LA CITTÀ COMPATTA IN CLIMA MEDITERRANEO: ISOLA DI CALORE, MORFOLOGIA E SOSTENIBILITÀ

The compact city in Mediterranean climate: Heat Island, Urban Morphology and Sustainabilty

Agnese Salvati

Tesi di Dottorato in cotutela

Relatori: Prof. Ing. Carlo Cecere
Prof. Arch. Helena Coch Roura

Correlatore: Prof. Ing. Paolo Monti

SAPIENZA Università di Roma
DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA DELL'ARCHITETTURA E URBANISTICA
Facoltà di Ingeneria Civile e Industriale
DICEA - Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BarcelonaTECH
ÀMBITS DE RECERCA EN L'ENERGIA I EL MEDI AMBIENT A L'ARQUITECTURA
Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona
Departament de Tecnologia de l'Arquitectura

Roma, Maggio 2016

SECONDA
PARTE

MORFOLOGIA URBANA E PERFORMANCE CLIMATICA ED ENERGETICA

CAPITOLO 5

MORFOLOGIA URBANA E ISOLA DI CALORE

I risultati conseguiti nell'ambito dello studio e della modellazione del clima urbano trovano ancora scarsa applicazione nel settore della pianificazione e della progettazione. Tale difficoltà è dovuta perlopiù ad una carenza di strumenti idonei ad analizzare il fenomeno secondo scale proprie delle discipline edilizie e urbanistiche.

Lo studio che si presenta in questo capitolo intende contribuire a colmare tale carenza, individuando strumenti speditivi di analisi dell'intensità dell'isola di calore in funzione di indici di densità comunemente utilizzati nella pianificazione urbana.

Il capitolo è dedicato all'indagine delle interrelazioni tra densità, morfologia urbana e intensità di isola di calore nel contesto Mediterraneo. Attraverso analisi numeriche e modellazioni, si evidenzia come la morfologia e la densità dei tessuti urbani omogenei incidano in maniera determinante sull'andamento dell'isola di calore alla scala locale.

In primo luogo, applicando una metodologia di analisi comparativa, viene analizzato il comportamento climatico di diversi tessuti urbani individuati nelle città di Roma e Barcellona. I casi di studio rappresentano un campione di morfologie tipiche delle realtà urbane europee, associate a determinati periodi storici di programmazione e realizzazione e caratterizzate da elevata omogeneità morfologica e varietà in termini di densità e compattezza. Lo studio della performance climatica è eseguito con UWG, sulla base di modelli tipologici realizzati per ciascun caso di studio.

La relazione tra morfologia urbana e isola di calore è stata esplicitata mediante un controllo parametrico delle caratteristiche morfologiche e della performance climatica estiva ed invernale. L'analisi dei risultati ha permesso una valutazione qualitativa e quantitativa della performance di ciascun caso di studio, in funzione delle sue caratteristiche morfologiche.

Successivamente è stato applicato un modello di regressione lineare ai risultati dell'intensità di isola di calore calcolata per un più vasto campione di casi di studio. Ciò ha permesso di individuare relazioni analitiche tra le variabili morfologiche indipendenti e l'isola di calore estiva ed invernale, valide per il clima Mediterraneo.

Le relazioni individuate si configurano come strumenti di interpretazione del comportamento climatico dei tessuti edilizi della città compatta e permettono una valutazione speditiva dell'intensità di isola di calore al variare delle caratteristiche morfologiche dei tessuti urbani.

In tal modo progettisti e decisori possono avvalersi di strumenti di analisi delle prestazioni climatiche dei tessuti urbani, utili alla realizzazione di mappe di vulnerabilità e alla prefigurazione dei benefici conseguibili a fronte di eventuali trasformazioni.

5.I. Parametri morfologici e di densità del costruito

Lo studio della relazione tra densità, morfologia e isola di calore è incentrata alla scala locale dei tessuti edilizi, sia per quanto riguarda l'individuazione dei parametri descrittivi della morfologia urbana, sia per la determinazione dell'intensità media di isola di calore.

La scelta di tale scala di approfondimento risiede in due presupposti principali alla base di questa ricerca: in primo luogo, si ritiene più utile conoscere la variabilità spaziale dell'isola di calore "locale" all'interno dell'area urbana, piuttosto che alla mesoscala o alla microscala. Nello studio dell'isola di calore alla mesoscala la città costituisce nel suo insieme una fonte di calore che altera il clima dell'intera regione, ma non è possibile apprezzare le variazioni di temperatura all'interno della città stessa. Al contrario, uno studio alla microscala risulta fortemente influenzato dalle peculiarità del singolo canyon urbano oggetto di studio e non si presta ad analisi speditive della vulnerabilità climatica all'interno della città.

La scala locale, invece, rappresenta il dominio di analisi più idoneo per la valutazione della "performance climatica" dell'edificato. Alla scala dei tessuti edilizi, la consistenza dell'edificato può essere efficacemente parametrizzata per mezzo di indici di densità, che permettono l'individuazione di relazioni quantitative tra le caratteristiche morfologiche e le prestazioni espresse.

Occorre pertanto individuare un adeguato insieme di parametri morfologici e di densità che permettano una descrizione efficace dei tessuti urbani in relazione alla loro performance climatica. La maggior parte degli studi finora condotti assumono una parametrizzazione della geometria urbana fondata su un solo indice, normalmente lo Sky View Factor o il rapporto di verticalità del canyon.
Tale schematizzazione non è però idonea ad esprimere la prestazione climatica alla scala locale, in quanto risulta insufficiente a descrivere la morfologia tridimensionale del tessuto urbano. La parametrizzazione del canyon urbano attraverso un solo indice non dà nessuna informazione sulla "forma" dell'edificato, né sulle sue dimensioni, bensì solo sulla proporzione dello spazio esterno (figura 105). Tessuti urbani caratterizzati dallo stesso rapporto di verticalità del canyon possono corrispondere a configurazioni urbane e spaziali anche molto differenti

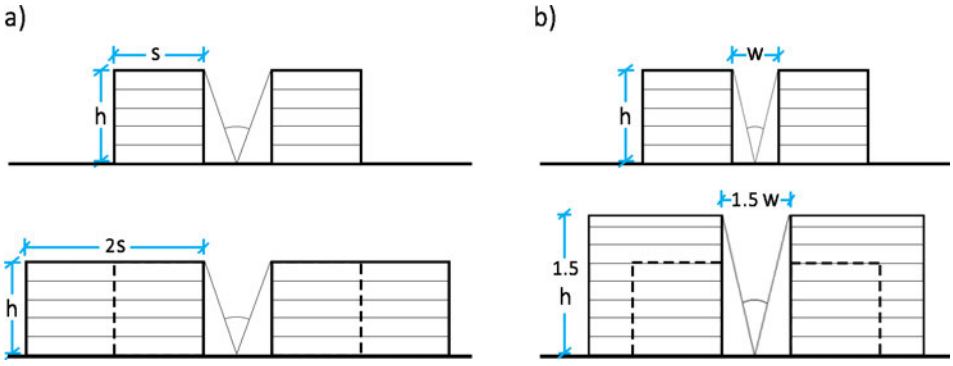


Figura 105 Esempio di morfologie urbane con stesso rapporto di verticalità del canyon ma caratteristiche differenti. Nel caso a) due tessuti che presentano la stessa proporzione dei canyon ma sono composti da tipologie edilizie differenti per profondità. Nel caso b) tessuti con lo stesso rapporto di propozione ma di dimensioni differenti, sia rispetto all'impronta a terra dell'edificato, che all'altezza e alla profondità del canyon

e, conseguentemente, presentare comportamenti climatici diversi.

Per poter associare una performance climatica o energetica ai tessuti urbani occorre quindi necessariamente ampliare l'insieme dei parametri minimi necessari a descrivere la morfologia tridimensionale in esame.

Il presente studio adotta una parametrizzazione della morfologia urbana fondata sui tre indici del modello Urban Weather Generator:

ALTEZZA MEDIA (Average Building height - h_{bld}): Altezza media dell'edificio nell'area urbana,

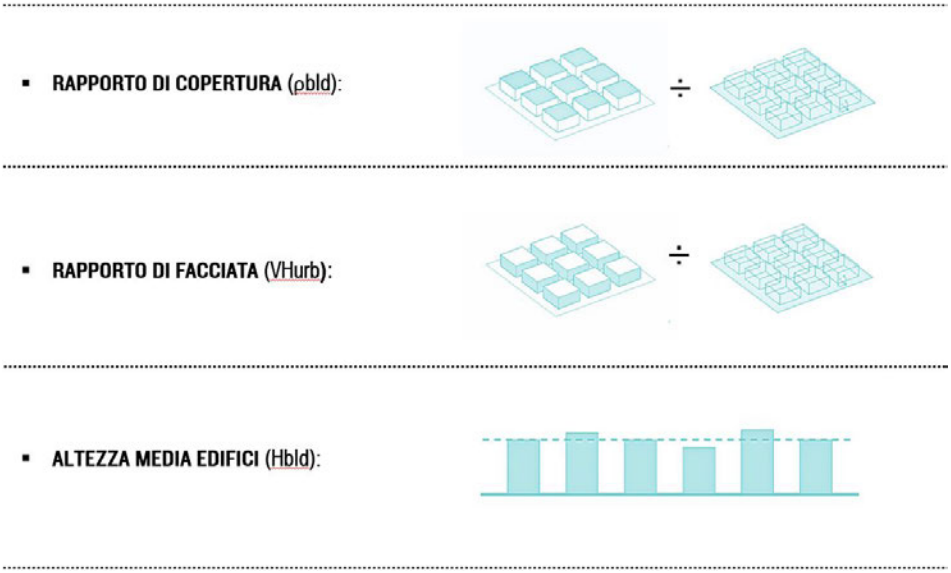


Figura 106 I parametri morfologici utilizzati nel calcolo di UWG.

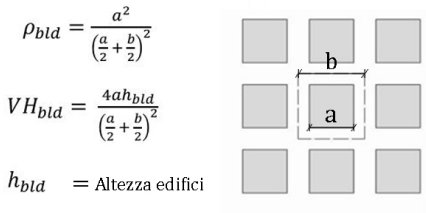


Figura 107 Parametrizzazione del TEB utilizzata nel modello UWG.

normalizzato in funzione dell'area costruita

RAPPORTO DI COPERTURA (Site coverage ratio - ρ_{urb}): Rapporto tra l'impronta dell'edificio e l'area di riferimento del sito

RAPPORTO DI FACCIATA (Façade to site ratio - VH_{urb}):): Rapporto tra le superficie verticale dell'edificio e l'area di riferimento del sito

La parametrizzazione del modello si basa su quella del TEB (Masson, 2000), per cui la porzione di città oggetto di analisi viene schematizzata come un insieme di canyon identici, in cui tutte le orientazioni sono possibili e si considerano presenti con la stessa probabilità (average-oriented canyon). Pertanto nel calcolo dell'isola di calore, il programma considera un modello semplificato e simmetrico della morfologia urbana, secondo la parametrizzazione geometrica rappresentata nella figura 107. Inoltre il modello assume che il canyon urbano possieda un orientamento medio (45° rispetto al Nord) e che la percentuale di superficie vetrata sia uniforme sulle diverse facciate.
Tale semplificazione, ovviamente, introduce errori nel bilancio radiativo e quindi anche nelle temperature. L'entità dell'errore dipende da vari fattori, tra i quali l'orientazione media del tessuto urbano considerato e il rapporto di copertura. Un'analisi dettagliata su questo argomento è stata recentemente fornita da Cantelli et al. (2015). Tuttavia il modello ha dimostrato un buon grado di affidabilità nella simulazione dell'andamento giornaliero dell'isola di calore, come ampiamente commentato nel capitolo 4.

Analizzando l'insieme delle equazioni risolte dal programma (vedi allegato 2) è possibile verificare che i parametri morfologici rientrano nel calcolo dei più importanti flussi energetici urbani, influendo in modo determinante sulla quantità di radiazione solare netta ricevuta dalle superfici. Tale valore è importante in quanto determina, in misura proporzionale, la quantità di calore trasferita per irraggiamento dalle pareti e dalla strada e, infine, la temperatura media del canyon urbano.
Gli stessi parametri morfologici assumono un ruolo importante nella determinazione della velocità d'interscambio dell'aria all'interno dello strato limite superiore e nell'interscambio radia-

tivo ad onda lunga tra le superfici urbane. Le analisi di sensibilità hanno infatti confermato la maggiore rilevanza dei parametri morfologici nella determinazione dell'isola di calore rispetto alle altre variabili urbane coinvolte nel calcolo (vedi allegato 3).

Il sistema di parametrizzazione morfologica proposto da Bueno per l'Urban Weather Generator presenta interessanti analogie con quello presentato da Pont e Haupt nella ricerca "Space Density and Urban Form" (Pont & Haupt, 2010). I ricercatori olandesi individuano una serie di parametri di densità che, nell'insieme e a varie scale, sono in grado di fornire informazioni sulla forma dell'edificato. In tal senso, i parametri di densità sono utilizzati per uno scopo sia *quantitativo* della consistenza fisica, sia *descrittivo* della morfologia urbana, rivelandosi particolarmente utili al fine dell'individuazione delle "prestazioni" di differenti tessuti urbani.

I tre parametri utilizzati nel calcolo di UWG assumono una valenza molto simile, in quanto oltre ad essere indici di densità, quantitativi, forniscono informazioni rispetto alla forma e alla tipologia edilizia presente nell'area urbana di riferimento.

Il parametro "rapporto di copertura" indica il grado di compattezza dell'edificato, in quanto misura la percentuale di occupazione del suolo da parte degli edifici. Un incremento del suo valore implica un incremento dell'impronta degli edifici nell'area di riferimento e, pertanto, una struttura più compatta.

Il parametro "rapporto di facciata" dà una misura della quantità di superfici verticali nell'area di riferimento, fornendo indicazioni sulla tipologia edilizia presente. Un tessuto con un alto "rapporto di facciata" è costituito da tipologie edilizie che ottimizzano la quantità di superficie verticale rispetto all'impronta a terra dell'edificio, organizzate su isolati di ridotte dimensioni che creano una rete stradale fitta.

Infine il parametro "altezza media" fornisce indicazioni sul rapporto di verticalità dei canyon e sullo sviluppo verticale dell'edificato.

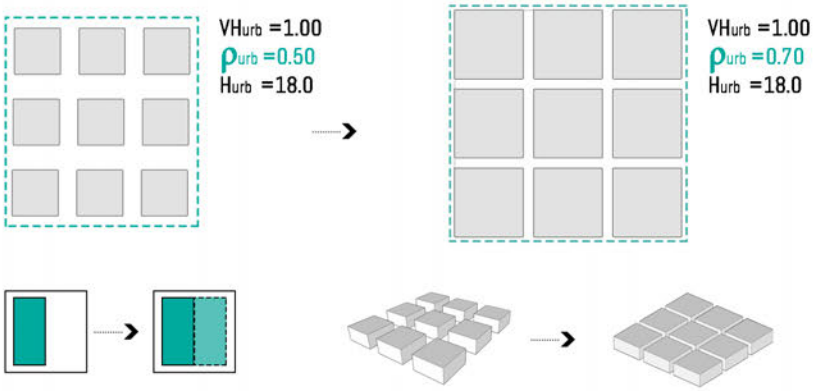
» DENSITÀ ORIZZONTALE E VERTICALE

I tre parametri descrivono pertanto la morfologia di tessuti urbani omogenei mediante indici di "densità di superfici". In particolare il rapporto di copertura è un indice della "densità orizzontale", mentre il rapporto di facciata e l'altezza media sono indici della "densità verticale" del tessuto (figura 108).

Il sistema di parametrizzazione dell'UWG risulta pertanto idoneo per l'individuazione della performance climatica di differenti tessuti urbani. Inoltre i tre parametri sono abbastanza comuni nella pratica professionale e nella pianificazione urbana e facilmente ottenibile tramite Sistemi Informativi Geografici per molte città, per cui si adattano perfettamente all'obiettivo ed alle ipotesi alla base dello studio.

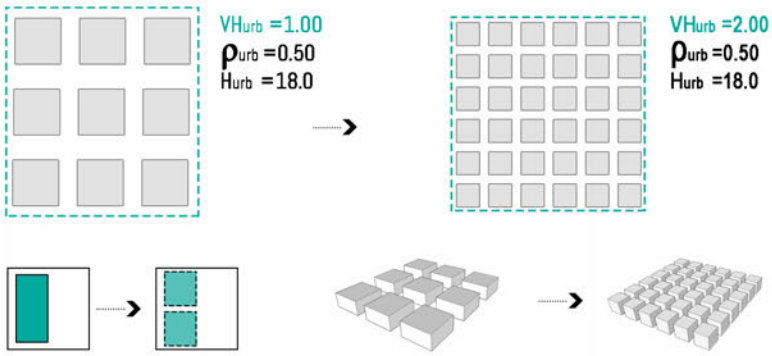
DENSITÀ ORIZZONTALE

RAPPORTO DI COPERTURA (ρbld):



DENSITÀ VERTICALE

RAPPORTO DI FACCIATA (VHurb):



ALTEZZA MEDIA EDIFICI (Hbld):

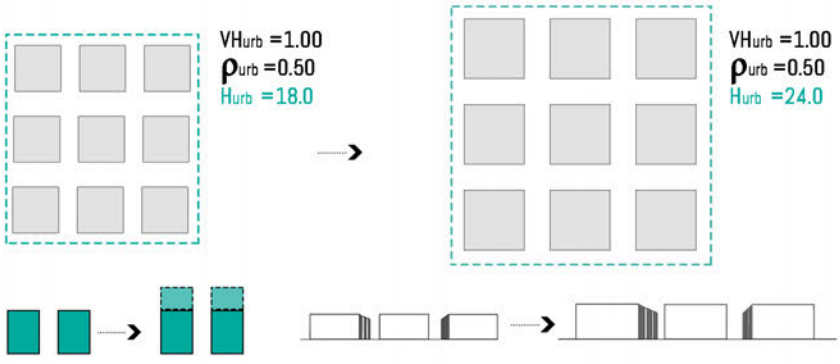


Figura 108 Rappresentazione grafica del significato morfologico dei tre parametri. Il rapporto di copertura è un indice di "densità orizzontale" mentre il rapporto di facciata e l'altezza media sono indici di "densità verticale".

5.2 Prestazione climatica dei tessuti edilizi in clima mediterraneo

5.2.I casi di studio e metodologia

Per l'analisi dell'isola di calore in funzione di differenti configurazioni urbane è stato utilizzato un campione di tessuti urbani omogenei presenti nella realtà di Roma e Barcellona, già oggetto di studio nella tesi di dottorato di Morganti (Morganti, 2013). La selezione dei tessuti ha teso ad individuare, nei due contesti urbani, un dominio il più possibile variegato e completo di morfologie urbane tipiche della città compatta europea.

Cronologicamente i tessuti edilizi selezionati abbracciano un periodo che parte dell'epoca medievale, per quanto riguarda i quartieri del centro storico, fino alle espansioni periferiche del novecento e quelle ai margini delle aree metropolitane dei nostri giorni. I tessuti sono stati individuati e prescelti sulla base di tre criteri (Morganti, 2013):

1. Omogeneità morfologica;

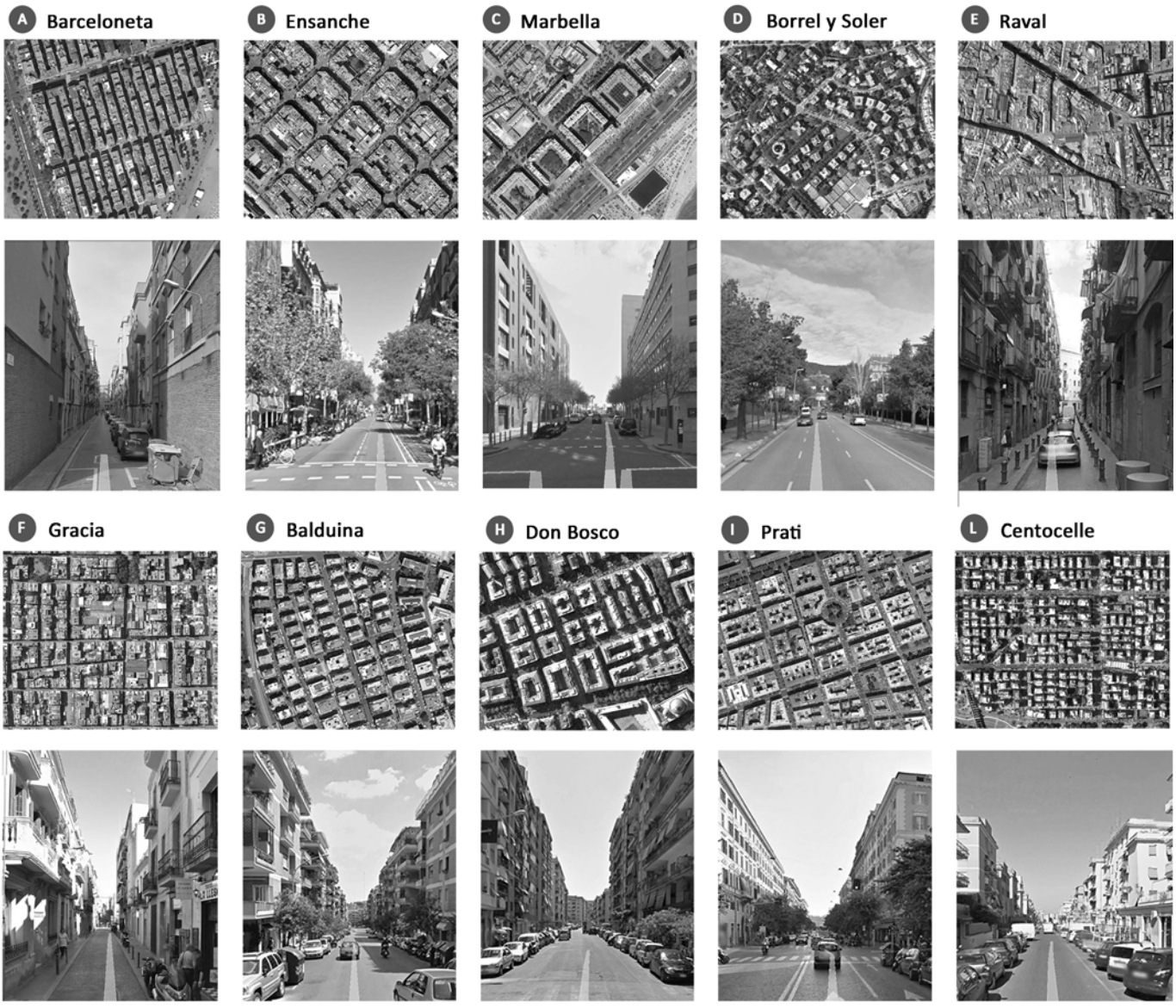
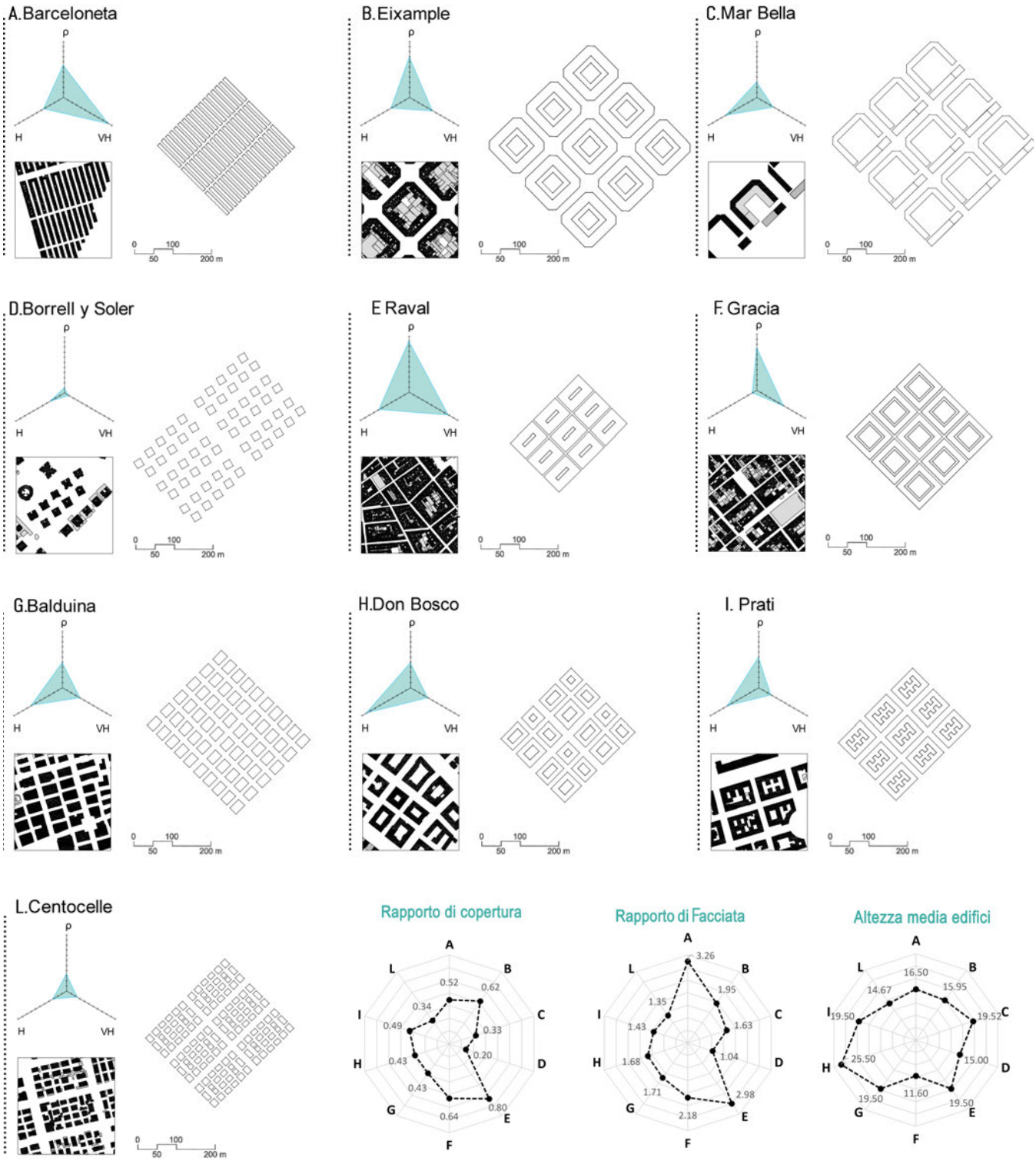


Figura 109 I tessuti urbani di Roma e Barcellona oggetto di studio



Parametri morfologici tessuti		H_{bld} Altezza media	ρ_{urb} Rapporto di copertura	VH_{urb} Rapporto di facciata
BARCELONETA	A	16.50	0.52	3.26
EIXAMPLE	B	15.95	0.62	1.95
MAR BELLA	C	19.52	0.33	1.63
BORREL I SOLER	D	15.00	0.20	1.04
RAVAL	E	19.50	0.80	2.98
GRACIA	F	11.60	0.64	2.18
BALDUINA	G	19.50	0.43	1.71
DON BOSCO	H	25.50	0.43	1.68
PRATI	I	19.50	0.49	1.43
CENTOCELLE	L	14.67	0.34	1.35

Figura 110 In alto: stralcio dei tessuti, modelli tipologici e valori assunti dai tre parametri morfologici per ciascun caso di studio

Figura 111 In basso a destra: intervallo di variazione di ciascun parametro morfologico nel campione di tessuti analizzati

Tabella 20 Valori dei tre parametri morfologici per ciascun caso di studio

2. Chiarezza, varietà e riconoscibilità morfologica, tipologica e costruttiva;

3. Tessuto urbano "tipico" della città europea compatta, con una certa diffusione in termini quantitativo-dimensionali;

I 10 casi di studio sono: Barceloneta, Ensanche, Marbella, Borrel y Soler, Raval e Gracia a Barcellona e Balduina, Don Bosco, Prati e Centocelle a Roma (figura 109).

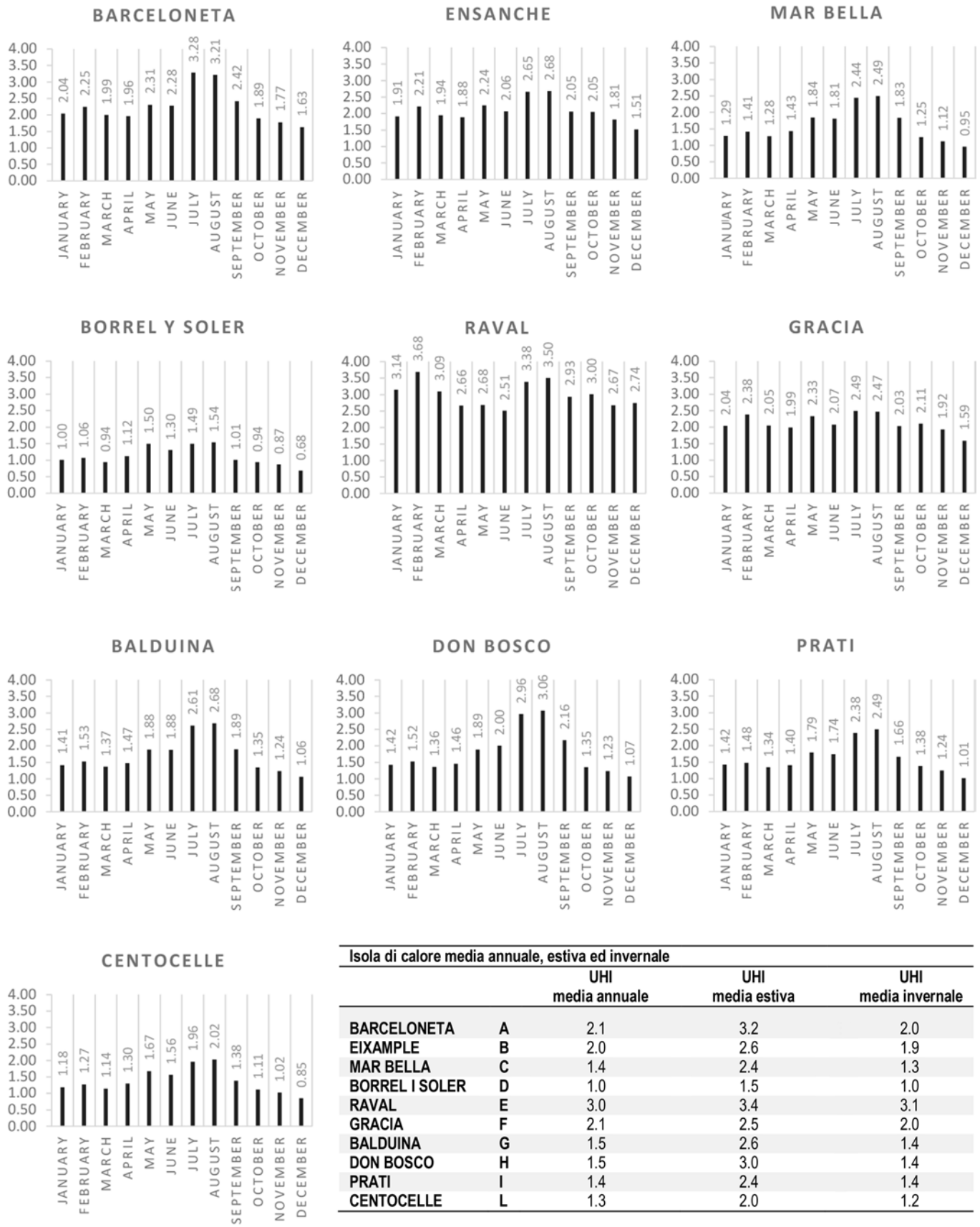
Per ciascun caso di studio sono stati calcolati i tre parametri morfologici utilizzati nel calcolo di UWG. Al fine di trovare una tendenza generale e non compromettere la comprensione comparativa dei risultati a causa di singolarità locali, nella modellazione dei casi di studio è stato adottato un approccio tipologico. Per ciascun tessuto reale è stato quindi creato un modello tipologico teorico mediante un processo di *normalizzazione e replicazione* dell'isolato tipo (Morganti, 2013; Zhang et al., 2012). Secondo tale approccio, l'isolato tipico di ciascun tessuto viene regolarizzato e ripetuto secondo una maglia urbana regolare e simile a quella del caso reale (figura 110), allo scopo di eliminare le singolarità esistenti ed evidenziarne le caratteristiche formali predominanti. Su tali modelli digitali "tipologici" sono stati calcolati i parametri morfologici richiesti dal programma (tabella 20).

La performance climatica alla scala del tessuto edilizio è stata studiata attraverso modellazioni con Urban Weather Generator. La metodologia di analisi si basa su un approccio parametrico e comparativo, al fine di confrontare le prestazioni climatiche del campione di casi di studio incentrandosi esclusivamente sulle caratteristiche morfologiche.

Per ciascun caso di studio è stata condotta una simulazione dell'isola di calore. Nello svolgi-

Parametri di simulazione (UWG)	
Urban Parameters	
latitude	41.47°
longitude	12.34°
city radius	6500m
District Parameters	
Average building height	CASI DI STUDIO
Horizontal building density	CASI DI STUDIO
Vertical to horizontal urban area ratio	CASI DI STUDIO
Tree coverage	6%
Non Building Latent anthropogenic heat	0
Non Building Sensible anthropogenic heat	8 W/mq
Canyon	
wall albedo	0.25
Wall emissivity	0.92
wall construction	Muratura 0.03m
roof albedo	0.25
roof emissivity	0.92
roof construction	Solaio Laterocementizio 0.38m
road albedo	0.08
Building	
Glazing ratio	0.3
Internal heat gain	5.8 W/mq notte - 2.0 W/mq giorno
infiltration/ventilation	0.5 ac/h
Daytime cooling sistem set poin	26 °C
Nightime cooling system set point	26 °C
Daytime heating system set poin	20 °C
Nightime heating system set point	20 °C
Heat released to canyon	0.5

Tabella 21 Parametri costanti utilizzati per le simulazioni dell'isola di calore con UWG



Isola di calore media annuale, estiva ed invernale				
		UHI media annuale	UHI media estiva	UHI media invernale
BARCELONETA	A	2.1	3.2	2.0
EIXAMPLE	B	2.0	2.6	1.9
MAR BELLA	C	1.4	2.4	1.3
BORREL I SOLER	D	1.0	1.5	1.0
RAVAL	E	3.0	3.4	3.1
GRACIA	F	2.1	2.5	2.0
BALDUINA	G	1.5	2.6	1.4
DON BOSCO	H	1.5	3.0	1.4
PRATI	I	1.4	2.4	1.4
CENTOCELLE	L	1.3	2.0	1.2

Figura 112 Isola di calore media mensile calcolata per ciascun caso di studio

Tabella 22 Isola di calore media annuale, estiva ed invernale per ciascun caso di studio

mento delle simulazioni tutti i parametri non morfologici sono stati mantenuti costanti e pari ad un valore medio urbano, mentre i parametri morfologici sono stati fatti variare a seconda delle diverse trame urbane oggetto di studio. I parametri costanti utilizzati per la simulazione sono riportati nella tabella 21. I risultati sono pertanto da intendersi come "prestazioni teoriche" delle morfologie urbane, a parità di condizioni al contorno. I dati climatici di input sia per i casi di studio di Roma che di Barcellona sono quelli di Roma Ciampino[1].

5.2.2. Discussione dei risultati

Lo studio conferma l'importanza della morfologia urbana sull'andamento del fenomeno dell'isola di calore in clima mediterraneo.

Le temperature calcolate per i dieci casi di studio mostrano una differenza significativa di intensità media mensile dell'isola di calore, sia in inverno che in estate (figura 112). La differenza di intensità dell'isola di calore media mensile tra la morfologia urbana più favorevole e la più sfavorevole arriva fino a 2,6 °C a febbraio e 2.0 °C a agosto.

Sia in inverno che in estate, l'intensità più alta si produce nel tessuto del Raval, con un aumento medio della temperatura di + 3,5 °C in agosto e + 3,1 °C a gennaio, rispetto alle temperature rurali.
Raval è il caso di studio con il valore più elevato di "rapporto di copertura" (figura 111) e presenta un valore molto alto anche per il "rapporto di facciata", rispettivamente 0,8 il primo e 2,98 il secondo. Appare inoltre evidente la differenza tra le temperature di Borrell y Soler e tutti gli altri casi di studio; Borrel y Soler, d'altro canto, è un caso di studio con bassissima densità dell'edificato, formato da tipologie edilizie isolate e disperse.

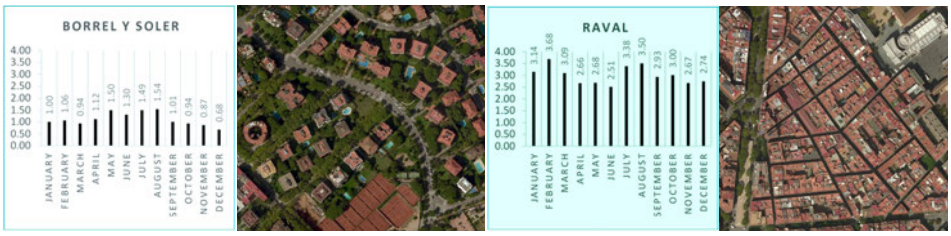


Figura 113 Borrel y Soler e Raval; comparazione tra i due casi di studio estremi in quanto a densità e isola di calore indotta

Analizzando il complesso dei risultati si nota che le prestazioni microclimatiche dei diversi tessuti sono generalmente variabili nel corso dell'anno, con l'eccezione di pochi casi che mantengono una intensità simile sia in estate che in inverno.

La figura 115 confronta le intensità massime, minime e medie giornaliera di isola di calore nel mese di agosto e gennaio per ogni tessuto urbano analizzato.

A gennaio l'isola di calore media maggiore si verifica nei tessuti con alto rapporto di copertura, come Raval (+3,68 °C), Gracia (+2.38 °C), Barceloneta (+2,25 °C) e Ensanche (+2.21 °C), che hanno rispettivamente un valore del rapporto di copertura pari a 0,8, 0,64, 0,52 e 0,62.

Nel mese di agosto, invece, si presentano elevate intensità dell'isola di calore anche in tessuti urbani con un rapporto di copertura minore. Tra tutti spiccano due casi, Barceloneta e Don Bosco, che presentano un'isola di calore molto più forte in estate rispetto all'inverno inverno. I casi in questione presentano però i massimi valori del rapporto di facciata (Barceloneta VH_{urb}=3.26,) e dell'altezza media (Don Bosco, H_{bld}=25.5).

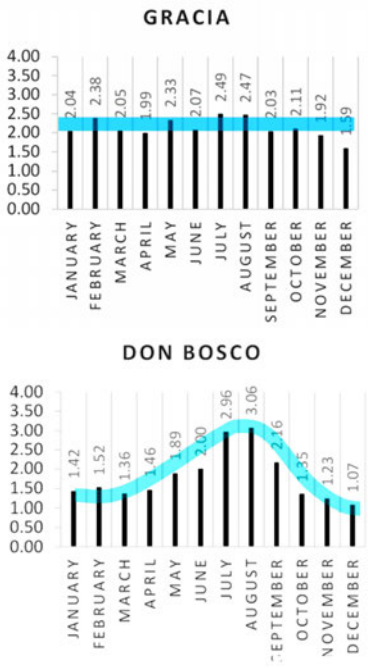


Figura 114 Esempio di tessuto con UHI costante (Gracia) o variabile (Don Bosco) tra estate ed inverno

1 I dati climatici di Roma Ciampino fanno riferimento alla media delle osservazioni per il periodo 1951-1970 (formato dati IGDG). Per un approfondimento della fonte dei dati meteorologici consultare https://energyplus.net/weather/sources#IGDG

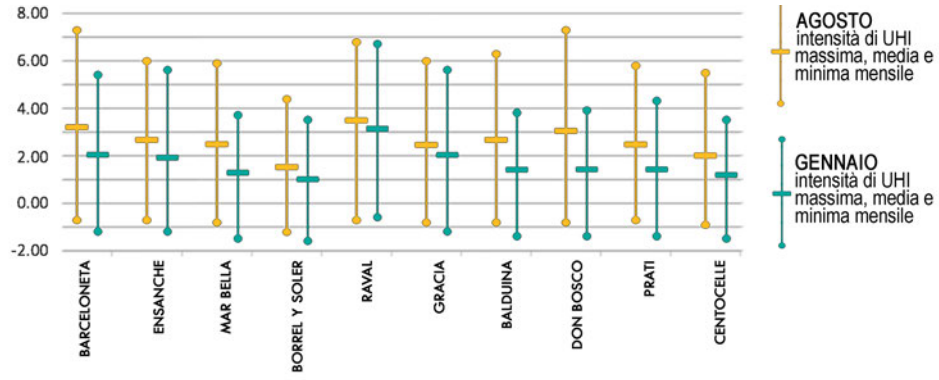


Figura 115 Isola di calore media, massima e minima ad agosto e gennaio per ciascun caso di studio

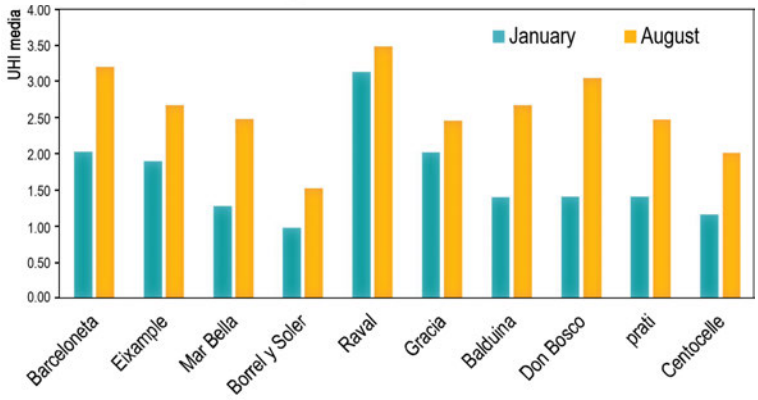


Figura 116 Comparazione tra l'intensità media di isola di calore invernale (gennaio) ed estiva (agosto) per ciascun caso di studio

Isola di calore massima e media a gennaio ed agosto

		UHI MAX gennaio	UHI media gennaio	UHI MAX agosto	UHI media agosto
BARCELONETA	**A**	5.4	2.0	7.3	3.2
EIXAMPLE	**B**	5.6	1.9	6.0	2.7
MAR BELLA	**C**	3.7	1.3	5.9	2.5
BORREL I SOLER	**D**	3.5	1.0	4.4	1.5
RAVAL	**E**	6.7	3.1	6.8	3.5
GRACIA	**F**	5.6	2.0	6.0	2.5
BALDUINA	**G**	3.8	1.4	6.3	2.7
DON BOSCO	**H**	3.9	1.4	7.3	3.1
PRATI	**I**	4.3	1.4	5.8	2.5
CENTOCELLE	**L**	3.5	1.2	5.5	2.0

Tabella 23 Intensità dell'isola di calore media e massima in inverno (gennaio) ed agosto per ciascuna morfologia urbana

Sempre dalla figura 115 si deduce l'intervallo di variazione dell'intensità dell'isola di calore media e massima nei diversi tessuti della città mediterranea: l'intensità media mensile varia da +3,5 °C in estate nel Raval a +1°C a febbraio in Borrel y Soler, mentre l'intensità massima giornaliera varia da + 7.3 °C sia a Barceloneta che a Don Bosco in estate a + 3,5 °C in inverno a Borrel y Soler. Tali valori sono in linea con i risultati dei precedenti lavori sull'isola di calore in clima Mediterraneo (Mat Santamouris, 2007).

ISOLA DI CALORE E PARAMETRI MORFOLOGICI:

I risultati presentati suggeriscono che esistano relazioni tra l'intensità dell'isola di calore ed i singoli parametri morfologici che caratterizzano i tessuti.

Tali relazioni sono state esplicitate nei grafici in figura 117, in cui l'intensità dell'isola di calore media annuale, estiva ed invernale è stata messa in relazione con i due parametri morfologici principali: il rapporto di copertura e il rapporto di facciata.

La relazione tra il rapporto di copertura e l'intensità dell'isola di calore è lineare e piuttosto accurata sia nella media annuale che invernale (r^2 = 0,88 nella media annua e r^2 = 0,86 nella media invernale). Il parametro invece non risulta ugualmente ben correlato all'intensità di isola di calore estiva, per la quale si rileva una bassa precisione della relazione lineare (r^2 = 0,57).

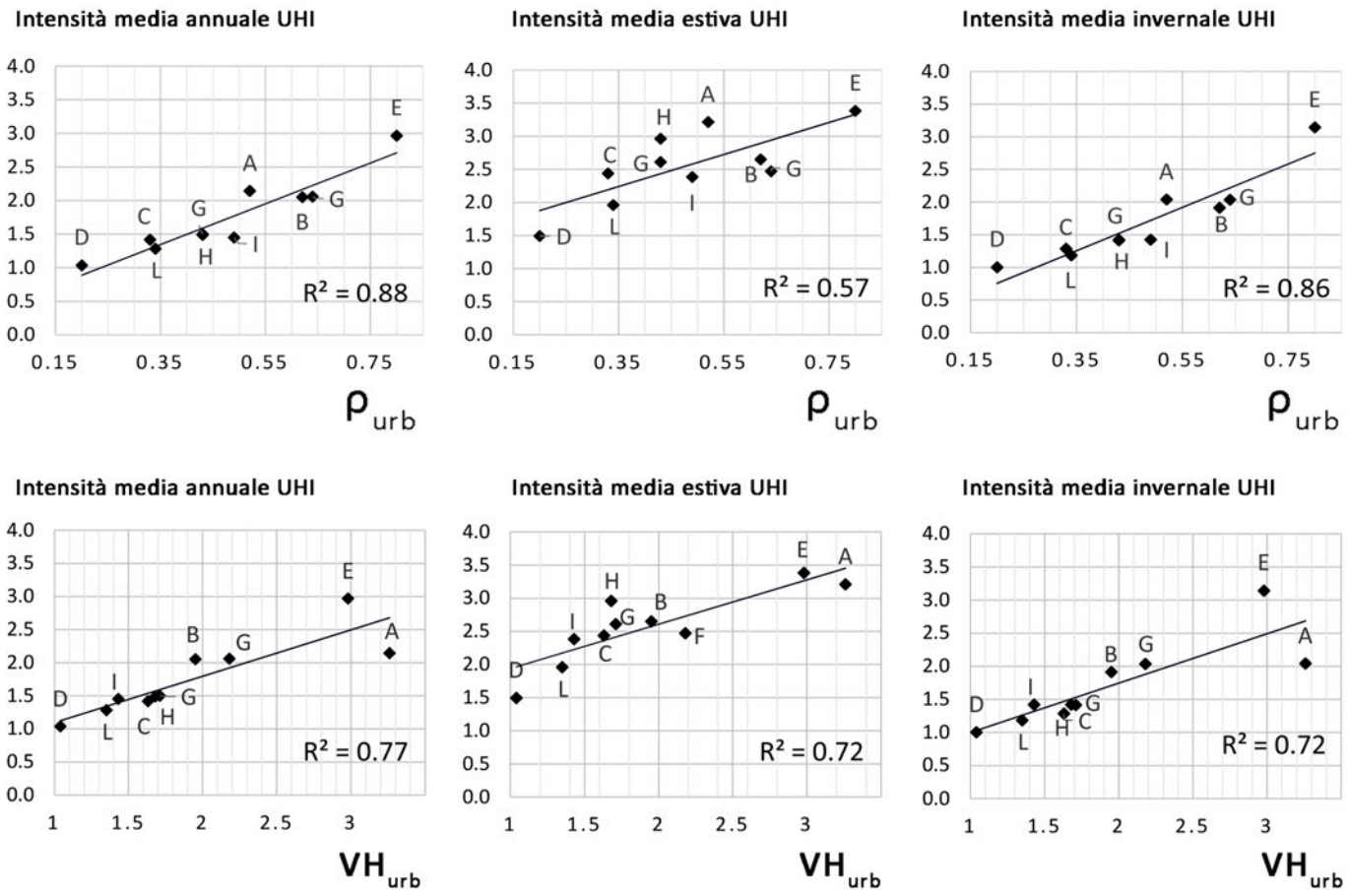


Figura 117 Correlazione tra l'isola di calore media dei casi di studio ed parametri morfologici (rapporto di copertura e raporto di facciata)

A. Barceloneta
B. Ensanche
C. Mar Bella
D. Borrel y Soler
E. Raval
F. Gracia
G. Balduina
H. Don Bosco
I. Prati
L. Centocelle

Rispetto alla performance estiva, in effetti, il parametro rapporto di facciata fornisce risultati più accurati, mostrando una relazione con l'intensità dell'isola di calore estiva piuttosto affidabile ($r^2 = 0,72$).

Le relazioni pertanto indicano una rilevanza differente degli indici di densità a seconda della stagione considerata.

Il parametro che risulta più determinante è il rapporto di copertura, che è ben correlato con l'intensità dell'isola di calore media annuale e invernale.

Il suo valore, compreso tra 0 e 1, è dato dal rapporto tra la superficie costruita e la superficie urbana di riferimento e risulta inversamente proporzionale allo sky view factor medio della rete stradale. Un aumento del valore di questo parametro implica pertanto una maggiore occupazione dello spazio da parte degli edifici e quindi un maggior grado di ostruzione della volta celeste ed un conseguente rallentamento del potenziale di raffreddamento notturno. Nei tessuti con alto valore del rapporto di copertura l'isola di calore risulta infatti essere forte durante tutto l'anno.

Il divario di temperatura tra il caso con maggior rapporto di copertura (Raval) e gli altri tessuti urbani è particolarmente evidente nei mesi invernali. Probabilmente ciò accade perché durante la stagione fredda, una importante fonte di calore urbano è il quello prodotto dagli impianti di riscaldamento degli edifici stessi, oltre alla radiazione solare. Pertanto tanto più compatto risulta il tessuto edilizio, tanto meno il calore prodotto all'interno del canyon dagli edifici si disperde verso il cielo.

In estate, invece, l'assorbimento della radiazione solare assume molta più importanza nella determinazione dell'isola di calore. In effetti, le trame urbane più sfavorevoli, rispetto alle intensità di isola di calore estiva, sono Raval e Barceloneta, vale a dire quelle con i valori più alti del rapporto di facciata, rispettivamente 2,98 Raval e 3,26 Barceloneta.

Le aree urbane che presentano un alto valore del rapporto di facciata, sono strutture dense e con una rete stradale fitta, composte da una tipologia edilizia che ottimizza la superficie di involucro esposta all'ambiente esterno rispetto al volume. Con queste caratteristiche morfologiche, l'assorbimento della radiazione solare sulle facciate viene massimizzata. In estate, quindi, tale conformazione favorisce il surriscaldamento delle superfici e, di conseguenza, dell'aria, soprattutto di notte, perché il processo di raffreddamento è più lungo rispetto ad un tessuto urbano che ha immagazzinato meno calore durante il giorno.

