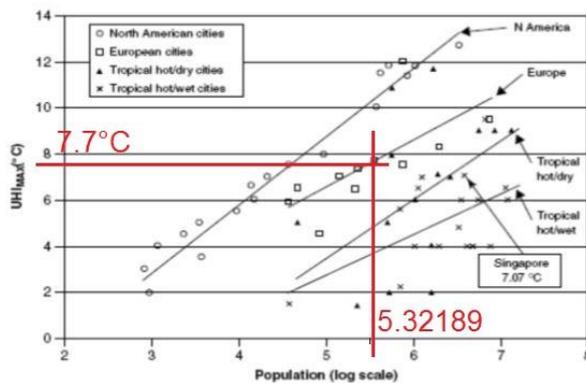
P = 209839 abitanti (01/14)

log P=5.32189

- Matzarakis (2001)



- Chow e Roth (2006)



- Oke T.R. (1976)

$UHI_{max} = 2.01 \cdot \log(209839) - 4.06 = 6.6(3699) \pm 0.9 \text{ } ^\circ\text{C}$

- Bonan (2002)

$UHI_{max} = 3.02 \cdot \log(209839) - 3.29 = 12.7(8209) \text{ } ^\circ\text{C}$