Un altro caso di studio che presenta una forte intensità di isola di calore durante i mesi estivi rispetto a quelli invernali è Don Bosco. In questo tessuto, nel mese di agosto, l'intensità media mensile di isola di calore è pari a +3 °C, con una intensità massima giornaliera di +7,3 °C. Don Bosco presenta temperature estive molto più elevate rispetto a Balduina e Prati, altri due casi di studio con valori molto simili del rapporto di facciata e del rapporto di copertura. Al tempo stesso, però, Don Bosco è il caso di studio con il valore più grande dell'altezza media dell'edificato.
Ciò significa che, a parità degli altri due parametri, la presenza di edifici mediamente più alti comporta una riduzione significativa dei fattori di vista del cielo ed un incremento della quantità di superficie verticale di interscambio energetico e immagazzinamento del calore.
La relazione tra l'altezza media dell'edificato e l'isola di calore non presenta però una tendenza chiara come nel caso degli altri due parametri. Il parametro altezza media, da solo, non fornisce un'indicazione dell'isola di calore media prevista nel tessuto edilizio, ma può essere considerato un parametro di secondo ordine; al suo aumentare cresce anche l'intensità di isola di calore, ma partendo da un valore di riferimento che fondamentalmente viene determinato dagli altri due parametri.

Alla luce dei risultati, sembra esistere una gerarchia tra i tre parametri morfologici e l'andamento dell'isola di calore: alcuni parametri, da soli, forniscono una "previsione" già affidabile della tendenza generale, mentre altri parametri, migliorano l'accuratezza del risultato aggiungendo ulteriori informazioni.

Per capire il significato di questi risultati conviene analizzare il comportamento di due casi di studio che presentano valori differenti del rapporto di copertura e del rapporto di facciata. I casi di studio sono Barceloneta (ρ_{urb} = 0.52 e VH_{urb} =3.26) e Ensanche (ρ_{urb} = 0.62 e VH_{urb} =1.95). Barceloneta è un tessuto urbano denso, composto di abitazioni in linea dal corpo stretto e lungo, disposte parallelamente in una fitta rete stradale; la presenza di una tipologia di edificio con uno sviluppo superficiale molto superiore rispetto alla tipologia a corte del tessuto di En-

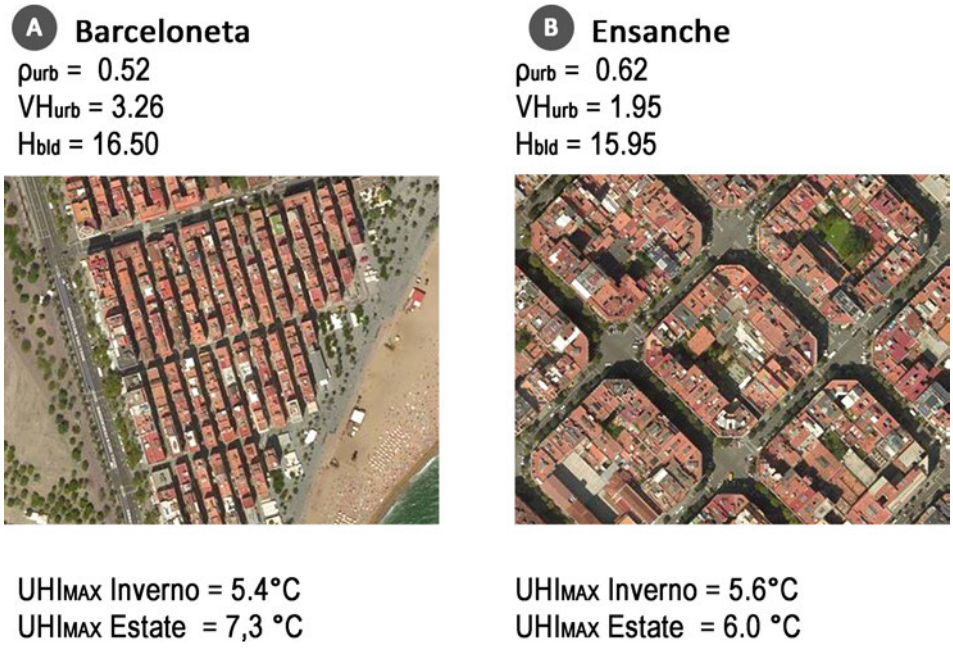


Figura 118 Performance climatica delle morfologie di Barceloneta e Ensanche

sanche determina un valore del rapporto di facciata molto più elevato. Per quanto riguarda la densità orizzontale i due tessuti presentano un valore simile, ma leggermente superiore nella morfologia dell'Ensanche rispetto a Barceloneta. Ciò determina un'intensità di isola di calore invernale leggermente superiore a Ensanche rispetto a Barceloneta (UHI max rispettivamente 5,4° a Barceloneta e 5.6° a Ensanche), in virtù della somiglianza in termini di "compattezza". Al contrario, in estate la performance climatica risulta abbastanza differente, con un'intensità di isola di calore media massima decisamente maggiore nella morfologia di Barceloneta rispetto a quella di Prati (rispettivamente UHI max 7.3° a Barceloneta e 6.0° a Ensanche).

5.3 Parametri morfologici e isola di calore: uno strumento interpretativo

L'insieme delle simulazioni condotte sui casi di studio ha confermato la rilevanza delle caratteristiche morfologiche urbane nella formazione del microclima locale, con una gerarchia di importanza dei tre parametri morfologici considerati a seconda della stagione analizzata.

Il parametro più significativo e indicativo del comportamento climatico medio risulta essere il rapporto di copertura, mentre gli altri due parametri assumono più importanza nei risultati per l'isola di calore estiva.

Alla luce di questi primi risultati è stato condotto un ulteriore set di simulazioni con l'obiettivo di individuare una relazione analitica tra l'isola di calore estiva ed invernale e ciascuno dei tre parametri morfologici. L'ipotesi alla base della costruzione del set di dati è che l'isola di calore assuma un andamento che dipende dalla combinazione pesata dei tre parametri morfologici.

5.3.I. Metodologia

Il set di simulazioni condotte è finalizzato alla costruzione di strumenti grafici e relazioni analitiche utili alla comprensione della prestazione climatica dei tessuti urbani in funzione dei parametri di densità che ne descrivono la consistenza e la morfologia.

A tal fine sono stati eseguite una serie di simulazioni dell'isola di calore, con l'obiettivo di individuare l'incidenza di ciascun parametro morfologico rispetto all'intensità del fenomeno estivo ed invernale.

Le simulazioni sono state eseguite con UWG, adottando lo stesso approccio del paragrafo precedente, vale a dire mantenendo costanti tutti i parametri eccetto quelli relativi alle caratteristiche morfologiche dell'area urbana.

L'intervallo di variazione dei parametri morfologici è definito dai valori minimi e massimi riscontrati nel campione di tessuti urbani precedentemente analizzati. In tal modo è stato individuato

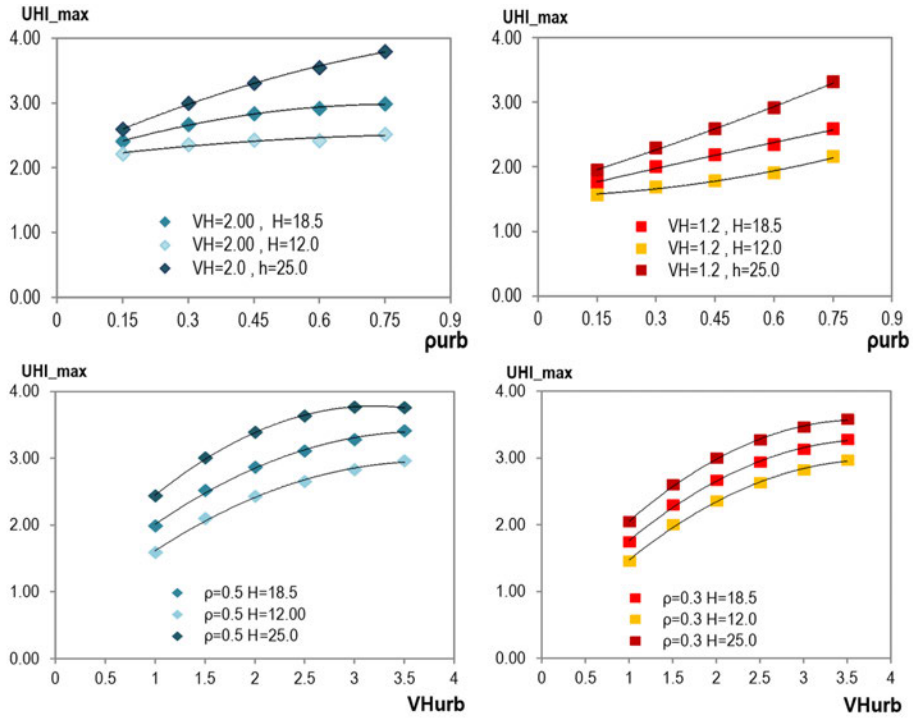


Figura 119 Variazione dell'isola di calore media massima in funzione di ρurb e VHurb, per diversi valori degli altri due parametri

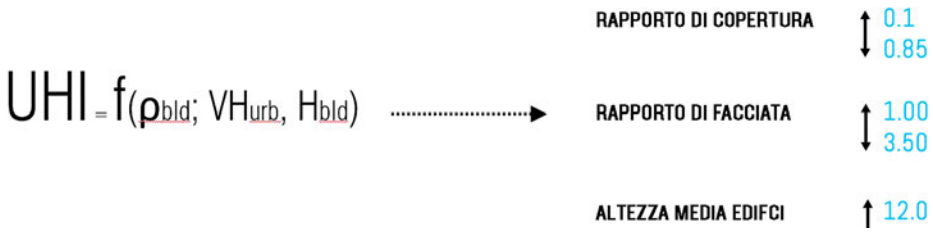
un intervallo di variabilità degli indici di densità che rappresenta un ampio dominio delle possibili configurazioni dell'edificato presenti nel contesto urbano della città compatta mediterranea.

Occorre ricordare che i tre parametri morfologici sono indipendenti e contribuiscono a determinare nel complesso l'isola di calore associata ad una determinata morfologia urbana. All'incremento del valore di uno dei tre parametri corrisponde una variazione dell'isola di calore, ma l'entità di questa variazione dipende dal valore assunto dagli altri due parametri (figura 119). Per studiare la variabilità del fenomeno in funzione dei parametri morfologici occorre pertanto analizzare i risultati dell'intensità dell'isola di calore corrispondente a un campione sufficientemente ampio delle possibili combinazioni dei tre parametri.

A tal fine sono stati individuati 3 intervalli di variazione per ciascun parametro (tabella 24) ed è stata costruita una matrice di casi di studio "teorici" corrispondenti a 102 combinazioni possibili dei tre parametri. Per ciascuna combinazione è stata quindi eseguita la simulazione dell'isola di calore e alla totalità dei risultati è stato applicato un modello di regressione lineare multi-variabile, che evidenzia il peso relativo assunto da ciascun parametro rispetto all'intensità dell'isola di calore estiva ed invernale.

Valori dei parametri morfologici nelle simulazioni		
ρ_{urb}	VH_{urb}	H_{bld}
0.10	1.00	12
0.25	1.50	18
0.40	2.00	24
0.55	2.50	
0.70	3.00	
0.85	3.50	

Tabella 24 Valori dei parametri morfologici per la costruzione della matrice delle simulazioni



5.3.2. Interpretazione analitica dei risultati

L'analisi dei risultati per il nuovo set di simulazioni dell'isola di calore ha permesso di individuare leggi di variazione dell'UHI estiva ed invernale in funzione delle 3 variabili morfologiche indipendenti: ρurb, VHurb e Hbld. Le relazioni sono state esplicitate applicando un modello di regressione lineare multi variabile all'insieme dei risultati.

La regressione lineare è una tecnica matematica utilizzata per la stima del valore atteso di una variabile dipendente rispetto ai valori assunti da una o più variabili indipendenti. Tale metodo di analisi permette di individuare i coefficienti angolari β della retta che meglio relaziona il valore della variabile dipendente Yi in funzione delle variabili indipendenti Xi:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3$$

In questo studio la variabile dipendente è l'isola di calore media estiva o invernale, mentre le variabili indipendenti sono i parametri morfologici: ρurb, VHurbe e Hbld.
Dato che le 3 variabili morfologiche assumono valori e unità di misura differenti, occorre preliminarmente procedere ad una standardizzazione dei loro valori, per trasformarle in valori e unità di misura comparabili. La standardizzazione consiste nel trasformare una variabile aleatoria, distribuita secondo una media ed una varianza, in una variabile con distribuzione "standard", ovvero di media pari a zero e varianza (e deviazione standard Sx) pari a 1. Pertanto le variabili morfologiche indipendenti, ciascuna secondo il proprio intervallo di variazione, sono state standardizzate come segue:

$$\text{variabile standardizzata} = Zi = \frac{x_i - \overline{x_i}}{Sx}$$

Variabili standardizzate						
	ρ_{urb}	Z_ρ	VH_{urb}	Z_{VH}	H_{bld}	Z_H
	0.10	-1.34	1.0	-1.34	12	-1.00
	0.25	-0.80	1.5	-0.80	18	0.00
	0.40	-0.27	2.0	-0.27	24	1.00
	0.55	0.27	2.5	0.27		
	0.70	0.80	3.0	0.80		
	0.85	1.34	3.5	1.34		
Media	0.475		2.25		18	
Dev St	0.280624		0.935414		6	

Tabella 25 Valori delle variabili morfologiche standardizzate

Risultati regressione UHI invernale	
Statistics	
Multiple R	0.900042
R Square	0.810075
Adjusted R Square	0.804261
Standard Error	0.442424
Observations	102

	Coefficients	Standard error
Intercept	-0.0831	0.044137
Z_ρ - Variable 1	0.976401	0.050237
Z_{VH} - Variable 2	0.303997	0.047988
Z_H - Variable 3	0.107877	0.05499

Figura 120 Statistiche e risultati della regressione lineare applicata ai risultati dell'isola di calore invernale

Risultati regressione UHI estiva	
Statistics	
Multiple R	0.937318063
R Square	0.87856515
Adjusted R Square	0.874847757
Standard Error	0.353768629
Observations	102

	Coefficients	Standard error
Intercept	0.067731862	0.035292682
Z_ρ - Variable 1	0.428299052	0.04017049
Z_{VH} - Variable 2	0.815312124	0.038371595
Z_H - Variable 3	0.579102972	0.043970756

Figura 121 Statistiche e risultati della regressione lineare applicata ai risultati dell'isola di calore estiva

Dove Xi è il valore della variabile, $\overline{X_i}$ è la media della variabile e Sx la deviazione standard dei valori. I risultati della standardizzazione sono riportati nella tabella 25. Lo stesso procedimento è stato applicato anche ai valori dell'isola di calore.

Applicando dunque il modello di regressione lineare al complesso dei risultati (102 valori di UHI) è stata individuata la relazione tra i tre parametri morfologici e l'isola di calore estiva ed invernale:

$$UHI_estiva = 0.068 + 0.43\ Z_\rho + 0.82\ Z_{VH} + 0.58\ Z_H \quad (r^2=0.878)$$

$$UHI_invernale = -0.083 + 0.98\ Z_\rho + 0.30\ Z_{VH} + 0.10\ Z_H \quad (r^2=0.810)$$

Con Variabile Z_ρ : valori normalizzati del rapporto di copertura

Varibile Z_{VH} : valori normalizzati del rapporto di facciata.

Variabile Z_H: valori normalizzati dell'altezza media

Le equazioni presentate sono utili a comprendere il peso di ciascun parametro ed il loro differente ruolo a seconda della stagione di riferimento.

Se analizziamo la relazione dedotta per l'isola di calore invernale, si individua chiaramente la maggiore influenza del parametro rapporto di copertura rispetto agli altri due indici. Il parametro rapporto di copertura risulta infatti correlato con un coefficiente pari a 0.98, contro lo 0.3 del rapporto di facciata e lo 0.1 dell'altezza media. Nella situazione invernale, pertanto, un incremento del rapporto di copertura determina un incremento significativo dell'isola di calore, mentre le variazioni degli altri parametri risultano meno indicative. In particolare l'altezza media dell'edificato assume una rilevanza del tutto secondaria. L'isola di calore invernale **risulta pertanto dtrettamente correlata alla "densità orizzontale" del tessuto.**

Differente è il caso estivo, in cui i tre parametri sono correlati all'isola di calore rispettivamente con un coefficiente pari a 0.43 per il rapporto di copertura, 0.82 per il rapporto di facciata e 0.58 per l'altezza media. Il parametro più determinante rispetto all'isola di calore estiva risulta il rapporto di facciata, con un'incidenza doppia rispetto al rapporto di copertura. In questo caso anche l'altezza media assume una rilevanza significativa, mentre il rapporto di copertura risulta il parametro meno influente. Pertanto la relazione analitica conferma una maggiore **dipendenza dell'isola di calore estiva rispetto alla "densità verticale" del tessuto, piuttosto** che a quella orizzontale. Tali relazioni confermano e quantificano le considerazioni effettuate sulla base dei risultati per i casi di studio.

5.3.3. Interpretazione grafica dei risultati

L'interpretazione grafica dei risultati consiste nella rappresentazione dell'andamento dell'isola di calore su grafici tridimensionali e bidimensionali, che permettono di effettuare valutazioni qualitative e quantitative della performance climatica espressa dalle diverse morfologie urbane.

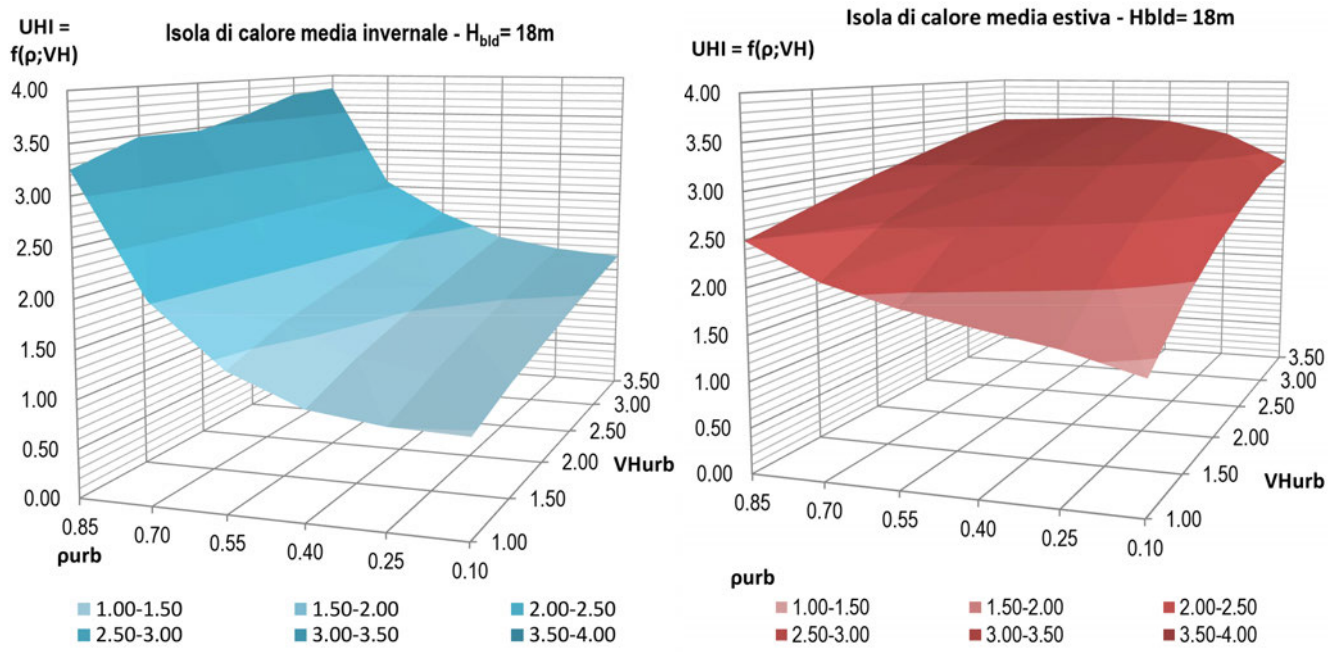
Nei grafici tridimensionali l'andamento dell'isola di calore è rappresentato come una superficie in funzione dei due parametri morfologici principali, VHurb e ρurb (figura 122).

Per ciascuna altezza di riferimento (h=12, 18 e 24), è stato costruito un grafico che rappresenta la variazione dell'isola di calore estiva ed invernale per ciascuna coppia di valori di VHurb e ρurb. In tal modo è più intuitivo valutare come la "densità orizzontale" e la "densità verticale" influiscano in maniera diversa sull'andamento del fenomeno durante l'anno.

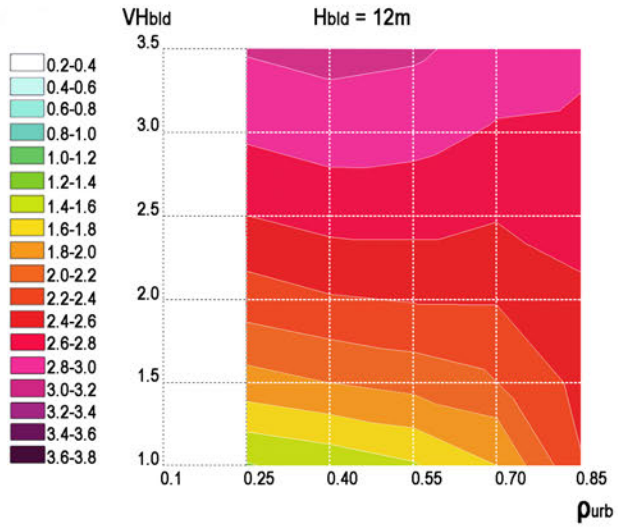
Dai grafici tridimensionali si nota infatti che le due superfici assumono un andamento molto differente in estate ed in inverno.

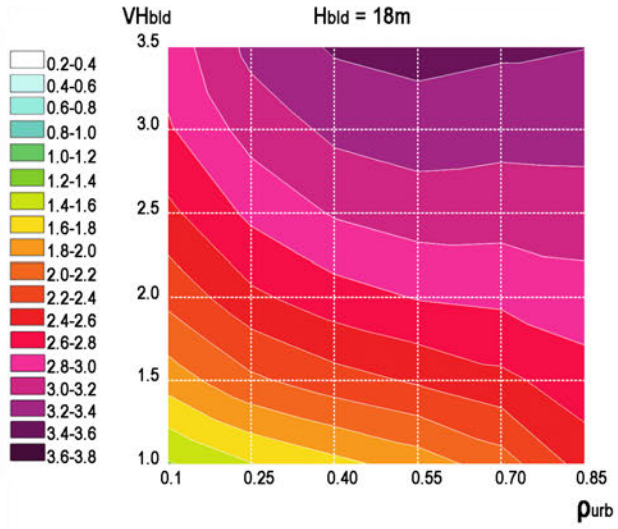
Nel grafico invernale è evidente l'incremento dell'isola di calore all'aumentare del parametro rapporto di copertura, ovvero all'aumentare della "densità orizzontale" del tessuto urbano. Al contrario, in quello estivo si nota come l'isola di calore aumenti in funzione sia del rapporto di copertura e che del rapporto di facciata. In particolare si nota che i valori maggiori dell'isola di calore si hanno per i massimi valori del rapporto di facciata, confermando la rilevanza della "densità verticale" del tessuto nella determinazione dell'isola di calore estiva.

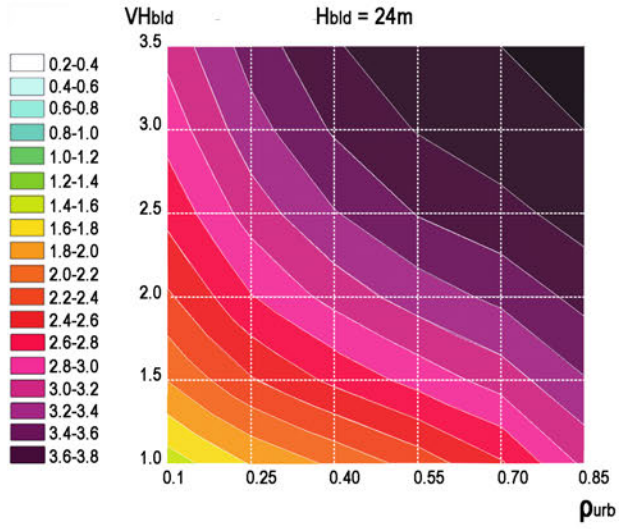
Figura 122 Rappresentazione grafica tridimensionale dei risultati: le superfici rappresentano l'andamento dell'isola di calore in funzione dei valori di VHurb e purb , con Hbld costante (18m)



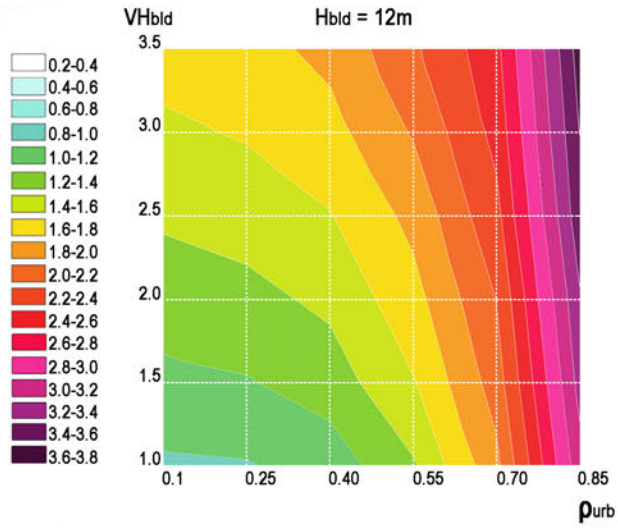
ISOLA DI CALORE ESTIVA

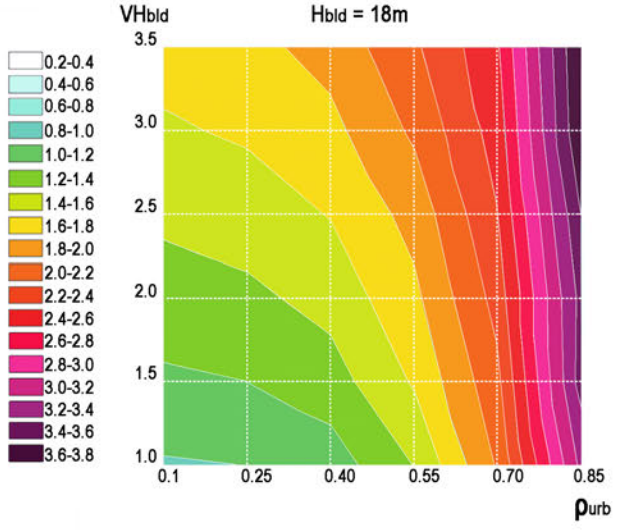






ISOLA DI CALORE INVERNALE





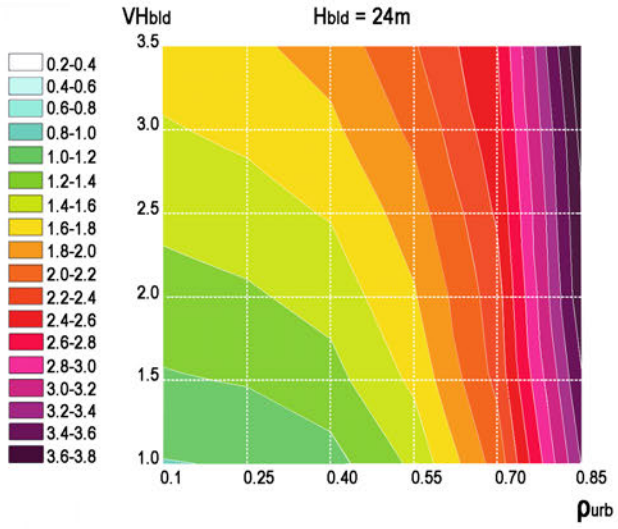


Figura 123 Nella pagina accanto: grafici che rappresentano le isoterme dell'isola di calore in funzione dei parametri VHurb e purb, per altezze pari a 12, 18 e 24m

Per una più agevole lettura dei risultati le superfici sono state proiettate sul piano orizzontale, in modo da poter leggere il gradiente dell'intensità dell'isola di calore attraverso fasce di colore, che indicano aree "isoterme". Nella figura 123 si riportano i grafici corrispondenti alle tre altezze di riferimento (12, 18 e 24m).

In inverno, per tutte le altezze di riferimento, l'isola di calore varia in maniera sostanziale a partire da valori del parametro rapporto di copertura superiori a circa 0.55. Superato tale valore, le curve isoterme tendono a distribuirsi parallelamente all'asse Vhurb, indicando una variazione dell'isola di calore quasi direttamente proporzionale all'incremento del rapporto di copertura, a prescindere dai valori del rapporto di facciata e per tutte e tre le altezze medie considerate.

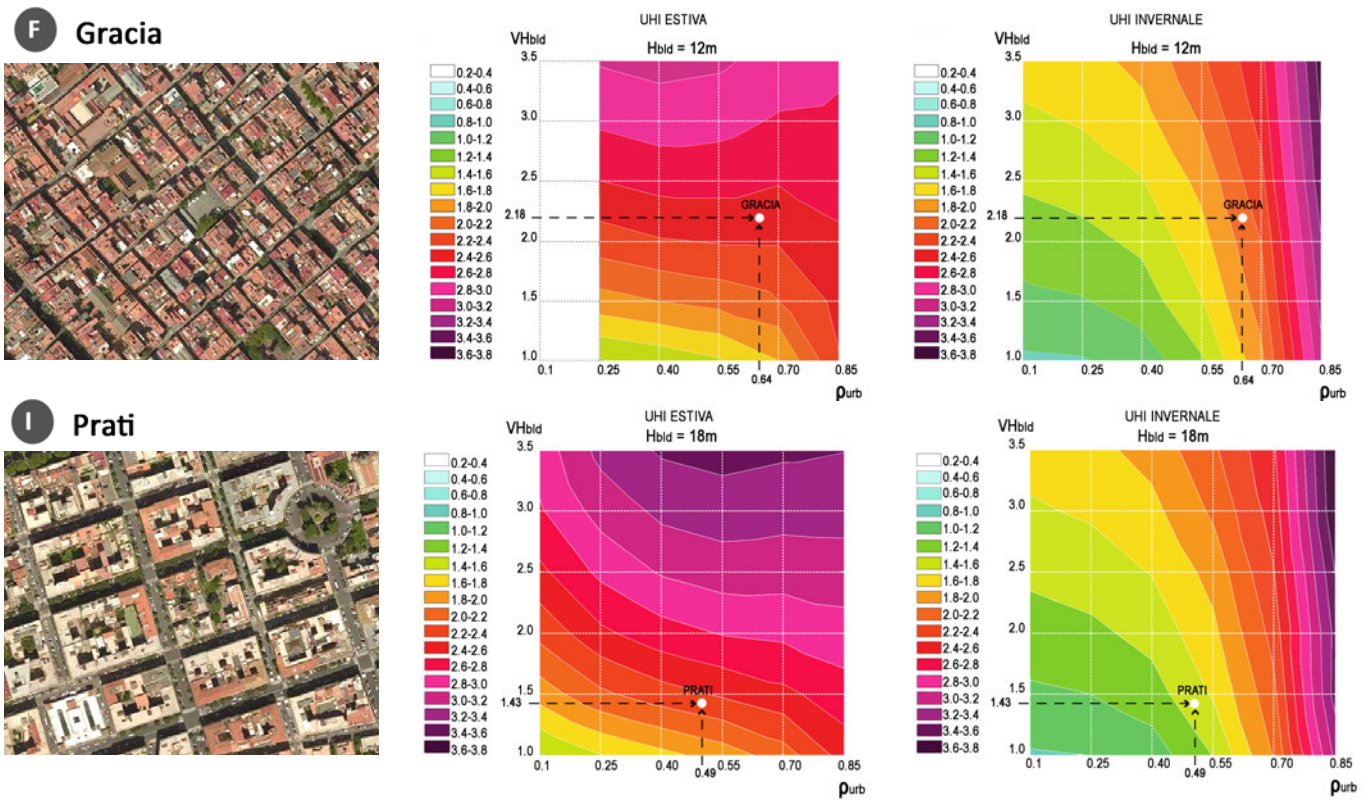
In estate, invece, le curve isoterme si dispongono in maniera diversa a seconda dell'altezza di riferimento. Per l'altezza media dell'edificato maggiore (24m) tendono a disporsi con un andamento quasi a 45° rispetto ai due assi. Ciò significa che i due parametri morfologici assumono una rilevanza simile, ovvero che variazioni consistenti dell'isola di calore estiva si verificano tanto per un incremento del rapporto di facciata che del rapporto di copertura. Al contrario, nel caso di un'altezza dell'edificato media o bassa (18 m e12m), le curve isoterme risultano quasi orizzontali, indicando una rilevanza maggiore del rapporto di facciata nell'incremento dell'isola di calore.

5.3.4. Interpretazione fisico-morfologica dei risultati

A titolo di esempio si mostra l'utilità degli strumenti grafici e analitici presentati per la valutazione della performance climatica dei tessuti urbani, utilizzando i casi di studio di Prati e Gracia.

I tessuti in questione differiscono per tutti e tre i parametri morfologici. Gracia è un tessuto denso e compatto, caratterizzato da una rete viaria fitta e da un edificato piuttosto basso (Hbld = 11.6, ρurb = 0.64, VHurb =2.18). Prati è un tessuto reticolare a grana grossa, con un minor rapporto di copertura rispetto a Gracia ma con un edificato decisamente più alto (Hbld = 19.5,

Figura 124 Valutazione della performance climatica di Gracia e Prati mediante i grafici bidimensionali dell'isola di calore



ρurb = 0.49, VHurb =1.43). Noti i tre parametri morfologici che descrivono la morfologia dei tessuti, è possibile valutarne sul rispettivo grafico la prestazione climatica (figura 124).

Utilizzando il grafico per un'altezza media di riferimento di 12m, si può ricavare che per Gracia l'isola di calore media estiva è compresa tra +2,4-2,6 °C.
Analogamente sul grafico per un'altezza di 18m possiamo leggere la performance estiva di Prati, pari a 2,2-2,4°C.
Analizzando gli stessi due casi nel periodo invernale si deduce che la morfologia di Prati determina un'isola di calore media invernale di 1,4-1,6 °C mentre Gracia di 2,0-2,2 °C.
In inverno, pertanto, la morfologia di Gracia determina un'isola di calore decisamente maggiore crispetto a Prati, mentre in estate la loro performance climatica è molto simile. Ciò è dovuto al fatto che Gracia presenta un alto valore di densità orizzontale, mentre Prati un'altezza dell'edificato maggiore che peggiora soprattutto la sua performance estiva.

Tale procedimento può essere ripetuto per qualsiasi caso di studio, per cui noti i parametri morfologici è possibile valutare la performance climatica in maniera speditiva, ottenendo un buon grado di approssimazione.

Occorre ricordare che tali stime sono tanto più realistiche quanto più i casi analizzati rispettano le condizioni al contorno utilizzate nella simulazione di riferimento, ovvero posizione centrale rispetto alla città, scarsa presenza di vegetazione o bacini d'acqua importanti nelle vicinanze, destinazione d'uso dell'area prevalentemente residenziale e impiego moderato dei sistemi di aria condizionata.

Gli strumenti presentati si prestano pertanto ad analisi comparative della prestazione di differenti tessuti urbani della città storica e compatta, consentendo una valutazione speditiva del grado di vulnerabilità climatica legato alla morfologia dell'edificato nell'area urbana.

5.4. Commento e conclusioni

L'insieme delle modellazioni presentate nel capitolo ha evidenziato che la morfologia urbana influisce fortemente sull'intensità del fenomeno dell'isola di calore in clima Mediterraneo.

Analizzando il campione di casi di studio, l''intensità media mensile risulta compresa tra + 3,5 °C in estate nel tessuto urbano più denso e +1°C nel mese di febbraio e nel tessuto meno denso. Le intensità massime giornaliere sono invece compresa nell'intervallo di + 7,3 °C in estate a + 3,5 °C in inverno.

Il set di simulazioni condotte ha permesso la costruzione di relazioni analitiche e strumenti grafici utili alla lettura della performance microclimatica dei tessuti urbani in clima Mediterraneo. Noti i tre parametri morfologici, è possibile valutare l'intensità media di isola di calore estiva ed invernale per qualsiasi area urbana morfologicamente omogenea, utilizzando le relazioni analitiche e gli strumenti grafici illustrati.

L'efficacia e l'innovatività del metodo presentato si fonda sulla semplicità dei dati che occorre conoscere per poter effettuare la valutazione in maniera speditiva.
Due dei tre parametri morfologici, il rapporto di copertura e l'altezza media dell'edificato, sono estremamente frequenti nell'ambito della progettazione urbana e vengono normalmente impiegati negli strumenti di governo del territorio. Il terzo parametro, relativo alla superficie verticale dell'edificato, è facilmente calcolabile attraverso banche dati GIS (perimetro x altezza delle parcelle) o attraverso modellazioni CAD o altro tipo di digitalizzazione della porzione urbana da analizzare.

Gli strumenti di analisi presentati costituiscono pertanto una base preliminare per la costruzione di mappe di vulnerabilità climatica a scala urbana. Inoltre i valori dell'isola di calore stimati possono essere facilmente inseriti nei file climatici per un calcolo più accurato della prestazione energetica in ambito urbano.

Alla luce dei risultati conseguiti si rileva inoltre una gerarchia tra i parametri morfologici in relazione all'intensità di isola di calore corrispondente durante l'arco dell'anno.

In linea generale, il rapporto di copertura assume grande rilevanza durante tutto l'anno e può ritenersi direttamente proporzionale all'innalzamento delle temperature urbane soprattutto durante l'inverno. Gli altri due parametri, il rapporto di facciata e l'altezza media dell'edificato assumono invece grande importanza durante l'estate, determinando livelli di isola di calore sostanzialmente differenti a parità del rapporto di copertura.

» DENSITÀ ORIZZONTALE, DENSITÀ VERTICALE E ISOLA DI CALORE

Esistono quindi due "tipi" di densità che risultano determinanti nell'incremento delle temperature urbane: la *densità orizzontale* e la *densità verticale*. La densità orizzontatale è proporzionale al rapporto di copertura, mentre la densità verticale è proporzionale al rapporto di facciata e all'altezza media degli edifici.

Nella situazione invernale, un incremento della densità orizzontale determina un innalzamento significativo dell'isola di calore. Nel caso estivo la relazione tra i tre parametri morfologici e l'isola di calore estiva individua invece una chiara gerarchia di rilevanza: il parametro che risulta determinante è il rapporto di facciata, segue l'altezza media degli edifici ed, infine, il rapporto di copertura.

E' pertanto la "densità" di superfici verticali presenti nell'area urbana di riferimento che governa l'andamento delle temperature urbane nella stagione estiva. In estate infatti l'intensità dell'isola di calore è strettamente connessa alla radiazione netta che entra nel sistema.

Al contrario, in inverno, buona parte del calore immagazzinato nella canopia urbana è prodotto all'interno degli stessi canyon, da fonti antropogeniche quali traffico e impianti di riscaldamento degli edifici. Diversi studi hanno dimostrato che la quota di calore antropogenico estiva ed invernale è molto differente e che in inverno tale contributo termico può anche superare quello della radiazione netta (Pigeon et al., 2007; Sailor, 2011).

Per tale motivo, la "densità delle superfici verticali" rappresenta una variabile discriminante sul comportamento climatico estivo, in quanto incrementa l'immagazzinamento del calore nell'area urbana captando buona parte della radiazione solare incidente. Al contrario, in inverno, tale parametro risulta meno significativo data la riduzione degli apporti radiativi solari ed assume più rilevanza la "densità orizzontale", che contribuisce a mantenere il calore antropogenico all'interno della canopia urbana.

Cantelli, A., Monti, P., & Leuzzi, G. (2015). Numerical study of the urban geometrical representation impact in a surface energy budget model. *Environmental Fluid Mechanics*, *15*(2), 251–273. doi:10.1007/s10652-013-9309-0

Masson, V. (2000). A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorology*, *94*(3), 357–397. doi:10.1023/A:1002463829265

Morganti, M. (2013). *SUSTAINABLE DENSITY: Form, Built Environment, Energy*. PhD,UPC, SAPIENZA.

Pigeon, G., Legain, D., Durand, P., & Masson, V. (2007). Anthropogenic heat release in an old European agglomeration (Toulouse, France). *International Journal of Climatology*, *27*, 1969–1981. doi:10.1002/joc.1530

Pont, M. B., & Haupt, P. (2010). *Spacematrix: Space, Density and Urban Form*. Rotterdam, Netherlands: NAi Publishers.

Sailor, D. J. (2011). A review of methods for estimating anthropogenic heat and moisture emissions in the urban environment. *International Journal of Climatology*, *31*(2), 189–199. doi:10.1002/joc.2106

Zhang, J., Heng, C. K., Malone-Lee, L. C., Hii, D. J. C., Janssen, P., Leung, K. S., & Tan, B. K. (2012). Evaluating environmental implications of density: A comparative case study on the relationship between density, urban block typology and sky exposure. *Automation in Construction*, *22*, 90–101. doi:10.1016/j.autcon.2011.06.011

CAPITOLO 6

MORFOLOGIA URBANA E DOMANDA ENERGETICA

Il capitolo 6 evidenzia l'esistenza di relazioni significative tra i parametri morfologici del tessuto edilizio e la domanda energetica per l'edificato in clima Mediterraneo.

Il lavoro si basa sull'assunzione che la morfologia urbana influisca significativamente sulla domanda energetica dell'edificato, sia in inverno che in estate, determinando il grado di ostruzione della radiazione solare incidente e contribuendo all'innalzamento delle temperature per effetto dell'isola di calore urbana, come ampiamente dimostrato nei capitoli precedenti.

Questi due processi termici e radiativi modificano gli apporti energetici passivi per l'edificato, contribuendo ad innalzare o abbassare la domanda di riscaldamento e raffrescamento in maniera determinante, soprattutto per il settore residenziale.
Pertanto la morfologia urbana influisce sulla determinazione della domanda di energia a scala urbana per mezzo di due contributi, che d'ora in avanti chiameremo il "contributo diretto", legato all'ostruzione della radiazione, ed il "contributo indiretto", dovuto all'intensità dell'isola di calore.

Figura 125 I contributi della morfologia urbana nella determinazione della performance energetica. Elaborazione personale sulla base della rappresentazione gafica dei fattori che concorrono alla determinazione della performance energetica, Ratti, 2005.

La valutazione dell'entità del contributo diretto e indiretto è stata condotta per mezzo di simulazioni energetiche svolte con Design Builder, utilizzando il motore di calcolo EnergyPlus.

In primo luogo è stato evidenziato l'effetto dell'isola di calore sulla domanda energetica per un caso di studio a Barcellona, utilizzando le temperature misurate nei canyon durante la campagna di misurazione.

Successivamente sono stati valutati separatamente i due effetti, diretto e indiretto, attraverso una serie di analisi di sensibilità volte ad evidenziare la variazione della domanda energetica in funzione dell'innalzamento delle temperature urbane e dell'ostruzione della radiazione solare determinata dal contesto.

L'insieme delle analisi energetiche ha permesso di individuare relazioni significative tra i parametri morfologici che descrivono la conformazione dei tessuti urbani e la loro prestazione energetica.
Data la variabilità stagionale che caratterizza il clima Mediterraneo, i risultati verranno presentati dividendo la domanda di riscaldamento da quella di raffreddamento, in quanto gli effetti della morfologia urbana risultano benefici o gravosi a seconda della stagione di riferimento.

L'analisi ha permesso quindi di stabilire l'intervallo di variazione della domanda energetica per un edificio residenziale in funzione della morfologia del tessuto urbano in cui si inserisce e, allo stesso tempo, di individuare il grado di errore attualmente diffuso nella valutazione della domanda energetica dell'edificato quando suddetti contributi vengono omessi o trascurati.

6.I Isola di calore e ripercussioni energetiche

In questa prima parte dello studio si analizza l'effetto dell'isola di calore sul comportamento energetico estivo di un edificio residenziale, utilizzando le temperature misurate durante la campagna di misurazione a Barcellona.

Valutare l'effetto di tale incremento di temperatura sul consumo energetico è utile per individuare il grado di errore attualmente diffuso nella pratica delle simulazioni che utilizzano le temperature dell'aeroporto come input.

6.I.I. Un caso di studio a Barcellona

La variazione della performance energetica determinata dall'isola di calore è stata valutata mediante simulazioni energetiche svolte con Design Builder 4.2 (DesignBuilder Software, 2014a, 2014b), utilizzando il motore di calcolo EnergyPlus 8.1 (Reference & Calculations, 2013). La domanda di raffrescamento si riferisce ad un appartamento di riferimento ed è stata calcolata utilizzando due file meteorologici differenti; uno costruito sulla base dei dati orari di temperatura dell'aeroporto di Barcellona, l'altro con le temperature misurate nel canyon di Carrer de Jesus a Gracia durante la campagna di misurazione (figura 129).

Mediante la comparazione dei risultati è stato possibile individuare il grado di errore che viene normalmente commesso nella simulazione energetica utilizzando i dati di riferimento dell'aeroporto invece dei dati meteorologici urbani.

L'oggetto dell'analisi energetica è un appartamento teorico di 65 mq, con una esposizione principale (Nord-Ovest o Sud-Est) ed un affaccio su un cavedio per i locali di servizio.

Per tenere in considerazione l'effetto della geometria urbana, il modello geometrico del canyon è stato completamente ricostruito e l'appartamento oggetto di studio è stato inserito in posizione centrale rispetto al canyon stesso (figura 126).

La domanda di raffrescamento per l'appartamento tipo è stata calcolata per 4 differenti posizioni all'interno del canyon (figura 127):

P1: Al primo piano, con esposizione Sud-Est
P2: Al primo piano con esposizione Nord-Ovest
P3: All'ultimo piano con esposizione Sud-Est
P4: All'ultimo piano con esposizione Nord-Ovest

In tal modo è possibile tenere in considerazione l'effetto delle differenti condizioni di soleggiamento che si producono a diverse altezze nel canyon urbano e che risultano determinanti sulla domanda di raffrescamento.

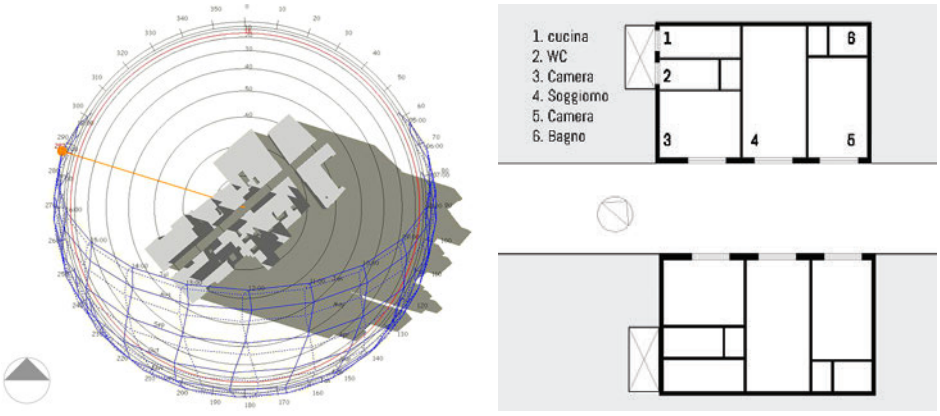


Figura 126 A destra: il canyon di Carrer de Jesus modellato in Design Builder e schema dell'appartamento di riferimento per le simulazioni

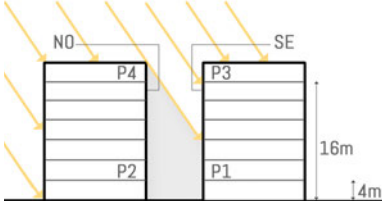


Figura 127 Posizioni dell'appartamento all'interno del canyon

Tabella 26 Assunzioni del modello energetico

Parametri di simulazione (Design builder)	
Caratteristiche generali	
Superficie	65 mq
Altezza interpiano	3.3 m
Occupazione	
Densità	0.03 persone/mq
Programma	Lunedì - Venerdì: 00:00-09:00 + 16:00-24:00 – Domenica: sempre
Controllo ambientale	
Set point di raffrescamento	25 °C
Set back di raffrescamento	27 °C
Programma	Lunedì - Domenica: 07:00-09:00 + 16:00-23:00
Ventilazione naturale	On - 2 ac/h
Programma	Programma occupazione
Funzionamento	Ventilazione senza restrizioni rispetto alla Tout o al ΔTin-out
Costruzione	
Infiltrazione	Costante – 0.5 ac/h
Parete - Trasmittanza	Muratura portante - 1.3 W/mq K
Superficie vetrata	30%
Finestra - Trasmittanza	Vetro semplice – 4.5 w/mq K
Dispositivi di ombreggiamento	Nessuno

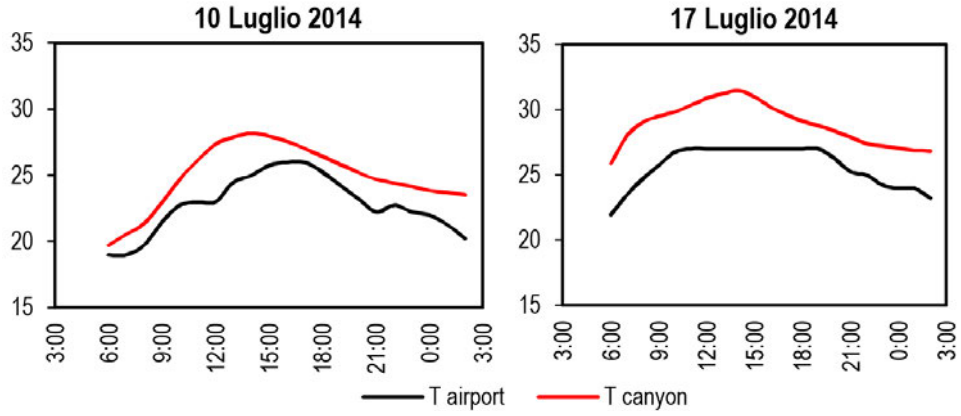


Figura 128 Temperature all'aeroporto (nero) e nel canyon Carrer de Jesus (rosso) nei giorni di simulazione

Nel canyon urbano, infatti, a parità di isola di calore, ciascun appartamento beneficia di apporti solari estremamente differenti, in funzione del piano di appartenenza e dell'altezza relativa dell'edificio prospiciente e dell'esposizione principale.

Il calcolo della domanda di raffrescamento per l'appartamento di riferimento è stato effettuato per i giorni 10 e 17 Luglio del 2014.

Nelle assunzioni del modello energetico, l'appartamento si suppone raffrescato sia meccanicamente che naturalmente; la temperatura di set point dell'aria condizionata (25°C) ed i periodi di funzionamento sono stati definiti sulla base dell'edificio di riferimento della normativa tecnica spagnola (Ministerio de Fomento. Gobierno de España, 2007). Le caratteristiche principali del modello energetico sono riportate nella tabella 26.

6.1.2. Discussione dei risultati

L'esito delle simulazioni conferma la rilevanza dell'effetto dell'isola di calore sulla domanda di raffrescamento in clima Mediterraneo, ma con un'incidenza diversa a seconda della posizione dell'appartamento all'interno del canyon. La quantità di radiazione solare incidente rappresenta infatti una variabile di estrema importanza nel bilancio energetico in clima Mediterraneo.

Nella figura 129 sono rappresentati i guadagni solari relativi alle 4 posizioni analizzate all'in-

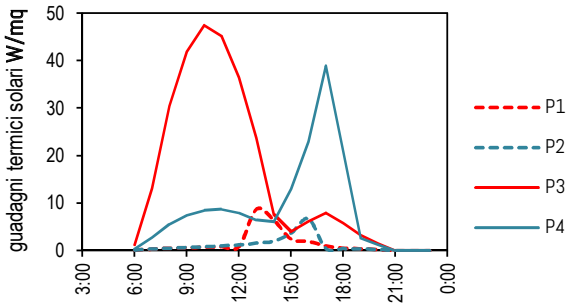


Figura 129 Guadagni termici solari per le quattro posizioni nel canyon: P1- primo piano SE, P2 - primo piano NO, P3 - ultimo piano SE, P4- ultimo piano NO

terno del canyon. A parità di superficie vetrata, i guadagni solari relativi degli appartamenti posti all'ultimo piano rispetto a quelli del primo piano sono significativamente maggiori, per entrambe le esposizioni. Al primo piano raggiungono valori massimi di 8,6 W/mq all'01:00 per l'orientamento S-E e 6,7 W/mq alle 04:00 per l'orientamento N-O. All'ultimo piano invece, dove il livello di ostruzione della radiazione è molto basso, si raggiunge un massimo di 47,5 W/mq alle 10:00 per l'orientamento S-E e 38,9 W/mq per quello N-O, alle 5 del pomeriggio. Gli apporti energetici solari variano con un fattore pari quasi a 6 a seconda della posizione relativa nel canyon e ciò determina una variazione consistente della domanda energetica estiva. Ci si attende una domanda di raffrescamento molto più elevata per gli appartamenti all'ultimo piano ed anche un'incidenza diversa dell'effetto di isola di calore che, a differenza della radiazione solare, determina un incremento delle temperature abbastanza omogeneo in tutto il volume d'aria compreso nel canyon.

I risultati delle simulazioni energetiche per i giorni 10 e 17 luglio 2014 sono riportati in figura 130 e 131 suddivisi per ciascuna posizione di riferimento.

Per gli appartamenti al primo piano (P1 e P2) la temperatura di comfort interno è quasi sempre garantita senza la necessità di aria condizionata. In particolare, l'appartamento posto al primo piano con orientamento N-O (P2) non richiede la necessità di aria condizionata neanche il 17 luglio, una giornata particolarmente calda sia all'aeroporto che, soprattutto, in città. L'appartamento posto allo stesso piano ma con esposizione S-E (P1), necessita invece di raffrescamento meccanico il giorno 17 Luglio. Questa differenza è determinata dal fatto che i guadagni solari per questa esposizione sono sufficientemente superiori da determinare l'attivazione

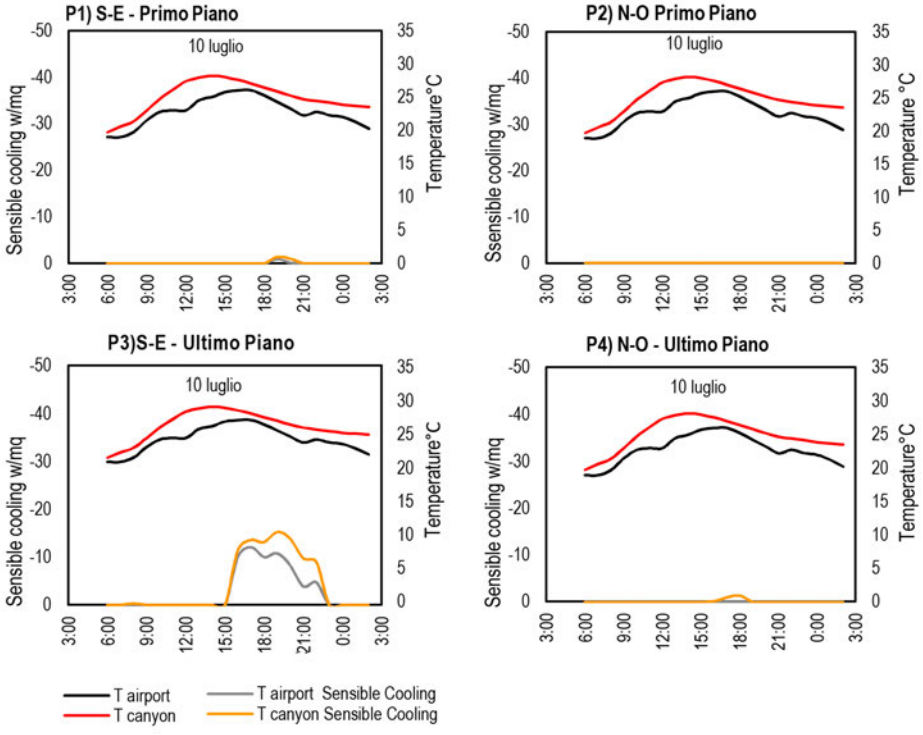


Figura 130 Domanda di raffrescamento oraria per le 4 posizioni nel giorno 10 Luglio. La linea nera e rossa rappresentano l'andamento delle temperature rispettivamente all'aeroporto e nel canyon urbano. La linea grigia e gialla rappresentano la domanda di raffrescamento oraria calcolata rispettivamente con le temperature dell'aeroporto e con le temperature del canyon

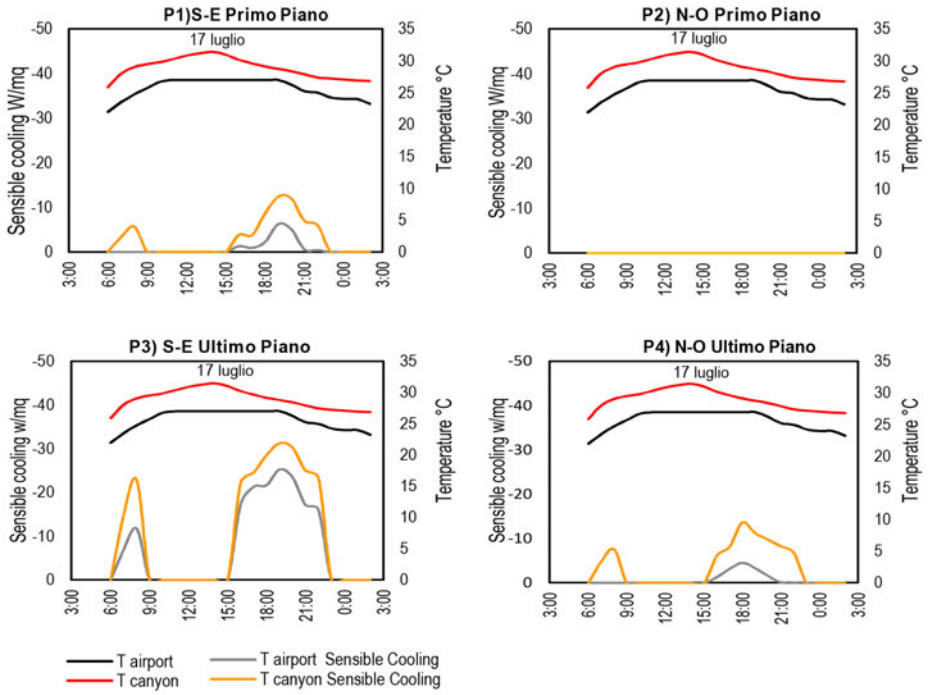


Figura 131 Domanda di raffrescamento oraria per il 17 Luglio. La linea nera e rossa rappresentano l'andamento delle temperature rispettivamente all'aeroporto e nel canyon urbano. La linea grigia e gialla rappresentano la domanda di raffrescamento oraria calcolata rispettivamente con le temperature dell'aeroporto e con le temperature del canyon

Domanda di raffrescamento giornaliera (Wh/mq)

10 Luglio	T Aeroporto	T canyon	Errore relativo
P1	1.2	2.4	-50%
P2	0	0	0%
P3	60.2	86.8	-31%
P4	0	2.5	-100%

17 Luglio	T Aeroporto	T canyon	Errore relativo
P1	16.8	62.6	-73%
P2	0	0	0%
P3	161.4	223.1	-28%
P4	14.2	76.4	-81%

Tabella 27 Domanda di raffrescamento giornaliera in funzione delle differenti posizioni e temperature. L'errore relativo è dato dalla differenza tra la domanda calcolata con le temperature dell'aeroporto e quella calcolata con le temperature del canyon urbano

dell'aria condizionata per poter garantire la temperatura di comfort stabilita. Quando si verificano temperature più elevate, come nel caso del 17 luglio, la necessità del raffreddamento aumenta notevolmente e l'effetto dell'UHI è più evidente, provocando un aumento giornaliero della domanda di raffrescamento da 16,8 Wh/mq a 62 Wh/mq (tabella 27).

Una situazione simile può essere letta per la posizione P4, ovvero l'ultimo piano con esposizione N-O; a causa del suo orientamento, l'appartamento riceve una quantità minore di radiazione solare rispetto all'esposizione SE. In effetti, nel corso di una giornata media estiva come il 10 luglio, la sua domanda di raffreddamento è vicino allo zero, anche considerando l'effetto di isola di calore urbana. Ma in un giorno caldo, come il 17 luglio, l'effetto di isola di calore diventa discriminante nella determinazione della sua domanda di raffrescamento, che passa da 14,2 Wh/mq, se calcolata con te temperature dell'aeroporto, a 76,4 Wh/mq con le temperature urbane.

Infine per quanto riguarda la posizione P3, all'ultimo piano e con esposizione SE, l'effetto dell'isola di calore costituisce sempre un'aggravante della domanda di raffrescamento, che risulta significativa anche in giornate non particolarmente calde. Per questo appartamento, il 17 Luglio, la domanda di raffrescamento varia da 161.4 Wh/mq a 223.1 Wh/mq se calcolata rispettivamente con le temperature dell'aeroporto o con quelle del canyon urbano.

I risultati delle analisi energetiche pertanto confermano che l'omissione dell'effetto dell'isola di calore nel calcolo della domanda può condurre ad errori di valutazione significativi, variabili in funzione dell'esposizione e della posizione considerata all'interno del canyon. Per gli appartamenti che godono di elevati apporti solari, l'incremento delle temperature dovute all'effetto urbano costituisce sempre un'aggravante energetica, la cui omissione comporta un errore dell'ordine del 30% sulla stima della domanda energetica (tabella 27).
Per gli appartamenti più "protetti" dalla radiazione solare estiva, per posizione o esposizione, l'effetto di isola di calore può invece determinare l'attivazione del sistema di raffrescamento meccanico, creando una domanda energetica estiva che non può essere stimata se si utilizzano le temperature dell'aeroporto come input per la simulazione.

6.2 Performance energetica dei tessuti edilizi in clima mediterraneo

I risultati che verranno esposti in questa ultima parte della ricerca evidenziano l'entità del contributo diretto, indiretto e globale della morfologia urbana sulla domanda energetica in clima Mediterraneo.

Attraverso un approccio comparativo è stata individuata la variazione della domanda energetica di un edificio residenziale in ambiente urbano rispetto ad un edificio isolato al di fuori della città, tenendo in considerazione l'influenza dell'isola di calore e del contesto morfologico sul bilancio energetico annuale.

La performance energetica di un edificio inserito in un tessuto urbano rispetto ad un edificio isolato risulta chiaramente modificato dal grado di densità e dalla morfologia del tessuto stesso. Come evidenziato nel capitolo precedente, un aumento del grado di densità dell'edificato (sia "orizzontale" che "verticale") comporta un incremento consistente dell'isola di calore, che influisce sulla domanda energetica estiva, negativamente, e su quella invernale, positivamente.
Allo stesso tempo, tessuti urbani densi e compatti determinano una diminuzione della radiazione solare che penetra nel canyon e raggiunge le facciate degli edifici; tale fenomeno comporta una riduzione dei guadagni termici solari che risulta positiva in estate ma svantaggiosa in inverno.

Tenendo in considerazione entrambi gli effetti si deduce che un incremento del grado di densità del tessuto può determinare esisti contrastanti sulla performance energetica in clima Mediterraneo. Se un aumento delle temperature urbane comporta dei vantaggi energetici invernali e degli svantaggi estivi, al contrario l'ostruzione della radiazione comporta un aumento della domanda energetica invernale ed una diminuzione di quella estiva.

6.2.I. Metodologia

L'analisi energetica che si presenta individua, separatamente, l'entità dell'effetto diretto e indiretto della morfologia urbana sulla performance energetica dell'edificato.

La valutazione è stata condotta attraverso delle analisi di sensibilità della domanda energetica alle temperature urbane e all'ostruzione della radiazione solare, che permettono di individuare e comparare:

1) L'EFFETTO INDIRETTO: variazione di domanda energetica di un alloggio residenziale in funzione dell'intensità dell'isola di calore

2) L'EFFETTO DIRETTO: variazione della domanda energetica in funzione della percentuale di ostruzione della radiazione solare

Successivamente è stato individuato il contributo globale della morfologia urbana sulla performance energetica dell'edificato considerando la compresenza dei due fenomeni nella città compatta Mediterranea. A tal fine sono stati utilizzati come casi di studio alcuni dei tessuti urbani precedentemente analizzati. L'insieme delle simulazioni ha permesso di individuare delle leggi di variazione della domanda energetica in funzione dei tre parametri morfologici che descrivono la conformazione dei tessuti urbani.

ANALISI DI SENSIBILITA'

In virtù dell'effetto diretto e indiretto, la morfologia urbana determina la variazione di due variabili fondamentali nel calcolo della domanda energetica: le temperature esterne e la radiazione solare incidente.

Per valutare l'entità di tali contributi è stata condotta un'analisi di sensibilità della domanda energetica residenziale in funzione dei valori assunti dalle due variabili di ingresso. Il modello energetico utilizzato per il calcolo è EnergyPlus 8.1, attraverso l'interfaccia grafica Design Builder 4.2. I dati meteorologici di riferimento sono quelli di Roma Ciampino.

Per le due variabili considerate, ovvero le temperature esterne e la radiazione solare incidente, è stato individuato un intervallo realistico di variabilità in funzione dello specifico campo di indagine della città compatta e del clima mediterraneo.

INTERVALLO TEORICO DI VARIAZIONE DELLE TEMEPRATURE ESTERNE:

Per le temperature urbane è stato considerato un incremento medio fino a +4 °C rispetto alle temperature rurali, che corrisponde all'isola di calore media massima per il contesto di Roma e Barcellona. I valori di test delle temperature esterne sono pertanto +1, +2, +3 e +4°C rispetto alle medie orarie di Roma Ciampino.
Per svolgere le simulazioni con EnergyPlus tenendo in considerazione i diversi incrementi di temperatura sono stati creati 4 file meteorologici modificando manualmente i valori orari delle temperature del file climatico di riferimento (temperatura a bulbo secco e temperatura di rugiada).

INTERVALLO TEORICO DI VARIAZIONE DELLA RADIAZIONE SOLARE INCIDENTE:

Analogamente, per testare la sensibilità della domanda energetica alla variazione della radiazione solare incidente è stato considerato un grado di ostruzione dal 20% all'80% della radiazione totale disponibile alla latitudine di Roma Ciampino (N 41 47'). Sono stati quindi creati 4 ulteriori file climatici in cui la radiazione solare oraria (Global horizontal radiation, Direct normal radiation e Diffuse horizontal radiation) è stata diminuita rispettivamente del 20, 40, 60 e 80% rispetto al valore di riferimento per Roma Ciampino, mantenendo invece inalterati i valori della temperatura.

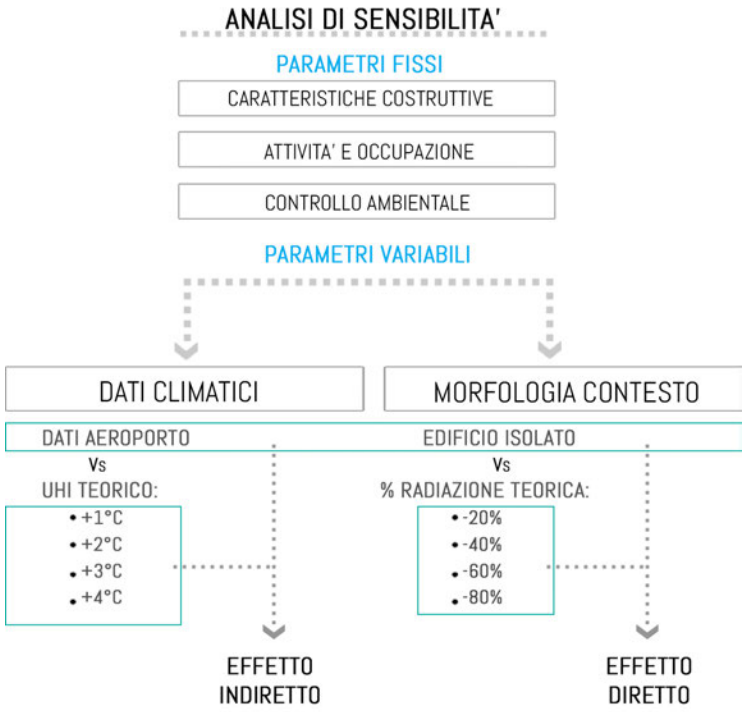


Figura 132 Struttura delle simulazioni e parametri testati per l'analisi di sensibilità della domanda energetica alle temperature esterne e alla radiazione incidente

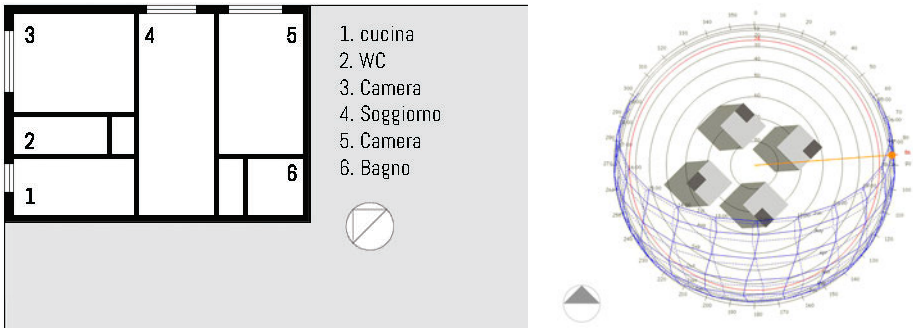


Figura 133 A sinistra :Appartamento tipo modellato in Design Builder con l'esposizione Nord-Est Nord-Ovest. A destra: esposizioni analizzate NE-NO, NO-SO, SO-SE e SE-NE

Tabella 28 Assunzioni del modello energetico per le analisi di sensibilità

Parametri di simulazione analisi di sensibilità (Design builder)	
Caratteristiche generali	
Superficie	70 mq
Altezza interpiano	3.3 m
Piano di riferimento	Primo piano (3.3 m da terra)
Attività e occupazione	
Densità	0.03 persone/mq
Carichi interni	5 W/mq
Programma	Lunedì - Venerdì: 00:00-09:00 + 16:00-24:00 – Domenica: sempre
Controllo ambientale	
Set point di riscaldamento	20°C
Set back di riscaldamento	15°C
Periodo	Da Novembre a Marzo
Programma	Lunedì - Sabato: 07:00-09:00 + 16:00-23:00, Domenica: 07:00-23:00
Set point di raffrescamento	26 °C
Set back di raffrescamento	28 °C
Periodo	Da Aprile a Ottobre
Programma	Lunedì - Sabato: 07:00-09:00 + 16:00-23:00, Domenica: 07:00-23:00
Ventilazione naturale	On - 2 ac/h
Programma	Programma occupazione
Funzionamento	Tin > 22°C
Costruzione	
Infiltrazione	Costante – 0.5 ac/h
Parete - Trasmittanza	Muratura portante - 1.59 W/mq K
Superficie vetrata	20%
Finestra - Trasmittanza	Vetro semplice – 4.5 w/mq K
Dispositivi di ombreggiamento	Nessuno

Tutte le altre variabili che concorrono a definire la domanda energetica sono state mantenute costanti nel corso delle simulazioni, utilizzando come riferimento il modello energetico di un appartamento di 70mq con le caratteristiche costruttive, di occupazione e di controllo ambientale descritte nella tabella 28. L'analisi di sensibilità è stata svolta considerando l'appartamento secondo 4 possibili orientamenti: NE-NO, NO-SO, SO-SE e SE-NE (figura 133).

INTERVALLO DI VARIAZIONE DELLE VARIABILI DETERMINATO DAI CASI DI STUDIO:

Un'altra serie di simulazioni è stata effettuata utilizzando 5 modelli di tessuti urbani come riferimento. In questo secondo tipo di analisi, la variazione della domanda energetica è stata valutata in funzione dell'intensità di isola di calore e della riduzione di radiazione solare determinato dalla morfologia dei diversi tessuti urbani.

A tal fine, per cinque tessuti urbani di riferimento, è stati costruito il modello tipologico normalizzato (vedi capitolo 5) in Design Builder (figura 134) ed è stato creato il corrispondente file climatico mediante Urban Weather Generator, che tiene in conto dell'isola di calore determinata dalla sua morfologia e densità.

Per valutare comparativamente l'entità del contributo diretto e indiretto in funzione della mor-

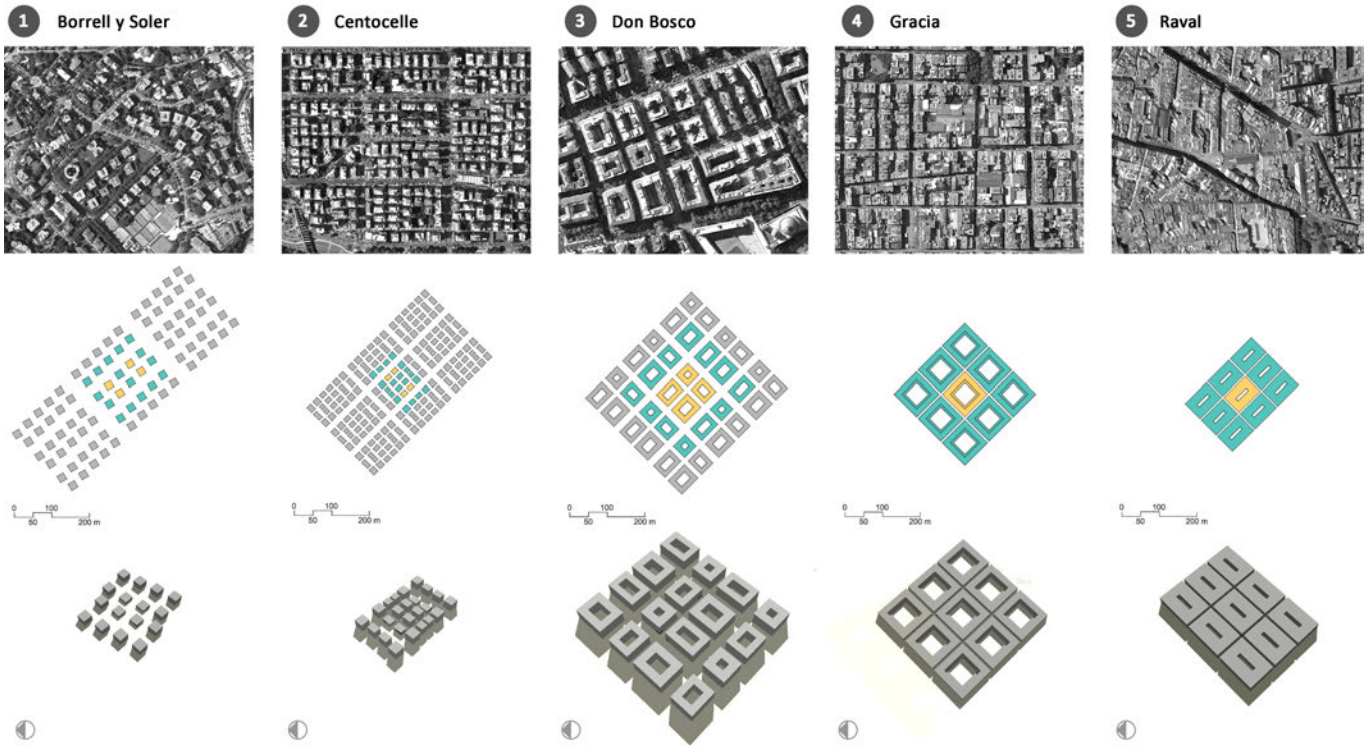


Figura 134 Tessuti urbani di riferimento e modelli tipologici normalizzati. In azzurro è evidenziala la porzione modellata in Design Builder, in giallo gli edifici considerati per ciascuna esposizione.

fologia dei casi di studio sono state svolte 3 tipi di simulazione:

1. S_1 - Contributo indiretto: La simulazione della domanda energetica per l'appartamento di riferimento è stata eseguita senza la presenza del contesto urbano e utilizzando i dati meteorologici calcolati da UWG per ciascun tessuto.

L'obiettivo di tale simulazione è la valutazione della domanda energetica in funzione di vari livelli di intensità di isola di calore. A differenza delle analisi di sensibilità , in cui è stato utilizzato un intervallo teorico di incremento delle temperature, in questo tipo di simulazione l'isola di calore non è costante nell'arco del giorno e dell'anno, ma assume un andamento variabile, con temperature maggiori durante la notte (figura 135) e intensità generalmente superiore in estate rispetto all'inverno.

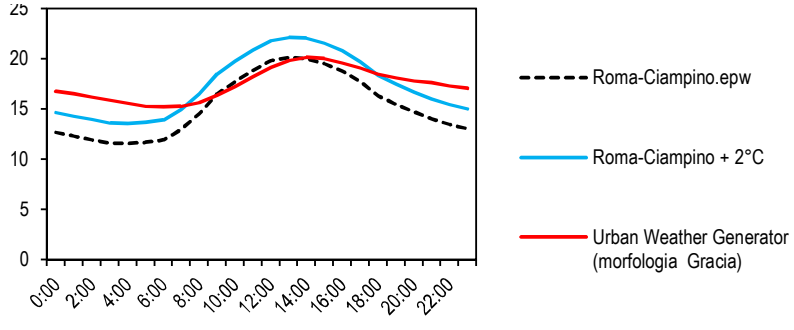


Figura 135 Comparazione tra le temperature di input usate per le simulazioni: la linea nera tratteggiata rappresenta l'andamento delle temperature medie annue a Roma-Ciampino, quella azzurra l'incremento medio di 2°C applicato alle temperature di Roma-Ciampino per le analisi di sensibilità, quella rossa le temperature medie annuali calcolate da UWG considerando i parametri morfologici corrispondenti al caso di studio di Gracia e le temperature di Roma-Ciampino come stazione meteorologica rurale

Il secondo tipo di simulazione è volto ad evidenziare il contributo diretto della morfologia urbana sulla domanda energetica:

2. S_2 - Contributo diretto: La domanda energetica è stata calcolata inserendo l'appartamento di riferimento nel contesto urbano morfologico dei 5 casi di studio (al primo piano, a 3,3 m dalla quota della strada), utilizzando i dati climatici di Roma Ciampino.

In tal modo è possibile determinare quanto il contesto urbano dei diversi casi di studio influisce sull'ostruzione della radiazione solare e pertanto sulla domanda energetica, senza considerare l'effetto dell'isola di calore. Viene quindi evidenziato il contributo diretto della morfologia

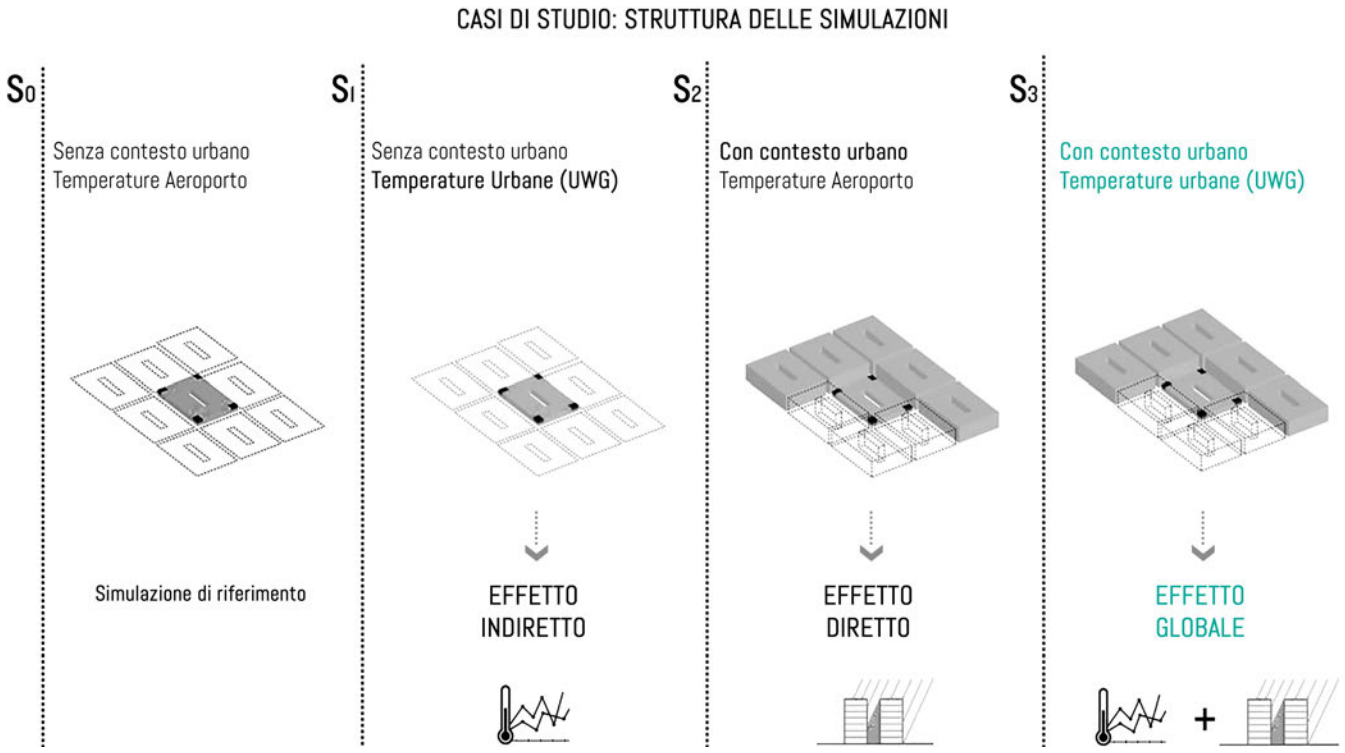


Figura 136 Modalità di realizzazione delle simulazioni energetiche utilizzando i casi di studio per evidenziare l'effetto diretto, indiretto e globale della morfologia urbana sulla domanda energetica annuale

urbana sulla domanda energetica.

CONTRIBUTO GLOBALE

La fase conclusiva delle analisi energetiche è volta alla valutazione della performance globale dei tessuti urbani in clima Mediterraneo, in considerazione sia dell'effetto diretto che indiretto indotto dalla morfologia urbana dei differenti casi di studio. A tal fine viene eseguito un'ultima serie di simulazioni:

3. S_3 - Contributo globale: la domanda energetica è stata calcolata inserendo l'appartamento di riferimento nel contesto morfologico dei casi di studio ed utilizzando i file climatici prodotti da UWG per ciascuna morfologia.

Il contributo diretto e indiretto viene pertanto considerato in maniera simultanea.

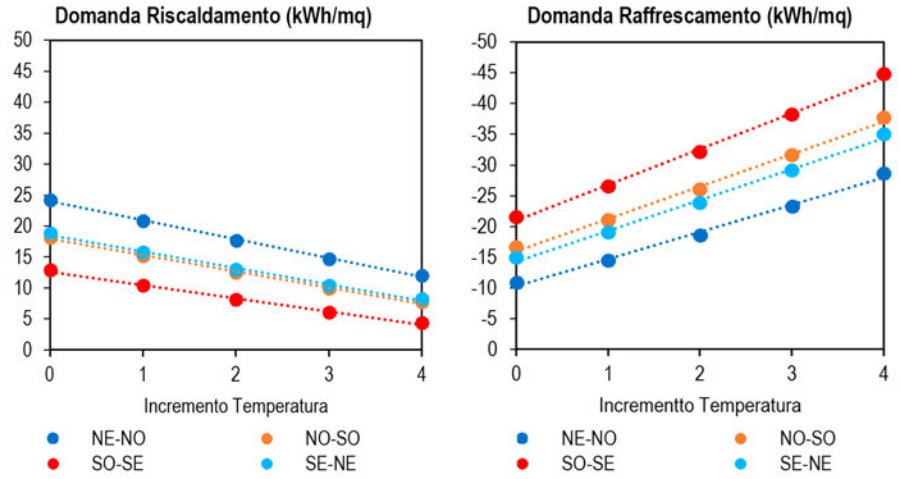
I risultati hanno permesso di valutare il peso relativo dei due effetti sul bilancio energetico annuo e di stabilire la performance dei vari tessuti in relazione ai parametri di densità.

6.2.2. Morfologia urbana e contributo indiretto

In figura 137 si presentano i risultati dell'analisi di sensibilità della domanda energetica in funzione di un incremento costante delle temperature rispetto a quelle rurali. I punti che corrispondono al valore 0 sull'asse orizzontale indicano la domanda di riscaldamento o raffreddamento calcolata per l'appartamento di riferimento con i dati climatici di Roma-Ciampino. Per ciascun grado di innalzamento delle temperature esterne è possibile notare come la domanda di riscaldamento diminuisca, mentre quella di raffreddamento aumenta.

Nella figura 138 si riportano invece i risultati per i casi di studio (simulazioni S_1), ovvero la variazione della domanda energetica dell'appartamento di riferimento in funzione delle temperature urbane calcolate da UWG, che tengono in conto dell'effetto di isola di calore determinato dalla morfologia dei tessuti di riferimento.

I risultati ottenuti applicando un incremento costante alle temperature "rurali" rispetto a quelli



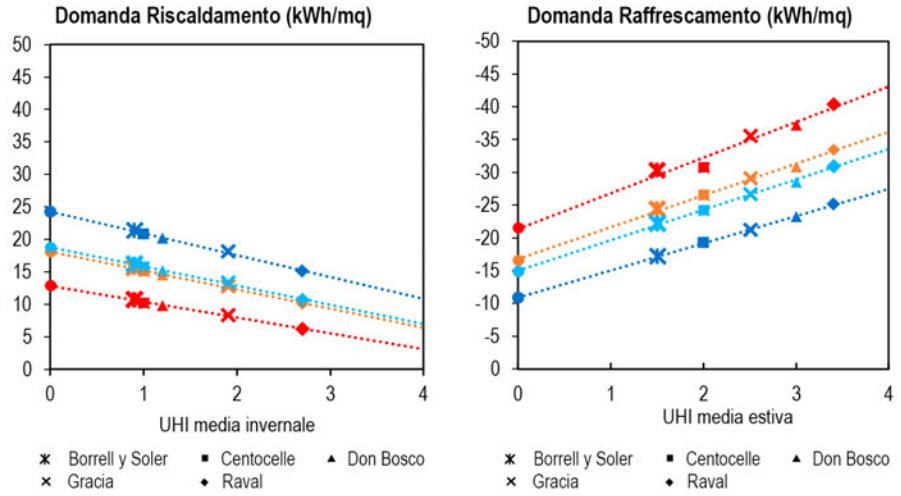


Figura 137 Analisi di sensibilità della domanda energetica in funzione di un incremento costante delle temperature rispetto a quelle rurali

Figura 138 Variazione della domanda energetica in funzione delle temperature urbane calcolate da UWG, che tengono in conto dell'effetto di isola di calore determinato dalla morfologia dei tessuti di riferimento

Isola di calore media calcolata con UWG			
Casi di studio	**UHI media annuale**	**UHI media estiva**	**UHI media invernale**
Borrel y Soler	1.0	1.5	0.9
Centocelle	1.3	2.0	1.0
Gracia	2.1	2.5	1.9
Don Bosco	1.5	3.0	1.2
Raval	3.0	3.4	2.7

Tabella 29 Isola di calore media annuale, invernale ed estiva calcolata con UWG per i casi di studio

ottenuti utilizzando l'andamento reale dell'isola di calore durante l'arco del giorno mostrano la stessa tendenza e le stesse variazioni nella domanda energetica finale.

Ciò significa che, al fine di una valutazione più accurata della domanda energetica in un contesto urbano, non è discriminante conoscere l'andamento orario delle temperature modificate dall'effetto dell'isola di calore, bensì è sufficiente avere una misura dell'incremento medio estivo ed invernale determinato dal fenomeno. Inoltre dai grafici si nota che la variazione della performance energetica indotta dal fenomeno dell'isola di calore assume la stessa tendenza per tutte e quattro le esposizioni studiate.

Per ogni grado di incremento delle temperature esterne, la domanda di riscaldamento diminuisce in media di 3 Kwh/mq (3,4 Kwh/mq per l'esposizione NE-NO e 2,6 Kwh/mq per l'esposizione SO-SE), mentre quella di raffrescamento aumenta di 4.2 kWh/mq (5,0 Kwh/mq per l'esposizione SO-SE e 3,5 Kwh/mq per l'esposizione NO-NE). Pertanto l'effetto dell'isola di calore risulta negativo sul bilancio energetico annuale, in quanto l'incremento della domanda energetica estiva è più oneroso dei benefici sulla domanda invernale.

Analizzando i risultati ottenuti per i casi di studio è possibile valutare la variazione della do-

Contributo indiretto della morfologia urbana sulla domanda energetica: risultati dei casi di studio									
	Riscaldamento (KWh/mq)			Raffrescamento (KWh/mq)			Domanda annuale (KWh/mq)		
	T Ciampino	T Urbane (UWG)	Er %	T Ciampino	T Urbane (UWG)	Er %	T Ciampino	T Urbane (UWG)	Er %
NO-NE									
Borrel y Soler	24.3	21.43	13%	-10.91	-17.27	-37%	35.21	38.7	-9%
Centocelle	24.3	20.79	17%	-10.91	-19.22	-43%	35.21	40.01	-12%
Gracia	24.3	18.27	33%	-10.91	-21.29	-49%	35.21	39.56	-11%
Don Bosco	24.3	20.13	21%	-10.91	-23.22	-53%	35.21	43.35	-19%
Raval	24.3	15.12	61%	-10.91	-25.16	-57%	35.21	40.28	-13%
NO-SO									
Borrel y Soler	18.16	15.64	16%	-16.61	-24.37	-32%	34.77	40.01	-13%
Centocelle	18.16	15.14	20%	-16.61	-26.54	-37%	34.77	41.68	-17%
Gracia	18.16	12.85	41%	-16.61	-29.18	-43%	34.77	42.03	-17%
Don Bosco	18.16	14.51	25%	-16.61	-30.8	-46%	34.77	45.31	-23%
Raval	18.16	10.09	80%	-16.61	-33.52	-50%	34.77	43.61	-20%
SO-SE									
Borrel y Soler	12.94	10.74	20%	-21.56	-30.27	-29%	34.5	41.01	-16%
Centocelle	12.94	10.25	26%	-21.56	-30.74	-30%	34.5	40.99	-16%
Gracia	12.94	8.41	54%	-21.56	-35.69	-40%	34.5	44.1	-22%
Don Bosco	12.94	9.78	32%	-21.56	-37.12	-42%	34.5	46.9	-26%
Raval	12.94	6.24	107%	-21.56	-40.46	-47%	34.5	46.7	-26%
SE-NE									
Borrel y Soler	18.84	16.29	16%	-14.95	-22.22	-33%	33.79	38.51	-12%
Centocelle	18.84	15.77	19%	-14.95	-24.27	-38%	33.79	40.04	-16%
Gracia	18.84	13.47	40%	-14.95	-26.77	-44%	33.79	40.24	-16%
Don Bosco	18.84	15.09	25%	-14.95	-28.44	-47%	33.79	43.53	-22%
Raval	18.84	10.72	76%	-14.95	-31	-52%	33.79	41.72	-19%

Tabella 30 Variazione della domanda energetica in funzione dell'isola di calore calcolata per i 5 casi di studio. Er % indica l'errore relativo che si commette calcolando la domanda energetica omettendo l'effetto dell'isola di calore urbana

manda estiva ed invernale in funzione dell'isola di calore media calcolata da UWG per i cinque tessuti. Ad esempio, per la morfologia del Raval il programma UWG stima un'isola di calore media invernale di 2,7 °C ed un'UHI media estiva di 3,4 °C. A fronte di tali incrementi, la domanda di riscaldamento dell'appartamento con esposizione NO-NE diminuisce di 9,2 kWh/mq rispetto a quella calcolata con temperature rurali, mentre quella di raffrescamento aumenta di 14,2 kWh/mq. Per un appartamento di esposizione SO-SE la variazione è ancora più rilevante, con un incremento della domanda estiva di 18,9 kWh/mq a fronte di un risparmio invernale di 6,7 kWh/mq.

Non tenere in conto dell'effetto dell'isola di calore può determinare pertanto un errore fino al 26% sulla stima della domanda energetica annuale e degli errori relativi sulla domanda di riscaldamento e raffrescamento ancora più elevati (tabella 30). In particolare l'errore maggiore sulla domanda di riscaldamento si commette per l'esposizione SO-SE, mentre su quella di raffrescamento per l'esposizione NO-NE.

RELAZIONE TRA PARAMETRI MORFOLOGICI E CONTRIBUTO INDIRETTO

La variazione della domanda energetica in funzione dell'isola di calore conferma la rilevanza energetica del contributo "indiretto" della morfologia urbana sulla domanda energetica.

Data l'esistenza di una relazione tra la densità dell'edificato e l'isola di calore prodotta, è possibile individuare una relazione tra la densità dell'edificato e la variazione della domanda energetica derivante dal corrispondente effetto di isola di calore.
A tal fine, la variazione della domanda prodotta dall'effetto dell'isola di calore è stata posta in relazione ai due indici morfologici più significativi: il rapporto di copertura (purb) ed il rapporto di facciata (VHurb). La figura 139 riporta l'andamento della domanda energetica (media delle quattro esposizioni) in funzione dei parametri morfologici dei casi di studio. La relazione tra la riduzione della domanda di riscaldamento e l'incremento del grado di densità, sia "orizzontale"

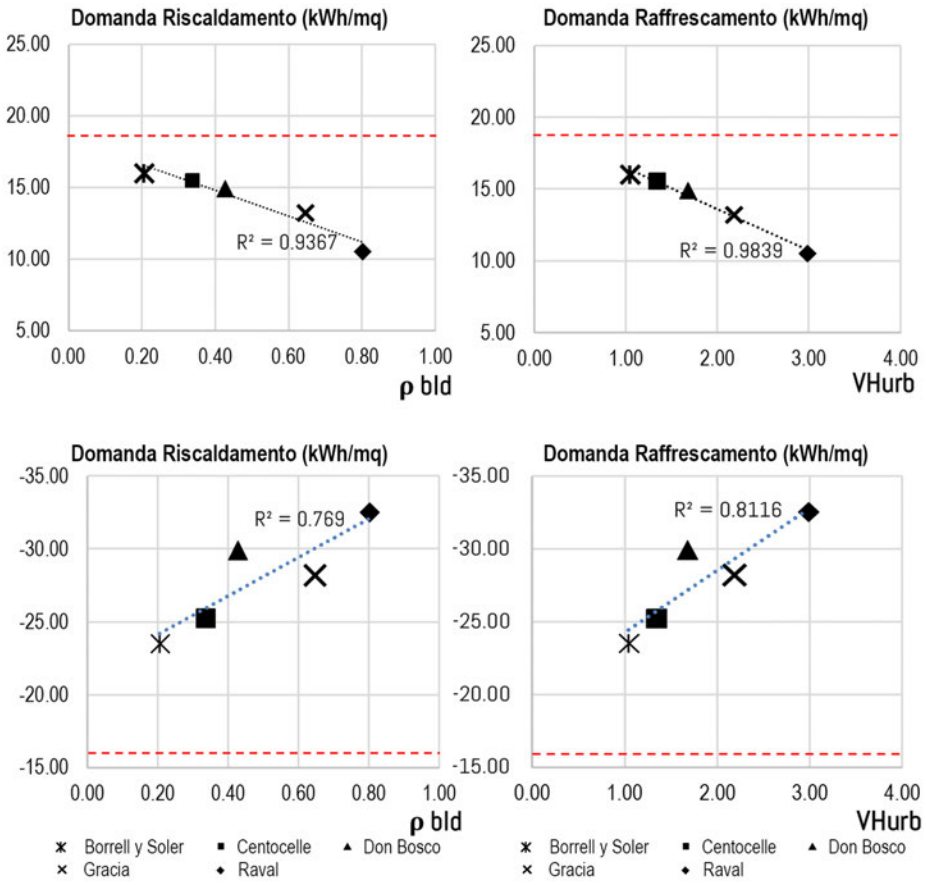


Figura 139 Parametri morfologici e effetto indiretto sulla domanda energetica. La linea rossa tratteggiata rappresenta la domanda calcolata con le temperature rurali. Gli indicatori corrispondono alla domanda energetica media al variare dell'effetto dell'isola di calore, calcolato con UWG per ciascun caso di studio.

che "verticale" è lineare e risulta affidabile (r^2=0.9). Per quanto riguarda l'incremento della domanda estiva, invece, risulta più affidabile la relazione con il parametro Vhurb (r^2=0.81) rispetto a ρurb (r^2=0.77). Tale differenza dipende dal fatto che l'isola di calore estiva dipende in misura maggiore dalla densità di superfici verticali, mentre quella invernale dal rapporto di copertura.

Esiste pertanto una relazione piuttosto chiara tra la performance energetica dell'edificato e la densità del tessuto edilizio, quando si tiene in conto dell'effetto di isola di calore indotto. Tale effetto cresce linearmente con l'incremento della densità del tessuto, determinando un incremento della domanda di raffrescamento e una riduzione della domanda di riscaldamento.

6.2.3 Morfologia urbana e contributo diretto

La figura 140 mostra la variazione della domanda energetica estiva ed invernale in funzione di una riduzione teorica della radiazione incidente, dall'80% al 20% della radiazione totale disponibile (latitudine di Ciampino). Analogamente la figura 141 illustra i risultati delle simulazioni energetiche S_2, eseguite collocando l'appartamento di riferimento nei modelli tipologici dei 5 casi di studio. La percentuale di riduzione della radiazione incidente per ciascun caso di studio è stata valutata comparando i guadagni solari dell'appartamento inserito nei differenti contesti urbani, collocato al primo piano, rispetto a quelli ottenuti senza la presenza del contesto stesso.

L'analisi di sensibilità mostra che la riduzione della radiazione incidente assume un peso differente sulla domanda energetica a seconda dell'esposizione considerata, determinando variazioni massime per l'esposizione SO-SE e minime per quella NO-NE, sia in inverno che in estate.

L'esposizione SO-SE gode dei massimi apporti termici solari durante tutto l'arco dell'anno,

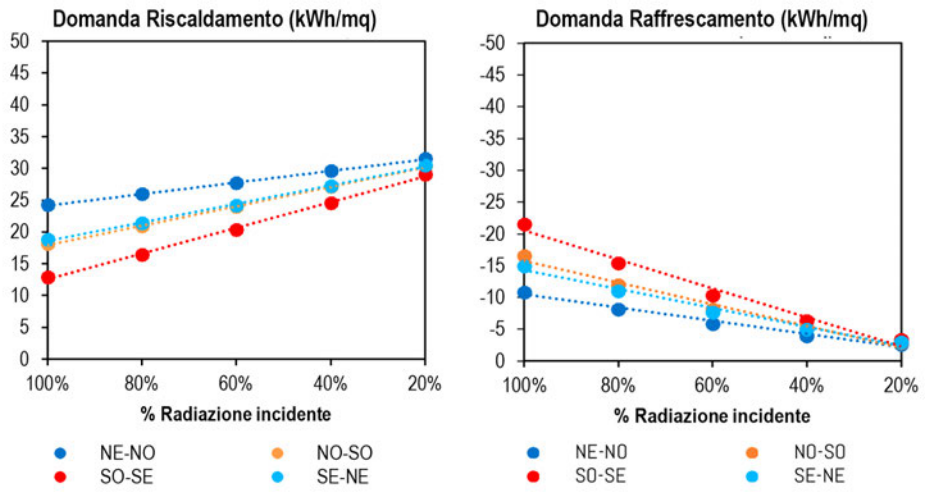


Figura 140 Analisi di sensibilità della domanda energetica in funzione di una riduzione teorica della radiazione solare incidente

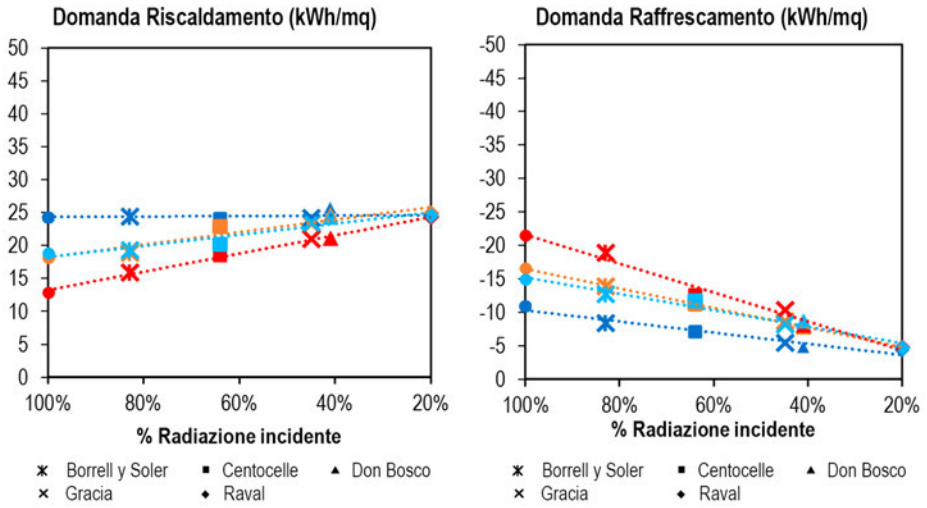


Figura 141 Variazione della domanda energetica in funzione dell'ostruzione della radiazione determinato dalla morfologia dei 5 casi di studio.

Tabella 31 Ostruzione della radiazione determinato dalla morfologia dei 5 casi di studio per l'appartamento posto al primo piano

Riduzione della radiazione incidente determinata dal contesto					
	Borrel	**Centocelle**	**Don Bosco**	**Gracia**	**Raval**
Percentuale di radiazione incidente	83%	64%	41%	45%	20%

pertanto una riduzione della radiazione incidente per effetto del contesto urbano determina una variazione consistente del suo bilancio energetico. Al contrario, l'esposizione NO-NE, pur in assenza di ostruzioni urbane, riceve una quantità di radiazione molto bassa sia in inverno che in estate; la sua domanda energetica finale risulta quindi meno influenzata dal grado di ostruzione determinato dal contesto urbano.

Analizzando i risultati dei casi di studio (simulazioni S_2) tale comportamento è ancora più evidente.

Per l'orientamento NE-NO, la variazione della radiazione incidente determinata dal contesto urbano non comporta alcuna variazione della domanda energetica per il riscaldamento, che per questa esposizione risulta governata dalle temperature esterne piuttosto che dalla radiazione solare. Al contrario, per l'esposizione SO-SE, la differenza della domanda di riscaldamento di un edificio isolato rispetto ad un edificio nel contesto morfologico del Raval (maggior grado di ostruzione tra i casi di studio) comporta un incremento della domanda da 12,9 kWh/mq a 24,4 kWh/mq. Allo stesso tempo, in estate l'ostruzione della radiazione solare risulta molto influente per l'esposizione SO-SE, determinando una riduzione della domanda di raffrescamento da 21,5 kWh/mq a 4,8 kWh/mq nel contesto morfologico di Raval. Anche per l'esposizione NO-NE un aumento del grado di ostruzione comporta un beneficio sulla domanda estiva, da 10,9 kWh/mq a 4,4 kWh/mq.

Contributo diretto della morfologia urbana sulla domanda energetica: risultati dei casi di studio									
	RISCALDAMENTO (KWh/mq)			RAFFRESCAMENTO (KWh/mq)			DOMANDA ANNUALE (KWh/mq)		
	Senza Contesto	Con Contesto	Er %	Senza Contesto	Con Contesto	Er %	Senza Contesto	Con Contesto	Er %
NO-NE									
Borrel	24.3	24.46	-1%	-10.91	-8.52	28%	35.21	32.98	7%
Centocelle	24.3	24.09	1%	-10.91	-7.14	53%	35.21	31.23	13%
Gracia	24.3	24.24	0%	-10.91	-5.52	98%	35.21	29.76	18%
Don Bosco	24.3	25.71	-5%	-10.91	-4.74	130%	35.21	30.45	16%
Raval	24.3	24.2	0%	-10.91	-4.4	148%	35.21	28.6	23%
NO-SO									
Borrel	18.16	18.96	-4%	-16.61	-13.94	19%	34.77	32.9	6%
Centocelle	18.16	22.92	-21%	-16.61	-11.21	48%	34.77	34.13	2%
Gracia	18.16	23.36	-22%	-16.61	-8.82	88%	34.77	32.18	8%
Don Bosco	18.16	24.67	-26%	-16.61	-7.83	112%	34.77	32.5	7%
Raval	18.16	24.95	-27%	-16.61	-4.7	253%	34.77	29.65	17%
SO-SE									
Borrel	12.94	16.04	-19%	-21.56	-18.97	14%	34.5	35.01	-1%
Centocelle	12.94	18.44	-30%	-21.56	-12.63	71%	34.5	31.07	11%
Gracia	12.94	21.08	-39%	-21.56	-10.46	106%	34.5	31.54	9%
Don Bosco	12.94	21.13	-39%	-21.56	-8.09	167%	34.5	29.22	18%
Raval	12.94	24.4	-47%	-21.56	-4.81	348%	34.5	29.21	18%
SE-NE									
Borrel	18.84	19.36	-3%	-14.95	-12.75	17%	33.79	32.11	5%
Centocelle	18.84	20.17	-7%	-14.95	-11.75	27%	33.79	31.92	6%
Gracia	18.84	23.6	-20%	-14.95	-8.27	81%	33.79	31.87	6%
Don Bosco	18.84	24.24	-22%	-14.95	-8.7	72%	33.79	32.94	3%
Raval	18.84	24.59	-23%	-14.95	-4.75	215%	33.79	29.34	15%

Tabella 32 Variazione della domanda energetica in funzione dell'ostruzione della radiazione solare determinata dalla morfologia urbana dei 5 casi di studio. La colonna Er % indica l'errore relativo che si commette calcolando la domanda energetica omettendo la presenza del contesto urbano

L'effetto diretto della morfologia urbana sul comportamento termico dell'edificio in clima mediterraneo risulta pertanto globalmente positivo.

L'ostruzione di parte della radiazione solare incidente, permette una diminuzione della domanda annuale per tutte le esposizioni, incidendo in maniera preponderante sulla domanda energetica di raffrescamento (tabella 32). L'omissione di tale contributo comporta errori rilevanti nel calcolo della domanda energetica in clima Mediterraneo, soprattutto per le esposizioni Sud.

L'entità dell'errore rispetto al calcolo della domanda annuale è stimato fino ad un massimo del 23% ed è comparabile a quello commesso omettendo l'effetto dell'isola di calore. In questo caso, però, gli errori sulle singole domande energetiche estiva ed invernale risultano decisamente maggiori, soprattutto per quella di raffrescamento, per tutte le esposizioni considerate.

RELAZIONE TRA PARAMETRI MORFOLOGICI E CONTRIBUTO DIRETTO

La figura 142 mette in relazione la variazione della domanda energetica determinata dall'effetto diretto della morfologia urbana con i parametri morfologici purb e VHurb dei casi di studio.

L'andamento risulta esattamente opposto rispetto ai risultati per l'effetto indiretto; un aumento del grado di densità, sia orizzontale che verticale, comporta l'incremento della domanda di riscaldamento e la diminuzione di quella di raffreddamento. Le relazioni lineari risultano abbastanza affidabili per entrambi i parametri (r^2 compreso tra 0.7 e 0.8).

Alla luce di questi primi risultati, l'effetto diretto e indiretto della morfologia assumono un'intensità paragonabile in termini di variazioni energetiche indotte sull'edificato, ma contrastante per quanto riguarda "il verso" di queste variazioni.

L'errore che si commette nell'omettere l'effetto "indiretto" è una sottostima della domanda energetica annuale del 9-26% a seconda dell'intensità dell'isola di calore indotta dalla morfologia dell'edificato e dell'orientamento dell'edificio. L'omissione dell'effetto "diretto" comporta invece una sovrastima della domanda energetica, con un errore dell'ordine del 7-23%, a se-

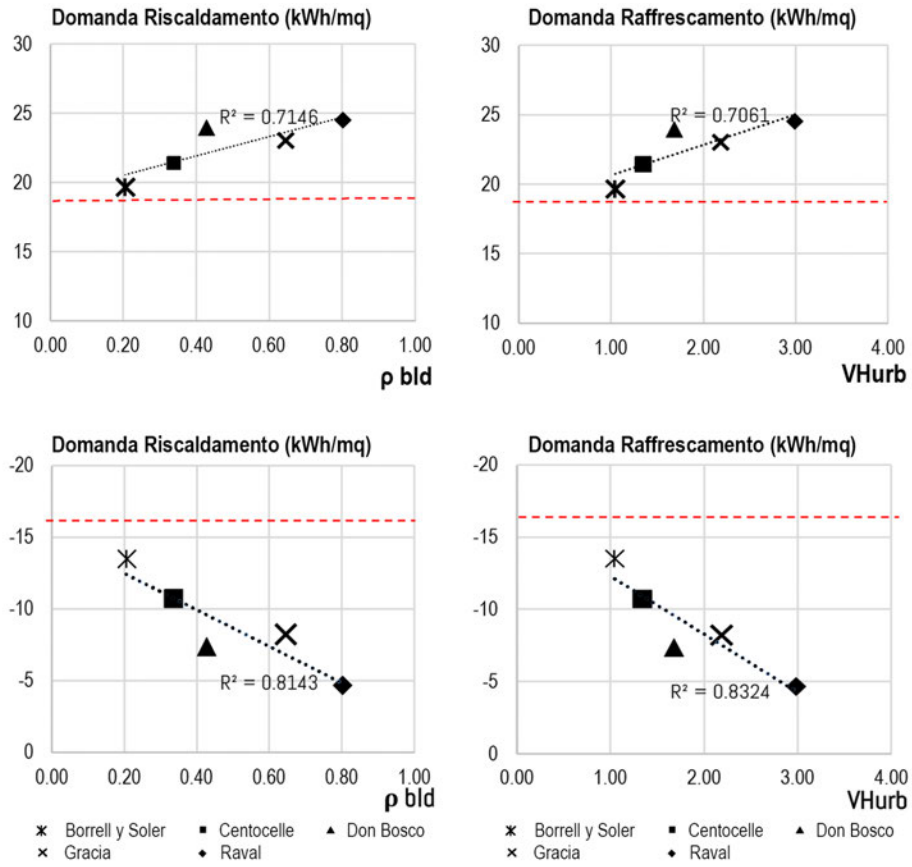


Figura 142 Parametri morfologici e effetto diretto sulla domanda energetica. La linea rossa tratteggiata rappresenta la domanda calcolata con in assenza del contesto urbano. Gli indicatori corrispondono alla domanda energetica che ti che tiene in conto dell'ostruzione della radiazione determinata dal contesto morfologico dei 5 casi di studio, nella media delle 4 esposizioni

conda del grado di ostruzione della radiazione solare e dell'esposizione considerata. Gli errori relativi alle singole domande energetiche invernali ed estiva sono decisamente più rilevanti in entrambi i casi.
Per ottenere una stima attendibile della performance energetica alla scala del tessuto edilizio occorre pertanto considerare entrambi gli effetti.

6.2.4. Morfologia urbana e contributo globale

Il contributo globale della morfologia urbana nella determinazione della domanda energetica è stato valutato attraverso il set di simulazioni S_3, che tiene in conto simultaneamente dell'ostruzione della radiazione solare mediante la modellazione del contesto urbano e dell'isola di calore indotta dalla morfologia dei 5 casi di studio. Il risultato delle simulazioni per ciascuna esposizione è riportato nella tabella 33, in comparazione con la domanda energetica calcolata senza la presenza del contesto urbano e senza l'effetto dell'isola di calore (S_0).

La domanda energetica risultante per ciascun caso di studio è stata messa in relazione ai due parametri morfologici principali: il rapporto di copertura ed il rapporto di facciata (figura 143). I punti, uno per ciascun caso di studio, individuano il valore medio della domanda rispetto alle 4 esposizioni studiate.
Pertanto i grafici sono rappresentativi della variazione della domanda energetica di un edificio mediamente orientato in funzione della morfologia del tessuto in cui si trova inserito, in considerazione dell'effetto diretto e indiretto prodotto dalla densità del tessuto stesso. La linea rossa tratteggiata rappresenta la domanda energetica per un edificio isolato e fuori dal contesto urbano (simulazione S_0), che pertanto non risente di nessuno dei due effetti energetici legati alla morfologia urbana.

Analizzando il grafico della domanda di raffrescamento notiamo che in ambito urbano la richiesta energetica è sempre maggiore rispetto al contesto rurale, a causa della presenza dell'isola

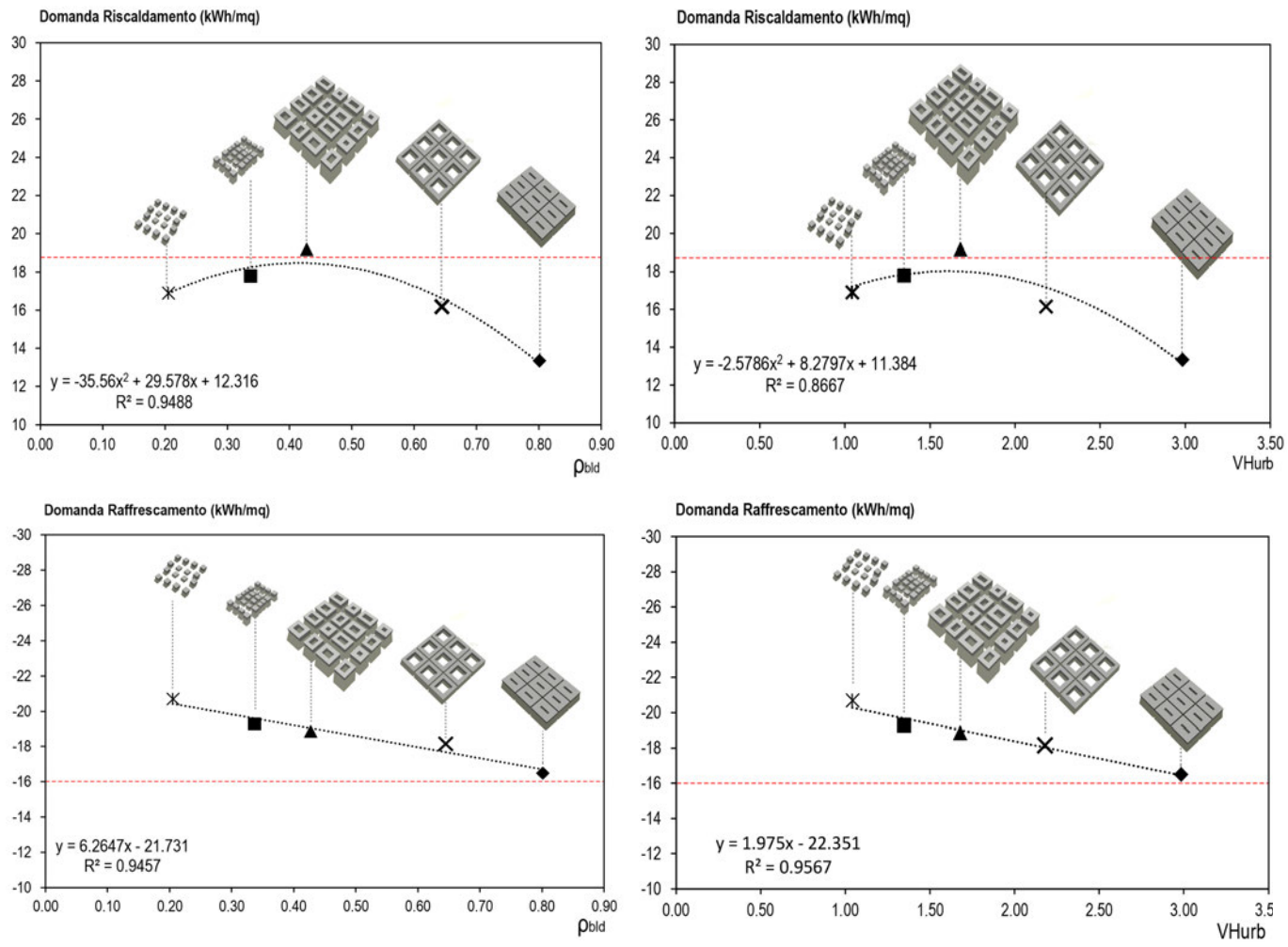


Figura 143 Variazione della domanda energetica invernale ed estiva in funzione del rapporto di copertura e del rapporto di facciata dei tessuti studiati. Risultato medio tra le 4 esposizioni

di calore. La tendenza mostra però una chiara diminuzione di tale domanda al crescere della densità del tessuto.

La relazione lineare tra la domanda di raffrescamento ed entrambi i parametri morfologici è lineare e molto accurata (r2 =0.95).

» morfologia urbana e domanda di raffrescamento

Il risultato conferma che un grado di densità elevato risulta benefico nel clima Mediterraneo nella stagione estiva, in quanto la riduzione degli apporti solari termici assume maggiore importanza rispetto all'aumento delle temperature per l'effetto dell'isola di calore.

Il comportamento invernale è invece diverso. La domanda energetica presenta un andamento non lineare rispetto ai parametri morfologici.

In generale la domanda di riscaldamento in ambito urbano è minore rispetto al contesto rurale, in quanto in inverno l'effetto dell'isola di calore risulta benefico. All'aumentare del grado di densità del tessuto la domanda di riscaldamento cresce, perché diminuiscono gli apporti della radiazione solare.

Intorno ai valori ρurb=0.4 e VHurb=1.6 la curva presenta un massimo; superati tali valori di densità la domanda di riscaldamento comincia a diminuire.
I valori ρurb=0.4 e VHurb=1.6 rappresentano pertanto dei valori di soglia oltre i quali l'innalzamento delle temperature dovute alla densità dell'edificato risulta benefico sulla domanda di riscaldamento, nonostante la riduzione degli apporti solari termici.

» morfologia urbana e domanda di riscaldamento

I grafici nelle figure 144 e 145 mostrano infine l'andamento della domanda energetica media annuale al variare dei parametri morfologici. Dai grafici si nota che per bassi valori di densità la domanda rimane superiore rispetto al contesto rurale. La curva di tendenza e la linea di

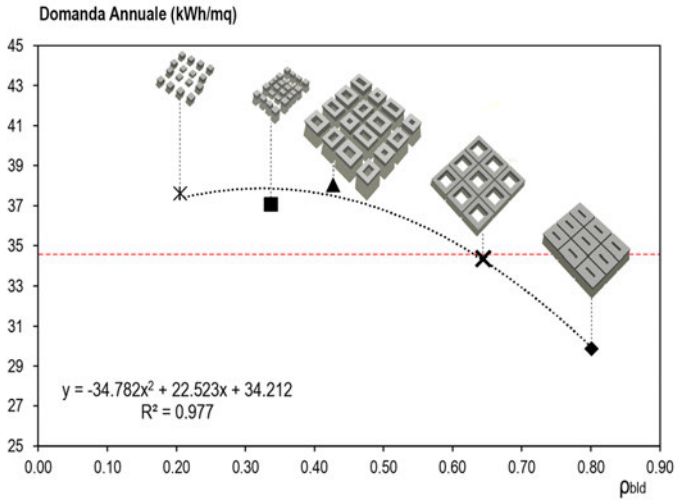


Figura 144 Variazione della domanda energetica globale in funzione del rapporto di copertura dei tessuti studiati. Risultato medio tra le 4 esposizioni

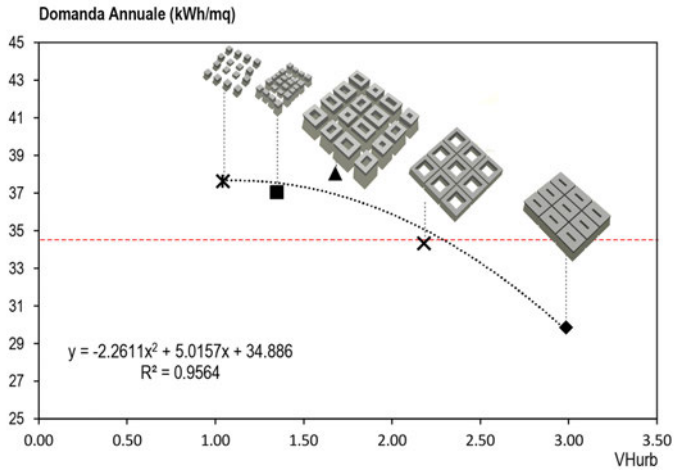


Figura 145 Variazione della domanda energetica globale in funzione del rapporto di facciata dei tessuti studiati. Risultato medio tra le 4 esposizioni

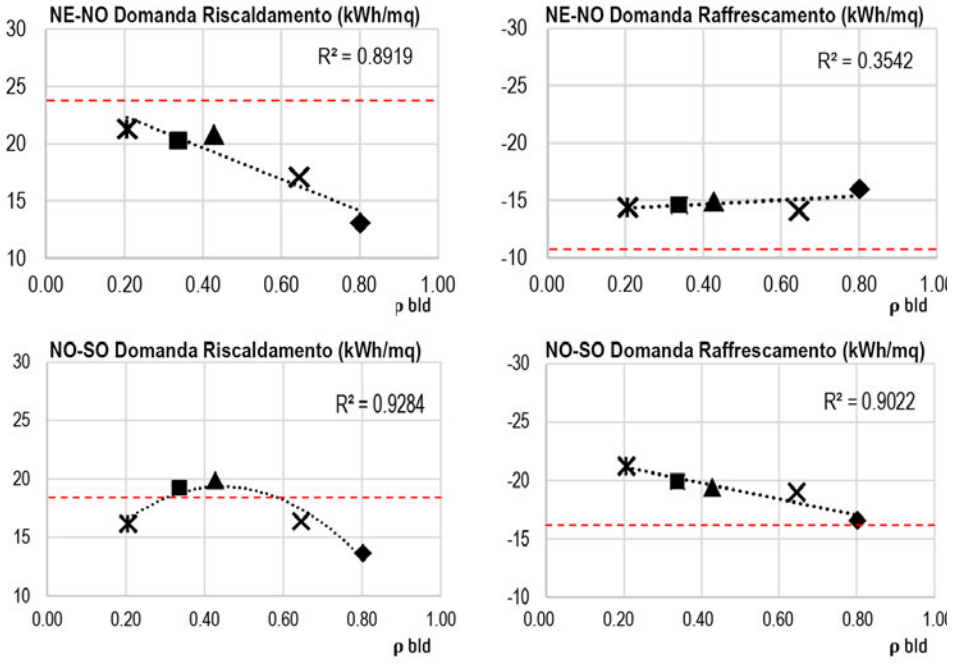


Figura 146 Parametri morfologici e effetto globale sulla domanda energetica: variazione della domanda energetica estiva ed invernale per le esposizioni Nord Est-Nord Ovest e Nord Ovest-Sud Ovest

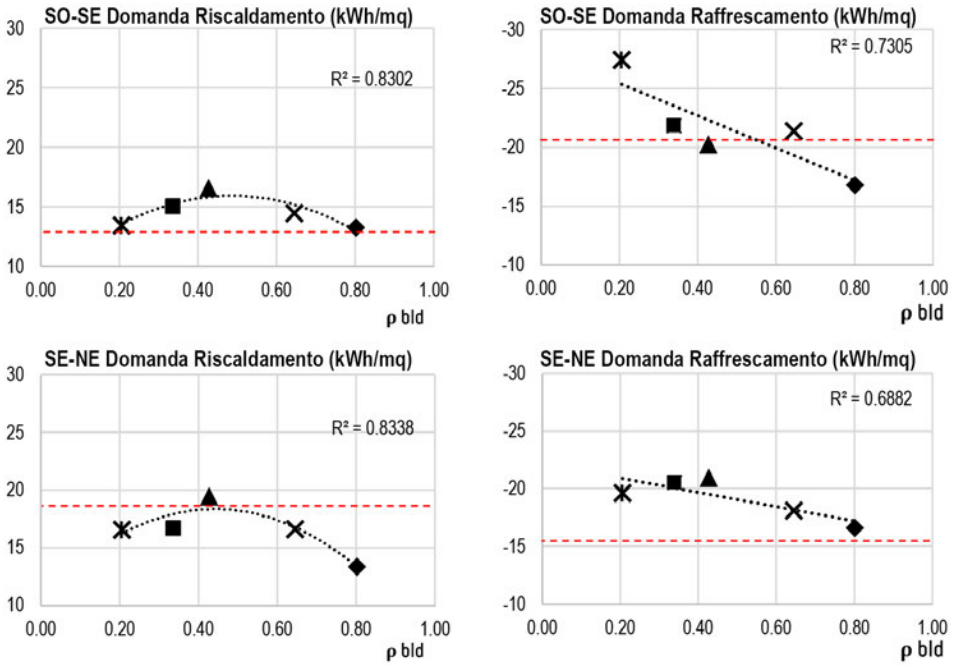


Figura 147 Parametri morfologici e effetto globale sulla domanda energetica: variazione della domanda energetica estiva ed invernale per le esposizioni Sud Ovest-Sud Est e Sud Est-Nord Est

Contributo globale della morfologia urbana sulla domanda energetica: risultati per esposizione

	DOMANDA DI RISCALDAMENTO (KWh/mq)			DOMANDA DI RAFFREDDAMENTO (KWh/mq)			DOMANDA ANNUALE (KWh/mq)		
	S_0	S_3	Er %	S_0	S_3	Er %	S_0	S_3	Er %
MEDIA									
Borrel	18.56	16.92	10%	-16.01	-20.72	-23%	34.57	37.64	-8%
Centocelle	18.56	17.77	4%	-16.01	-19.26	-17%	34.57	37.03	-7%
Gracia	18.56	16.18	15%	-16.01	-18.18	-12%	34.57	34.36	1%
Don Bosco	18.56	19.18	-3%	-16.01	-18.86	-15%	34.57	38.04	-9%
Raval	18.56	13.36	39%	-16.01	-16.51	-3%	34.57	29.87	16%
NE-NO									
Borrel	24.3	21.35	14%	-10.91	-14.44	-24%	35.21	35.79	-2%
Centocelle	24.3	20.19	20%	-10.91	-14.61	-25%	35.21	34.8	1%
Gracia	24.3	17.11	42%	-10.91	-14.17	-23%	35.21	31.28	13%
Don Bosco	24.3	20.79	17%	-10.91	-14.88	-27%	35.21	35.67	-1%
Raval	24.3	13.07	86%	-10.91	-16	-32%	35.21	29.07	21%
NO-SO									
Borrel	18.16	16.23	12%	-16.61	-21.29	-22%	34.77	37.52	-7%
Centocelle	18.16	19.21	-5%	-16.61	-19.96	-17%	34.77	39.17	-11%
Gracia	18.16	16.44	10%	-16.61	-19.02	-13%	34.77	35.46	-2%
Don Bosco	18.16	19.9	-9%	-16.61	-19.4	-14%	34.77	39.3	-12%
Raval	18.16	13.69	33%	-16.61	-16.58	0%	34.77	30.27	15%
SO-SE									
Borrel	12.94	13.48	-4%	-21.56	-27.47	-22%	34.5	40.95	-16%
Centocelle	12.94	15.03	-14%	-21.56	-21.87	-1%	34.5	36.9	-7%
Gracia	12.94	14.5	-11%	-21.56	-21.41	1%	34.5	35.91	-4%
Don Bosco	12.94	16.59	-22%	-21.56	-20.24	7%	34.5	36.83	-6%
Raval	12.94	13.28	-3%	-21.56	-16.82	28%	34.5	30.1	15%
SE-NE									
Borrel	18.84	16.6	13%	-14.95	-19.69	-24%	33.79	36.29	-7%
Centocelle	18.84	16.64	13%	-14.95	-20.6	-27%	33.79	37.24	-9%
Gracia	18.84	16.65	13%	-14.95	-18.13	-18%	33.79	34.78	-3%
Don Bosco	18.84	19.43	-3%	-14.95	-20.92	-29%	33.79	40.35	-16%
Raval	18.84	13.39	41%	-14.95	-16.64	-10%	33.79	30.03	13%

Tabella 33 Variazione della domanda energetica in funzione del contributo globale della morfologia urbana. La colonna Er % indica l'errore relativo che si commette calcolando la domanda energetica omettendo entrambi gli effetti indotti della morfologia urbana.

riferimento si incrociano ai valori di ρurb=0.63 e VHurb=2.28. Superati tali valori la domanda energetica nel contesto urbano risulta minore rispetto a quella di un contesto rurale.

» morfologia urbana e domanda energetica annuale

Ciò pertanto significa che una struttura urbana sufficientemente densa e compatta contribuisce a contenere i consumi energetici in clima Mediterraneo. Le morfologie di Raval e Gracia, ad esempio, nonostante determinino un'isola di calore estiva piuttosto elevata, risultano più efficienti rispetto a tessuti urbani poco densi e dispersi.

Analizzando i risultati per le singole esposizioni (figure 146 e 147), vale la pena sottolineare il comportamento dell'orientamento SO-SE e NO-NE. I due casi in esame rappresentano rispettivamente l'esposizione che riceve il massimo ed il minimo della radiazione solare.

Nel caso dell'esposizione NE-NO la domanda di riscaldamento si abbassa linearmente con l'incremento della densità del tessuto, risultando sempre minore rispetto al contesto rurale. Per un'esposizione che non riceve grandi apporti solari, l'incremento delle temperature per effetto dell'isola di calore risulta sempre benefico in inverno e comporta una riduzione consistente della domanda di riscaldamento. Al contrario in estate per questa esposizione non si rileva una variazione apprezzabile della domanda di raffrescamento in funzione della densità urbana e la domanda rimane sempre superiore rispetto al contesto rurale.

L'esposizione SO-SE assume il comportamento opposto; in inverno la domanda energetica risulta sempre leggermente maggiore o al più uguale all'edificio nel contesto rurale, per qualsiasi valore di densità, perché l'ostruzione di parte della radiazione solare comporta una variazione determinante nel bilancio energetico dell'edifico, che viene solo in parte compensato dal fenomeno dell'isola di calore. In estate, invece, l'incremento della densità del contesto urbano risulta molto positivo sulla domanda di raffrescamento che si abbassa sotto ai valori calcolati per il contesto rurale.

6.2.5 Commenti e conclusioni

L'esito delle simulazioni conferma l'esistenza di relazioni significative tra la densità del tessuto edilizio e la prestazione energetica dell'edificato. L'ipotesi che la morfologia urbana influenzi in maniera sostanziale la performance energetica dell'edificato mediante effetti diretti e indiretti è pertanto confermata.

L'effetto diretto e indiretto determinano variazioni della domanda energetica comparabili come entità, ma diverse come risultato.

L'errore che si commette nell'omettere l'effetto "indiretto" è una sottostima della domanda energetica annuale del 9-26% a seconda dell'intensità di isola di calore indotta dalla morfologia dell'edificato e dell'orientamento dell'edificio. L'omissione dell'effetto "diretto" comporta invece una sovrastima della domanda energetica, con un errore dell'ordine del 7-23%, a seconda del grado di ostruzione della radiazione solare incidente e dell'esposizione considerata.

I risultati conseguiti hanno inoltre dimostrato l'esistenza di leggi di variazione affidabili della domanda energetica estiva ed invernale in funzione dei parametri morfologici più significativi: il rapporto di copertura ed il rapporto di superficie verticale.

L'effetto diretto e indiretto della morfologia urbana sul comportamento energetico dell'edificato tendono a bilanciarsi nei tessuti della città compatta Mediterranea.

Un grado di densità medio o alto consente infatti di beneficiare dell'isola di calore invernale, ma garantendo una riduzione della domanda di raffrescamento grazie all'ostruzione della radiazione solare.
La predominanza di tali effetti benefici si raggiunge al superamento di valori di soglia dei parametri morfologici, e rispettivamente per valori del rapporto di copertura superiori a 0.4 e del rapporto di facciata superiore a 1.6.

In definitiva, sebbene in ambito urbano nella maggioranza dei casi la domanda energetica risulti maggiore rispetto a quella di un contesto rurale, tuttavia l'incremento della densità e della compattezza del tessuto contribuiscono ad una diminuzione dei dispendi energetici.

L'utilità e l'originalità delle analisi presentate consiste nell'aver quantificato in maniera parametrica l'incidenza della morfologia e della densità dei tessuti edilizi sulla domanda energetica, analizzando l'effetto dell'ostruzione della radiazione solare ma anche dell'isola di calore, che difficilmente viene presa in considerazione in studi analoghi.

Sulla base delle relazioni individuate è possibile finalmente affermare che una conformazione densa e compatta dell'edificato garantisce un comportamento energetico efficiente in clima Mediterraneo, nonostante l'incidenza negativa dell'isola di calore.

DesignBuilder Software. (2014). ANSI / ASHRAE Standard 140-2007 Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests. DesignBuilder Version 4.2 (incorporating EnergyPlus version 8.1.0). Retrieved from http://www.designbuilder.co.uk/component/option,com_docman/task,cat_view/gid,20/Itemid,30/

DesignBuilder Software. (2014). DesignBuilder SBEM Training Manual. Retrieved from http://www.designbuilder.co.uk/component/option,com_docman/task,cat_view/gid,20/Itemid,30/

EnergyPlus Engineering Reference. The Reference to EnergyPlus Calculations. (2013). Retrieved from https://energyplus.net/documentation

Ministerio de Fomento. Gobierno de España. (2007). Documento Básico HE. Ahorro de energía, 1–129.

Santamouris, M. (2014). On the energy impact of urban heat island and global warming on buildings. *Energy and Buildings*, *82*, 100–113. doi:10.1016/j.enbuild.2014.07.022

CAPITOLO 7

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

CONCLUSIONS AND FUTURE INVESTIGATION

SINTESI DEI RISULTATI

La tesi di dottorato ha indagato le relazioni tra morfologia urbana, isola di calore e domanda energetica nella città Mediterranea, con l'obiettivo di individuare metodologie e parametri di analisi che permettano una valutazione efficace e speditiva delle ripercussioni energetiche e climatiche tra l'interno e l'esterno dell'edificio. I risultati conseguiti si basano su analisi sperimentali e modellazioni che riguardano due ambiti principali di indagine: l'intensità dell'isola di calore nel contesto Mediterraneo e le relazioni, dirette o indirette, tra i caratteri morfologici dei tessuti edilizi e le loro prestazioni, espresse per mezzo di indici energetici e climatici.

» L'ISOLA DI CALORE NEL CONTESTO MEDITERRANEO

L'analisi sperimentale dell'isola di calore è stata condotta a Roma e Barcellona, analizzando il fenomeno alla scala locale e alla *microscala*. Alla scala locale il fenomeno è stato studiato comparando le temperatura misurate presso stazioni meteorologiche rurali e urbane, collocate rispettivamente negli aeroporti e in quartieri centrali delle due città.

Nel *substrato di rugosità* si rileva un'intensità di isola di calore maggiore durante i mesi invernali piuttosto che estivi, in entrambe le città. L'intensità media massima invernale si presenta durante la notte e raggiunge 2.8°C a Barcellona e 2.4°C a Roma, mentre in estate si attesa su 1.7°C a Barcellona e 1.6°C a Roma. Le due città pertanto assumono un comportamento climatico analogo, che rispecchia le somiglianze in termini di latitudine e prossimità al mare. La minore intensità dell'isola di calore estiva nel *substrato di rugosità* deriva, infatti, dall'effetto benefico della brezza marina che riguarda entrambe le città, e Barcellona in modo particolare. L'andamento delle temperature urbane risulta inoltre influenzato dalla morfologia e densità dell'edificato, presentandosi in maniera più marcata nel quartiere Raval rispetto a Gracia.

L'analisi dell'isola di calore alla *microscala*, basata su misurazioni effettuate alla quota stradale, ha rivelato una differenza sostanziale delle temperature nel canyon urbano rispetto a quelle rilevate al di sopra dell'altezza media dei tetti; al livello stradale, le temperature sono significativamente più alte durante le ore più calde della giornata, soprattutto in estate. A Roma, a Via Arenula, si registra un'isola di calore media massima estiva di 4.5 °C per l'anno di riferimento; analogamente a Barcellona, durante la campagna di misurazione, si osserva un'intensità massima di isola di calore di 4.3°C. L'incremento delle temperature alla quota stradale è da imputarsi all'effetto del *trapping radiativo*, sia diurno che notturno, alla vicinanza a fonti di calore antropogenico e, soprattutto, alla ridotta velocità del vento rispetto alla quota dei tetti.

Alla *microscala*, inoltre, si rileva una maggiore dipendenza delle temperature rispetto alla geometria del canyon. Le misurazioni effettuate in un campione di canyon urbani con rapporti di verticalità e orientamento differente ha individuato un andamento giornaliero delle temperature diverso nei canyon con alto rapporto di verticalità (H/W maggiore di 3) rispetto ai canyon più larghi (H/W minore di 2). Nonostante la differente quantità di radiazione solare ricevuta durante il giorno, e indipendentemente dall'orientamento, nei canyon urbani con rapporto di verticalità alto si registra la massima intensità dell'isola di calore notturna.

I risultati discussi riguardano un solo anno di riferimento per ciascuna stazione meteorologica considerata, pertanto non possono essere considerati come medie climatiche statisticamente rilevanti per le due città. Tuttavia, forniscono una misura attendibile del comportamento climatico delle aree urbane considerate e un'indicazione della consistenza del fenomeno, al fine della valutazione delle conseguenze energetiche per l'edificato.

» MORFOLOGIA E PRESTAZIONE CLIMATICA

La variabilità spaziale del fenomeno in funzione della morfologia dei tessuti edilizi è stata analizzata attraverso analisi con il modello Urban Weather Generator. Lo strumento si presta ad uno studio comparativo della prestazione climatica dei tessuti urbani in quanto considera una parametrizzazione della morfologia urbana fondata su tre indici: il rapporto di copertura, che indica il grado di compattezza dell'edificato, l'altezza media degli edifici, ed il rapporto di superficie verticale, che dà una misura della proporzione delle superfici verticali dell'involucro rispetto all'area occupata dall'edificio.

SUMMARY OF FINDINGS

This dissertation investigates the relationship between urban morphology, heat island and energy demand in Mediterranean cities, and intends to define methods and descriptors that allow for a practical and effective assessment of the energetic and climatic interactions between outdoors and indoors within the built environment. The results are stemmed from experimental work and computational modelling which probe two research questions: the intensity of the urban heat island effect in the Mediterranean context and the relationships, either direct or indirect, between the morphology of the urban textures and their performances, by means of energetic and climatic descriptors.

The experimental analysis of the urban heat island (UHI) has been carried out in Rome and Barcelona, considering the effects at the local scale and at the microscale. As regards the former, the UHI effect has been assessed by comparing the measured temperatures as recorded by weather stations located in rural and urban areas, namely airports and central districts respectively.

A greater intensity of the heat island is recorded during the winter rather than the summertime within the *roughness sublayer*, for both the cities. The average maximum intensity in winter occurs during the night, reaching 2.8 °C in Barcelona and 2.4 °C in Rome. Conversely, the corresponding value in summer is 1.7 °C in Barcelona and 1.6 °C in Rome. The two cities hence reflect a similar climatic behaviour with respect to the heat island effect, determined by the same latitude and common proximity to the sea. The small intensity of the heat island within the *roughness sublayer* is determined indeed by the beneficial effect of the sea breeze, especially in Barcelona. The trend of the urban temperatures is also affected by the morphology and density of the buildings fabric, a representative example of which is given by the different temperatures recorded in the district of Raval as opposed to Gracia.

The analysis of the UHI at the microscale, based on measurements taken at the ground level, reveals sensibly different temperatures within the urban canyon as opposed to those measured above the average height of the buildings' roofs; at the ground level temperatures are notably higher during the warmest hours of the day, with particular regards to summer. In Via Arenula, Rome, an average maximum intensity of 4.5 °C was recorded in summer, with respect to the reference year. Similarly, in Barcelona, a corresponding value of 4.3 °C was measured during the fieldwork. The increase of the temperature at the ground level is due to the radiation trapping, during both day time and night time, the vicinity to anthropogenic heat sources and, particularly, to the reduced wind speed as compared to the one at the roofs height.

The analysis at the microscale also revealed a greater dependence of the urban temperature trend on the canyon's geometry. Sample measurements taken in different urban canyons, characterised by various height-to-width ratios and orientations, revealed a different trend in temperatures for those canyons with a height-to-width ratio greater than three, as opposed to the equivalent trend for those with a height-to-width ratio smaller than two. The highest intensities of the UHI during night time occur in the urban canyons with greater height-to-width ratio, despite being exposed to a different amount of solar radiation during the day and regardless of the orientation.

Since the reference time period is limited to one year of observations for each weather station, the limited statistical power of the results suggests not to consider them as climatic averages for the two cities. However, data provide useful insights on the climatic behaviour of the two urban areas as well as on the quantitative evaluation of the UHI intensity, to the purpose of assessing the energy consequences on the built environment.

The spatial variability of the UHI intensity as a function of the urban texture's morphology has been analysed by means of the model Urban Weather Generator. This tool appears to be particularly suitable for comparative analysis of the climatic performance of the urban textures

I tre parametri sono pertanto utili a descrivere la morfologia dei tessuti urbani in termini di densità di superfici, ma forniscono anche indicazioni rispetto alla forma e alla tipologia edilizia prevalente nell'area urbana di riferimento. A informazioni di tipo quantitativo, pertanto, è possibile associare anche valutazioni di tipo qualitativo sulla prestazione climatica corrispondente a differenti conformazioni fisiche e tipologiche dell'edificato.

La regressione lineare multipla, applicata a un idoneo campione di risultati delle simulazioni, ha consentito di individuare la relazione tra i tre parametri morfologici e l'isola di calore media massima estiva ed invernale. Tali relazioni permettono una valutazione comparativa della prestazione climatica alla scala locale che, sulla base delle analisi di sensibilità condotte, risulta fortemente influenzata dai caratteri morfologici dell'edificato rispetto alle altre variabili urbane.

L'aspetto più interessante dei risultati ottenuti è costituito dalla prova dell'esistenza di una relazione tra la densità del tessuto edilizio e l'isola di calore corrispondente, che assume un andamento variabile durante l'anno.
Sono state individuate due relazioni distinte per l'isola di calore estiva ed invernale, entrambe piuttosto accurate (r^2 rispettivamente pari a 0.87 e 0.81).

» RUOLO DELLA DENSITÀ ORIZZONTALE E VERTICALE

L'interpretazione dei risultati ha evidenziato che esistono due "tipi" di densità che risultano determinanti nell'incremento delle temperature urbane: la densità orizzontale e la densità verticale.

La densità orizzontatale è proporzionale al rapporto di copertura, mentre la densità verticale è proporzionale al rapporto di superficie verticale e all'altezza media degli edifici.

Nella situazione invernale, un incremento della densità orizzontale determina un innalzamento significativo dell'isola di calore, mentre le variazione indotte dall'incremento degli altri parametri risultano molto meno significative. In particolare, per valori del rapporto di copertura inferiori a 0.5, l'isola di calore invernale è piuttosto debole. Superata tale soglia, un incremento del valore del rapporto di copertura comporta un innalzamento significativo dell'isola di calore, quasi indifferentemente dal valore assunto dagli altri parametri.

Nel caso estivo i parametri di densità verticale assumono invece maggiore importanza rispetto alla densità orizzontale.
La relazione tra i tre parametri morfologici e l'isola di calore estiva individua, infatti, una chiara gerarchia di rilevanza. Il parametro che risulta determinante è il rapporto di superficie verticale; a seguire si colloca l'altezza media degli edifici ed, infine, il rapporto di copertura.

E' pertanto la "densità" di superfici verticali presenti nell'area urbana di riferimento che governa l'andamento delle temperature urbane nella stagione estiva.
Ciò avviene perché le aree urbane caratterizzate da alti valori di densità verticale corrispondono a tessuti strutturati su una rete stradale molto fitta, composti da una tipologia edilizia a elevato sviluppo verticale in proporzione all'impronta a terra; tale conformazione ottimizza la captazione della radiazione solare e favorisce l'immagazzinamento del calore durante il giorno, determinando temperature più elevate durante la notte, quando il calore viene lentamente rilasciato verso la volta celeste.

La densità orizzontale del tessuto, invece, assume più rilevanza durante l'inverno, quando la radiazione solare è meno intensa e l'isola di calore risulta più dipendente dalla quantità di calore antropogenico associato al riscaldamento degli edifici. La compattezza dell'edificato, in questa situazione, contribuisce a mantenere il calore nella *canopia urbana*, determinando un'intensità dell'isola di calore tanto più elevata quanto più è elevato il rapporto di copertura degli edifici nell'area di riferimento.

I diversi studi che, fino ad ora, hanno considerato la relazione tra l'isola di calore e la geometria urbana si sono concentrati su un solo parametro geometrico, quale lo Sky View Factor o il rapporto di verticalità del canyon. Questo tipo di relazione risulta tuttavia poco significativa per essere applicata al campo della progettazione e pianificazione urbana, in quanto utilizza

as it involves a parameterization of the urban morphology based on three descriptors: the “site coverage ratio”, that describes how close buildings are built in the urban area, the “average building height” in the area and the “Façade to site ratio”, the latter of which gauges the ratio of the vertical surface area to the urban plan area. Besides the evident information given by the three parameters in terms of surfaces density, they also contribute to further describe the typical shape and building type of a reference neighbourhood. Consequently, the qualitative characters of the urban areas can be readily enhanced with quantitative data relating the corresponding climatic performances.

A statistical analysis has been implemented on a representative sample of the simulation results. The relationship between the average maximum heat island, for both summer and winter time, and the three aforementioned parameters has been established through multiple linear regression analysis. This relationship allows for a comparative assessment of the energetic performance at the local scale, which has been shown to be more dependent on the morphological features of the building fabric than other urban factors.

The most interesting outcome of the analysis is represented by the proof of the tight relationship between the density of the urban texture and the corresponding heat island intensity, which varies significantly over the year. The power of the statistical inference resulted sufficiently high for both the summer and the winter heat island, with a coefficient of determination equal to 0.87 and 0.81 respectively.

The results led to the identification of two types of density strongly affecting the trend of temperatures, namely the horizontal density and the vertical density

The horizontal density is proportional to the site coverage ratio, whereas the vertical density to the façade-to-site ratio and to the average building height.

In winter time, as the horizontal density increases it determines a notable rise of the heat island, whereas the effects provoked by similar variations of the others parameters are negligible. Specifically, for values of the site coverage ratio smaller than 0.5, the heat island effect for winter results rather weak. Above this threshold, any increases of the site coverage ratio would result in a significant increase of the heat island, pretty much regardless of the values of the other parameters.

Conversely, during the summer, vertical density parameters become more important than the horizontal density one.

The established relationship between the morphological parameters and the heat island during summertime identifies indeed a precise hierarchy of significance. The most determinant parameter is the façade-to-site ratio, followed by the average building height and finally the site coverage ratio.

Therefore, the “vertical density” of the reference urban area rules the trend of temperatures during summertime. This is a consequence of the dense urban areas structured upon a cramped roads layout. The building type peculiar of these urban areas is characterized by a notable vertical surface compared to its footprint. This conformation optimizes the capture of solar radiation and allows for heat storage during the day. This in turn provokes higher temperatures at night time as the stored heat scatters slowly back towards the sky.

The considerable body of literature that has investigated the relationship between heat island and urban geometry so far, mostly focused on a single geometrical parameter such as the Sky View Factor or the height-to-width ratio of the urban canyon. This kind of relationship though has not resulted significant enough to be appropriate for the fields of architectural design and urban planning, as these parameters cannot describe solely by themselves the complex structure of a urban area.

The novelty of this study hence consists in the identification of a new parameterisation system able to characterise the three-dimensional morphology of the urban textures and to assess the

parametri che, da soli, non sono sufficienti a descrivere la conformazione di un tessuto urbano.

» STRUMENTI SPEDITIVI DI ANALISI DELLA PERFORMANCE CLIMATICA

L'originalità del lavoro di ricerca consiste pertanto nell'aver identificato un nuovo sistema di parametrizzazione, idoneo a caratterizzare la morfologia tridimensionale del tessuto edilizio e ad associarne la prestazione in termini di isola di calore, estiva ed invernale.

In tal modo è possibile effettuare valutazioni speditive e comparative dell'intensità di isola di calore nei differenti tessuti urbani della città, sulla base di pochi parametri morfologici utili a caratterizzare la consistenza dell'edificato.
I parametri morfologici individuati permettono pertanto una classificazione della morfologia urbana rispetto alla sua prestazione climatica, favorendo l'azione di decisori e pianificatori nell'individuazione degli ambiti prioritari di intervento per la mitigazione delle temperature nelle aree urbane.
In ambito progettuale e alla scala architettonica, sono utili a valutare l'effetto della morfologia del contesto sul microclima locale, che costituisce un dato di input rilevante per l'individuazione di strategie passive di riduzione dei consumi per l'edificato.

» MORFOLOGIA E PERFORMANCE ENERGETICA

Utilizzando lo stesso tipo di approccio è stata analizzata la prestazione energetica dei tessuti edilizi in clima Mediterraneo. L'analisi è stata condotta mediante simulazioni con il software EnergyPlus, prendendo un edificio residenziale a riferimento.

La morfologia dei tessuti urbani contribuisce a determinare la domanda energetica di ciascun edificio attraverso due effetti: uno diretto, dovuto alla parziale ostruzione della radiazione solare, uno indiretto legato all'intensità dell'isola di calore determinata dalla morfologia urbana.

I due effetti comportano esiti contrastanti sulla prestazione energetica nel clima Mediterraneo. Da un lato un tessuto urbano denso determina un'isola di calore consistente, che risulta positiva sulla domanda di riscaldamento ma negativa su quella di raffrescamento.
Dall'altro l'ostruzione della radiazione solare dovuta alla densità del tessuto si traduce in una diminuzione degli apporti solari termici all'interno degli edifici, che comporta una diminuzione della domanda di raffrescamento ma un incremento di quella di riscaldamento.

» CONTRIBUTO INDIRETTO

L'effetto dell'isola di calore risulta globalmente negativo sulla domanda energetica nel clima Mediterraneo; per ciascun grado di aumento delle temperature urbane si stima una diminuzione della domanda di riscaldamento media del 16% ed un incremento della domanda di raffrescamento del 27% rispetto al calcolo della domanda considerando le temperature dell'aeroporto. L'incremento assoluto della domanda di raffrescamento risulta pertanto più oneroso del risparmio energetico invernale, determinando un innalzamento significativo della domanda annuale anche a fronte di pochi gradi di aumento delle temperature esterne. L'errore che si commette nell'omettere tale contributo è una sottostima della domanda energetica annuale del 9-26% a seconda dell'intensità di isola di calore presente e dell'orientamento dell'edificio considerato.

» CONTRIBUTO DIRETTO

Allo stesso tempo, l'ostruzione della radiazione solare che si produce in tessuti urbani densi e compatti consente una riduzione notevole della richiesta di raffrescamento, che rappresenta la quota maggiore della domanda energetica in clima Mediterraneo. La diminuzione degli apporti solari termici consente pertanto una riduzione della domanda energetica globale per un edificio in ambito urbano rispetto ad un edificio isolato, soprattutto per le esposizioni Sud-Ovest e Sud-Est che ricevono il massimo della radiazione solare a queste latitudini. L'omissione del contributo diretto della morfologia urbana nel calcolo della domanda energetica comporta quindi una sovrastima di quest'ultima, con un errore dell'ordine del 7-23%, a seconda del grado di densità del tessuto urbano e dell'esposizione considerata.

II due fenomeni precedentemente illustrati coesistono nella città compatta mediterranea e pertanto tendono ad equilibrarsi da un punto di vista energetico.

» EFFICIENZA ENERGETICA DELLA CITTÀ COMPATTA

Sulla base di modellazioni energetiche per un campione rappresentativo di tessuti urbani, tenendo in conto entrambi gli effetti, sono state individuate due differenti relazioni tra la prestazione energetica estiva ed invernale ed i parametri morfologici dei tessuti edilizi, che dimostrano un comportamento termico efficiente dei tessuti densi e compatti nel clima mediterraneo.

relating performance in terms of heat island intensity, in both summer and winter. Thus, a rapid evaluation and comparison of the heat island effect in different urban structures can be carried out on the basis of few appropriate morphological parameters.

Similarly, these parameters allow for a taxonomy of the urban morphology with regards to its climatic performance, thereby providing a valuable support for decision-making processes aimed at the definition of action plans to mitigate temperatures in the urban context.

From the design standpoint at the architectural scale, a thorough understanding of the effect of urban morphology on the local climate permits the adoption of suitable passive systems to reduce the energy consumption of the built environment.

The energy performance of the urban textures in Mediterranean context have been analyzed following the same approach, by means of numerical simulations with the software Energy Plus based on a reference building type.

The effect of the morphology of urban fabric on the energy consumption of a single building is twofold: a direct effect is due to the partial obstruction of solar radiation, whereas an indirect one is related to the induced heat island intensity.

The two effects determine contrasting outcomes as regards the energetic performance in Mediterranean climate. On the one hand, a dense urban texture entails a significant heat island intensity, the sign of which is positive for the heating demand and negative for the cooling one. On the other hand, the obstruction of the solar radiation due to the dense texture results in a constraint solar thermal supply inside the building. This in turn determines a decrease of the cooling demand and, concurrently, an increase of the heating one.

The impact of the heat island is generally detrimental to the energy demand in Mediterranean climate; when comparing urban temperatures with those recorded by airport weather stations, for every degree of temperature increase the average heating demand is estimated to decrease by 16%, and the cooling demand to increase by 27%. Therefore, the overall growth of cooling demand results costlier than the energy saving during winter, because of which even few degrees of temperature increase provoke a conspicuous rise of the yearly demand. Overlooking this contribution to the energy balance would lead to an underestimation of the annual energy demand by about 9 to 26%, depending on the heat island intensity and on the orientation of the reference building.

Notwithstanding, the obstruction of solar radiation in compact and dense urban textures accounts for a sensible reduction of the cooling demand, which represents the major part of the energetic demand in Mediterranean context. Buildings within a compact urban fabric would hence require less energy than isolated ones. Particularly, those facades oriented south west and south east would be exposed to the highest solar radiation at these latitudes. Neglecting the contribution of the urban morphology in the energy demand calculation lead to an overestimation of the latter with prediction error of 7 to 23%, depending on the density degree of the urban fabric and the expositions considered.

However, the two phenomena coexist in dense Mediterranean cities and therefore outbalance each other in terms of energy performance.

Two different relationships have been found between the energetic performance, for summer and winter, and the morphological parameters of the urban textures as resulting from energetic simulations over a representative sample of urban morphologies.

The morphological parameters and the cooling demand are linearly correlated, with a robust r^2 =0.95. The beneficial effect of a high degree of density during summer consists in the greater importance of the reduced solar radiation than the increase of the heat island. As the texture density becomes finer, the energy demand decreases linearly. However, the cooling demand of urban area is necessarily higher than the corresponding rural because of the heat island effect.

Una relazione lineare affidabile (r^2 =0.95) è stata individuata tra i parametri morfologici e la domanda di raffrescamento che dimostra che un grado di densità elevato risulta benefico nella stagione estiva, in quanto la riduzione degli apporti solari termici assume maggiore importanza in confronto all'incremento dell'isola di calore. Ad un aumento del grado di densità del tessuto corrisponde pertanto una diminuzione lineare della domanda energetica, sebbene in ambito urbano la richiesta di raffrescamento rimane sempre superiore rispetto ad un ambito rurale per la presenza dell'isola di calore.

Per quanto riguarda la domanda di riscaldamento è stata invece individuata una legge di variazione non lineare nei confronti dei parametri morfologici.
Per bassi valori di densità, la domanda di riscaldamento risulta minore rispetto ad un edificio collocato fuori dalla città, in virtù dell'effetto benefico dell'isola di calore urbana. All'aumentare del grado di densità del tessuto la domanda di riscaldamento cresce, perché la diminuzione degli apporti solari si fa più consistente. Esistono però dei valori di soglia dei parametri di densità (rapporto di copertura pari a 0.4 e rapporto di superficie verticale pari a 1.6) oltre i quali la domanda di riscaldamento torna a diminuire. Ciò perchè l'isola di calore che si produce in tessuti particolarmente densi consente un guadagno energetico più consistente rispetto alla corrispondente riduzione degli apporti solari.

I risultati del complesso delle analisi confermano pertanto che una struttura urbana sufficientemente densa e compatta contribuisce a ridurre i consumi energetici in clima Mediterraneo, abbassando la domanda sia di raffreddamento che di riscaldamento rispetto ad un edificio isolato.

È pertanto possibile affermare che un grado di densità sufficientemente alto garantisce un comportamento energetico efficiente nel clima Mediterraneo rispetto ad una configurazione del tessuto dispersa e sgranata, confermando la validità delle strategie messe in campo dall'architettura vernacolare caratteristica del contesto geografico.

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

La tesi di dottorato rafforza e conferma le capacità analitiche delle categorie "densità" e "forma" del costruito nell'ambito dell'architettura e della sostenibilità urbana. L'insieme delle analisi e delle relazioni individuate tra morfologia urbana e prestazione climatica ed energetica consente di dare una risposta all'interrogativo sotteso all'intero lavoro di ricerca:

La città densa e compatta è un modello di sostenibilità energetica nel contesto climatico Mediterraneo?

La risposta a questo interrogativo si inquadra nell'obiettivo più generale di contribuire alla definizione di un corpo di conoscenze relativo al comportamento ambientale dei sistemi urbani, che rappresenti una base scientifica su cui fondare principi e linee guida di intervento per il miglioramento delle prestazioni energetiche e del comfort della città esistente.

Tale approccio, multidisciplinare e multi-scalare, risponde a due tipi di utilità nel settore della progettazione architettonica e urbana: uno di carattere scientifico-conoscitivo, l'altra di carattere operativo.
L'urgenza e l'attualità della questione urbana e ambientale ha rinnovato l'interesse di numerosi studiosi e progettisti verso le potenzialità analitiche del concetto di densità, quale categoria di analisi del funzionamento delle realtà metropolitana. Negli ultimi anni si è infatti sempre più rafforzata l'idea per cui la città densa e compatta fosse sinonimo di città "sostenibile", sulla base di considerazioni perlopiù qualitative derivanti dall'evidenza delle implicazioni ambientali generate dall'eccessivo consumo di suolo prodotto dallo sprawl urbano. Tuttavia l'analisi quantitativa e oggettiva delle implicazioni energetiche ed ambientali connesse alla forma e alla consistenza dei tessuti che compongono la città non è stato condotto con pari rigore scientifico

As regards the heating demand, a non linear relationship has been found with respect to the morphological parameters. At low values of density, the heating demand of a urban building is less than the one of an isolated rural building, due to the beneficial effect of the heat island. As the density increases, the heating demand follows the same trend because of the progressive lack of solar radiation. However, threshold values over which the heating demand resumes to decrease have been identified in a site coverage ratio equal to 0.4 and a façade-to-site ratio to 1.6. This is due to the greater energy saving accounted for by the heat island effect triggered by particularly dense urban textures, despite the reduced contribution of solar radiation.

The results of this study confirm that a sufficiently dense and compact urban texture contributes to reduce the energy consumption in Mediterranean climate, by decreasing both the cooling and heating demand as opposed to the performance of an isolated building.

It is therefore reasonable to acknowledge the validity of the strategies adopted by the vernacular architecture, peculiar of the environmental context, on the basis of the more efficient energetic performance in Mediterranean context provided by higher degrees of density, or finer resolution, of the urban fabric.

CONCLUSIONS AND FUTURE INVESTIGATION

The present study validates the analytical significance of the categories “density” and “form” of the built environment in the context of architecture and urban sustainability. The developed set of analyses and consequent relationships between urban morphology and climatic/energetic performance permits to answer the underlying research question, which reads as follows

Is the dense and compact urban texture a role model of energetic sustainability in the **Mediterranean context?**

The research question is contextualised in the broader purpose of defining a comprehensive knowledge of the environmental performance of urban systems. This represents the scientific ground that can set the basis for principles and guidelines to inform the improvement process of energetic performance and climatic comfort of the built environment.

This multidisciplinary approach, involving multiple scales, is useful for architectural design and urban planning in a twofold way: on a scientific level and on a practical one.

The recent and urgent topic of environmental issues of urban areas has garnered the interest of many researchers and designers towards the potentiality of “density”, conceived as an analysis tool of metropolitan areas. The idea of the dense and compact city as a model of sustainability has recently consolidated, mostly because of the qualitative appraisal of the environmental issues deriving from an uncontrolled urban sprawl. Notwithstanding, a quantitative object-based analysis of the energetic and environmental entailments of urban fabrics has not been carried out with the same scientific rigour as in other disciplines studying environmental

rispetto ad altre discipline che studiano i fenomeni complessi legati all'ambiente.

La complessità dei fenomeni fisico-energetici che si instaurano alla scala urbana rappresenta un campo di analisi multidisciplinare in cui convergono domini di conoscenza specialistici che, ad oggi, risultano ancora indipendenti e slegati.
Un approccio scientifico e multidisciplinare alla questione della sostenibilità urbana deve però fondarsi sull'oggettività della misura e delle relazioni che hanno una valenza significativa nel funzionamento energetico urbano, con particolare attenzione agli aspetti tecnici ed architettonici che riguardano il settore di interesse di progettisti e decisori. L'integrazione inter-scalare tra le varie discipline che studiano i fenomeni ambientali ed urbani, adottando domini spaziali e gradi di approssimazione differenti, rappresenta pertanto la base conoscitiva indispensabile per oggettivare le conseguenze energetiche ed ambientali strettamente connesse alla "forma" e alla "densità" dell'insediamento.

In tal senso il concetto di densità e morfologia dell'edificato si configura come uno strumento utile all'analisi dei fenomeni fisici a scala locale, che rappresenta il collegamento indispensabile tra la dimensione architettonica e urbana.

I risultati raggiunti nella ricerca di dottorato dimostrano che la scala locale risulta adeguata ad individuare i parametri e le variabili che governano le relazioni energetiche tra interno ed esterno dell'edificio e consente un'effettiva integrazione delle conoscenze multidisciplinari coinvolte.

Il lavoro di tesi ha individuato un insieme di parametri morfologici e di indici energetici che relazionano e quantificano l'intensità dell'isola di calore e la prestazione energetica in funzione delle caratteristiche morfologiche dell'edificato, adottando un grado di approssimazione proporzionato alla scala locale di analisi.

Le modellazione e gli strumenti di analisi presentati consentono una valutazione oggettiva e speditiva delle prestazioni energetiche e climatiche dei tessuti edilizi, fondata su parametri di densità comunemente reperibili nella pratica della progettazione e pianificazione urbana. Le relazioni individuate coinvolgono grandezze e variabili di facile controllo per i progettisti, permettendo una effettiva integrazione delle conoscenze tra il mondo della progettazione e la ricerca nel campo della climatologia o degli studi energetici applicati all'edilizia.

Il lavoro di ricerca costituisce inoltre una base di conoscenze preliminare per lo sviluppo di un sistema di calcolo integrato che permetta di analizzare i fenomeni fisico-energetici a scala locale e le relative ripercussioni alla scala dell'edificio, colmando la carenza di strumenti di analisi adeguati a garantire l'integrazione tra i vari domini di analisi.

L'implementazione di strumenti capaci di leggere tale complessità, con un opportuno grado di approssimazione idoneo a garantirne l'applicabilità nel settore edile, è d'altra parte necessario per la definizione di linee guida di intervento che possano indirizzare le scelte dei progettisti e dei pianificatori, cui è delegato l'importante compito di contribuire alla diminuzione dell'impatto energetico ed ambientale del costruito.

Allo stesso tempo, in un contesto di crisi quale quello che stiamo vivendo, la predisposizione di strumenti di prefigurazione del comportamento energetico di intere porzioni di città permette di attuare una programmazione oculata degli investimenti e di superare la logica fallimentare della certificazione e dell'incentivo economico per la riqualificazione energetica, che di fatto promuove, "caso per caso", un lento ed inefficace adeguamento dei sistemi impiantistici e tecnologici del singolo edificio o unità immobiliare.

La possibilità di condurre valutazioni speditive degli ambiti urbani maggiormente colpiti dagli effetti negativi dell'isola di calore o caratterizzate da un comportamento energetico poco efficiente, costituisce un supporto necessario alla redazione di mappe di vulnerabilità climatica ed energetica a scala urbana, che consente l'individuazione del grado di priorità degli interventi per l'adattamento al cambio climatico, la mitigazione delle temperature e la riqualificazione energetica diffusa del patrimonio edilizio.

phenomena.

The complexity of physical and energetic phenomena occurring at the urban scale represents a field of multidisciplinary analysis onto which independent and uncorrelated specialist knowledges converge. A scientific and multidisciplinary approach to urban sustainability analysis must rely upon the precision and accuracy of measurements as well as on those relationships significant for the urban energetic performance, especially as regards the interest of designers and planners. The cross-scale integration of the various disciplines studying this issue, which generally adopt different spatial resolutions and degrees of approximation, represents a viable background knowledge to assess objectively the energetic and environmental performance due to form and density of the built environment.

Density and morphology of the urban textures are therefore useful parameters to analyse physical phenomena at the local scale, and can be thought of as the essential link between the architectural and urban dimensions.

The local scale indeed is suitable for the identification of the descriptors and variables that rule the energetic relationships between indoors and outdoors, and also allows for an effective integration of the multidisciplinary knolwledges involved.

A set of morphological parameters and energetic indices have been shown in this study to relate and quantify the intensity of the heat island and the energetic performance of the building fabric, with a degree of approximation suitable for the local scale of analysis.

The modelling and analytical tools introduced in this study permit an objective and rapid assessment of the energetic and climatic performance of urban fabrics, based on density parameters commonly employed in design and urban planning practice. The established relationships involve descriptors and variables generally regarded as readily understandable and usable by professionals, allowing for the sought after integration between the academic and professional fields.

Furthermore, this research constitutes a background knowledge essential to develop a comprehensive assessment tool whereby analyzing physical and energetic phenomena at the local scale and the corresponding implications at the building scale, filling the lack of analysis tools suitable for cross-scale integration.

The implementation of tools capable of handling the aforementioned complexity, with a degree of approximation suitable for the application to the construction industry, is necessary to define guidelines that support designers and planners in the task of reducing the energetic and environmental impact of the built environment.

Considering also the economic and social crisis of the recent years, prediction tools of the energetic performance of urban areas may result useful for a parsimonious planning of the investments. This would allow to overcome the inefficient rationale of the energetic certification and related financial incentive schemes which have in fact promoted only a slow upgrade of building services and utilities, on case by case basis.

The opportunity of performing rapid assessment of those urban districts mostly affected by the negative effects of the heat island, or characterised by an inefficient energetic performance, provide a valuable support to map the climatic and energetic vulnerability at the urban scale. Consequently, the definition of a degree of priority permits to schedule efficiently interventions for the adaptation to climatic changes, temperatures mitigation and widespread energetic performance improvements of the building heritage.

Based on the achieved results, further work may be undertaken as regards the definition of design guidances taking into account the different morphological features and energetic performance of the urban textures. Understanding the relationships between morphological

Il rilievo dei risultati sin qui conseguiti consente di prefigurare un ulteriore sviluppo del lavoro di ricerca, capace di condurre a linee guida di intervento differenziate in base alle caratteristiche morfologiche e alle prestazioni espresse alla scala del tessuto edilizio. La conoscenza delle relazioni tra i caratteri morfologici dei tessuti urbani e le ripercussioni sul comfort e sulla domanda energetica degli edifici, così come la prefigurazione dell'ordine di grandezza dei risparmi energetici conseguiti nella presente ricerca, pongono infatti le basi per l'identificazione degli interventi più idonei a garantire l'efficacia dei processi di trasformazione, riqualificazione e rigenerazione a cui è costantemente sottoposta la città storica e consolidata.

Il lavoro di ricerca presentato ha chiaramente evidenziato che i caratteri morfologici dei tessuti urbani assumono una rilevanza sulla prestazione energetica dell'edificato almeno pari alle caratteristiche costruttive e tecnologiche del singolo edificio.

Inoltre la *quantità* e la *qualità* delle superfici di intercambio energetico, costituite dall'involucro dell'edificio, assumono una rilevanza sia rispetto al comfort interno che alle modificazioni climatiche esterne. L'efficacia delle strategie di miglioramento energetico applicate all'involucro, quali serre bioclimatiche, tetti o pareti verdi, materiali freddi, proporzione tra superficie vetrata e superficie opaca, isolamento termico o sistemi di ombreggiamento, risultano pertanto strettamente legate ai caratteri morfologici e tipologici tanto dei singoli edifici quanto del contesto urbano in cui si collocano

Sulla base dei risultati acquisiti è già ora possibile procedere a una mappatura della vulnerabilità climatica ed energetica dell'edificato a scala urbana. Un successivo traguardo preventivabile della ricerca riguarda l'identificazione degli interventi più idonei, alla scala dell'involucro degli edifici, in funzione dell'accessibilità solare e delle prestazioni climatiche espresse da ciascuna morfologia urbana. In tal modo le analisi condotte alla scala urbana e locale potranno tradursi in strumenti operativi per la progettazione alla scala dell'edificio e per la riqualificazione degli spazi pubblici, a servizio della progettazione architettonica e urbana di dettaglio.

La necessità di confrontarsi con il cambio climatico e con l'isola di calore è ormai un dato di fatto per progettisti e decisori, alla luce delle implicazioni che essi hanno nel settore dell'edilizia. La conoscenza fisica della realtà urbana costituisce la base per l'innovazione nella pratica edilizia costruttiva e processuale e consente l'adeguamento del patrimonio edilizio esistente alle necessità della società attuale senza più omettere o trascurare la componente energetica ed ambientale.

Il lavoro di tesi di dottorato fornisce degli strumenti di valutazione speditiva delle relazioni energetiche e climatiche che si instaurano nei tessuti edilizi, che dimostrano l'efficienza della città densa e compatta nel contesto mediterraneo.

Se appare finalmente assodato che densità e morfologia dell'edificato sono intimamente relazionati alla sua performance energetica, allo stesso tempo è evidente che i caratteri dei tessuti edilizi costituiscono l'elemento più resiliente alle trasformazioni derivanti da avanzamenti tecnici, tecnologici e scientifici che nel corso degli anni hanno mutato tanto il processo edilizio che le dinamiche di crescita degli insediamenti.

La risposta all'interrogativo iniziale assume pertanto una rilevanza particolare nel contesto urbano europeo, in cui l'edificato storico e consolidato prevale sui nuovi insediamenti. Ciò significa che le caratteristiche morfologiche e la performance dei tessuti edilizi costituiscono l'elemento imprescindibile di confronto per il raggiungimento degli obiettivi di risparmio energetico ed il complessivo miglioramento ambientale delle aree urbane.

features and their impact on comfort and energy demand, as well as the relative importance in terms of energy saving, sets the basis to identify the most suitable interventions for guaranteeing effectiveness to the transformation process, refurbishment and renovation works that currently occur in historical and consolidated urban environment.

The morphological features of the urban textures have resulted to be at least as relevant as the structural and technological features of the building in terms of energetic performance. Furthermore, the quantity and quality of the vertical surfaces, prominent in the heat transfer process, affect both the internal comfort and the external climate. The efficiency of strategies for energetic performance upgrade (like bioclimatic greenhouse, green roofs and facades, proportion of glazed and matted cladding, thermal insulation and sunlight screening etc.) depends on the typological and morphological parameters of the individual buildings as much as on the urban context they are located.

So the results achieved in this thesis are a preliminary basis to create maps of the climatic and energetic vulnerability at urban scale. A future line for the investigation concerns the identification of the most appropriate interventions at the building scale, according to the solar accessibility and the climatic performance expressed by each urban morphology.

In this way the analysis of the energy performance at urban at local scale can translate into operational tools for the design at building scale or microscale, fostering the work of architects and urban planners in the field of urban renewal and energy efficiency.

The need to face the global climate change and the urban heat island is today a necessary requirement to the work of decision-makers and professionals involved in the building sector.

The understanding of the physical urban phenomena is thus the basis for the innovation in the building construction technics and procedures, in order to adapt, reuse and transform the existing buildings to the needs of the contemporary society without omitting or neglecting the energy and environmental implications.

This work provides a set of practical assessment tools that highlight the energy and climatic performances of the urban textures in the Mediterranean climate, proving the efficiency of dense and compact configurations in this context.

If it is finally established that the buildings' density and morphology are intimately related to their energy performance, at the same time it is evident that the characters of the urban textures are the most resilient elements with respect to the innovations resulting from technical and technological advances, that have deeply changed the construction industry and the urban growth over the years.

So the answer to the initial question is particularly important in the European context, where the existing building heritage clearly prevails on the new settlements; this means that its characteristics and performances are the most important reference for the achievement of the energy saving and the overall environmental improvement of the urban areas.

ALLEGATI

I. Analisi sperimentale dell'isola di calore:

Dati

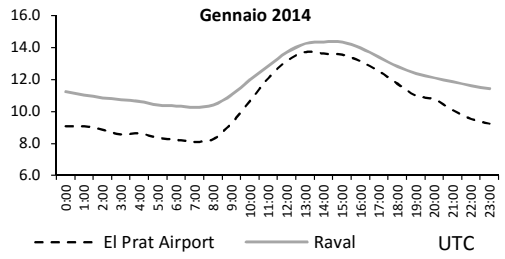
I.I Dati climatici delle stazioni meteorologiche fisse

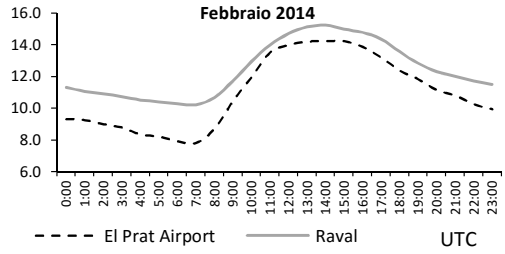
RAVAL & AEROPORTO EL PRAT _Temperature orarie medie mensili 2014

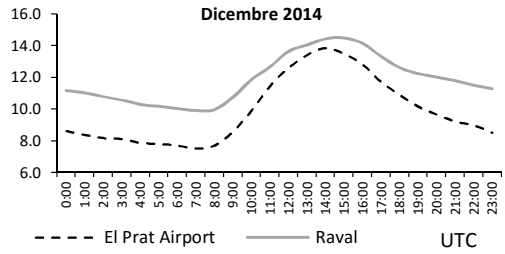
Gennaio 2014			
Orario (GMT)	Aeroporto El Prat	Raval	ΔT Raval
0:00	9.1	11.2	2.1
1:00	9.1	11.0	1.9
2:00	8.9	10.9	2.0
3:00	8.6	10.7	2.2
4:00	8.6	10.6	2.0
5:00	8.4	10.4	2.0
6:00	8.3	10.4	2.1
7:00	8.1	10.3	2.1
8:00	8.3	10.4	2.1
9:00	9.3	11.0	1.8
10:00	10.7	12.0	1.3
11:00	12.1	12.9	0.8
12:00	13.2	13.7	0.5
13:00	13.7	14.3	0.5
14:00	13.6	14.4	0.7
15:00	13.6	14.4	0.8
16:00	13.1	14.0	0.8
17:00	12.5	13.4	0.9
18:00	11.7	12.8	1.1
19:00	11.0	12.4	1.4
20:00	10.8	12.1	1.3
21:00	10.1	11.9	1.8
22:00	9.5	11.6	2.1
23:00	9.3	11.4	2.2
		UHI Media	1.5
		UHI Max	2.2

Dicembre 2014			
Orario (GMT)	Aeroporto El Prat	Raval	ΔT Raval
0:00	8.6	11.2	2.6
1:00	8.4	11.0	2.6
2:00	8.2	10.8	2.6
3:00	8.1	10.6	2.5
4:00	7.9	10.3	2.4
5:00	7.8	10.2	2.4
6:00	7.7	10.0	2.3
7:00	7.5	9.9	2.4
8:00	7.7	10.0	2.3
9:00	8.6	10.7	2.2
10:00	9.9	11.8	1.9
11:00	11.5	12.6	1.2
12:00	12.6	13.6	1.0
13:00	13.4	14.0	0.6
14:00	13.8	14.4	0.6
15:00	13.5	14.5	1.0
16:00	12.8	14.1	1.3
17:00	11.7	13.3	1.6
18:00	10.9	12.6	1.7
19:00	10.2	12.2	2.1
20:00	9.7	12.0	2.4
21:00	9.2	11.8	2.6
22:00	9.0	11.5	2.5
23:00	8.5	11.3	2.8
		UHI Media	2.0
		UHI Max	2.8

Febbraio 2014			
Orario (GMT)	Aeroporto El Prat	Raval	ΔT Raval
0:00	9.3	11.3	2.0
1:00	9.2	11.1	1.8
2:00	9.0	10.9	1.9
3:00	8.8	10.8	2.0
4:00	8.4	10.5	2.2
5:00	8.2	10.4	2.2
6:00	7.9	10.3	2.4
7:00	7.8	10.2	2.4
8:00	8.7	10.7	2.0
9:00	10.5	11.7	1.3
10:00	12.0	12.9	1.0
11:00	13.5	14.0	0.5
12:00	14.0	14.7	0.7
13:00	14.2	15.1	0.9
14:00	14.2	15.2	1.0
15:00	14.2	15.0	0.8
16:00	13.9	14.8	0.9
17:00	13.2	14.4	1.2
18:00	12.4	13.6	1.2
19:00	11.8	12.8	1.0
20:00	11.1	12.3	1.2
21:00	10.8	12.0	1.2
22:00	10.3	11.7	1.5
23:00	9.9	11.5	1.6
		UHI Media	1.4
		UHI Max	2.4



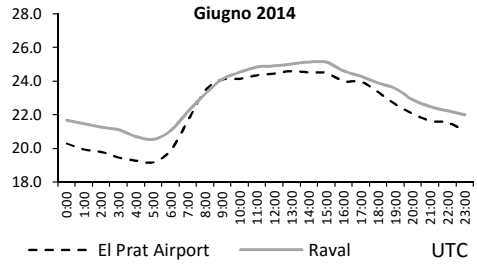


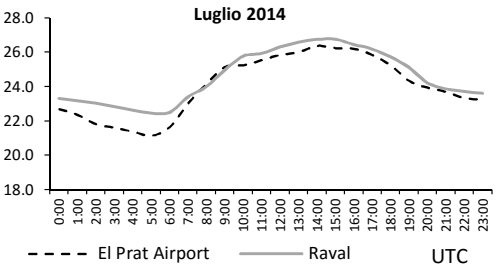


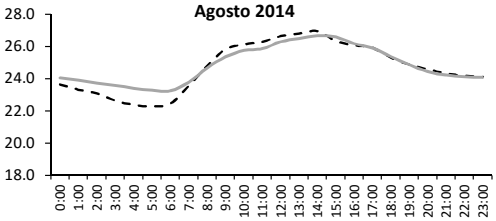
Giugno 2014			
Orario (GMT)	Aeroporto El Prat	Raval	ΔT Raval
0:00	20.3	21.7	1.4
1:00	19.9	21.5	1.6
2:00	19.8	21.3	1.5
3:00	19.5	21.1	1.7
4:00	19.3	20.7	1.4
5:00	19.2	20.6	1.4
6:00	19.9	21.1	1.2
7:00	21.7	22.2	0.5
8:00	23.4	23.3	-0.2
9:00	24.1	24.2	0.0
10:00	24.1	24.6	0.4
11:00	24.4	24.9	0.5
12:00	24.5	24.9	0.5
13:00	24.6	25.1	0.5
14:00	24.5	25.2	0.6
15:00	24.5	25.1	0.7
16:00	24.0	24.6	0.6
17:00	24.0	24.3	0.3
18:00	23.3	23.9	0.6
19:00	22.6	23.6	1.0
20:00	22.1	22.9	0.8
21:00	21.6	22.5	0.9
22:00	21.5	22.3	0.7
23:00	21.1	22.0	1.0
		UHI Media	0.8
		UHI Max	1.7

Agosto 2014			
Orario (GMT)	Aeroporto El Prat	Raval	ΔT Raval
0:00	23.6	24.0	0.4
1:00	23.3	23.9	0.6
2:00	23.1	23.7	0.6
3:00	22.6	23.6	0.9
4:00	22.4	23.4	1.0
5:00	22.3	23.3	1.0
6:00	22.4	23.2	0.8
7:00	23.6	23.8	0.2
8:00	24.8	24.7	-0.1
9:00	25.8	25.4	-0.5
10:00	26.1	25.8	-0.4
11:00	26.3	25.9	-0.4
12:00	26.6	26.3	-0.3
13:00	26.8	26.5	-0.3
14:00	26.9	26.7	-0.3
15:00	26.3	26.6	0.3
16:00	26.1	26.2	0.1
17:00	25.9	25.9	0.0
18:00	25.3	25.4	0.1
19:00	24.9	24.9	0.0
20:00	24.6	24.5	-0.1
21:00	24.3	24.2	-0.1
22:00	24.2	24.1	-0.1
23:00	24.1	24.1	0.0
		UHI Media	0.1
		UHI Max	1.0

Luglio 2014			
Orario (GMT)	Aeroporto El Prat	Raval	ΔT Raval
0:00	22.7	23.3	0.6
1:00	22.4	23.2	0.8
2:00	21.8	23.0	1.2
3:00	21.6	22.8	1.2
4:00	21.4	22.6	1.2
5:00	21.2	22.5	1.3
6:00	21.7	22.5	0.8
7:00	23.0	23.4	0.4
8:00	24.2	24.0	-0.2
9:00	25.1	25.0	-0.2
10:00	25.2	25.8	0.5
11:00	25.5	25.9	0.4
12:00	25.8	26.3	0.5
13:00	26.0	26.6	0.6
14:00	26.4	26.7	0.4
15:00	26.2	26.8	0.5
16:00	26.2	26.5	0.3
17:00	25.8	26.2	0.4
18:00	25.2	25.7	0.5
19:00	24.3	25.1	0.8
20:00	23.9	24.2	0.3
21:00	23.7	23.9	0.2
22:00	23.3	23.7	0.4
23:00	23.3	23.6	0.3
		UHI Media	0.6
		UHI Max	1.3







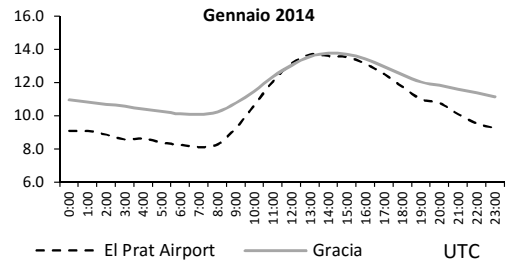
GRACIA & AEROPORTO EL PRAT _Temperature orarie medie mensili 2014

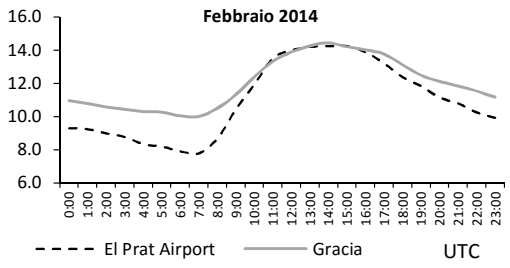
INVERNO

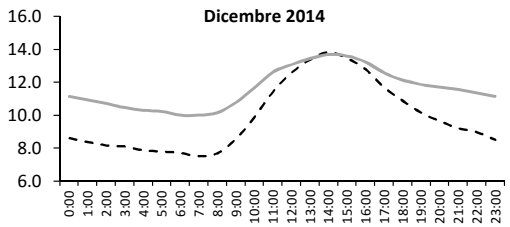
Gennaio 2014			
Orario (GMT)	Aeroporto El Prat	Gracia	ΔT Gracia
0:00	9.1	11.0	1.9
1:00	9.1	10.8	1.7
2:00	8.9	10.7	1.8
3:00	8.6	10.6	2.0
4:00	8.6	10.4	1.8
5:00	8.4	10.3	1.9
6:00	8.3	10.1	1.9
7:00	8.1	10.1	2.0
8:00	8.3	10.2	2.0
9:00	9.3	10.8	1.5
10:00	10.7	11.5	0.8
11:00	12.1	12.4	0.3
12:00	13.2	13.1	-0.1
13:00	13.7	13.6	-0.1
14:00	13.6	13.8	0.2
15:00	13.6	13.7	0.2
16:00	13.1	13.4	0.3
17:00	12.5	13.0	0.5
18:00	11.7	12.5	0.7
19:00	11.0	12.0	1.0
20:00	10.8	11.8	1.1
21:00	10.1	11.6	1.5
22:00	9.5	11.4	1.8
23:00	9.3	11.2	1.9
		UHI Media	1.2
		UHI Max	2.0

Dicembre 2014			
Orario (GMT)	Aeroporto El Prat	Gracia	ΔT Gracia
0:00	8.6	11.1	2.5
1:00	8.4	10.9	2.6
2:00	8.2	10.7	2.6
3:00	8.1	10.5	2.4
4:00	7.9	10.3	2.4
5:00	7.8	10.2	2.4
6:00	7.7	10.0	2.3
7:00	7.5	10.0	2.5
8:00	7.7	10.1	2.4
9:00	8.6	10.8	2.2
10:00	9.9	11.7	1.7
11:00	11.5	12.6	1.2
12:00	12.6	13.1	0.5
13:00	13.4	13.5	0.0
14:00	13.8	13.7	-0.1
15:00	13.5	13.6	0.1
16:00	12.8	13.2	0.4
17:00	11.7	12.6	0.9
18:00	10.9	12.1	1.2
19:00	10.2	11.9	1.7
20:00	9.7	11.7	2.1
21:00	9.2	11.6	2.3
22:00	9.0	11.4	2.4
23:00	8.5	11.2	2.6
		UHI Media	1.7
		UHI Max	2.6

Febbraio 2014			
Orario (GMT)	Aeroporto El Prat	Gracia	ΔT Gracia
0:00	9.3	11.0	1.6
1:00	9.2	10.8	1.5
2:00	9.0	10.6	1.6
3:00	8.8	10.4	1.7
4:00	8.4	10.3	1.9
5:00	8.2	10.3	2.0
6:00	7.9	10.0	2.1
7:00	7.8	10.0	2.2
8:00	8.7	10.5	1.8
9:00	10.5	11.3	0.9
10:00	12.0	12.4	0.4
11:00	13.5	13.3	-0.2
12:00	14.0	13.9	-0.1
13:00	14.2	14.2	0.1
14:00	14.2	14.4	0.2
15:00	14.2	14.2	0.0
16:00	13.9	14.0	0.1
17:00	13.2	13.8	0.6
18:00	12.4	13.1	0.7
19:00	11.8	12.5	0.6
20:00	11.1	12.1	1.0
21:00	10.8	11.8	1.1
22:00	10.3	11.5	1.3
23:00	9.9	11.2	1.2
		UHI Media	1.0
		UHI Max	2.2





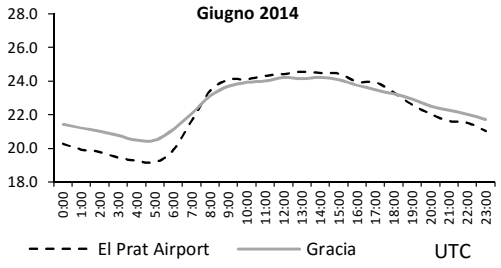


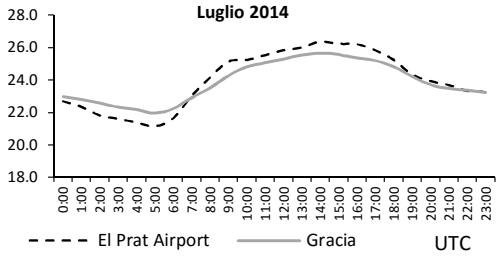
ESTATE

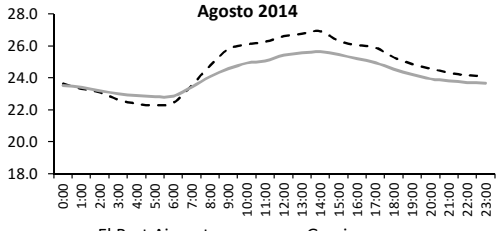
Giugno 2014			
Orario (GMT)	Aeroporto El Prat	Gracia	ΔT Gracia
0:00	20.3	21.5	1.2
1:00	19.9	21.2	1.3
2:00	19.8	21.0	1.2
3:00	19.5	20.8	1.3
4:00	19.3	20.5	1.2
5:00	19.2	20.5	1.3
6:00	19.9	21.2	1.3
7:00	21.7	22.1	0.4
8:00	23.4	23.2	-0.3
9:00	24.1	23.7	-0.4
10:00	24.1	24.0	-0.2
11:00	24.4	24.0	-0.3
12:00	24.5	24.2	-0.2
13:00	24.6	24.2	-0.4
14:00	24.5	24.2	-0.3
15:00	24.5	24.1	-0.4
16:00	24.0	23.8	-0.2
17:00	24.0	23.5	-0.4
18:00	23.3	23.3	-0.1
19:00	22.6	23.0	0.4
20:00	22.1	22.6	0.5
21:00	21.6	22.3	0.6
22:00	21.5	22.1	0.5
23:00	21.1	21.8	0.7
		UHI Media	0.4
		UHI Max	1.3

Agosto 2014			
Orario (GMT)	Aeroporto El Prat	Gracia	ΔT Gracia
0:00	23.6	23.5	-0.1
1:00	23.3	23.4	0.1
2:00	23.1	23.2	0.1
3:00	22.6	23.0	0.4
4:00	22.4	22.9	0.5
5:00	22.3	22.8	0.5
6:00	22.4	22.9	0.4
7:00	23.6	23.4	-0.1
8:00	24.8	24.1	-0.7
9:00	25.8	24.6	-1.2
10:00	26.1	24.9	-1.2
11:00	26.3	25.1	-1.2
12:00	26.6	25.4	-1.2
13:00	26.8	25.6	-1.2
14:00	26.9	25.6	-1.3
15:00	26.3	25.5	-0.9
16:00	26.1	25.2	-0.9
17:00	25.9	24.9	-1.0
18:00	25.3	24.6	-0.7
19:00	24.9	24.2	-0.7
20:00	24.6	23.9	-0.6
21:00	24.3	23.8	-0.5
22:00	24.2	23.7	-0.4
23:00	24.1	23.7	-0.4
		UHI Media	-0.5
		UHI Max	0.5

Luglio 2014			
Orario (GMT)	Aeroporto El Prat	Gracia	ΔT Gracia
0:00	22.7	23.0	0.3
1:00	22.4	22.8	0.5
2:00	21.8	22.6	0.8
3:00	21.6	22.3	0.7
4:00	21.4	22.2	0.8
5:00	21.2	22.0	0.8
6:00	21.7	22.3	0.6
7:00	23.0	22.9	-0.1
8:00	24.2	23.5	-0.6
9:00	25.1	24.3	-0.8
10:00	25.2	24.8	-0.4
11:00	25.5	25.1	-0.5
12:00	25.8	25.3	-0.5
13:00	26.0	25.6	-0.5
14:00	26.4	25.7	-0.7
15:00	26.2	25.6	-0.7
16:00	26.2	25.4	-0.8
17:00	25.8	25.2	-0.6
18:00	25.2	24.8	-0.4
19:00	24.3	24.2	-0.1
20:00	23.9	23.7	-0.2
21:00	23.7	23.5	-0.2
22:00	23.3	23.4	0.1
23:00	23.3	23.3	0.0
		UHI Media	-0.1
		UHI Max	0.8







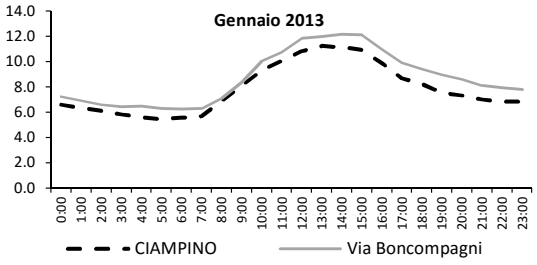
BONCOMPAGNI & AEROPORTO CIAMPINO_Temperature orarie medie mensili 2013

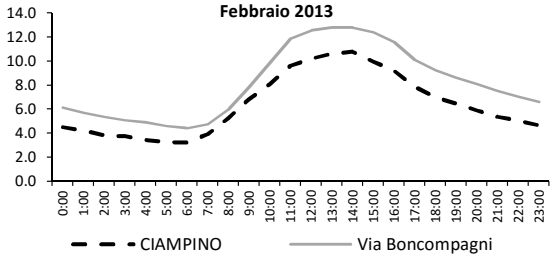
INVERNO

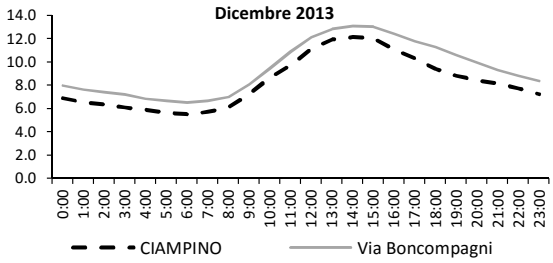
Gennaio 2013			
Orario (GMT)	Aeroporto Ciampino	Boncompagni	ΔT Boncompagni
0:00	6.6	7.2	0.7
1:00	6.3	6.9	0.6
2:00	6.1	6.6	0.5
3:00	5.8	6.4	0.6
4:00	5.6	6.4	0.8
5:00	5.5	6.3	0.8
6:00	5.5	6.3	0.7
7:00	5.7	6.3	0.6
8:00	6.9	7.1	0.2
9:00	8.1	8.4	0.3
10:00	9.3	10.0	0.7
11:00	10.1	10.8	0.7
12:00	10.8	11.8	1.0
13:00	11.3	12.0	0.7
14:00	11.1	12.2	1.0
15:00	10.9	12.1	1.1
16:00	9.9	11.0	1.1
17:00	8.7	9.9	1.2
18:00	8.2	9.4	1.2
19:00	7.5	9.0	1.4
20:00	7.3	8.6	1.3
21:00	7.0	8.1	1.1
22:00	6.8	7.9	1.1
23:00	6.8	7.8	1.0
		UHI Media	0.8
		UHI Max	1.4

Dicembre 2013			
Orario (GMT)	Aeroporto Ciampino	Boncompagni	ΔT Boncompagni
0:00	6.9	8.0	1.1
1:00	6.6	7.6	1.1
2:00	6.3	7.4	1.0
3:00	6.1	7.2	1.1
4:00	5.9	6.8	0.9
5:00	5.7	6.7	1.0
6:00	5.5	6.5	1.0
7:00	5.7	6.6	0.9
8:00	6.1	7.0	0.9
9:00	7.2	8.1	0.8
10:00	8.7	9.5	0.8
11:00	9.7	10.9	1.2
12:00	11.1	12.1	1.0
13:00	11.9	12.8	0.9
14:00	12.2	13.1	0.9
15:00	12.1	13.0	1.0
16:00	11.1	12.5	1.4
17:00	10.3	11.8	1.5
18:00	9.4	11.3	1.9
19:00	8.8	10.6	1.8
20:00	8.4	10.0	1.5
21:00	8.2	9.3	1.2
22:00	7.8	8.8	1.1
23:00	7.3	8.4	1.1
		UHI Media	1.1
		UHI Max	1.9

Febbraio 2013			
Orario (GMT)	Aeroporto Ciampino	Boncompagni	ΔT Boncompagni
0:00	4.5	6.2	1.6
1:00	4.3	5.7	1.5
2:00	3.9	5.4	1.5
3:00	3.8	5.1	1.3
4:00	3.5	4.9	1.4
5:00	3.3	4.6	1.3
6:00	3.2	4.4	1.2
7:00	4.0	4.8	0.8
8:00	5.3	6.0	0.7
9:00	6.9	7.9	1.0
10:00	8.1	9.9	1.8
11:00	9.6	11.9	2.2
12:00	10.2	12.5	2.4
13:00	10.6	12.8	2.1
14:00	10.8	12.8	2.0
15:00	10.0	12.4	2.4
16:00	9.2	11.6	2.4
17:00	7.9	10.1	2.3
18:00	7.0	9.2	2.2
19:00	6.5	8.6	2.1
20:00	5.9	8.1	2.2
21:00	5.4	7.5	2.2
22:00	5.0	7.1	2.0
23:00	4.7	6.6	2.0
		UHI Media	1.8
		UHI Max	2.4





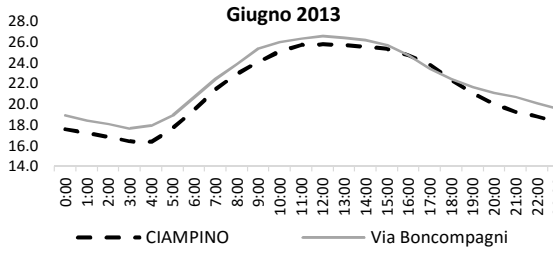


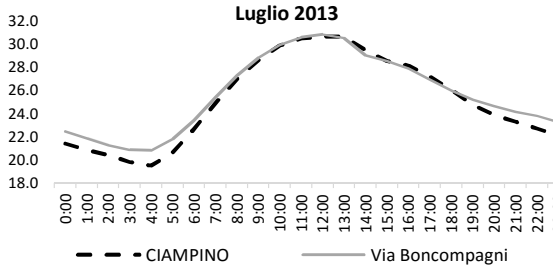
ESTATE

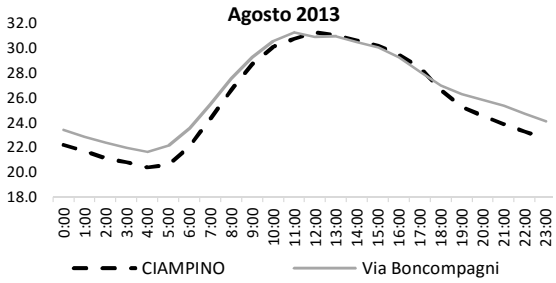
Giugno 2013			
Orario (GMT)	Aeroporto Ciampino	Boncompagni	ΔT Boncompagni
0:00	17.6	18.9	1.3
1:00	17.2	18.4	1.2
2:00	16.9	18.1	1.2
3:00	16.4	17.6	1.2
4:00	16.4	17.9	1.6
5:00	17.7	18.9	1.2
6:00	19.4	20.7	1.3
7:00	21.4	22.4	1.0
8:00	22.9	23.9	0.9
9:00	24.1	25.4	1.3
10:00	25.1	26.0	0.9
11:00	25.7	26.3	0.6
12:00	25.8	26.5	0.7
13:00	25.7	26.4	0.6
14:00	25.5	26.2	0.6
15:00	25.3	25.7	0.3
16:00	24.7	24.7	0.0
17:00	23.8	23.4	-0.4
18:00	22.3	22.5	0.1
19:00	21.0	21.7	0.6
20:00	20.0	21.1	1.1
21:00	19.3	20.7	1.4
22:00	18.8	20.1	1.2
23:00	18.2	19.5	1.3
		UHI Media	0.9
		UHI Max	1.6

Agosto 2013			
Orario (GMT)	Aeroporto Ciampino	Boncompagni	ΔT Boncompagni
0:00	22.2	23.4	1.2
1:00	21.7	22.9	1.2
2:00	21.1	22.4	1.3
3:00	20.8	22.0	1.2
4:00	20.4	21.7	1.2
5:00	20.6	22.1	1.5
6:00	22.1	23.6	1.4
7:00	24.3	25.5	1.2
8:00	26.6	27.5	0.9
9:00	28.7	29.3	0.6
10:00	30.1	30.6	0.5
11:00	30.7	31.3	0.5
12:00	31.3	30.9	-0.4
13:00	31.0	31.0	-0.1
14:00	30.6	30.5	-0.1
15:00	30.2	30.1	-0.1
16:00	29.5	29.3	-0.2
17:00	28.4	28.1	-0.3
18:00	26.6	27.0	0.4
19:00	25.3	26.3	1.0
20:00	24.5	25.9	1.3
21:00	23.9	25.4	1.5
22:00	23.3	24.7	1.4
23:00	22.7	24.1	1.4
		UHI Media	0.8
		UHI Max	1.5

Luglio 2013			
Orario (GMT)	Aeroporto Ciampino	Boncompagni	ΔT Boncompagni
0:00	21.4	22.5	1.0
1:00	20.9	21.9	1.0
2:00	20.4	21.3	0.9
3:00	19.8	20.9	1.0
4:00	19.5	20.8	1.3
5:00	20.7	21.8	1.1
6:00	22.7	23.4	0.7
7:00	24.9	25.4	0.5
8:00	27.0	27.3	0.3
9:00	28.7	28.9	0.2
10:00	29.9	30.0	0.1
11:00	30.5	30.6	0.1
12:00	30.7	30.9	0.2
13:00	30.6	30.6	-0.1
14:00	29.5	29.1	-0.5
15:00	28.6	28.6	0.0
16:00	28.2	27.9	-0.2
17:00	27.2	27.0	-0.2
18:00	26.1	26.0	0.0
19:00	24.8	25.2	0.5
20:00	23.9	24.7	0.8
21:00	23.3	24.2	0.9
22:00	22.7	23.8	1.1
23:00	22.1	23.3	1.2
		UHI Media	0.5
		UHI Max	1.3







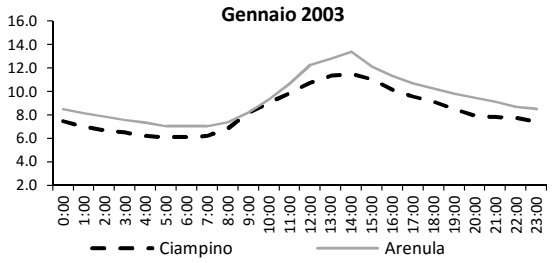
ARENULA & AEROPORTO CIAMPINO_Temperature orarie medie mensili 2013

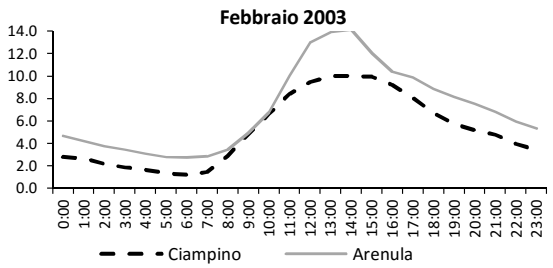
INVERNO

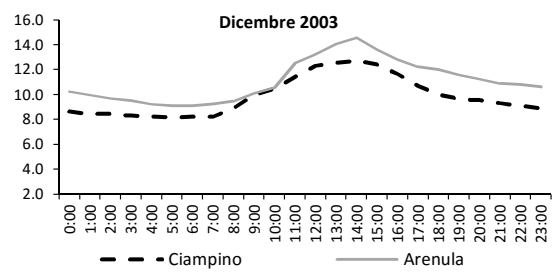
Gennaio 2003			
Orario (GMT)	Aeroporto Ciampino	Arenula	ΔT Arenula
0:00	7.5	8.5	1.0
1:00	7.0	8.2	1.2
2:00	6.7	7.9	1.2
3:00	6.5	7.6	1.1
4:00	6.2	7.3	1.1
5:00	6.1	7.0	0.9
6:00	6.1	7.0	0.9
7:00	6.2	7.1	0.8
8:00	6.8	7.4	0.5
9:00	8.2	8.2	0.1
10:00	9.0	9.3	0.3
11:00	9.9	10.7	0.8
12:00	10.8	12.3	1.5
13:00	11.3	12.8	1.5
14:00	11.5	13.4	1.9
15:00	11.1	12.1	1.0
16:00	10.2	11.3	1.1
17:00	9.6	10.7	1.1
18:00	9.2	10.3	1.1
19:00	8.5	9.8	1.3
20:00	8.0	9.5	1.5
21:00	7.8	9.2	1.4
22:00	7.8	8.7	0.9
23:00	7.5	8.5	1.1
		UHI Media	1.1
		UHI Max	1.9

Dicembre 2003			
Orario (GMT)	Aeroporto Ciampino	Arenula	ΔT Arenula
0:00	8.6	10.2	1.6
1:00	8.4	10.0	1.5
2:00	8.5	9.7	1.2
3:00	8.3	9.5	1.2
4:00	8.3	9.2	1.0
5:00	8.2	9.1	0.9
6:00	8.2	9.1	0.9
7:00	8.2	9.2	1.0
8:00	8.9	9.5	0.5
9:00	10.0	10.1	0.2
10:00	10.5	10.6	0.1
11:00	11.5	12.6	1.1
12:00	12.3	13.2	0.9
13:00	12.6	14.1	1.5
14:00	12.7	14.6	1.8
15:00	12.4	13.6	1.2
16:00	11.7	12.8	1.2
17:00	10.7	12.2	1.5
18:00	10.0	12.0	2.0
19:00	9.7	11.6	1.9
20:00	9.6	11.3	1.7
21:00	9.3	10.9	1.6
22:00	9.1	10.8	1.7
23:00	8.9	10.6	1.7
		UHI Media	1.2
		UHI Max	2.0

Febbraio 2003			
Orario (GMT)	Aeroporto Ciampino	Arenula	ΔT Arenula
0:00	2.8	4.7	1.9
1:00	2.7	4.2	1.5
2:00	2.2	3.8	1.5
3:00	1.9	3.5	1.6
4:00	1.7	3.1	1.4
5:00	1.4	2.8	1.4
6:00	1.2	2.8	1.5
7:00	1.5	2.8	1.4
8:00	2.9	3.5	0.6
9:00	4.9	5.0	0.1
10:00	6.6	6.8	0.2
11:00	8.4	10.1	1.6
12:00	9.5	13.0	3.5
13:00	10.0	13.9	3.9
14:00	10.1	14.1	4.1
15:00	9.9	12.0	2.1
16:00	9.3	10.4	1.1
17:00	8.1	9.9	1.8
18:00	6.8	8.9	2.1
19:00	5.8	8.2	2.4
20:00	5.2	7.6	2.4
21:00	4.8	6.8	2.0
22:00	4.0	6.0	2.0
23:00	3.4	5.4	2.0
		UHI Media	1.8
		UHI Max	4.1





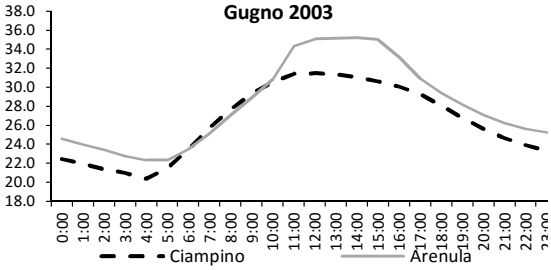


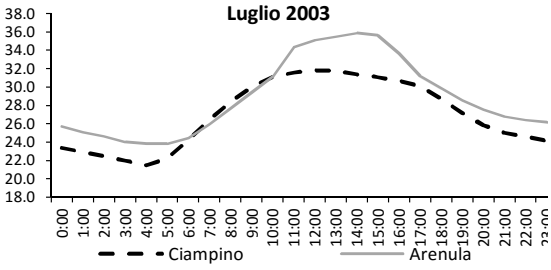
ESTATE

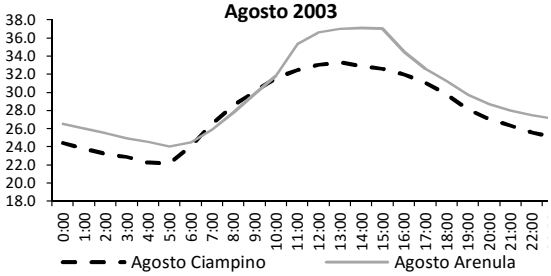
Giugno 2003			
Orario (GMT)	Aeroporto Ciampino	Arenula	ΔT Arenula
0:00	22.4	24.6	2.1
1:00	22.0	24.0	2.0
2:00	21.4	23.4	2.1
3:00	21.0	22.8	1.7
4:00	20.4	22.3	2.0
5:00	21.5	22.4	0.9
6:00	23.5	23.5	0.1
7:00	25.8	25.2	-0.6
8:00	27.7	27.1	-0.6
9:00	29.4	29.0	-0.4
10:00	30.6	30.9	0.3
11:00	31.4	34.4	3.0
12:00	31.5	35.1	3.6
13:00	31.3	35.2	3.8
14:00	31.1	35.2	4.1
15:00	30.6	35.1	4.4
16:00	30.1	33.2	3.1
17:00	29.3	31.0	1.6
18:00	28.1	29.4	1.3
19:00	26.8	28.2	1.4
20:00	25.7	27.1	1.5
21:00	24.7	26.2	1.6
22:00	23.9	25.6	1.7
23:00	23.3	25.3	1.9
		UHI Media	1.8
		UHI Max	4.4

Agosto 2003			
Orario (GMT)	Aeroporto Ciampino	Arenula	ΔT Arenula
0:00	24.4	26.5	2.1
1:00	23.8	26.1	2.3
2:00	23.2	25.5	2.4
3:00	22.9	25.0	2.1
4:00	22.3	24.6	2.3
5:00	22.2	24.1	1.8
6:00	24.1	24.5	0.4
7:00	26.5	25.9	-0.7
8:00	28.6	27.9	-0.7
9:00	30.1	29.8	-0.3
10:00	31.6	31.9	0.3
11:00	32.5	35.4	2.8
12:00	33.1	36.6	3.6
13:00	33.4	37.0	3.7
14:00	32.9	37.1	4.1
15:00	32.6	37.0	4.4
16:00	32.0	34.5	2.5
17:00	31.1	32.6	1.5
18:00	29.8	31.3	1.4
19:00	28.2	29.8	1.6
20:00	27.1	28.7	1.7
21:00	26.4	28.0	1.7
22:00	25.6	27.5	1.9
23:00	25.1	27.1	2.1
		UHI Media	1.9
		UHI Max	4.4

Luglio 2003			
Orario (GMT)	Aeroporto Ciampino	Arenula	ΔT Arenula
0:00	23.4	25.8	2.4
1:00	22.9	25.1	2.1
2:00	22.5	24.7	2.1
3:00	22.0	24.0	2.0
4:00	21.5	23.8	2.3
5:00	22.3	23.8	1.6
6:00	24.3	24.5	0.2
7:00	26.5	26.0	-0.5
8:00	28.5	27.7	-0.8
9:00	30.0	29.5	-0.6
10:00	31.1	31.1	0.0
11:00	31.6	34.3	2.7
12:00	31.8	35.2	3.3
13:00	31.8	35.5	3.7
14:00	31.4	35.9	4.5
15:00	31.1	35.6	4.5
16:00	30.7	33.7	3.0
17:00	30.1	31.2	1.2
18:00	28.8	29.9	1.1
19:00	27.2	28.6	1.4
20:00	25.9	27.6	1.7
21:00	25.1	26.8	1.7
22:00	24.6	26.4	1.8
23:00	24.1	26.2	2.0
		UHI Media	1.8
		UHI Max	4.5







I.2 Campagna di misurazione

4 LUGLIO 2014_Dati climatici presso le stazioni meteorologiche fisse

4 Luglio 2014										
	Temperature (°C)			Wind speed (m/s)			Wind direction (Degree)			Sky Conditions
TIME (UTC)	El Prat Airport	Raval	Gracia	El Prat Airport	Raval	Gracia	El Prat Airport	Raval	Gracia	El Prat Airport
0:00	24	23.5	23.3	6.2	2.3	2.7	60	76	45	Molto nuvoloso
1:00	24	23.7	23.3	5.7	2.2	0.9	70	92	22.5	Molto nuvoloso
2:00	23	23.3	23.2	4.6	1.3	1.8	70	60	67.5	Nubi sparse
3:00	23	23.2	22.9	3.1	1.2	0.4	90	24	67.5	Molto nuvoloso
4:00	22	22.9	22.2	3.1	0.7	0.4	100	47	337.5	Deboli Piogge e Temporali
5:00	19	19.1	22.5	2.1	1.8	0.9	250	258	315	Forte rovescio di pioggia
6:00	20	19.8	19.9	2.1	1.4	0.4	340	299	270	Nubi sparse
7:00	22	22.2	20.7	3.1	3.0	0.4	340	317	315	Parzialmente nuvoloso
8:00	24	23.4	22.2	2.6	2.9	1.8	190	293	270	Parzialmente nuvoloso
9:00	25	24.9	23.4	2.1	2.3	1.8	190	256	270	Parzialmente nuvoloso
10:00	25	26.9	25.3	5.1	3.0	2.7	230	288	292.5	Parzialmente nuvoloso
11:00	25	27.3	26.7	8.2	3.9	2.2	220	229	270	Parzialmente nuvoloso
12:00	26	28.1	26.3	9.3	3.7	3.6	220	240	225	Parzialmente nuvoloso
13:00	26	28.6	27.3	11.3	4.7	3.6	230	240	202.5	Parzialmente nuvoloso
14:00	26	28.4	27.1	10.3	4.4	4.5	220	242	225	Parzialmente nuvoloso
15:00	26	27.3	26.8	9.3	4.3	4.5	220	237	225	Parzialmente nuvoloso
16:00	26	26.6	25.7	8.8	4.8	4.9	230	241	225	Parzialmente nuvoloso
17:00	25	26.3	25.3	9.3	3.9	4.9	230	247	202.5	Parzialmente nuvoloso
18:00	25	25.8	25.4	8.2	2.9	3.1	240	241	225	Parzialmente nuvoloso
19:00	24	25	24.9	7.7	2.3	1.3	240	253	180	Parzialmente nuvoloso
20:00	25	25.4	25.3	3.1	1.6	0.4	250	265	202.5	Nubi sparse
21:00	25	25.7	25.4	2.6	1.6	0.4	230	64	225	Parzialmente nuvoloso
22:00	24	25.1	25.1	3.1	2.0	1.3	220	86	45	Parzialmente nuvoloso
23:00	23	24.3	24.4	1.0	1.2	0.9	0	116	22.5	Parzialmente nuvoloso
0:00	23	23.5	24.2	2.6	1.7	1.3	0	98	67.5	Parzialmente nuvoloso
1:00	22	22.5	23.3	2.1	2.1	0.9	0	87	67.5	Parzialmente nuvoloso
2:00	22	22.2	22.4	2.1	1.8	0.9	0	70	45	Parzialmente nuvoloso
3:00	21	21.9	21.7	2.6	1.7	0.9	0	64	45	Parzialmente nuvoloso

4 LUGLIO 2014_Temperature misurate nei canyon:

4 Luglio 2014								
	canyon Gracia				canyon Raval			
TIME (UTC)	Carrer de Jesus H/W 4.6	C. de Sant Pere Martir H/W 4	Gran de Gracia H/W 2	Travessera. de Dalt H/W 1.6	Carrer d'Elisabets H/W 3.9	Carrer del Notariat H/W 3.1	C. del Pintor Fortuny H/W 1.6	Rambla de Raval H/W 0.3
7:00	24.10	24.00	24.10	23.40	23.65	22.4	23.55	24.05
9:00	27.50	26.50	28.50	24.85	25.05	25.15	25.55	27.15
11:00	28.90	28.50	29.00	28.00	28.05	29.2	28.55	28.95
13:00	29.80	29.10	30.10	29.90	29.05	29.25	29.5	29
15:00	28.10	28.15	29.10	29.70	28.6	28.7	28.6	27.6
17:00	27.50	27.10	27.50	28.00	27.8	27.75	27	26.65
19:00	26.40	27.10	27.10	27.45	27.05	27.5	26.5	26.55
21:00	25.95	26.40	27.00	26.40	26.75	27.05	26.05	26.35
23:00	25.50	25.75	25.50	25.50	25.9	26.25	25.1	25.35
1:00	25.30	25.50	24.30	24.20	24.85	25.4	23.85	24.05

10 LUGLIO 2014_Dati climatici presso le stazioni meteorologiche fisse

10 Luglio 2014										
	Temperature (°C)			Wind speed (m/s)			Wind direction (Degree)			Sky Conditions
TIME (UTC)	El Prat Airport	Raval	Gracia	El Prat Airport	Raval	Gracia	El Prat Airport	Raval	Gracia	El Prat Airport
0:00	21	20.1	19.9	1.6	1.1	0.4	90	225	112.5	Nubi sparse
1:00	20	20.0	19.8	1.6	0.9	0.4	280	263	157.5	Parzialmente nuvoloso
2:00	19	19.9	19.7	3.1	0.9	0.4	340	319	157.5	Parzialmente nuvoloso
3:00	19	20.0	19.5	3.6	1.5	0.9	350	325	292.5	Parzialmente nuvoloso
4:00	19	20.1	19.6	3.6	1.9	0.9	350	332	292.5	Parzialmente nuvoloso
5:00	19	20.1	19.2	5.7	2.5	1.3	350	331	292.5	
6:00	20	20.2	19.6	5.7	2.2	1.3	350	324	292.5	Parzialmente nuvoloso
7:00	21	21.2	20.2	5.7	2.7	2.2	350	326	292.5	Parzialmente nuvoloso
8:00	22	21.9	21.3	5.7	2.5	0.9	340	289	292.5	Parzialmente nuvoloso
9:00	24	23.8	22.9	5.7	3.7	0.9	350	323	292.5	Parzialmente nuvoloso
10:00	24	25.5	23.1	5.7	3.8	3.1	200	312	292.5	Parzialmente nuvoloso
11:00	24	26.3	24.7	6.2	3.7	1.8	210	276	225	Sereno
12:00	25	25.6	25.8	7.2	4.2	2.7	210	223	202.5	Parzialmente nuvoloso
13:00	25	25.6	25.2	6.7	4.2	3.6	210	221	202.5	Parzialmente nuvoloso
14:00	26	26.2	25.3	9.3	4.0	4.0	230	223	202.5	Sereno
15:00	26	26.8	26	7.7	4.2	4.5	220	217	202.5	
16:00	26	26.6	26.2	7.2	3.4	3.6	210	218	202.5	Sereno
17:00	25	25.2	25.4	7.2	3.2	2.2	220	163	135	Sereno
18:00	24	24.0	23.9	5.1	3.1	2.2	210	207	135	Sereno
19:00	23	22.9	22.9	4.6	1.7	1.8	200	205	157.5	Sereno
20:00	23	22.5	22.3	2.1	1.9	1.3	180	138	180	Sereno
21:00	23	22.2	21.9	3.1	1.8	1.3	100	150	90	Sereno
22:00	22	22.0	21.6	3.1	1.4	0.9	70	129	90	Sereno
23:00	22	21.8	21.6	2.1	0.9	0.4	50	121	90	
0:00	21	21.7	21.4	3.6	1.1	0.4	350	43	90	Sereno
1:00	20	21.3	20.9	4.1	1.9	0.9	350	351	337.5	Sereno
2:00	20	21.1	20.5	4.6	2.4	1.3	350	344	292.5	
3:00	19	20.5	20	4.1	1.4	0.9	340	317	337.5	Parzialmente nuvoloso

10 LUGLIO 2014_Temperature misurate nei canyon:

10 Luglio 2014								
	canyon Gracia				canyon Raval			
TIME (UTC)	Carrer de Jesus H/W 4.6	C. de Sant Pere Martir H/W 4	Gran de Gracia H/W 2	Travessera. de Dalt H/W 1.6	Carrer d'Elisabets H/W 3.9	Carrer del Notariat H/W 3.1	C. del Pintor Fortuny H/W 1.6	Rambla de Raval H/W 0.3
5:00	20.0	21.3	20.1	19.9	21.4	21.9	22.3	22.8
7:00	21.7	22.0	22.5	20.9	22.5	23.0	23.4	24.0
9:00	25.3	24.6	25.6	24.9	25.2	25.2	25.5	26.1
11:00	27.7	27.0	27.5	27.6	27.1	27.4	27.5	27.9
13:00	28.3	27.9	28.5	28.9	28.6	28.6	28.8	28.2
15:00	27.5	26.7	27.8	28.0	28.6	28.3	28.9	28.1
17:00	26.3	25.2	27.0	27.5	27.7	27.4	27.4	27.1
19:00	25.1	24.6	25.5	26.5	26.5	26.3	25.9	25.4
21:00	24.4	24.1	24.5	25.5	25.4	25.2	24.6	24.1
23:00	23.8	23.5	23.7	24.3	24.5	24.2	23.5	23.1
1:00	23.5	23.2	22.7	22.5	23.5	23.1	22.3	21.9

I7 LUGLIO 2014_Dati climatici presso le stazioni meteorologiche fisse

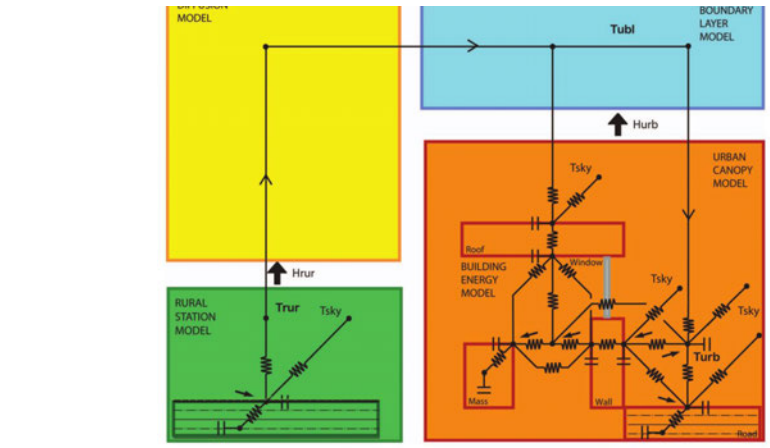
17 Luglio 2014										
	Temperature (°C)			Wind speed (m/s)			Wind direction (Degree)			Sky Conditions
TIME (UTC)	El Prat Airport	Raval	Gracia	El Prat Airport	Raval	Gracia	El Prat Airport	Raval	Gracia	El Prat Airport
0:00	23	24.9	25.3	1.0	1.1	0.0	270	255	247.5	Sereno
1:00	24	25.2	24.8	1.0	1.7	0.0	310	260		Sereno
2:00	23	25.1	24.9	1.0	1.9	0.0	300	292	247.5	Sereno
3:00	23	25.1	24.8	2.1	2.0	0.0	340	297	247.5	Sereno
4:00	22	24.8	24.5	3.1	2.9	0.0	340	288		Sereno
5:00	23	25.1	24.6	3.6	1.1	0.0	340	280		
6:00	24	26.1	25.6	2.6	0.6	0.4	350	107	225	Parzialmente nuvoloso
7:00	26	27.4	26.2	1.0	1.0	0.4	340	109	180	Parzialmente nuvoloso
8:00	27	28.9	27.8	3.1	1.8	0.9	190	220	180	Parzialmente nuvoloso
9:00	28	29.5	28.6	5.7	3.0	2.2	220	222	202.5	Parzialmente nuvoloso
10:00	27	29.4	28.9	8.2	2.9	2.7	210	227	202.5	Parzialmente nuvoloso
11:00	28	29.5	28.1	7.2	4.2	3.6	210	241	225	
12:00	27	29.6	28.5	7.2	3.7	4.0	210	230	225	Parzialmente nuvoloso
13:00	28	29.4	28.5	8.2	3.6	3.1	220	223	180	
14:00	28	29.5	28.8	6.7	4.0	3.1	210	234	202.5	Parzialmente nuvoloso
15:00	28	29.1	28.6	5.7	3.8	4.0	200	233	202.5	Sereno
16:00	28	29.0	28.4	5.1	3.4	3.6	220	238	202.5	Sereno
17:00	27	28.8	28.1	5.7	2.9	3.1	230	243	202.5	Sereno
18:00	27	28.6	28	5.1	3.4	3.1	230	256	225	Sereno
19:00	26	27.8	27.8	3.6	3.2	2.2	230	270	225	Sereno
20:00	25	27.6	27.4	3.1	2.0	1.3	240	273	225	Sereno
21:00	25	27.2	26.8	3.1	2.2	0.9	220	287	292.5	Sereno
22:00	24	26.7	26.4	2.1	1.3	1.3	240	268	270	Parzialmente nuvoloso
23:00	24	25.9	26.3	1.6	1.2	0.4	240	245	247.5	
0:00	24	25.4	26.1	1.0	1.3	0.4	240	257	225	Parzialmente nuvoloso
1:00	23	25	26	1.0	1.0	0.0	300	247	225	Parzialmente nuvoloso
2:00	22	24.4	25.4	1.0	1.3	0.0	320	262	225	Parzialmente nuvoloso
3:00	22	24.3	24.9	1.6	1.2	0.0	350	252	225	Parzialmente nuvoloso

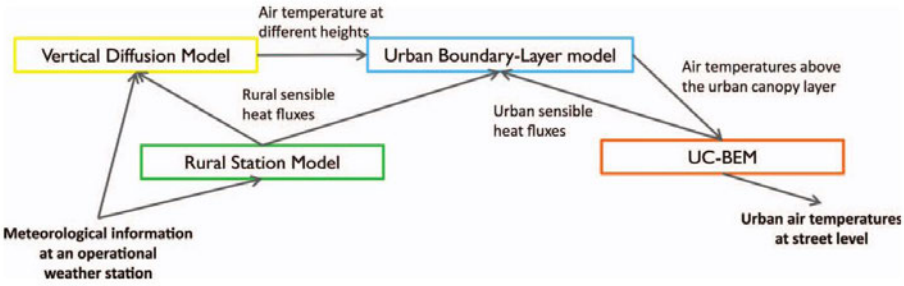
I7 LUGLIO 2014_Temperature misurate nei canyon:

17 Luglio 2014								
	canyon Gracia				canyon Raval			
TIME (UTC)	Carrer de Jesus H/W 4.6	C. de Sant Pere Martir H/W 4	Gran de Gracia H/W 2	Travessera. de Dalt H/W 1.6	Carrer d'Elisabets H/W 3.9	Carrer del Notariat H/W 3.1	C. del Pintor Fortuny H/W 1.6	Rambla de Raval H/W 0.3
5:00	27.2	26.8	27.3	25.5	27.3	26.8	27	26.5
7:00	29.3	29.0	29.2	27.8	28.5	28.0	28.4	27.9
9:00	29.9	29.3	29.7	28.6	29.4	29.5	29.6	29.1
11:00	31.0	30.3	30.7	29.9	30.6	31.0	30.9	30.8
13:00	31.5	31.0	31.5	30.5	31.3	31.2	31.4	30.8
15:00	30.0	30.5	30.7	30.0	30.5	30.2	30.3	29.9
17:00	29.0	29.6	30.0	29.3	29.9	29.8	29.7	29.4
19:00	28.3	28.7	29.0	28.5	29.0	28.9	29.3	28.5
21:00	27.3	27.7	27.3	27.5	28.1	27.9	28.0	27.2
23:00	27.0	27.3	26.3	26.6	27.0	26.7	26.8	26.0
1:00	26.8	27.0	26.0	26.0	25.9	25.6	25.6	24.8

ALLEGATO 2

2. Il modello UWG: moduli e parametri





2.I Moduli di calcolo

L'Urban Weather Generator è composto di quattro moduli: il "Rural Station Model" (RSM), il "Vertical Diffusion Model" (VDM), l'Urban Boundary-Layer (UBL) model e l'Urban Canopy and Building Energy Model (UC-BEM). Si basa sulla parametrizzazione di Masson (2000) per il Town Energy Balance, implementato con un modello energetico dell'edificio che tiene in conto dell'effetto del calore di scarto dovuto ai sistemi di climatizzazione.

IL MODELLO STAZIONE RURALE (RSM)

Il Modello Stazione Rurale (RSM) calcola il flusso di calore sensibile rurale in funzione deli parametri descrittivi della stazione meteorologica operativa. Il modello si basa sul bilancio di energia alla superficie del suolo, risolve pertanto l'accumulo e il rilascio di calore dal terreno nei diversi strati dell'aria attraverso le seguenti equazioni:

Per il primo strato:

$$d_1(\rho c)_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = C_{1,2}(T_2 - T_1) + Q_{surf}$$

per il generico strato intermedio:

$$d_i(\rho c)_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = C_{i,i+1}(T_{i+1} - T_i) + C_{i,i-1}(T_{i-1} - T_i)$$

e per lo strato più profondo :

$$d_{n-1}(\rho c)_{n-1} \frac{\partial T_{n-1}}{\partial t} = C_{n-i,n}(T_{deep} - T_{n-1})$$

Dove:

$c_{1,1+1}$ [W m^{-2} K^{-1}] rappresenta la Conduttività Termica Media tra due strati

Q_{surf} è la somma tra la Radiazione Netta (misurata nella stazione meteo), il Calore Sensibile (calcolato usando i coefficienti di trasferimento di calore per convenzione CHTC), ed il Calore Latente (calcolato come il 50% della radiazione ad onda corta assorbita)

T_{deep} rappresenta la Temperatura Media Annuale del Sito, è la condizione di contorno dell'ultimo strato

T_i [°C] raffigura la Temperatura dello strato i-esimo

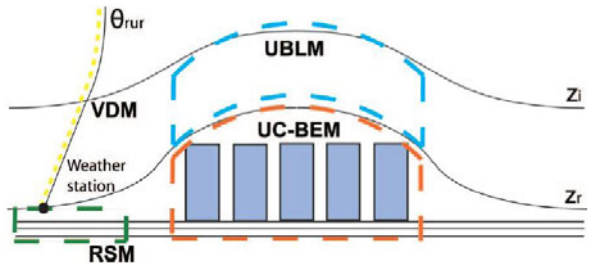
d_i [m] rappresenta la profondità dello strato i-esimo

ρc_i [J m^{-3} K^{-1}] individua la Capacità Termica Volumetrica dello strato i-esimo

I flussi di radiazione netta sono dati rilevati dalla stazione meteo mentre, in superficie, i flussi di calore sensibile sono calcolati utilizzando i coefficienti convettivi di scambio termico. I flussi di calore latente, dovuti all'evapotraspirazione della vegetazione (se presente), sono calcolati come una frazione della radiazione ad onda corta assorbita. Si assume infatti che in assenza di luce gli stomi delle piante sono chiusi e la traspirazione dopo il tramonto è praticamente trascurabile e che il rapporto tra il flusso di calore latente e la radiazione netta è

costante durante il giorno.

MODELLO DI DIFFUSIONE VERTICALE (VDM)



Il modulo VDM calcola il profilo verticale delle temperature dell'aria al di sopra della stazione rurale, a partire dalle temperature e velocità dell'aria misurate alla stazione meteorologica. Per il calcolo del profilo verticale della temperatura dell'aria θ(z) sopra la stazione meteorologica il modello calcola l'equazione di diffusione del calore:

$$V_{cv}\,\rho c_v\,\frac{d\theta_{urb}}{dt} = H_{urb} + \int u_{ref}\,\rho c_p\,(\theta_{ref} - \theta_{urb})dA_f$$

Dove:

θ(z) la Temperatura Potenziale dell'Aria

$k_d(z)$ il Coefficiente di diffusione, calcolato in maniera dinamica in funzione di E (energia cinetica turbolenta):

$k_d = C_k l_k E^{1/2}$

Con:

C_k parametro costante pari a 0,4

l_k "lenght scale" descrive la dimensione dei vortici che caratterizzano la turbolenza

E rappresenta l'energia cinetica turbolenta ad ogni altezza, ed è uguale a E= max (w_s^2, E_{min})

In cui:

w_s la "mixed-layer velocity scale" calcolata secondo Hong et al.(2006).

E_{min} è impostato pari ad 0,01 $m^2 s^{-2}$

URBAN BOUNDARY-LAYER MODEL (UBL)

Il modello dello strato limite urbano UBL calcola le temperature orarie al di sopra della canopia urbana a partire dalle temperature fornite dal modello di diffusione vertical VDM e dai flussi di calore sensibile calcolati dal RSM e dal UC-BEM. Il modello preso in esame elabora i dati attraverso l'equazione del Bilancio di Energia in un volume di controllo.
Il volume considerato è quello all'interno dello Strato Limite Urbano (Zr-Zi)

$$V_{cv}\,\rho c_v\,\frac{d\theta_{urb}}{dt} = H_{urb} + \int u_{ref}\,\rho c_p\,(\theta_{ref} - \theta_{urb})dA_f$$

Dove:

V_{cv} rappresenta il volume di controllo

C_v è il calore specifico dell'aria a volume costante

H_{urb} rappresenta il flusso di calore sensibile sulla superficie del volume di controllo

u_{ref} è la velocita di riferimento dell'aria fuori del volume di controllo

C_p è il calore specifico dell'aria a pressione costante

θ_{ref} è la temperatura potenziale dell'aria fuori del volume di controllo

θ_{urb} è la temperatura potenziale media dell'aria interno del volume di controllo

A_f è l'area laterale di scambio termico tra il volume di controllo e la parte esterna

Il termine a primo membro:

$$V_{cp}\,\rho c_v\,\frac{d\theta_{urb}}{dt}$$

rappresenta l'inerzia termica del volume di controllo.

Il secondo membro

$$H_{urb} + \int u_{ref}\,\rho c_p\,(\theta_{ref} - \theta_{urb})dA_f$$

rappresenta l'effetto di avvezione (spostamento delle masse d'aria in direzione orizzontale).

Il modello UBL differenzia le condizioni notturne e diurne dello strato limite urbano e le condizioni di avvezione sospinte dal vento geostrofico o dalla circolazione di brezza urbana.

1) Strato Limite Notturno (Strati Stabili)

Di notte lo scambio radiativo tra superficie rurale/urbana e cielo mantiene lo strato limite urbano stratificato (strati caldi sopra, freddi sotto). La temperatura della superficie terrestre è minore rispetto alla temperatura dell'aria, pertanto i moti convettivi per gravità sono impediti e lo strato atmosferico permane in condizioni stratificate.

2) Strato Limite Diurno (Strato Limite Convettivo)

Di giorno, al contrario, per effetto dell'inerzia termica della città e per i flussi di calore antropogenico, lo strato limite urbano è in condizioni convettive (rimescolamento-mixing). La radia-

zione solare colpisce e riscalda la superficie urbana e rurale, che pertanto raggiunge temperature più elevate degli strati superiori di aria. Gli strati di aria a contatto con la superficie si riscaldano innescando moti convettivi e l'atmosfera è completamente rimescolata ("well mixed"). In tali condizioni lo strato limite urbano si estende per grandi altezze sopra la città e la campagna. Da ciò deriva un distintivo andamento giornaliero dell'intensità dell'isola di calore, con valori positivi durante la notte, valori negativi durante la mattina e valori leggermente positivi durante il pomeriggio.

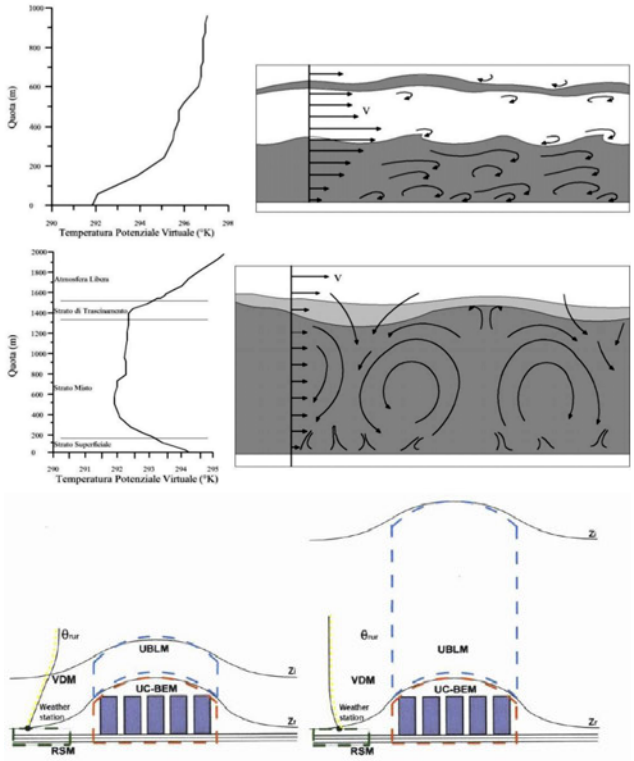


Figura 148 Rappresentazione dello strato limite urbano in condizioni stabili e convettive.

Una ulteriore differenziazione avviene per condizioni di avvezione sospinte dal vento geostrofico (condizione forzata) o dalla circolazione di brezza urbana dovuta all'effetto dell'isola di calore (galleggiamento- buoyancy-driven).

Si assume che il fenomeno sia governato dalla circolazione urbana se la velocità di circolazione u_{circ} è maggiore della velocità dell'aria misurata nella stazione metereologica rurale.

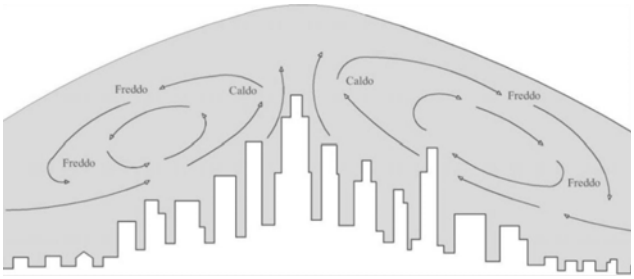


Figura 149 Circolazione urbana indotta dalla presenza dell'isola di calore (buoyancy driven)

La velocità di circolazione è calcolata come segue (Hidalgo, 2009):

$$u_{circ} = k_w \left(\beta_{zi} \frac{H_{urb} - H_{rur}}{\rho c_p} \right)^{1/3}$$

Dove:

k_w costante ($k_w \sim 1$)

β_{zi} il coefficiente di galleggiamento ($\beta_{zi} = g\theta^{-1}$)

H_{urb} il flusso di calore sensibile dell'area urbana (calcolato dal modulo UC-BEM)

H_{rur} è il flusso di calore sensibile dell'area rurale (calcolato dal modulo RSM)

L'equazione è risolta con il metodo implicito di Eulero, per cui:

$$\frac{d\theta_{urb}}{dt} = \frac{\theta_{urb} - \bar{\theta_{urb}}}{\delta}$$

dove δ è l'intervallo di simulazione.

L'equazione può essere quindi espressa:

$$\theta_{urb} - \bar{\theta_{urb}} = C_{surf} + C_{adv}\theta_{eq} - C_{adv}\theta_{urb}$$

dove C_{surf}, C_{adv} e θ_{eq} sono dati dalla tabella seguente:

	C_{surf}	C_{adv}	θ_{eq}
Night			
Forced (first)	$\frac{H_{urb}\delta}{z_i \rho c_v}$	$\frac{u_{wind}(z_m) z_i \delta c_p}{2 z_m dx c_v}$	$\frac{2}{3}\theta_{rur}(z_i) + \frac{1}{3}\theta_{rur}(z_r)$
Forced (rest)			θ_{n-1}
Buoyancy-driven	$\frac{H_{urb}\delta}{z_i \rho c_v}$	$\frac{P_{city} u_{circ} \delta c_p}{A_{city} c_v}$	$\frac{1}{2}\theta_{rur}(z_i) + \frac{1}{2}\theta_{rur}(z_r)$
Day			
Forced	$\frac{H_{urb}\delta}{z_i \rho c_v}$	$\frac{W u_{wind}(z_m) \delta c_p}{A_{city} c_v}$	$\theta_{rur}(z_{ref})$
Buoyancy-driven	$\frac{H_{urb}\delta}{z_i \rho c_v}$	$\frac{P_{city} u_{circ} \delta c_p}{A_{city} c_v}$	$\theta_{rur}(z_{ref})$

Tabella 34 Coefficienti superficiali (Csurf) per il calcolo della θ_{eq} in ogni condizione. D, Acity and Pcity sono rispettivamente il diametro, l'area e il perimetro della città. u_{wind} è la velocità dell'aria misurata alla stazione meteorologica rurale. Fonte: Bueno, 2013.

MODULO UC-BEM

Il Modulo UC-BEM calcola la Temperatura e l'Umidità del canyon a partire da:

1. dati di radiazione e precipitazione (misurate presso la stazione rurale)
2. velocità ed umidità dell'aria presso la stazione meteo rurale
3. la temperatura dell'aria al di sopra dell'Urban Canopy layer (UCL), calcolata con il Modello dello Strato Limite Urbano (UBL).

Il modulo UCM-BEM calcola la temperatura dell'aria nel canyon urbano mediante il metodo del bilancio termico sulle superfici di un volume di controllo, tenendo conto della capacità termica dell'aria nel canyon ed assumendo che questa sia perfettamente rimescolata (temperatura dell'aria nel canyon urbano omogenea).

Il Bilancio Termico citato tiene conto di:

1. flussi di calore dalle pareti, dalle finestre e dalla strada
2. scambio di calore sensibile tra l'aria nel canyon urbano (in funzione del contenuto di umidità) e lo strato di atmosfera superiore
3. flussi di calore dovuti all'infiltrazione, al riscaldamento, alla ventilazione naturale e meccanica ed altro tipo di calore di scarto di origine antropica
4. scambio di calore radiante tra l'aria del canyon ed il cielo

L'equazione di bilancio energetico per il canyon è data da:

$$V_{can}\,\rho c_v\,\frac{dT_{urb}}{dt} = A_w h_w\,(T_w - T_{urb}) +$$

$$A_r h_r (T_r - T_{urb}) + A_r h_{rd,sky}\left(T_{sky} - T_{urb}\right) +$$

$$A_{win} U_{win} (T_{in} - T_{urb}) + V_{inf/vent}\rho c_p (T_{in} - T_{urb}) +$$

$$u_{ex}\rho c_p (T_{ubl} - T_{urb}) + H_{waste} + H_{traff}$$

Dove:

V_{can} il volume di controllo

T_{urb} la temperatura dell'aria nel canyon urbano

T_{in} la temperatura dell'aria all'interno dell'edificio

T_{ubl} la temperatura dell'aria al di sopra dell'UCL (calcolata dal modulo UBL)

T_{sky} la temperatura del cielo (effective sky temperature)

U_{win} trasmittanza delle superfici vetrate

$V_{inf/vent}$ tasso di ricambio d'aria per ventilazione e/o infiltrazione

H_{waste} flusso di calore sensibile di scarto dovuto alla presenza di sistemi HVAC

$H_{traffic}$ flussi di calore di origine antropica (traffico)

u_{ex} la velocità di scambio (exchange velocity) tra l'aria nel canyon e lo strato di atmosfera superiore.

La velocità di scambio u_{ex} è ottenuta mediante la relazione di Bentham e Britter (2003)

$$u_{ex} = \frac{u_*}{\frac{u_{atm}}{u_*} - \left(\frac{8}{VH_{url}}\right)^{1/2}}$$

in cui:

u_* la velocità di attrito (friction velocity)

u_{atm} la velocità dell'aria al di sopra della canopia urbana; il suo valore è assunto pari alla velocità dell'aria misurata nella stazione meteo

Pertanto nel bilancio energetico i flussi di calore considerati sono i seguenti:

$A_w h_w (T_w - T_{urb})$ trasferimento di calore attraverso le pareti (convezione ed irraggiamento)

$A_r h_r (T_r - T_{urb})$ trasferimento di calore dalla strada (convenzione ed irraggiamento)

$A_r h_{rd,sky} (T_{sky} - T_{urb})$ scambio termico radiante tra l'aria nel canyon ed il cielo (si assume che in spazi sufficientemente ampi, come può essere un volume d'aria compreso in un canyon urbano, il vapore d'acqua presente partecipi allo scambio di calore per irraggiamento)

$A_{win} U_{win} (T_{in} - T_{urb})$ trasferimento di calore attraverso le finestre

$V_{inf/vent}\ \rho c_p (T_{in} - T_{urb})$ flussi di calore dovuti a infiltrazione e/o ventilazione naturale

$U_{ex}\ \rho c_p (T_{ubl} - T_{urb})$ scambio di calore sensibile tra l'aria nel canyon urbano e lo strato superiore di atmosfera (UBL)

La temperatura della superficie esterna della parete, della strada e del tetto sono calcolate risolvendo un Bilancio Energetico sulla Superficie simile a quello utilizzato nel Modello della Stazione Rurale. Le condizioni al contorno della strada sono le stesse utilizzate nel Modello della Stazione Rurale. Per le pareti ed il tetto, le condizioni al contorno del flusso di calore sono calcolate in base al Modello Energetico dell'Edificio.

Il flusso di calore alle superfici è composto dalle componenti di radiazione ad onda lunga, radiazione ad onda corta, calore sensibile e calore latente. Nell'equazione i coefficienti h_w e h_r sono coefficienti di trasferimento di calore per pareti e strada che tengono in conto degli effetti convettivi e radiativi: $h = h_{cv}$ e h_{rd}

RADIAZIONE A ONDA LUNGA:

Il coefficiente $h_{rd,sky}$ è il coefficiente di trasferimento radiante tra aria del canyon e cielo (funzione dell'emissività dell'aria nel canyon e dell'emissività delle superfici di parete, strada e cielo. Lo scambio termico radiante tra il canyon urbano (pareti, strada e aria nel canyon) ed il cielo è calcolato mediante la linearizzazione della legge di Stefan-Boltzmann, tenendo in conto della trasmittanza dell'aria del canyon e assumendo un solo riflesso per quanto riguarda lo scambio radiativo tra le superfici. I coefficienti di irraggiamento (RHTC) tra pareti, strada

e cielo sono calcolati come segue:

$$h_{rd,i-j} = 4\,(1-\varepsilon_{can})\,\varepsilon_i\,\varepsilon_j\,\sigma\,F_{i-j}\,T_{i-j}^{3}$$

Dove:

ε_{can} rappresenta l'emissività del canyon urbano

ε_i ε_j sono le emissività delle superfici (parete, strada,..)

σ è la costante di Stefan-Boltzmann

F_{i-j} è il fattore di vista tra le superfici i-j

T_{i-j} Temperatura media tra le superfici i e j (T_w - T_r, T_w-T_{sky}, T_r-T_{sky})

I coefficienti di irraggiamento tra pareti, strada, cielo e aria del canyon sono dati da:

$$h_{rd,can-j} = 4\varepsilon_{can}\varepsilon_j\sigma\overline{T_{can-j}}^{3}$$

L'emissività dell'aria ε_{can} è calcolata con la seguente espressione, in funzione del contenuto di umidità e delle dimensioni del canyon (Siegel and Howell 1981) :

$$\varepsilon_{can} = 0.683\,(1 - \exp(-1.17X^{1/2}))$$

dove

$X = P_w L_e\,(300/T_{urb})\,(P_a + bP_w)$

P_w e P_a sono le pressioni parziali di acqua (w) e aria (a)

L_e è la lunghezza media del raggio, data dal rapporto tra l'area trasversale del canyon ed il suo perimetro $L_e = 3.6\,A_{can}/P_{can}$

$b = 5(300/T_{urb})^{1/2}$

RADIAZIONE A ONDA CORTA

I fattori di vista tra superfici F_{i-j} sono calcolati come nel "Town Energy Balance", considerando una sola riflessione.

F_{i-j} dipende dalla morfologia del canyon urbano:

Per una parete:

$$F_w = \tfrac{1}{2}\,\frac{\left[\frac{h_{bld}}{w_r} + 1 - \left(\left(\frac{h_{bld}}{w_r}\right)^2 + 1\right)^{\frac{1}{2}}\right]}{\frac{h_{bld}}{w_r}}$$

per una strada:

$$F_r = \left(\left(\frac{h_{bld}}{w_r}\right)^2 + 1\right)^{1/2} - \frac{h_{bld}}{w_r}$$

dove per entrambi i casi w_r è un termine che tiene conto della geometria della costruzione in esame ed è uguale a:

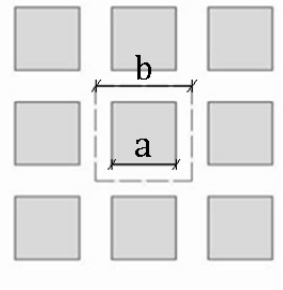
$$w_r = \frac{2h_{bld}\,(1-\rho_{bld})}{VH_{urb}}$$

In cui:

$$\rho_{bld} = \frac{a^2}{\left(\frac{a}{2}+\frac{b}{2}\right)^2}$$

$$VH_{bld} = \frac{4ah_{bld}}{\left(\frac{a}{2}+\frac{b}{2}\right)^2}$$

h_{bld} = Altezza edifici



La radiazione solare ricevuta da pareti e strada viene calcolata assumendo un orientamento medio del canyon urbano, fondata sulla formulazione proposta da Masson (2000):

Per i muri

$$K_w = K_{dir}\left(\frac{w_r}{h_{bld}}\left(0.5 - \frac{\theta_0}{\Pi}\right) + \frac{1}{\Pi}\tan(\lambda)\left(1-\cos(\theta_0)\right)\right) + F_w K_{dif}$$

Per le strade

$$K_r = K_{dir}\left(\frac{2\theta_0}{\Pi} + \frac{2}{\Pi}\frac{h_{bld}}{w_r}\tan(\lambda)\left(1-\cos(\theta_0)\right)\right) + F_r K_{dif}$$

In entrambi i casi θ_0 rappresenta l'angolo critico quando il canyon non è illuminato:

$$\theta_0 = \arcsin\left(\min\left[\frac{w_r}{h_{bld}}\frac{1}{\tan(\lambda)}, 1\right]\right)$$

Dove:

λ è l'angolo zenitale solare

F rappresenta il fattore di vista del cielo (per il muro e la parete)

K_{dir} rappresenta la radiazione solare diretta

K_{dif} rappresenta la radiazione solare diffusa

Le Riflessioni invece sono calcolate:

Per i muri:

$$M_w = \frac{R_w + F_w\rho_w R_r}{1-(1-2F_w)\rho_w + (1-F_r)F_w\rho_r\rho_w}$$

Per le strade:

$$M_r = \frac{R_r + (1-F_r)\rho_r(R_w + F_w\rho_w R_r)}{1-(1-2F_w)\rho_w + (1-F_r)F_w\rho_r\rho_w}$$

Nelle formule appena descritte abbiamo che:

ρ_w rappresenta il coeff. di riflessione delle pareti

ρ_r rappresenta il coeff. di riflessione delle strade

$R_w = \rho_w K_w$

$R_r = \rho_r K_r$

In conclusione, la Radiazione Solare Totale per la strada e per le pareti è data:

$$S_w = K_w + (1 + 2F_w)M_w + F_w M_r$$

$$S_r = K_r + (1 - F_r)M_w$$

I parametri morfologici di input rappresentano pertanto una variabile chiave per il calcolo del modello, poiché determinano i fattori di vista delle superfici e pertanto la quantità di radiazione ricevuta e riflessa, il trasferimento di calore per irraggiamento dalle pareti e dalla strada e, infine, la temperatura del canyon urbano. Inoltre questi parametri hanno un ruolo dominante nella velocità d' interscambio dell'aria, all'interno dello strato limite urbano.

$$V_{can}\,\rho c_v\,\frac{dT_{urb}}{dt} = A_w h_w (T_w - T_{urb}) +$$

$$A_r h_r (T_r - T_{urb}) + A_r h_{rd,sky} (T_{sky} - T_{urb}) +$$

$$A_{win} U_{win} (T_{in} - T_{urb}) + V_{inf/vent}\rho c_p (T_{in} - T_{urb}) +$$

$$u_{ex}\rho c_p (T_{ubl} - T_{urb}) + H_{waste} + H_{traff}$$

Figura 150 Bilancio energetico alle superfici del volume di controllo. In blu sono evidenziati i termini in cui sono coinvolti i parametri morfologici

FLUSSO CALORE SENSIBILE:

I flussi di calore sensibile dalle superfici sono calcolati utilizzando i coefficienti convettivi (convective heat transfer coefficient - CHTC). Per i tetti h_{cv} viene calcolato in funzione della u_{atm} al di sopra della canopia urbana (correlazione di Palyvos, 2008):

$$h_{cv} = 5.8 + 3.7\, u_{atm}$$

Per la strada con la stessa espressione ma utilizzando la velocità dell'aria nel canyon u_{can} (Bentham e Britter 2003):

$$u_{can} = u_* \left(\frac{8}{VH_{urb}}\right)^{1/2}$$

Il flusso di calore sensibile urbano (richiesto dal modello UBM) è dato dalla somma dei flussi termici tra l'aria del canyon e l'atmosfera, il flusso di calore convettivo dai tetti e la frazione di calore di scarto immesso dalle apparecchiature HVAC.

FLUSSO CALORE LATENTE:

Per superfici orizzontali (strada e tetto), l'UC-BEM calcola il flusso di calore latente associato ad uno strato sottile di acqua (max 1 mm) rimanente dalle precipitazioni.

Il bilancio della massa è dato da:

$$dw_g/dt = (P_g - E_g)$$

dove P_g e E_g sono rispettivamente la massa d'acqua dovuta alle precipitazioni e la massa evaporata $[m\ S^{-1}]$.

La massa evaporata è data dalla seguente espressione:

$$E_g = \frac{1}{\rho_w R}(q_{sat}(T_{surf}) - q_a)$$

con:

R la resistenza aerodinamica $[s\ m^{-1}]$ ottenuta dalla formula dei CHTC

ρ_w è la densità dell'acqua

q_{sat} l'umidità specifica di saturazione in funzione della temperatura superficiale $[kg\ kg^{-1}]$

q_a è l'umidità specifica dell'aria sopra alla superficie.

Quando lo strato di acqua è maggiore di zero, il flusso di calore latente è dato da:

$$L = E_g\,\rho_w\,l_v$$

con lv il calore latente di vaporizzazione $[J\ kg\text{-}1]$.

ASSUNZIONI DEL MODELLO UC-BEM

Le assunzioni del modulo UC-BEM riguardano le caratteristiche del canyon e dell'edificio tipo. Il modello considera:

1. morfologia urbana omogenea
2. edificio mediamente orientato
3. percentuale di superficie vetrata uniforme (l'intero edificio ha la stessa frazione di superficie vetrata rispetto alla superficie totale)

Per quanto riguarda il modello energetico dell'edificio si considerano inoltre le seguenti approssimazioni:

1. unica zona termica

2. temperatura e umidità dell'aria interna omogenea
3. massa termica interna che rappresenta l'inerzia dei materiali da costruzione all'interno dell'edificio (la radiazione trasmessa e la frazione radiante di calore sono completamente assorbite dalla massa termica interna, e poi rilasciata sotto forma di calore all'interno dell'ambiente)
4. area del piano terra completamente adiabatica, pavimento dell'edificio ben isolato

Il Modello Energetico prende quindi in considerazione in considerazione:

1. gli apporti di calore della radiazione solare trasmessa attraverso le superfici vetrate
2. la conduzione di calore e delle infiltrazioni attraverso le pareti dell'edificio
3. gli scambi termici per ventilazione
4. i guadagni termici interni
5. il calore di scarto Qrif prodotto dai sistemi di climatizzazione (HVAC), calcolato sulla base del consumo energetico dell'edificio (Qcons) e della domanda di energia (Qden)
6. l'evoluzione dinamica della temperatura e dell'umidità dell'aria interna dell'edificio.

MODELLO DI VEGETAZIONE

Infine il modello di vegetazione nell'UC-BEM si rifà all'approccio ombra-convezione (Shashua-Bar and Hoffman 2002). Si considera che la radiazione solare che raggiunge il canyon è parzialmente bloccato dalla chioma delle alberature, in funzione del valore di densità di superficie alberata. La radiazione solare assorbita dagli alberi si divide in flussi di calore sensibile e latente. Il modello converte il 50% della radiazione assorbita il calore latente. Entrambi i flussi partecipano al bilancio energetico del canyon urbano. Sebbene la chioma dell'albero costituisca anche un ostacolo rispetto alla vista del cielo, che può ridurre la radiazione netta uscente dal canyon, il modello assume che tale effetto sia trascurabile, considerando la temperatura delle foglie abbastanza vicina a quella delle superfici urbane.

2.2 UWG: Parametri di input

Definizione[1] dei parametri di input di UWG versione 1.0.0.

<BUILDING>

The "building" structure defines the typical building in terms on HVAC systems, glazing information, floor to ceiling height, and internal gains.

<floorHeight> Units: Meters

Typical floor-to-floor height within the urban area.

<nightInternalGains> Units: W/m²

Typical total nighttime internal heat gains per hour, including heat gains from people, lights, and equipment.

<dayInternalGains> Units: W/m²

Typical total daytime internal heat gains per hour, including heat gains from people, lights, and equipment

<radiantFraction> Units: Unitless, ranges from 0 to 1.

average of radiant fraction of the total building internal gains including people, light, and equipment, weighted by hourly internal load from each component. Internal gain can be split into sensible [radiant [mostly] and convective] and latent heat

<latentFraction> Units: Unitless, ranges from 0 to 1

average of latent fraction of the total building internal gains including people, light, and equipment, weighted by hourly internal load from each component. Internal gain can be split into sensible [radiant [mostly] and convective] and latent heat

<infiltration> Units: ACH

typical building infiltration

<ventilation> Units: ACH.

typical building ventilation rate

<glazingRatio> Units: Unitless, ranges from 0 to 1.

ratio of glazed area to total facade surface

<windowUvalue> Units: W/m²K

thermal transmittance of windows, equal to 1/R-value

<windowSHGC> Units: Unitless, ranges from 0 to 1.

fraction of incident total solar radiation that reaches the interior

<coolingSystemType> Units: 'AIR' or 'WATER'.

mechanical cooling system in the urban area. The system can either be 'AIR' or 'WATER'

<coolingCOP> Units: unitless coefficient

mechanical cooling system coefficient of performance, described by the ratio of the heat removed from the typical building over the energy used by the cooling .

<heatReleasedToCanyon> Units: Unitless, ranges from 0 to 1.

amount of the waste heat from the mechanical cooling system that is exhausted into the urban canyon above your neighborhood boundary laye

<daytimeCoolingSetPoint> Units: °C

indoor setpoint for mechanical cooling system during the day

<nighttimeCoolingSetPoint> Units: °C

indoor setpoint for mechanical cooling system during the night

<daytimeHeatingSetPoint>. Units: °C

indoor setpoint for heating system during the day

<nighttimeHeatingSetPoint> Units: °C

indoor setpoint for heating system during the night.

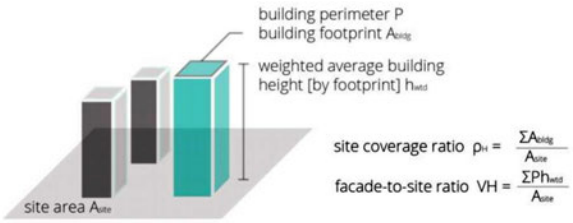
<coolingCapacity>. Units: W/m²

cooling system's ability to remove heat.

<heatingEfficiency>: Units: Unitless, ranges from 0 to 1.

effectiveness of a system in transforming the energy and power that is input to the device into an output. Efficiency is measured as a ratio of the measured performance to the performance of an ideal system

<URBAN AREA>



<averageBuildingHeight>. Units: Meters

average building height in the urban area, normalized by building footprint

<horizontalBuildingDensity> or <site coverage ratio> Units: unitless coefficient, ranges between 0 and 1

describes how close buildings are built in the city. Defined by $\Sigma A_{bldg} / A_{site}$, where A_{bldg} = building footprint and A_{site} = site area

<verticalToHorizontalUrbanAreaRatio> or <façade-to-site ratio > Units: unitless coefficient, ranges between 0 and 1

ratio of the vertical surface area [walls] to the urban plan area. Defined by $\Sigma P h_{wtd} / A_{site}$, where P = building perimeter, h_{wtd} = average building height, weighted by footprint, and A_{site} = total site area. Used to calculate canyon height and thus solar radiation received by building façade

<treeCoverage> Units: unitless coefficient, ranges between 0 and 1

amount of tree coverage in the urban area, includes those on the side streets

1 http://urbanmicroclimate.scripts.mit.edu/uwg_parameters.php

<nonBldgSensibleHeat> Units: W/m²

defines amount of heat released to urban canyon as sensible heat, mostly from traffic. Includes all sensible anthropogenic heat other than from buildings such as traffic, street lighting, and human metabolism

<nonBldgLatentAnthropogenicHeat> Units: W/m²

latent anthropogenic heat other than from buildings in the urban area

<radius> Units: Meters

radius of the urban area being modeled. This number should represent the total urban area even if only a smaller, representative section is being modeled

<ELEMENTS> (WALL, ROOF, ROAD, RURAL,MASS)

<albedo> Units: Unitless, ranges from 0 to 1.

Also known as reflection coefficient. It is the ratio of reflected radiation from the surface to incident radiation upon it. Affects sensible heat flux into boundary layer

<emissivity> Units: Unitless, ranges from 0 to 1.

Relative ability of the surface to emit energy by radiation. It is the fraction of energy radiated by a particular material compared to a black body. Affects sensible heat flux into boundary layer.

<vegetationCoverage>0</vegetationCoverage> Units: Unitless, ranges from 0 to 1.

The amount of vegetation on surfaces, such as green roof, grassy lawn, and vine-covered wall. A "vegetationCoverage" of 0 means no vegetation on the element surface, while "vegetationCoverage" of 1 means that the surface is completely covered in vegetation.

<initialTemperature> Units: °C

the initial temperature of a model element at the start of the simulation, midnight on January 1st. Since the UWG does not "warm up" as energyplus would, this value is directly input by the user.

<inclination>0</inclination> Units: Unitless, ranges from 0 to 1.

Orientation of the element. 0º = vertical [i.e. wall] and 1º = horizontal [i.e. roof]. A roof "inclination" of 0.5 would represent a roof with a 45% slope.

<materials> Units: varies.

defines the material of each layer of an element. Layers are sequentially defined from the exterior to the interior. Each material is defined by its 1) name, 2) thermal conductivity in watts per meter kelvin, 3) volumetric heat capacity in joules per meter cubed kelvin and 4) thickness in meters. The material names do not affect UWG results and are only for organization.

<names>

list construction layers; outer layers first

<thermalConductivity> Units: W/m-K

intrinsic property of the material to conduct heat

<volumetricHeatCapacity> Units: J/m³-K

Also known as thermal mass. ability of a given volume of a substance to store internal energy while undergoing a given temperature change, but without undergoing a phase transition. It is density * specific heat

<thickness>Units: Meters

Ranges between 0 and 1

<mass> Units: N/A

The sub-structure "mass" defines the construction of the typical, representative building internal mass. The mass is defined by 6 inputs: albedo, emissivity, vegetation coverage, initial temperature, inclination, and materials.

<REFERENCE SITE>

<latitude> Units: deg

latitude of the reference site

<longitude> Units: deg

longitude of the reference site

<averageObstacleHeight> Units: m

height of objects that obstruct views to the sky at the weather station site, such as trees and buildings

2.3 Individuazione delle variabili principali

Il set di parametri proposto da Bueno come input per il calcolo con UWG comprende 4 categorie di variabili, che fanno riferimento a 4 scale differenti: “Reference site”, “Urban Area”, “Building” e “Construction”.

La figura 151 (pagina successiva) riporta le variabili principali presenti in ciascuna categoria ed un’analisi del contributo di ciascuna variabile sul fenomeno dell’isola di calore. Per ciascuna variabile si esplicita pertanto mediante quale processo contribuisce all’innalzamento delle temperature e quale termine del bilancio energetico modifica.

In figura 151:

PRINCIPALI CAUSE DELL’ISOLA DI CALORE

1. Incremento di L↓ a causa dell’assorbimento della radiazione a onda lunga e successiva ri-emissione da parte delle sostanze inquinanti presenti in atmosfera.
2. Decremento di L↑ (decremento della perdita netta di energia per irraggiamento ad onda lunga) a causa della geometria dei canyon urbani che riduce lo SVF delle superfici.
3. Incremento o decremento di K* (K↓ - K↑= radiazione netta incidente) a causa della morfologia urbana che modifica il valore dell’albedo per motivi geometrici (trapping radiativo) oppure ostruisce gran parte della radiazione incidente, modificando la quota di radiazione netta assorbita dalle superfici.
4. Incremento di ΔQs per le proprietà termiche dei materiali da costruzione e per il rallentamento del raffrescamento notturno.
5. presenza di calore antropogenico (edifici, veicoli, industria, metabolismo umano)
6. Decremento dell’evapotraspirazione Q_E a causa della prevalenza di superfici impermeabili e scarsa presenza di alberi
7. Incremento di Qs nel canyon a causa della ridotta velocità del vento nella canopia urbana >

PARAMETRI PRINCIPALI

La figura 152 rappresenta l’analisi dell’importanza relativa assunta dai differenti parametri di input.

Il parametri di input del modello per la simulazione sono in tutto 58, ma non tutti possiedono la stessa rilevanza. Ad esempio i parametri della categoria “building” e parte di quelli della categoria “elements” servono per determinare il consumo energetico dell’edifico di riferimento, sulla base del quale si determina la porzione di calore di scarto immesso nel canyon dai sistemi di climatizzazione, pertanto sono parametri che indirettamente partecipano alla determinazione dell’isola di calore. Al contrario i parametri della categoria “urban area” e parte dei parametri in “elements” rappresentano variabili urbane che incidono direttamente sul bilancio energetico, influendo sui flussi di calore urbani attraverso processi radiativi termici e convettivi.

Per ciascun parametro nella tabella si evidenzia se partecipa in modo diretto o indiretto alla formazione dell’isola di calore e se ne valuta la rilevanza sulla base dello stato dell’arte in materia.

Viene anche esplicitato quali parametri concorrono alla formazione dell’isola di calore attraverso effetti molteplici, quali attraverso un effetto singolo. L’ipotesi di partenza è che i parametri che concorrono in maniera diretta alla modificazione delle temperature o che contribuiscono attraverso una molteplicità di effetti assumono un ruolo di maggiore importanza nella formazione dell’isola di calore.

A fronte di tali considerazioni sono state individuate le 6 categorie di variabili principali per lo svolgimento delle analisi di sensibilità del modello.

VARIABILI PRINCIPALI:

1.Raggio della città

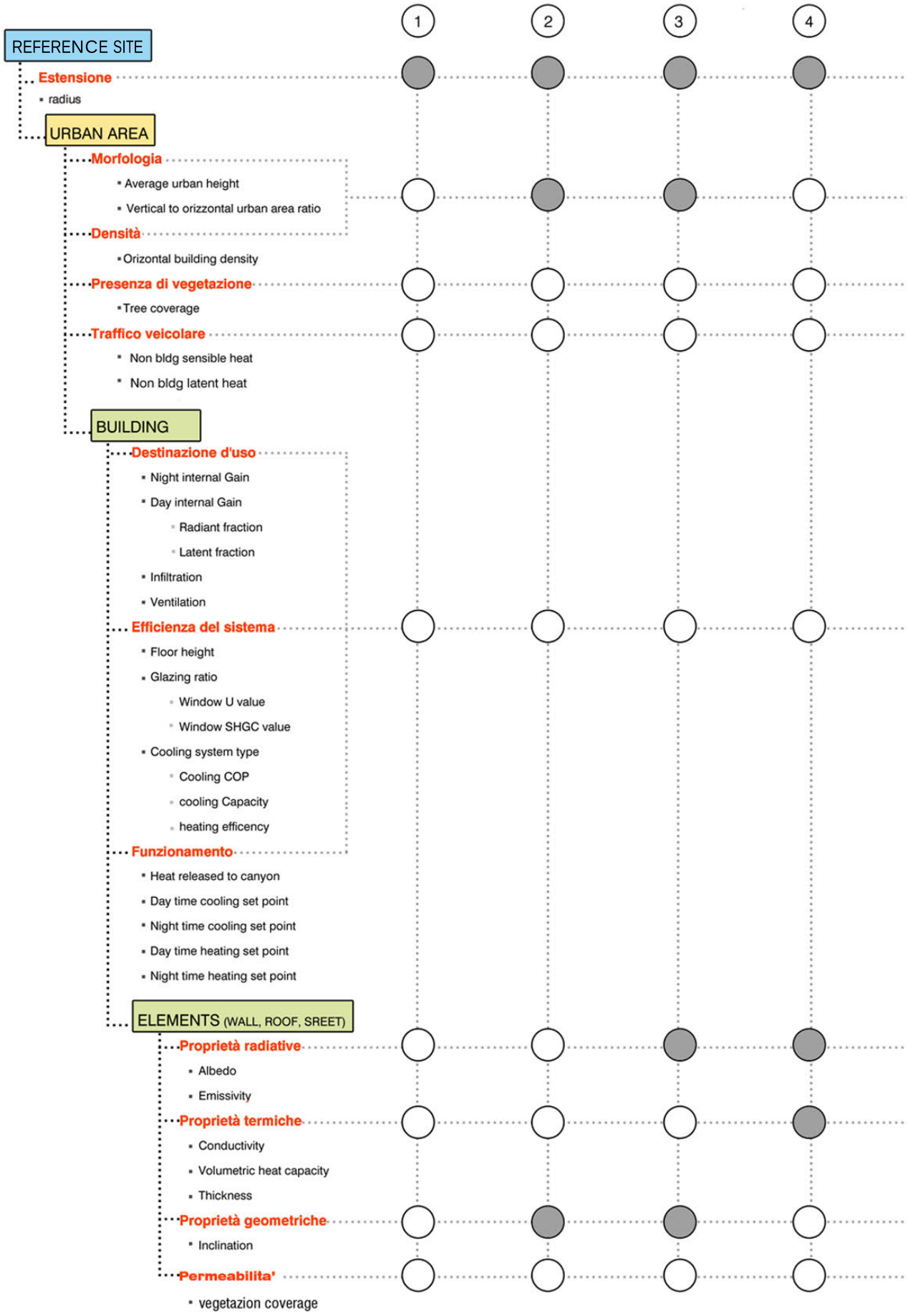
2.Parametri morfologici e di densità

3.Presenza di alberature

4.Albedo delle superfici

5.Proprietà termiche dei materiali

6.Presenza dei sistemi di aria condizionata


1
2
3
4
REFERENCE SITE
Estensione
radius
URBAN AREA
Morfologia
Average urban height
Vertical to orizzontal urban area ratio
Densità
Orizontal building density
Presenza di vegetazione
Tree coverage
Traffico veicolare
Non bldg sensible heat
Non bldg latent heat
BUILDING
Destinazione d'uso
Night internal Gain
Day internal Gain
Radiant fraction
Latent fraction
Infiltration
Ventilation
Efficienza del sistema
Floor height
Glazing ratio
Window U value
Window SHGC value
Cooling system type
Cooling COP
cooling Capacity
heating efficency
Funzionamento
Heat released to canyon
Day time cooling set point
Night time cooling set point
Day time heating set point
Night time heating set point
ELEMENTS (WALL, ROOF, SREET)
Proprietà radiative
Albedo
Emissivity
Proprietà termiche
Conductivity
Volumetric heat capacity
Thickness
Proprietà geometriche
Inclination
Permeabilita'
vegetazion coverage

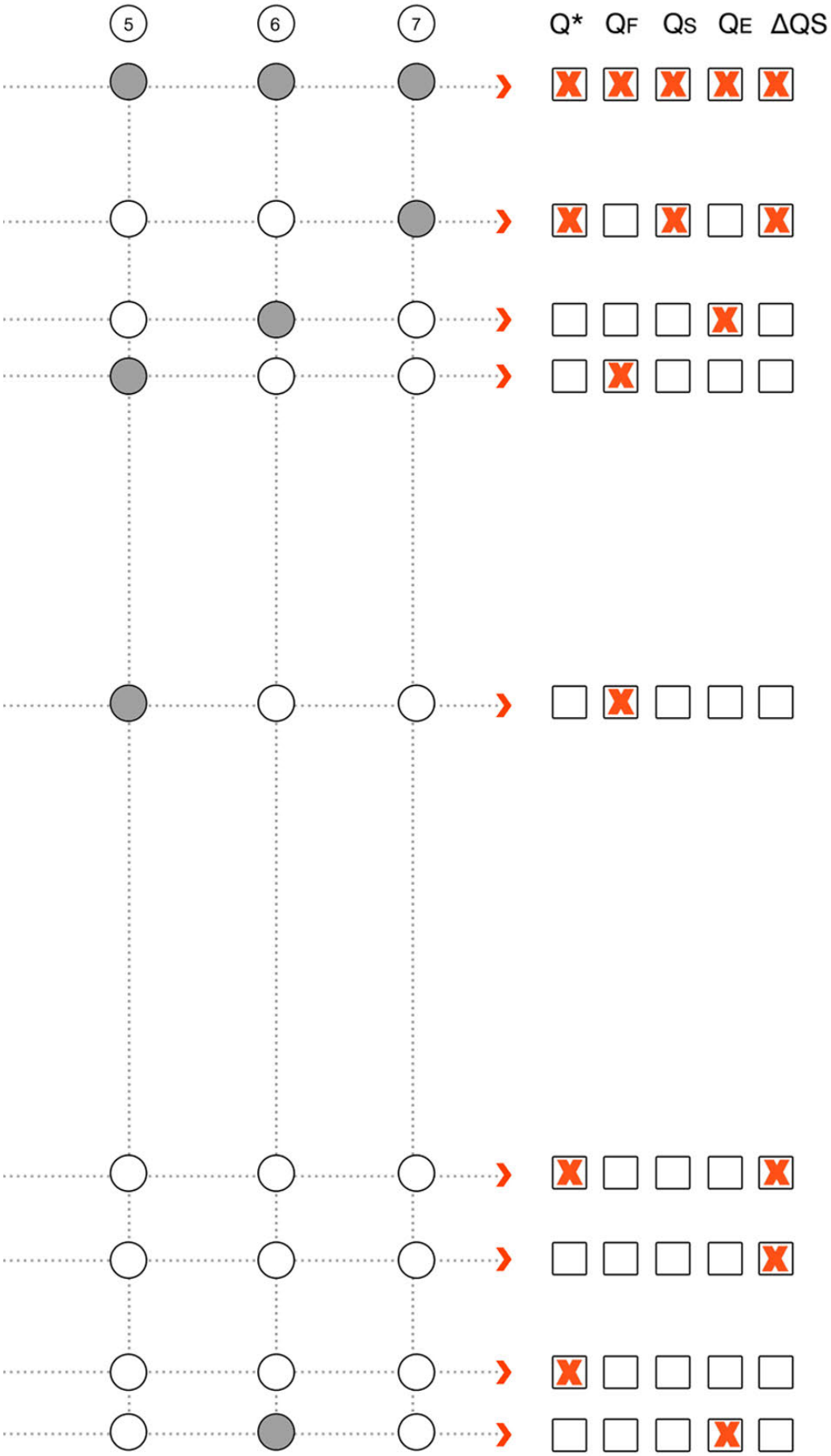


Figura 151 Ralazione tra i parametri di calcolo di UWG e i fenomeni termici che determinano la formazione dell'isola di calore. Per ciascun parametro è stato indicato attraverso quale "causa" contribuisce all'innalzamento delle temperature (1, 2,3 ..etc) e quale termine del bilancio energetico urbano interessa

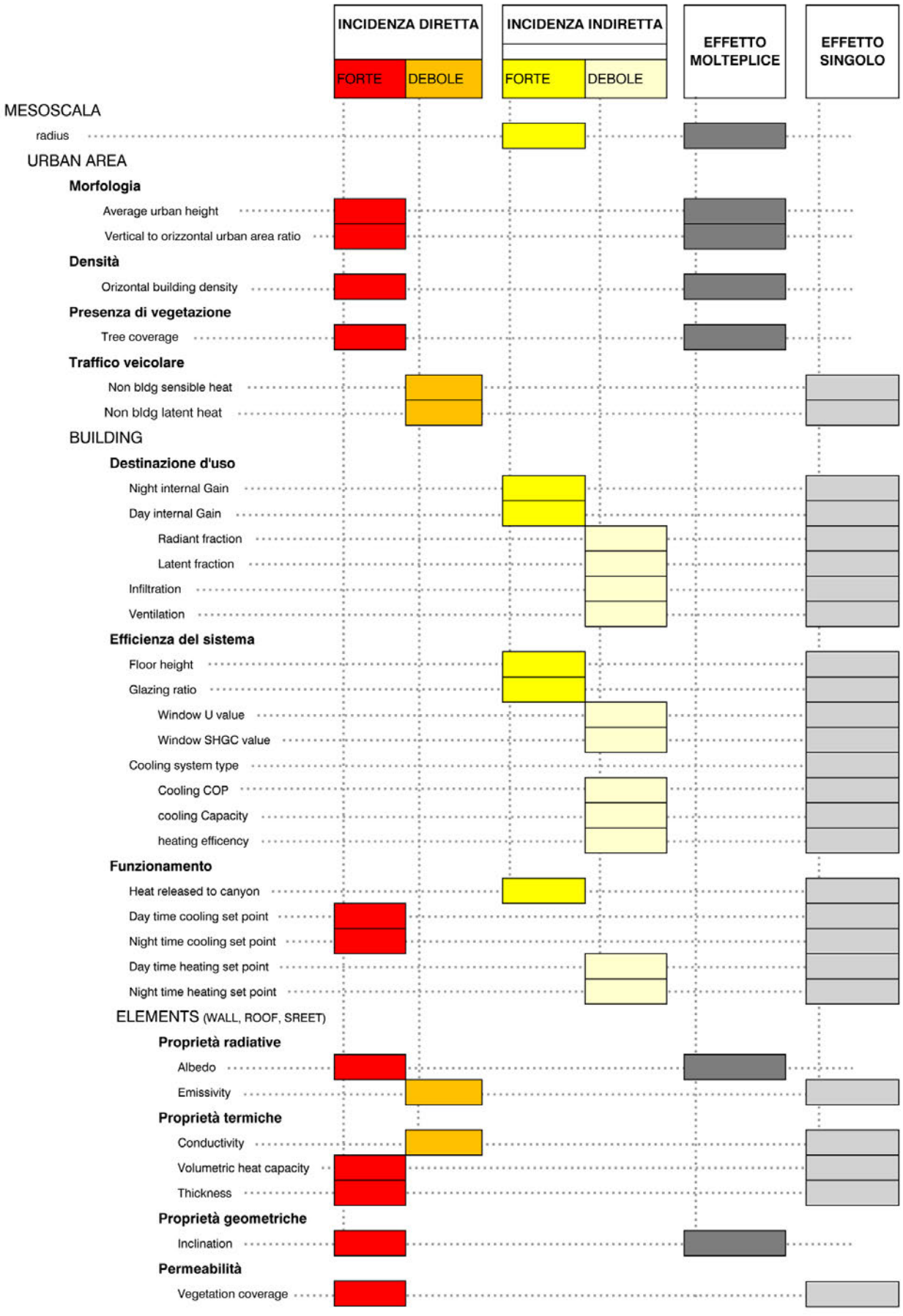


Figura 152 Criteri di individuazione dei parametri principali su cui svolgere le analisi di sensibilità del modello UWG.

Bibliografia:

Bentham, T. and Britter, R., (2003). Spatially averaged flow within obstacle arrays. *Atmospheric Environment*, 37 (15), 2037–2043

Bueno, B., Norford, L., Hidalgo, J., & Pigeon, G. (2013). The urban weather generator. *Journal of Building Performance Simulation*, 6(4), 269–281. doi:10.1080/19401493.2012.718797

Hidalgo, J., Masson, V., and Gimeno, L., (2009). Scaling the daytime urban heat island and urban-breeze circulation. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(5),889– 901.

Hong, S.Y., Noh, Y., and Dudhia, J., (2006). A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review*, 134 (9), 2318–2341.

Masson, V., (2000). A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorology*, 94, 357–397

Palyvos, J., (2008). A survey of wind convection coefficient correlations for building envelope energy systems' modeling, *Applied Thermal Engineering*, 28 (8–9), 801–808

Siegel, R. and Howell, J., (1981). *Thermal radiation heat transfer*. Series in thermal and fluids engineering. London: Hemisphere Publishing Corporation.

ALLEGATO 3

3. Analisi di sensibilità del modello UWG

3.I Metodologia

La descrizione dell'area urbana in forma parametrica permette la realizzazione di analisi di sensibilità utili ad evidenziare il ruolo delle principali variabili sull'incremento delle temperature urbane. L'analisi di sensibilità consiste nel valutare gli effetti sul risultato fornito dal modello (UWG) indotti da modifiche nei valori delle variabili di ingresso.

Eseguendo un set di simulazioni in cui viene fatto variare un solo parametro alla volta, secondo un intervallo di valori predeterminato, è possibile valutare quanto esso sia determinante nel fenomeno dell'isola di calore e valutarne comparativamente la gerarchia rispetto ad altri parametri. Le analisi di sensibilità dei parametri sono volte pertanto all'individuazione della rilevanza reciproca di ciascuna variabile rispetto al fenomeno dell'isola di calore locale e, in particolare, all'individuazione del ruolo svolto dalle caratteristiche morfologiche e di densità del costruito nei tessuti urbani omogenei della città Mediterranea.

A tal fine occorre preliminarmente valutare l'intervallo di variabilità reale assunto da ciascun parametro, considerandone l'ambito oggetto di studio, vale a dire le città di Roma e Barcellona. Sebbene infatti alcuni parametri risultino molto incisivi nella modificazione dei microclimi locali, non è detto che nel contesto urbano possano assumere valori sufficientemente differenti da produrre variazioni apprezzabili nelle temperature urbane.

Occorre dunque individuare quali parametri possiedano un intervallo di variazione tale da incidere sull'andamento delle temperature in modo significativo, assumendo invece per tutte le altre variabili dei valori medi costanti.

Individuato l'intervallo di variazione di ciascun parametro test, le analisi di sensibilità sono state svolte mantenendo costanti i valori di tutti gli altri parametri input e svolgendo un adeguato numero di simulazioni per ciascun valore assegnato al parametro oggetto di analisi. Come risultato è stato analizzato la variazione di isola di calore media mensile in funzione dei diversi valori assunti dal parametro. I dati climatici di input per le simulazioni fanno riferimento alla media delle osservazioni per il periodo 1951-1970 a Roma-Campino (formato dati IGDG[1]).

PARAMETRI "REFERENCE SITE"

RAGGIO DELLA CITTÀ

Il raggio della città rappresenta uno dei parametri della categoria "Reference site" insieme alla latitudine e longitudine. Nel calcolo viene utilizzato per determinare la velocità di circolazione al di sopra dell'area urbana, utile a determinare se i termini avvettivi sono legati essenzialmente al vento geostrofico (convezione forzata) o alla circolazione di brezza urbana dovuta all'effetto dell'isola di calore (flussi governati dal galleggiamento- buoyancy-driven).

Per valutare l'influenza dell'estensione dell'area urbanizzata sull'incremento locale delle temperature sono stati individuati dei raggi rappresentativi di città di piccola dimensione (r=1500m) fino all'estremo di grandi megalopoli (r=20000m).

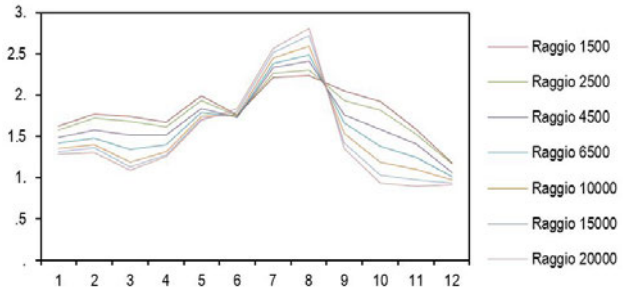


Figura 153 Isola di calore media mensile per differenti valori del raggio della città

La variazione di UHI media mensile è riportata nella figura 153. Il programma calcola un ΔT per città di dimensioni molto limitate, con diametro di circa 3 Km, molto prossimo a quello di città fino a 20000 m di raggio circa. A titolo di esempio si riportano alcune città rappresentative di ciascun valore test di raggio:

1500 m : Mataro (Catalogna), Perugia

2500 m : Basilea, Bologna

4500 m : Barcellona

6500 m : Roma

10000 m : Parigi, Londra (limite città europee)

20000 m : Città del Messico, San Paolo

L'incremento dell'effetto dell'isola di calore in funzione del raggio della città appare del tutto irrilevante, con una differenza massima estiva tra il valore per una città di 1500 m di raggio e quello di una da 20000m pari a circa 0,5 °C.

PARAMETRI MORFOLOGICI E DI DENSITA'

I parametri morfologici descrittivi dell'area oggetto di esame rientrano nella categoria "Urban area" e sono i seguenti:

- ALTEZZA MEDIA (Average building height - h_{bld}): Altezza media dell'edificio nell'area urbana, normalizzato in funzione dell'area costruita

- RAPPORTO DI COPERTURA (Site coverage ratio - ρ_{urb}): Rapporto tra l'impronta dell'edificio e l'area di riferimento del

1 Per un approfondimento della fonte dei dati meteorologici consultare https://energyplus.net/weather/sources#IGDG

sito

- RAPPORTO DI FACCIATA (Façade to site ratio - VH_{urb}):): Rapporto tra le superficie verticale dell'edificio e l'area di riferimento del sito

Per individuarne il grado di variabilità in ambito urbano è stato scelto un campione rappresentativo di tessuti urbani omogenei presenti nella realtà di Roma e Barcellona (Barceloneta, Ensanche, Marbella, Borrel y Soler, Raval e Gracia a Barcellona e Balduina, Don Bosco, Prati e Centocelle a Roma). Per il calcolo dei parametri morfologici relativi a ciascun tessuto urbano è stato costruito un modello digitale fondato su un processo di normalizzazione e replicazione (Morganti, 2013, Zhang et al., 2012). Su tali modelli digitali "tipologici" sono stati dunque calcolati i parametri morfologici richiesti dal programma[2] (tabella 35).

Per valutare la sensibilità del programma ai parametri morfologici sono state condotte 10 simulazioni, una per ciascun tessuto urbano, parametrizzato rispetto ai tre rispettivi indici morfologici. La variazione dell'isola di calore media mensile in funzione della morfologia urbana è riportata in figura 154. I risultati delle simulazioni mostrano una consistente variazione dei valori di isola di calore media nei differenti casi di studio, sia in inverno che in estate, confermando la rilevanza delle variabili morfologiche sull'intensità del fenomeno.

La differenza di UHI media nei differenti casi studio analizzati arriva infatti fino a circa 2,5° in inverno e 2°C in estate. In inverno le temperature medie maggiori si registrano nel Raval, che rappresenta il caso con densità orizzontale maggiore. Nel periodo estivo, Raval e Barceloneta rappresentano i casi più sfavorevoli. Alla luce di questo primo risultato, la relazione tra i parametri morfologici e l'isola di calore è stata approfondita nel capitolo 5.

Intervallo dei parametri Morfologici			
TESSUTO	**Hbld**	**purb**	VHurb
	Altezza media	Rapporto di copertura	Rapporto di superficie verticale
BARCELONETA	16.50	0.52	3.26
EIXAMPLE	15.95	0.62	1.95
MAR BELLA	19.52	0.33	1.63
BORREL I SOLER	15.00	0.20	1.04
RAVAL	19.50	0.80	2.98
GRACIA	11.60	0.64	2.18
BALDUINA	19.50	0.43	1.71
DON BOSCO	25.50	0.43	1.68
PRATI	19.50	0.49	1.43
CENTOCELLE	14.67	0.34	1.35

Tabella 35 Parametri morfologici test per l'analisi di sensibilità di UWG

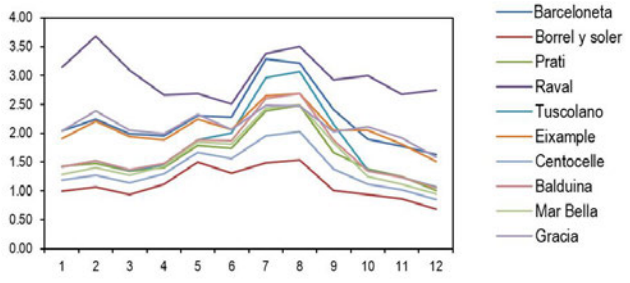


Figura 154 Isola di calore media mensile in funzione delle differenti morfologie urbane analizzate

2 Una più esaustiva descrizione dei casi di studio e dei criteri di modellazione è stata trattata nel capitolo 4

PERCENTUALE DI SUPERFICIE ALBERATA

Un secondo parametro rilevante della categoria "Urban area" è la percentuale di superficie alberata. Nel calcolo di UWG, la presenza di alberature influisce sull'ombreggiamento delle superfici e sulla quota di calore latente presente nell'area di studio. Il parametro di input per il programma è il "Tree coverage", dato dal rapporto tra la superficie alberata e la superficie urbana di riferimento. Per il calcolo dell'intervallo di variabilità del parametro è stato utilizzato il campione di tessuti urbani individuato precedentemente. In effetti il parametro "Tree coverage" risulta subordinato ai parametri morfologici dell'area, ed in particolare al rapporto di copertura. Infatti tanto più elevata è la densità e la compattezza dell'edificato e tanto minore sarà lo spazio disponibile per la presenza di alberature. Nei casi studi analizzati è stata rilevata una variabilità dal 5% (in Raval) al 28% (nel quartiere a bassa densità di Borrel y Soler). I risultati dell'analisi di sensibilità a questo parametro mostrano una differenza media nell'isola di calore mensile molto limitata durante i mesi invernali e leggermente più rilevante nei mesi estivi, sebbene tale differenza non raggiunga neanche 0.5°C (figura 155). La presenza di alberature rappresenta pertanto un parametro molto meno influente rispetto alla morfologia urbana dell'area di riferimento[3].

3 Le simulazioni sono state condotte utilizzando come parametri costanti per la morfologia urbana quelli relativi a Borrel y Soler (rapporto di copertura pari a 0.2), per permettere di poter utilizzare il massimo valore per la superficie alberata pari al 28% senza entrare in conflitto con il valore della superficie costruita. Per tale motivo l'isola di calore media mensile risulta mediamente bassa durante tutti i mesi dell'anno.

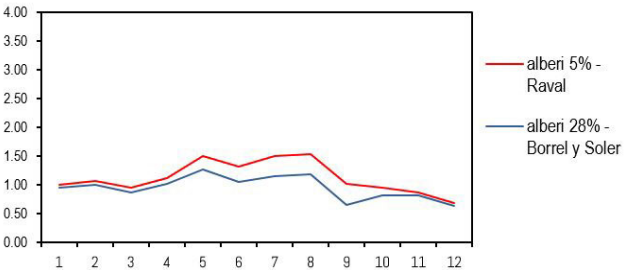


Figura 155 Isola di calore media mensile in funzione delle differenti percentuali di superficie alberata

Figura 156 Raval e Borrel y Sorel : tessuti con valori massimi e minimi dei parametri morfologi e della presenza di alberature

PARAMETRI "BUILDING"

ARIA CONDIZIONATA: SET POINT e CALORE DI SCARTO NEL CANYON

I sistemi di raffrescamento meccanico sono oggi sempre più diffusi, anche in regioni climatiche con estati miti o moderatamente calde. L'impiego su larga scala dei sistemi di climatizzazione innesca un pericoloso circolo vizioso: se da un lato essi garantiscono il raffrescamento degli ambienti interni, al prezzo di un aumento significativo dei consumi energetici annuali, dall'altro immettono calore di scarto nell'atmosfera che contribuisce all'innalzamento delle temperature urbane. Alcuni studi hanno dimostrato che la presenza di sistemi di aria condizionata su larga scala determina un incremento significativo delle temperature urbane, ancor più preoccupante in previsione del cambio climatico globale in atto (de Munck et al., 2013). Il modello UWG tiene in considerazione tale contributo per mezzo di due parametri contenuti nella categoria "Building": uno volto a indicare la temperatura media di raffrescamento (diurno e notturno) ed un secondo che specifica la modalità di immissione del calore di scarto nel canyon. Il primo parametro è il "cooling set point", attraverso il quale UWG determina il consumo energetico per l'edifico di riferimento e la proporzionale quantità di calore antropogenico immessa nei canyon.

Come valori di riferimento del "Cooling set point" si assume un margine di variazione compreso tra un valore estremamente basso e l'assenza del sistema di aria condizionata. Le analisi di sensibilità sono state quindi effettuate utilizzando i seguenti parametri test: 22°C, 24°C, 26°C e 40°C, quest'ultimo a indicare l'assenza di un sistema di climatizzazione.

Un secondo parametro riferito al sistema di climatizzazione è definito "Heat released to canyon". Tale parametro può variare da 0 a 1 e indica quale percentuale del calore di scarto prodotto dai sistemi di ventilazione e condizionamento viene immesso nel canyon. In maniera indiretta definisce pertanto che tipo di impianto è presente nell'edificio di riferimento, se caratterizzato da unità singole installate in ciascun appartamento o se di tipo "centralizzato", con posizionamento delle macchine in copertura.

Il parametro varia tra zero ed uno, indicando rispettivamente l'assenza o la totale immissione del calore di scarto nel canyon. I parametri testati per le analisi di sensibilità sono 0, 0.5 e 1, mantenendo costante il valore del set point a 24°C.

I risultati in figura 159 confermano la rilevanza di tali parametri nella determinazione dell'isola di calore estiva. La presenza di sistemi di climatizzazione e basse temperature di raffrescamento degli ambienti inducono un incremento medio delle temperature fino a 1,9°C nel mese più caldo. Tale incremento diminuisce per valori di temperature di raffrescamento più elevate, ma risulta rilevante anche per un set point pari a 26°C, che determina un aumento dell'isola di calore media fino ad un 1°C rispetto all'assenza di sistemi di aria condizionata. La modalità di rilascio del calore nel canyon assume altrettanta importanza. Qualora il calore di scarto venga interamente immesso nel canyon, le temperature nella canopia urbana incrementano fino a 0.7°C in agosto rispetto al posizionamento delle macchine di estrazione in copertura (parametro uguale a 0). Il parametro pertanto ha un'incidenza non trascurabile, ma indubbiamente risulta secondario rispetto al set point considerato.

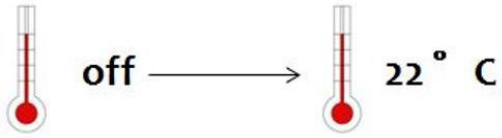


Figura 157 Estremi di variazione del parametro "Cooling set point"

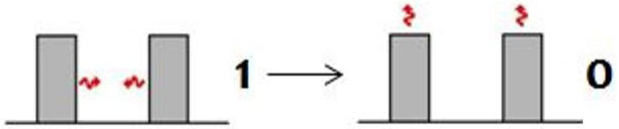


Figura 158 Variazione del parametro che indica la modalità di rilascio del calore di scarto nel canyon (Heat released to canyon)

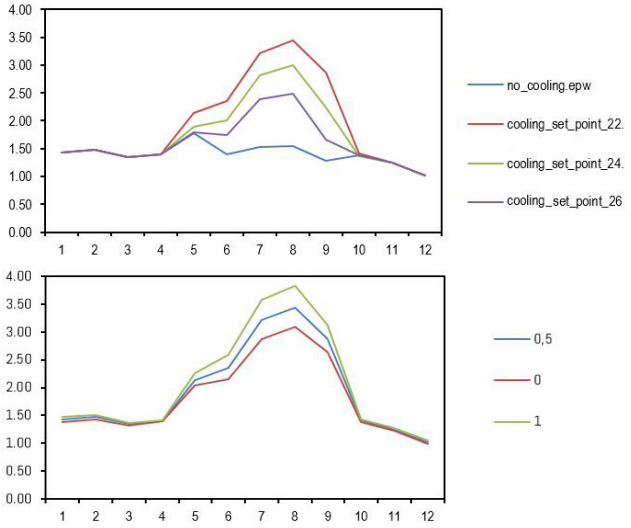


Figura 159 Variazione dell'isola di calore media mensile in funzione dei valori di "cooling set point" (sopra) e "Heat released to canyon" (sotto)

PARAMETRI "ELEMENTS"

Nella categoria "elements" sono raccolti i parametri che descrivono le proprietà termiche dei materiali che compongono l'involucro dell'edificio, importanti al fine della determinazione dell'isola di calore perchè influenti nei meccanismi di riflessione e assorbimento della radiazione solare incidente, nonchè nei processi di interscambio termico per conduzione, convezione ed irraggiamento tra ambiente interno ed esterno. Il programma tiene in conto della stratrigrafia di parete tetto e strada. Per ciascun elemento e per ciascun strato il modello richiede la descrizione dei materiali presenti attraverso l'introduzione di tre parametri: la sua conducibilità termica (W m^{-1}

K^{-1}), la capacità termica volumetrica (J m^{-3} K^{-1}) e lo spessore (m). Per quanto riguarda la conduttività termica dei materiali edili è possibile distinguere tra materiali isolanti e non isolanti. La capacità termica volumetrica è data invece dal prodotto del Calore specifico (Cs) per la densità del materiale. Il valore di Cs è piuttosto omogeneo per i materiali edili, pertanto la differenza nel comportamento termico della parete è dato dalla densità e dallo spessore dei materiali impiegati, ovvero dall'inerzia termica globale del sistema di chiusura verticale.

TIPO DI PARETE

Considerando il comportamento termico globale del sistema di parete, le tipologie costruttive ed i sistemi di chiusura verticale che hanno caratterizzato le diverse epoche storiche, l'intervallo di variabilità maggiore che possiamo incontrare in ambito urbano è la differenza tra una parete portante massiccia ed una tamponatura di tipo "leggero". L'analisi di sensibilità è stata condotta utilizzando come parametri test quelli corrispondenti a due tipologie di parete diverse per trasmittanza termica (U) ed inerzia, corrispondenti rispettivamente ad una parete in muratura portante e ad una tamponatura di tipo a cassetta isolata. Nello specifico sono state considerate le stratigrafie riportate nella tabella 36.

Il risultato delle simulazioni mostra una scarsa importanza di tali parametri sulla variazione del microclima esterno. Al variare dell'inerzia della parete si registra un incremento massimo estivo di circa 0,3°C in favore della parete massiccia. Una parete con maggiore inerzia, infatti, immagazzina il calore durante l'arco della giornata per poi rilasciarlo durante la notte.

Parete Pesante (U=1,5 W/mq K):			
Materiale (dall'esterno)	**Spessore m**	**Conducibilità W/m K**	**capacità termica volumetrica J/m³ K**
intonaco	0.02	1.0	1400000
muratura portante	0.5	0.72	1612800
intonaco	0.01	1.0	1400000

Parete Leggera (U=0,3 W/mq K):			
Materiale (dall'esterno)	**Spessore m**	**Conducibilità W/m-K**	**capacità termica volumetrica J/m³-K**
intonaco	0.02	1.0	1400000
laterizio alleggerito	0.08	0.37	930000
aria	0.05	0.026	1206
isolante	0.07	0.034	49000
laterizio alleggerito	0.12	0.37	930000
intonaco	0.01	1.0	1400000

Tabella 36 Stratigrafie considerate per il tipo di parete "pesante" e "leggera"

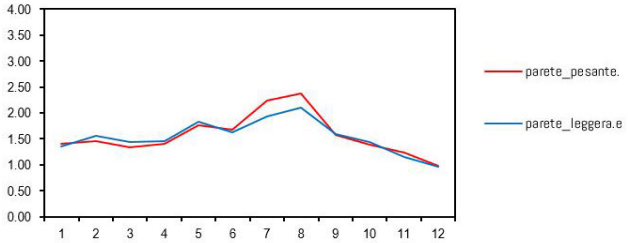


Figura 160 Variazione dell'isola di calore media mensile in funzione dell'inerzia della parete

Tale comportamento, sebbene benefico per quanto riguarda il comfort estivo interno, contribuisce all'innalzamento delle temperature urbane notturne. Nonostante ciò, la differenza calcolata dal programma risulta del tutto irrilevante.

ALBEDO DELLE SUPERFICI

Un secondo parametro caratterizzante gli elementi del canyon è l'albedo delle superfici. Nel campo delle strategie per la mitigazione del fenomeno dell'isola di calore, l'incremento dell'albedo delle superfici risulta una delle strategie più diffuse e pubblicizzate. Un incremento dei valori di albedo comporta, infatti, un incremento della riflessione della radiazione incidente e pertanto un abbattimento dell'assorbimento e immagazzinamento del calore.

Sebbene gli aspetti positivi dell'incremento dell'albedo siano noti, va però evidenziato che l'intervallo di variazione del valore dell'albedo superficiale in ambiente urbano è piuttosto basso. Il valore dell'albedo delle superfici varia tra 0 a 1 (albedo uguale a 1 significa che tutta la radiazione incidente viene riflessa dalla superficie) e dipende dalla colorazione delle stesse. Le colorazioni presenti in città, considerando la media di un'area urbana, sono piuttosto omogenee. Analizzando in letteratura il valore medio dell'albedo di strade, pareti e tetti è possibile individuare i seguenti intervalli di variazione (Gartland, 2008):

- tra 0.2 e 0.5 per la parete (intonaci e rivestimenti di tinte scure o chiare)
- tra 0.08 e 0.2 per la strada (asfalto fresco o invecchiato)
- tra 0.1 e 0.35 per il tetto (coperture impermeabilizzate, in laterizio o pavimentate per esterni)

L'analisi di sensibilità all'albedo è stata eseguita utilizzando come parametri test la combinazione con i minimi o i massimi valori di albedo degli intervalli individuati per parete, strada e tetto.

Il grafico in figura 161 mostra che, sebbene il valore dell'albedo delle superfici sia un fattore importante, quando si considera la media assunta da tale parametro in un'area urbana non è possibile raggiungere valori tali da determinare un abbassamento significativo delle temperature alla scala locale. Le strategie volte all'incremento dell'albedo possono avere un esisto positivo solo se applicate su larga scala, ovvero alme-

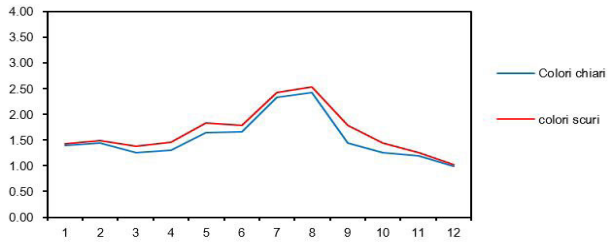


Figura 161 Variazioni cromatiche di pareti, tetti e strade in ambito urbano

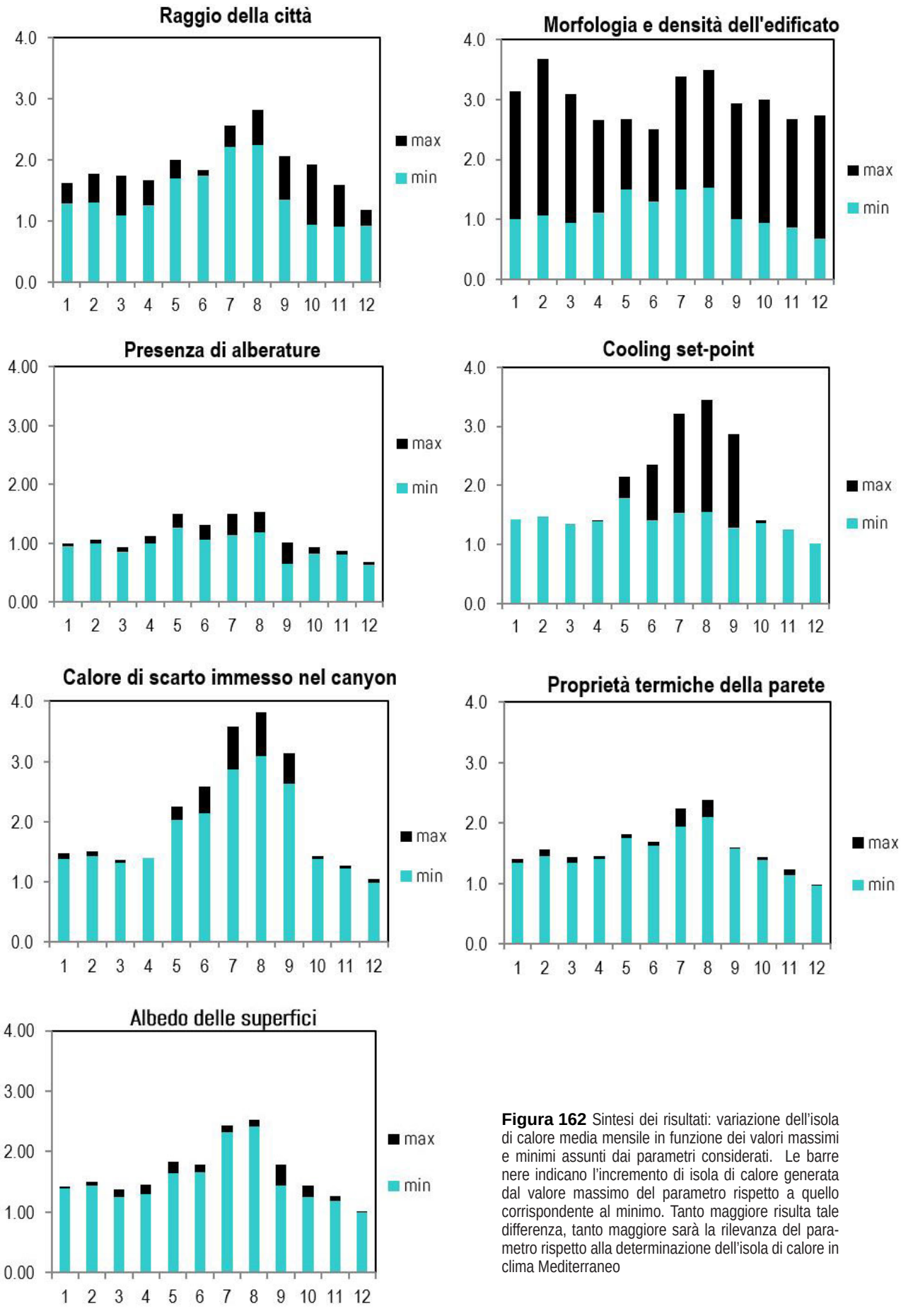


Figura 162 Sintesi dei risultati: variazione dell'isola di calore media mensile in funzione dei valori massimi e minimi assunti dai parametri considerati. Le barre nere indicano l'incremento di isola di calore generata dal valore massimo del parametro rispetto a quello corrispondente al minimo. Tanto maggiore risulta tale differenza, tanto maggiore sarà la rilevanza del parametro rispetto alla determinazione dell'isola di calore in clima Mediterraneo

no a interi quartieri. In tal senso, se la colorazione dei tetti o l'applicazione di "materiali freddi" alle coperture potrebbe rappresentare una strategia praticabile, molto più difficile appare l'applicabilità per quanto riguarda le facciate degli edifici o le strade, considerando i limiti normativi, economici e soprattutto la rilevanza architettonica e culturale assunta da tali elementi nei centri storici e consolidati delle realtà urbane europee.

3.2 Comparazione e discussione dei risultati

A fronte dell'analisi di sensibilità di ciascuna categoria di variabili, risulta utile un confronto tra i differenti risultati ottenuti al fine di valutare la gerarchia dei parametri coinvolti nella determinazione dell'innalzamento delle temperature in area urbana. Analizzando comparativamente il grado di variazione dell'isola di calore generata in funzione dei valori minimi e massimi assunti dai parametri è possibile evidenziare quale variabile sia più determinante nella formazione dell'isola di calore in clima mediterraneo, considerando l'intervallo di effettiva variabilità della medesima in ambito urbano.

I grafici in figura 162 evidenziano la differenza tra l'intensità dell'isola di calore media mensile determinata dal valore massimo assunto dai parametri rispetto a quella determinata dal valore minimo, per ciascuna categoria. Tali differenze, indicate con le barre nere, indicano pertanto il grado di variabilità dell'isola di calore in funzione di ciascun parametro.

Appare evidente dai grafici che la variazione di isola di calore indotta da differenti morfologie urbane è molto più rilevante rispetto agli altri parametri. Nel mese di febbraio raggiunge 3.5 °C mentre nei mesi estivi vale circa 2°C. L'entità di questa variazione è paragonabile solo nella stagione estiva a quella indotta dalla presenta di un sistema di aria condizionata con set-point molto basso, che determina un innalzamento delle temperature fino a 1.9°C rispetto ad una condizione di assenza di sistemi di climatizzazione.

Va però sottolineato che l'incremento significativo delle temperature esterne in funzione del set-point dell'aria condizionata si produce con valori delle temperature di raffrescamento molto bassi, pari a 22 °C. Inoltre tale parametro dovrebbe essere rappresentativo di tutta l'area urbana oggetto di studio ed, evidentemente, tale approssimazione è fortemente lontana dalla realtà. Al contrario, in tutte le realtà urbane è possibile identificare porzioni morfologicamente omogenee con diversi gradi di densità e compattezza.

Possiamo pertanto concludere che l'influenza della morfologia urbana sull'andamento delle temperature esterne è forte e persiste durante tutto l'arco dell'anno in maniera preponderante rispetto alle altre categorie di variabili analizzate. Al contrario, altri parametri quali la percentuale di superficie alberata, le proprietà termiche della parete o l'albedo delle superfici rivestono una rilevanza secondaria alla scala locale, in quanto tendono ad assumere valori più uniformi se mediati sull'intera area. L'albedo delle superfici e le alberature, in particolare, sono in grado di modificare il microclima di uno specifico sito, prestandosi a studi relativi al comfort urbano e degli spazi pubblici piuttosto che alla determinazione dell'isola di calore a scala locale e urbana.

ALLEGATO 4

4. Validazione UWG: parametri di input

GRACIA (BARCELLONA)

Simulazione luglio 2014 - Parametri input

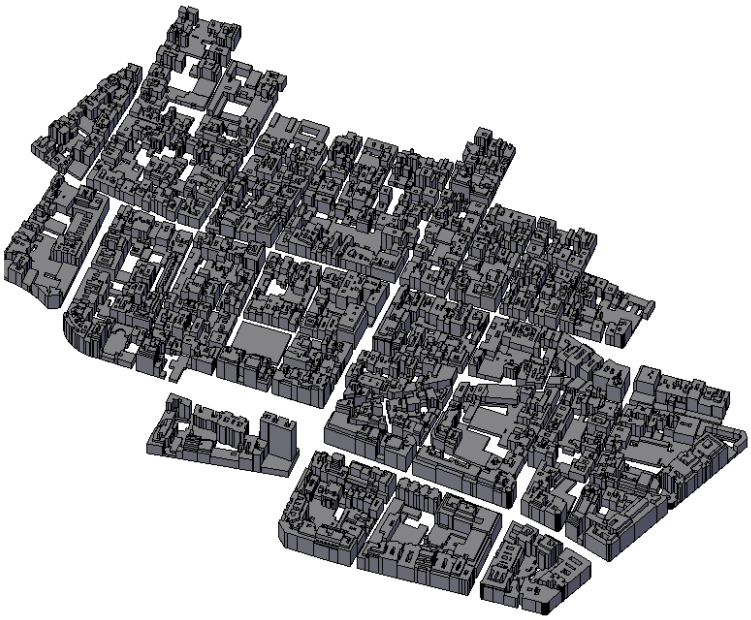


Figura 163 Stazione Gracia: Inquadramento urbano, footprint della stazione e modello CAD per il calcolo dei parametri morfologici

	Gracia
Area Urbana di riferimento	359563
Superficie costruita	199385.8
Superficie verticale	821464.3
Altezza media edificato	**15.3**
Rapporto di copertura	**0.55**
Rapporto di facciata	**2.28**

Tabella 37 Parametri mrofologici relativi alla footprint della stazione Gracia

<RURAL WEATHER FILE>:
Aeroporto di El Prat de Llobregat (2014)

<ELEMENTS>

Wall:
albedo: 0.25
emissivity: 0.92
vegetationCoverage: 0
initialTemperature: 20 °C
inclination:0

Materials:
Brick:
Thickness: 0.4m
ThermalConductivity: 0.9 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 1800000 J/m^{3}K
Plaster:
Thickness: 0.03m
ThermalConductivity: 1.0 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 1400000 J/m^{3}K

Roof:
albedo: 0.25
emissivity: 0.92
vegetationCoverage: 0
initialTemperature: 20 °C
inclination:1

Materials:
Tiles:
Thickness: 0.03m
ThermalConductivity: 0.7 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 1500000 J/m^{3}K
insulation:
Thickness: 0.03m
ThermalConductivity: 0.04 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 30000 J/m^{3}K
screed:
Thickness: 0.07m
ThermalConductivity: 1.1 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 2000000 J/m^{3}K
hollow-brick slab:
Thickness: 0.25m
ThermalConductivity: 0.7 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 2000000 J/m^{3}K

Road:
albedo: 0.08
emissivity: 0.95
vegetationCoverage: 0
initialTemperature: 20 °C
inclination:1

Materials:
Asphalt:
Thickness: 0.05m
ThermalConductivity: 0.74 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 1940000 J/m^{3}K
Stones:
Thickness: 0.2 m
ThermalConductivity: 2.1 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 2000000 J/m^{3}K
Soil:
Thickness: 0.1 m
ThermalConductivity: 0.4 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 1400000 J/m^{3}K

Rural
albedo: 0.25
emissivity: 0.92
vegetationCoverage: 20%
initialTemperature: 20 °C
inclination:1

Materials:
Asphalt:
Thickness: 0.05m
ThermalConductivity: 0.74 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 1940000 J/m^{3}K
Stones:
Thickness: 0.2 m
ThermalConductivity: 2.1 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 2000000 J/m^{3}K
Soil:
Thickness: 0.1 m
ThermalConductivity: 0.4 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 1400000 J/m^{3}K

Mass
albedo: 0.7
emissivity: 0.9
vegetationCoverage: 0
initialTemperature: 20 °C
inclination:0

Materials:
Concrete:
Thickness: 0.1m
ThermalConductivity: 0.93 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 1500000 J/m^{3}K

<BUILDING>

FloorHeight: 3.3 m
NightInternalGains: 5.8 W/m^2
DayInternalGains: 2.0 W/m^2
RadiantFraction: 0.2
LatentFraction: 0.2

Infiltration: 0.2 ACH
Ventilation: 0.3 ACH
GlazingRatio : 0.3
WindowUvalue : 2.715 W/m^{2}K
WindowSHGC: 0.75
CoolingSystemType: AIR
CoolingCOP: 2.5
HeatReleasedToCanyon: 1
DaytimeCoolingSetPoint: 26°C
NighttimeCoolingSetPoint: 26°C
DaytimeHeatingSetPoint: 20°C
NighttimeHeatingSetPoint: 20°C
CoolingCapacity: 75
HeatingEfficiency: 0.9

<URBAN AREA>

AverageBuildingHeight: 15.3m
HorizontalBuildingDensity: 0.54
VerticalToHorizontalUrbanAreaRatio: 2.28
TreeCoverage: 0.08
NonBldgSensibleHeat: 8.0 W/m^2
NonBldgLatentAnthropogenicHeat:0 W/m^2
radius:4500 m

<REFERENCE SITE>

Latitude: 41.4°
Longitude: 2.2°
AverageObstacleHeight: 0.1m

RAVAL (BARCELLONA)

Simulazione anno completo 2014 - Parametri input

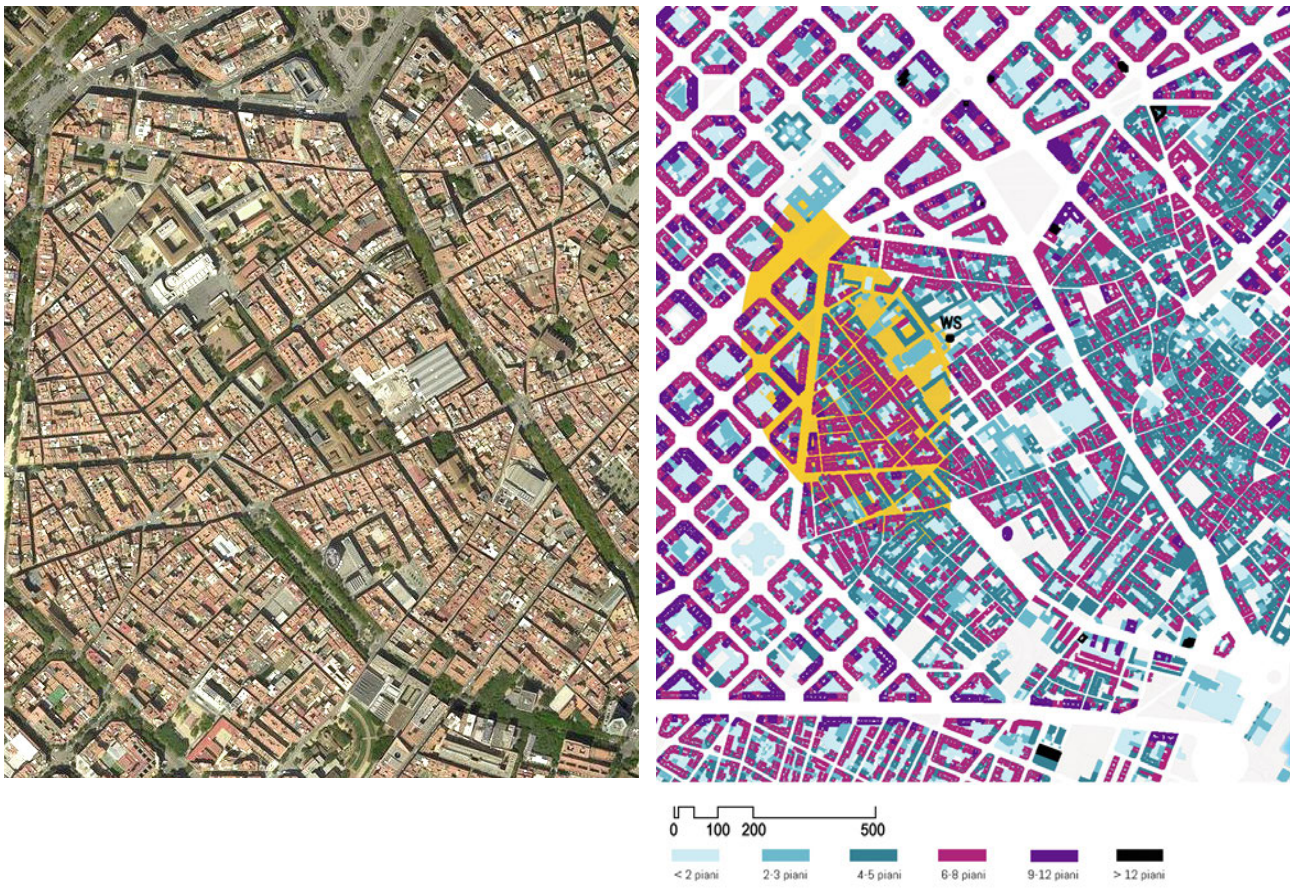
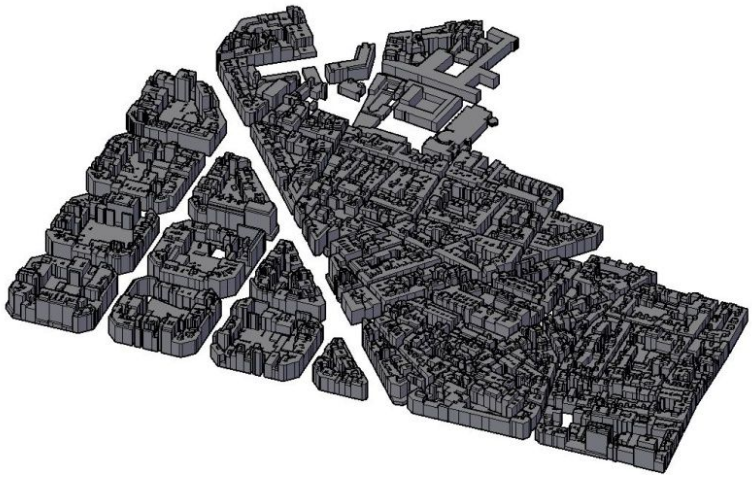


Figura 164 Stazione Raval: Inquadramento urbano, footprint della stazione e modello CAD per il calcolo dei parametri morfologici



	Raval
Area Urbana di riferimento	468941
Superficie costruita	295912.6
Superficie verticale	1028893.9
Altezza media edificato	**16.7**
Rapporto di copertura	**0.63**
Rapporto di facciata	**2.19**

Tabella 38 Parametri mrofologici relativi alla footprint della stazione Raval

<RURAL WEATHER FILE>:
Aeroporto di El Prat de Llobregat (2014)

<ELEMENTS>

Wall:
albedo: 0.25
emissivity: 0.92
vegetationCoverage: 0
initialTemperature: 20 °C
inclination:0

Materials:
Brick:
Thickness: 0.4m
ThermalConductivity: 0.9 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 1800000 J/m^{3}K
Plaster:
Thickness: 0.03m
ThermalConductivity: 1.0 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 1400000 J/m^{3}K

Roof:
albedo: 0.25
emissivity: 0.92
vegetationCoverage: 0
initialTemperature: 20 °C
inclination:1

Materials:
Tiles:
Thickness: 0.03m
ThermalConductivity: 0.7 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 1500000 J/m^{3}K
insulation:
Thickness: 0.03m
ThermalConductivity: 0.04 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 30000 J/m^{3}K
screed:
Thickness: 0.07m
ThermalConductivity: 1.1 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 2000000 J/m^{3}K
hollow-brick slab:
Thickness: 0.25m
ThermalConductivity: 0.7 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 2000000 J/m^{3}K

Road:
albedo: 0.08
emissivity: 0.95
vegetationCoverage: 0
initialTemperature: 20 °C
inclination:1

Materials:
Asphalt:
Thickness: 0.05m
ThermalConductivity: 0.74 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 1940000 J/m^{3}K
Stones:
Thickness: 0.2 m
ThermalConductivity: 2.1 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 2000000 J/m^{3}K
Soil:
Thickness: 0.1 m
ThermalConductivity: 0.4 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 1400000 J/m^{3}K

Rural
albedo: 0.25
emissivity: 0.92
vegetationCoverage: 20%
initialTemperature: 20 °C
inclination:1

Materials:
Asphalt:
Thickness: 0.05m
ThermalConductivity: 0.74 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 1940000 J/m^{3}K
Stones:
Thickness: 0.2 m
ThermalConductivity: 2.1 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 2000000 J/m^{3}K
Soil:
Thickness: 0.1 m
ThermalConductivity: 0.4 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 1400000 J/m^{3}K

Mass
albedo: 0.7
emissivity: 0.9
vegetationCoverage: 0
initialTemperature: 20 °C
inclination:0

Materials:
Concrete:
Thickness: 0.1m
ThermalConductivity: 0.93 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 1500000 J/m^{3}K

<BUILDING>

FloorHeight: 3.3 m
NightInternalGains: 5.8 W/m^2
DayInternalGains: 2.0 W/m^2
RadiantFraction: 0.2
LatentFraction: 0.2

Infiltration: 0.2 ACH
Ventilation: 0.3 ACH
GlazingRatio : 0.3
WindowUvalue : 2.715 W/m²K
WindowSHGC: 0.75
CoolingSystemType: AIR
CoolingCOP: 2.5
HeatReleasedToCanyon: 0
DaytimeCoolingSetPoint: 26 °C
NighttimeCoolingSetPoint: 35 °C
DaytimeHeatingSetPoint: 20 °C
NighttimeHeatingSetPoint: 20 °C
CoolingCapacity: 75
HeatingEfficiency: 0.9

<URBAN AREA>

AverageBuildingHeight: 16.7 m
HorizontalBuildingDensity: 0.63
VerticalToHorizontalUrbanAreaRatio: 2.19
TreeCoverage: 0.08
NonBldgSensibleHeat: 8.0 W/m^2
NonBldgLatentAnthropogenicHeat:0 W/m^2
radius:4500 m

<REFERENCE SITE>

Latitude: 41.4°
Longitude: 2.2°
AverageObstacleHeight: 0.1m

VIA BONCOMPAGNI (ROMA)

Simulazione anno completo 2013 - Parametri input

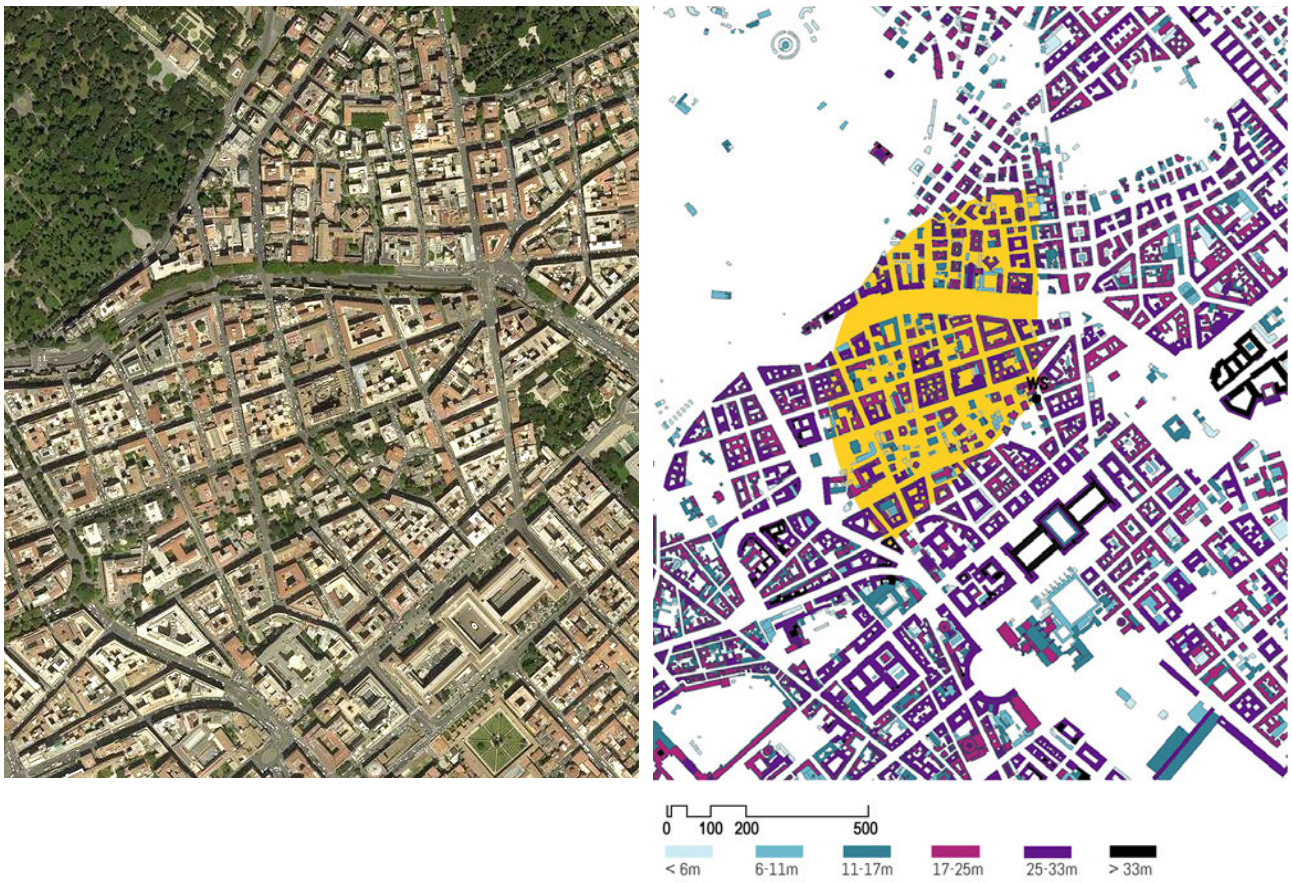
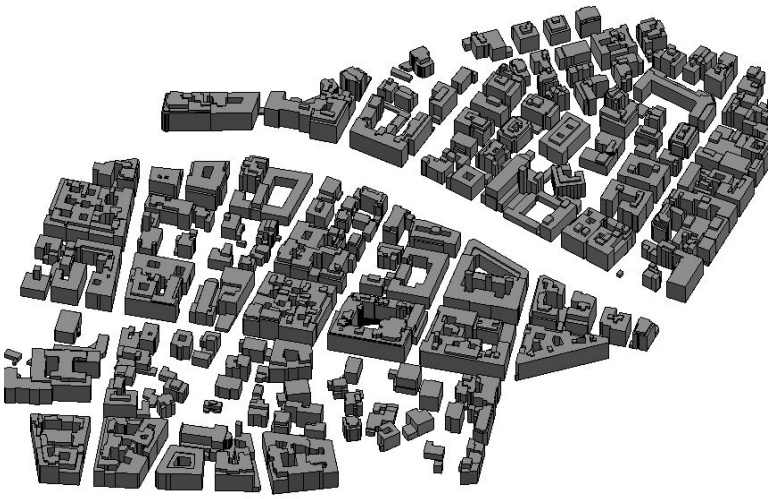


Figura 165 Stazione Boncompagni: Inquadramento urbano, footprint della stazione e modello CAD per il calcolo dei parametri morfologici



	Boncompagni
Area Urbana di riferimento	391717
Superficie costruita	174944.9
Superficie verticale	651295.9
Altezza media edificato	**20.1**
Rapporto di copertura	**0.45**
Rapporto di facciata	**1.66**

Tabella 39 Parametri mrofologici relativi alla footprint della stazione Boncompagni

<RURAL WEATHER FILE>:
Aeroporto di Roma Ciampino (2013)

<ELEMENTS>

Wall:
albedo: 0.25
emissivity: 0.92
vegetationCoverage: 0
initialTemperature: 20 °C
inclination:0

Materials:
Brick:
Thickness: 0.4m
ThermalConductivity: 0.9 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 1800000 J/m^{3}K
Plaster:
Thickness: 0.03m
ThermalConductivity: 1.0 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 1400000 J/m^{3}K

Roof:
albedo: 0.25
emissivity: 0.92
vegetationCoverage: 0
initialTemperature: 20 °C
inclination:1

Materials:
Tiles:
Thickness: 0.03m
ThermalConductivity: 0.7 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 1500000 J/m^{3}K
insulation:
Thickness: 0.03m
ThermalConductivity: 0.04 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 30000 J/m^{3}K
screed:
Thickness: 0.07m
ThermalConductivity: 1.1 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 2000000 J/m^{3}K
hollow-brick slab:
Thickness: 0.25m
ThermalConductivity: 0.7 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 2000000 J/m^{3}K

Road:
albedo: 0.08
emissivity: 0.95
vegetationCoverage: 0
initialTemperature: 20 °C
inclination:1

Materials:
Asphalt:
Thickness: 0.05m
ThermalConductivity: 0.74 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 1940000 J/m^{3}K
Stones:
Thickness: 0.2 m
ThermalConductivity: 2.1 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 2000000 J/m^{3}K
Soil:
Thickness: 0.1 m
ThermalConductivity: 0.4 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 1400000 J/m^{3}K

Rural
albedo: 0.15
emissivity: 0.96
vegetationCoverage: 48%
initialTemperature: 20 °C
inclination:1

Materials:
Stones:
Thickness: 0.15 m
ThermalConductivity: 2.1 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 2000000 J/m^{3}K
Soil:
Thickness: 0.2 m
ThermalConductivity: 0.4 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 1400000 J/m^{3}K

Mass
albedo: 0.7
emissivity: 0.9
vegetationCoverage: 0
initialTemperature: 20 °C
inclination:0

Materials:
Concrete:
Thickness: 0.1m
ThermalConductivity: 0.93 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 1500000 J/m^{3}K

<BUILDING>

FloorHeight: 3.3 m
NightInternalGains: 5.8 W/m^2
DayInternalGains: 2.0 W/m^2
RadiantFraction: 0.2
LatentFraction: 0.2
Infiltration: 0.2 ACH
Ventilation: 0.3 ACH

GlazingRatio : 0.3
WindowUvalue : 2.715 W/m²K
WindowSHGC: 0.75
CoolingSystemType: AIR
CoolingCOP: 2.5
HeatReleasedToCanyon: 0
DaytimeCoolingSetPoint: 26 °C
NighttimeCoolingSetPoint: 35 °C
DaytimeHeatingSetPoint: 20 °C
NighttimeHeatingSetPoint: 20 °C
CoolingCapacity: 75
HeatingEfficiency: 0.9

<URBAN AREA>

AverageBuildingHeight: 20.1 m
HorizontalBuildingDensity: 0.45
VerticalToHorizontalUrbanAreaRatio: 1.66
TreeCoverage: 0.12
NonBldgSensibleHeat: 8.0 W/m^2
NonBldgLatentAnthropogenicHeat:0 W/m^2
radius:6500 m

<REFERENCE SITE>

Latitude: 41.47°
Longitude: 12.34°
AverageObstacleHeight: 0.1m

ARENULA (ROMA)

Simulazione anno completo 2003- Parametri input

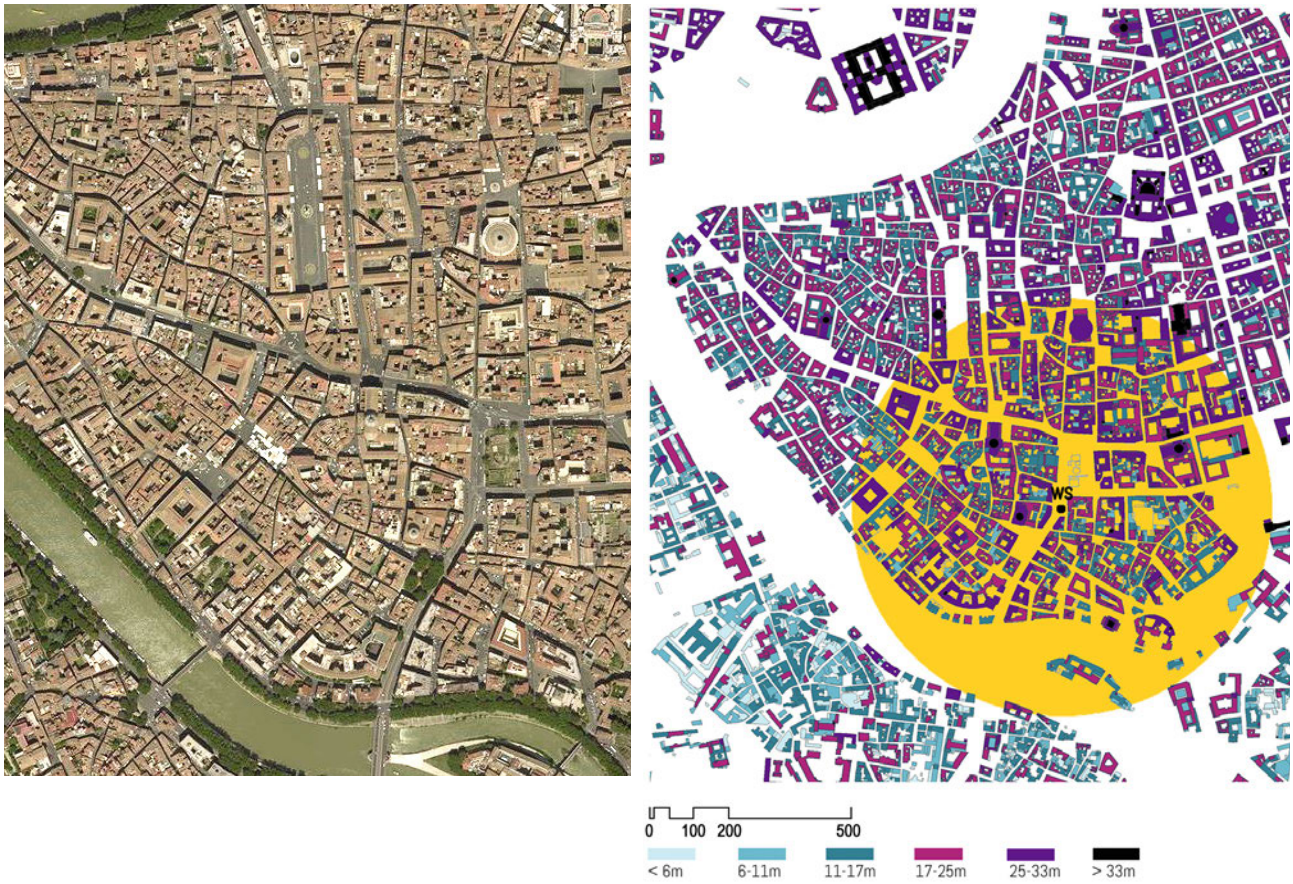
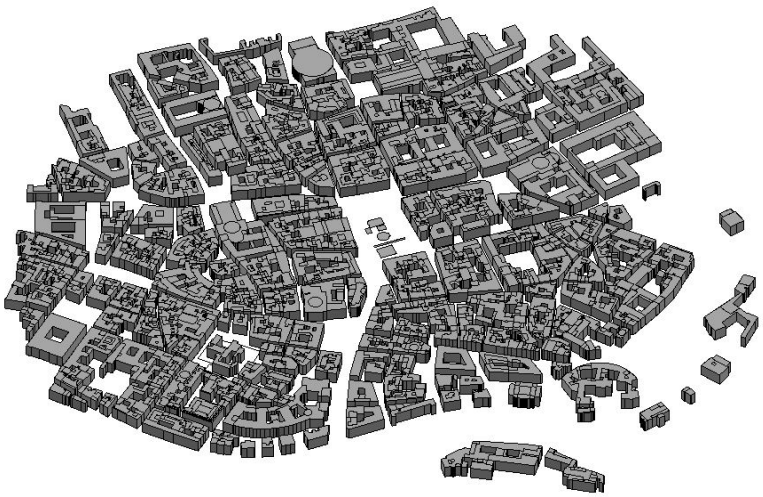


Figura 166 Stazione Arenula: Inquadramento urbano, footprint della stazione e modello CAD per il calcolo dei parametri morfologici



	Arenula
Area Urbana di riferimento	785398
Superficie costruita	386997
Superficie verticale	1128397.8
Altezza media edificato	**19.9**
Rapporto di copertura	**0.49**
Rapporto di facciata	**1.44**

Tabella 40 Parametri mrofologici relativi alla footprint della stazione Arenula

<RURAL WEATHER FILE

Aeroporto di Roma Ciampino (2003)

<ELEMENTS>

Wall:
albedo: 0.25
emissivity: 0.92
vegetationCoverage: 0
initialTemperature: 20 °C
inclination:0

Materials:
Brick:
Thickness: 0.4m
ThermalConductivity: 0.9 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 1800000 J/m^{3}K
Plaster:
Thickness: 0.03m
ThermalConductivity: 1.0 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 1400000 J/m^{3}K

Roof:
albedo: 0.25
emissivity: 0.92
vegetationCoverage: 0
initialTemperature: 20 °C
inclination:1

Materials:
Tiles:
Thickness: 0.03m
ThermalConductivity: 0.7 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 1500000 J/m^{3}K
insulation:
Thickness: 0.03m
ThermalConductivity: 0.04 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 30000 J/m^{3}K
screed:
Thickness: 0.07m
ThermalConductivity: 1.1 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 2000000 J/m^{3}K
hollow-brick slab:
Thickness: 0.25m
ThermalConductivity: 0.7 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 2000000 J/m^{3}K

Road:
albedo: 0.08
emissivity: 0.95
vegetationCoverage: 0
initialTemperature: 20 °C
inclination:1

Materials:
Asphalt:
Thickness: 0.05m
ThermalConductivity: 0.74 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 1940000 J/m^{3}K
Stones:
Thickness: 0.2 m
ThermalConductivity: 2.1 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 2000000 J/m^{3}K
Soil:
Thickness: 0.1 m
ThermalConductivity: 0.4 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 1400000 J/m^{3}K

Rural
albedo: 0.15
emissivity: 0.96
vegetationCoverage: 48%
initialTemperature: 20 °C
inclination:1

Materials:
Stones:
Thickness: 0.15 m
ThermalConductivity: 2.1 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 2000000 J/m^{3}K
Soil:
Thickness: 0.2 m
ThermalConductivity: 0.4 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 1400000 J/m^{3}K

Mass
albedo: 0.7
emissivity: 0.9
vegetationCoverage: 0
initialTemperature: 20 °C
inclination:0

Materials:
Concrete:
Thickness: 0.1m
ThermalConductivity: 0.93 W/mK
VolumetricHeatCapacity: 1500000 J/m^{3}K

BUILDING>

FloorHeight: 4.0 m
NightInternalGains: 5.0 W/m^2
DayInternalGains: 30.0 W/m^2
RadiantFraction: 0.2
LatentFraction: 0.2
Infiltration: 0.2 ACH
Ventilation: 0.3 ACH
GlazingRatio : 0.3

WindowUvalue : 2.715 W/m²K
WindowSHGC: 0.75
CoolingSystemType: AIR
CoolingCOP: 2.5
HeatReleasedToCanyon: 1
DaytimeCoolingSetPoint: 26 °C
NighttimeCoolingSetPoint: 35 °C
DaytimeHeatingSetPoint: 20 °C
NighttimeHeatingSetPoint: 20 °C
CoolingCapacity: 75
HeatingEfficiency: 0.9

<URBAN AREA>

AverageBuildingHeight: 19.9 m
HorizontalBuildingDensity: 0.49
VerticalToHorizontalUrbanAreaRatio: 1.44
TreeCoverage: 0.07
NonBldgSensibleHeat: 8.0 W/m^2
NonBldgLatentAnthropogenicHeat:0 W/m^2
radius:6500 m

<REFERENCE SITE>

Latitude: 41.47°
Longitude: 12.34°
AverageObstacleHeight: 0.1m

BIBLIOGRAFIA

Adelard, L., Pignolet-Tardan, F., Mara, T., Lauret, P., Garde, F., & Boyer, H. (1998). Sky temperature modelisation and applications in building simulation. *Renewable Energy*, *15*(1-4), 418–430. doi:10.1016/S0960-1481(98)00198-0

Akbari, H., & Konopacki, S. (2005). Calculating energy-saving potentials of heat-island reduction strategies. *Energy Policy*, *33*(6), 721–756. doi:10.1016/j.enpol.2003.10.001

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*, *70*(3), 295–310. doi:10.1016/S0038-092X(00)00089-X

Akbari, H., & Rose, L. S. (2001). *Characterizing the Fabric of the Urban Environment: A Case Study of Salt Lake City , Utah*. *LBNL-47851*. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory.

Akbari, H., Bretz, S., Km-n, D. M., & Hanford, J. (1997). Peak power and cooling energy savings of high-albedo roofs. *Energy and Buildings*, *25*(2), 117–126.

Alcoforado, M. J., & Andrade, H. (2006). Nocturnal urban heat island in Lisbon (Portugal): Main features and modelling attempts. *Theoretical and Applied Climatology*, *84*(1-3), 151–159. doi:10.1007/s00704-005-0152-1

Alexander, E. R., Reed, K. D., & Murphy, P. (1988). Density Measures and Their Relation to Urban Form. *Center for Architecture and Urban Planning Research Books*, Book *37*.

Allegrini, J., Dorer, V., & Carmeliet, J. (2012). Influence of the urban microclimate in street canyons on the energy demand for space cooling and heating of buildings. *Energy and Buildings*, *55*, 823–832. doi:10.1016/j.enbuild.2012.10.013

ANCE. (2014). Osservatorio congiunturale sull' industria delle costruzioni. Retrieved from http://www.ance.it/docs/docDownload.aspx?id=20284

Andreou, E., & Axarli, K. (2012). Investigation of urban canyon microclimate in traditional and contemporary environment. Experimental investigation and parametric analysis. *Renewable Energy*, *43*, 354–363. doi:10.1016/j.renene.2011.11.038

APUR-Atelier Parisien d'Urbanisme. (2012). *Les Îlots de Chaleur Urbains à Paris*. Retrieved from http://www.apur.org/sites/default/files/documents/ilot_chaleur_urbains_paris_cahier1.pdf

Arnfield, a. J. (1990). Street design and urban canyon solar access. *Energy and Buildings*, *14*, 117–131. doi:10.1016/0378-7788(90)90031-D

Asociacón GvSIG. (2015). GVSIG 2.2 - User guide. Retrieved from www.gvsig.com

Beckers, B. (2016). Computational Methods for Solids and Fluids: Multiscale Analysis, Probability Aspects and Model Reduction. In A. Ibrahimbegovic (Ed.), (pp. 1–27). Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-27996-1_1

Beckers, B., & Beckers, P. (2013). Sky vault partition for computing daylight availability and shortwave energy budget on an urban scale. *Lighting Research and Technology*, *46*, 716–728. doi:10.1177/1477153513502507

Beckers, B. (2012). *Solar Energy at Urban Scale*. ISTE-John Wiley.

Beckers, B. (2007). Interpretación geométrica de la luz del cielo en el proyecto de arquitectura. *Informe Helio_005_es*. Retrieved from www.heliodon.net

Beckers, B., & Masset, L. (2006). Heliodon2, software and user's guide. Retrieved from www.heliodon.net

Bentham, T. and Britter, R., (2003). Spatially averaged flow within obstacle arrays. *Atmospheric Environment*, 37 (15), 2037–2043

Bonacquisti, V., Casale, G. R., Palmieri, S., & Siani, a M. (2006). A canopy layer model and its application to Rome. *The Science of the Total Environment*, *364*(1-3), 1–13. doi:10.1016/j.scitotenv.2005.09.097

Boogert, G. den, Hakvoort, L., Heit, R., Fèvre, S. Le, Lemmens, B., Mantel, B., … Vries, B. de. (2014). Energy Atlas. Amsterdam Southeast. City of Amsterdam. Retrieved from https://www.amsterdam.nl/wonen-leefomgeving/duurzaam-amsterdam/energie-atlas-brengt/

Bourbia, F., & Boucheriba, F. (2010). Impact of street design on urban microclimate for semi arid climate (Constantine). *Renewable Energy*, *35*(2), 343–347. doi:10.1016/j.renene.2009.07.017

Bouwman. (2000). Changing mobility patterns in a compact city: environmental impacts. In G. de Roo & D. Miller (Eds.), *Compact cities and sustainable urban development. A critical assessment of policies and plans from an international perspective* (pp. 229 – 240). Aldershot UK: Ashgate Publishing.

Bozonnet, E., Musy, M., Allard, F., Guarracino, G., & Chazelas, M. (2008). Concevoir et construire en milieu urbain Du bâtiment à la ville , du microclimat à la demande énergétique. In Jac Fol (Ed.), *Futur de l'habitat* (pp. 139–154). Jean-Michel Place/PUCA.

Brown, M. J., Grimmond, S., & Ratti, C. (2001). Comparison of Methodologies for Computing Sky View Factor in Urban Environments. In *International Society of Environmental Hydraulics Conf*. Tempe, AZ.

Bueno, B., Roth, M., Norford, L., & Li, R. (2014). Computationally efficient prediction of canopy level urban air temperature at the neighbourhood scale. *Urban Climate*, *9*, 35–53. doi:10.1016/j.uclim.2014.05.005

Bueno, B., Norford, L., Hidalgo, J., & Pigeon, G. (2013). The urban weather generator. *Journal of Building Performance Simulation*, *6*(4), 269–281. doi:10.1080/19401493.2012.718797

Bueno, B., Norford, L., Pigeon, G., & Britter, R. (2012). A resistance-capacitance network model for the analysis of the interactions between the energy performance of buildings and the urban climate. *Building and Environment*, *54*, 116–125. doi:10.1016/j.buildenv.2012.01.023

Bueno, B. (2012). *Study and prediction of the energy interactions between buildings and the urban climate*. PhD, Massachusetts Institute of Technology.

Bueno, B., Norford, L., Pigeon, G., & Britter, R. (2011). Combining a Detailed Building Energy Model with a Physically-Based Urban Canopy Model. *Boundary-Layer Meteorology*, *140*(3), 471–489. doi:10.1007/s10546-011-9620-6

Burchell, R. W., Shad, N. A., Listokin, D., & Phillips, H. (1998). *The costs of sprawl--revisited*. *TCRP Report 39*. Washington, D.C.: National Academy Press.

Burdett, R., & Sudjic, D. (2007). *The endless city - Urban age project*. (R. Burdett & D. Sudjic, Eds.). London: Phaidon Press.

Bussadori, V. (2013). La pianificazione come strumento di adattamento ai cambi climatici. In F. Musco & E. Zanchini (Eds.), *Il Clima Cambia le Città: Conferenza sull'adattamento climatico in ambito urbano* (p. 20). Corila, Venezia: e-book. Retrieved from http://www.legambiente.it/sites/default/files/docs/ebook.pdf

Butera, F. M. (2004). *Dalla caverna alla casa ecologica. Storia del comfort e dell'energia*. Milano: Edizioni Ambiente srl.

Cantelli, A., Monti, P., & Leuzzi, G. (2015). Numerical study of the urban geometrical representation impact in a surface energy budget model. *Environmental Fluid Mechanics*, *15*(2), 251–273. doi:10.1007/s10652-013-9309-0

Cantelli, A., Monti, P., & Leuzzi, G. (2008). A subgrid surface scheme for the analysis of the urban heat island of rome. *Croatian Meteorological Journal*, *43*, 354–358.

Cappuccitti, A. (2006). *Tessuti e centralità nella morfologia urbana di Roma* (I.). Roma: Aracne editrice.

Cardinale, N., Francese, D., & Ruggiero, F. (2001). Bio-Climatic Technologies in Mediterranean Countries. In N. Maiellaro (Ed.), *Towards sustainable building* (pp. 59–76). Springer - GeoJournal Library.

Carreras, C., Marin, M., Vide, J. M., & Moreno, C. (1990). Modificaciones térmicas en las ciudades. Avance sobre la isla de calor en Barcelona. *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, *17*, 51–77.

Cecere, C., Coch, H., Morganti, M., & Clementella, G. (2012). Dalla Riqualificazione Energetica al Recupero Sostenibile. *In_BO Ricerche E Progetti per Il Territorio, La Città E L'architettura*, *3*(5).

Chandler, T. J. (1965). *The climate of Lon-*

don. London: Hutchinson & CO LTD.

Chao, Y., & Liang, C. (2011). Mitigating urban heat island effects in high- density cities based on sky view factor and urban morphological understanding : a study of Hong Kong. *Architectural Science Review*, *54*(4), 305–315.

Cheng, V., Steemers, K., Montavon, M., & Compagnon, R. (2006). Urban Form , Density and Solar Potential. In *PLEA2006 - The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Switzerland, 6-8 September*.

Coch Roura, H., & Serra Florensa, R. (1995). *Arquitectura y energía natural* (I.). Barcelona: Edicions UPC.

Coch, H. (1998). Bioclimatism in vernacular architecture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *2*(1-2), 67–87. doi:10.1016/S1364-0321(98)00012-4

Colacino, M., & Lavagnini, a. (1982). Evidence of the urban heat island in Rome by climatological analyses. *Archives for Meteorology, Geophysics, and Bioclimatology Series B*, *31*(1-2), 87–97. doi:10.1007/BF02311344

Commissione Europea. (2009). *L'adattamento ai cambiamenti climatici - White Paper*.

Compagnon, R. (2004). Solar and daylight availability in the urban fabric. *Energy and Buildings*, *36*(4), 321–328. doi:10.1016/j.enbuild.2004.01.009

Conti, S., Meli, P., Minelli, G., Solimini, R., Toccaceli, V., Vichi, M., … Perini, L. (2005). Epidemiologic study of mortality during the Summer 2003 heat wave in Italy. *Environmental Research*, *98*(3), 390–399. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2004.10.009

Conzen, M. R. G. (2004). *Thinking about urban form. Papers on Urban Morphology, 1932-1998*. (M. P. Conzen, Ed.). Oxford, UK: Peter Lang.

Cornoldi, A., & Los, S. (1982). *Habitat y Energía*. Barcelona: Gustavo Gili.

Crawley, D. B. (2008). Estimating the impacts of climate change and urbanization on building performance. *Journal of Building Performance Simulation*, *1*(2), 91–115. doi:10.1080/19401490802182079

Curreli, A. (2015). *El acceso solar a la escala del tejido urbano. El enfoque morfologico y el metodo de analisis comparativo aplicados al caso de Barcelona.* PhD Etsab, UPC.

Curreli, A., & Coch, H. (2010). Solar access in the compact city: a study case in Barcelona. In *Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment. "PALENC 2010"* (pp. 1–11). Rhodes Island

De Gregorio Hurtado, S., Olazabal, M., Salvia, M., Pietrapertosa, F., Olazabal, E., Geneletti, D., … Reckien, D. (2015). Understanding how and why cities engage with climate policy. An analysis of local climate action in Spain and Italy. *Tema. Journal of Land Use, Mobility and Environment*, 8(8 (Special Issue ECCA 2015)), 23–46.

de la Flor, F. S., & Domı□nguez, S. A. (2004). Modelling microclimate in urban environments and assessing its influence on the performance of surrounding buildings. *Energy and Buildings*, *36*(5), 403–413. doi:10.1016/j.enbuild.2004.01.050

De Munck, C., Pigeon, G., Masson, V., Meunier, F., Bousquet, P., Tréméac, B., Marchadier, C. (2013). How much can air conditioning increase air temperatures for a city like Paris, France? *International Journal of Climatology*, *33*(1), 210–227. doi:10.1002/joc.3415

De Pascali, P. (2008). *Città ed energia: la valenza energetica dell'organizzazione insediativa*. Milano: Franco Angeli.

de Wilde, P., & Coley, D. (2012). The implications of a changing climate for buildings. *Building and Environment*, *55*, 1–7. doi:10.1016/j.buildenv.2012.03.014

Denes-Bejat, T., Bozonnet, E., & Calmet, I. (2009). Modeling the global warming effect on indoor door temperature peaks and cooling systems systems consumption,. In *Eleventh International IBPSA conference* (pp. 117–122). Glasgow, Scotland.

DesignBuilder Software. (2014). ANSI / ASHRAE Standard 140-2007 Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests. DesignBuilder Version 4.2 (in-

corporating EnergyPlus version 8.1.0). Retrieved from http://www.designbuilder.co.uk/component/option,com_docman/task,cat_view/gid,20/Itemid,30/

DesignBuilder Software. (2014). DesignBuilder SBEM Training Manual. Retrieved from http://www.designbuilder.co.uk/component/option,com_docman/task,cat_view/gid,20/Itemid,30/

Dorer, V., & Allegrini, J. (2012). Urban Climate and Energy Demand in Buildings. Final Report. Retrieved from http://www.bfe.admin.ch/php/modules/enet/streamfile.php?file=000000010715.pdf&name=000000290497

Dorer, V., Allegrini, J., Orehounig, K., Moonen, P., Upadhyay, G., Kämpf, J., & Carmeliet, J. (2013). Modelling the urban microclimate and its impact on the energy demand of buildings and building clusters. In *13th Conference of International Building Performance Simulation Association* (pp. 3483–3489). Chambéry, France. Retrieved from http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2013/p_1176.pdf

Downs, A. (1999). Some Realities about Sprawl and Urban Decline. *Housing Policy Debate*, *10*(4), 955–974. doi:10.1080/10511482.1999.9521356

EnergyPlus Engineering Reference. The Reference to EnergyPlus Calculations. (2013). Retrieved from https://energyplus.net/documentation

Erell, E. (2008). The Application of Urban Climate Research in the Design of Cities. *Advances in Building Energy Research*, *2*(1), 95–121. doi:10.3763/aber.2008.0204

Erell, E., Pearlmutter, D., & Williamson, T. (2011). *Urban Microclimate. Designing the space between buildings*. London: Earthscan Publishing.

European Commission. (2013). An EU Strategy on adaptation to climate change.

European Environment Agency. (2012). *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012: an indicator-based report.*

European Commission. (2010). *Energy 2020: a strategy for competitive, sustainable and secure energy*.

Eurostat. (2012). Eurostat Statistical Analysis, retrived from: http://ec.europa.eu/eurostat/statistical-atlas/gis/viewer/

Fabrizi, R., Bonafoni, S., & Biondi, R. (2010). Satellite and Ground-Based Sensors for the Urban Heat Island Analysis in the City of Rome. *Remote Sensing*, *2*(5), 1400–1415. doi:10.3390/rs2051400

Facility for Euro-Mediterranen Investiment and Partnership. (2008). Study on Climate Change and Energy in the Mediterranean. Sophia Antipolis: Plan Bleu.

Fanchiotti, A., Cornielo, E., & Zinzi, M. (2012). Impact of cool materials on urban heat islands and on buildings comfort and energy consumption. In *World Renewable Energy Forum, WREF 2012*. Denver, Colorado. Retrieved from https://ases.conference-services.net/resources/252/2859/pdf/SOLAR2012_0176_full paper.pdf

Fernández, J. E. (2014). Urban metabolism and city typologies. In *2014 MIT Europe Conference*. Brussels. Retrieved from http://ilp.mit.edu/images/conferences/2014/brussels/presentations/Fernandez.2014.Brussels.pdf

Filpa, A., & Ombuen, S. (2014). La carta della vulnerabilità climatica di Roma 1.0. *URBANISTICATRE*, 5, 47–58.

Gál, C. V. (2014). The influence of built form and vegetation on the canopy layer microclimate within urban blocks *Acta Climatologica et Chorologica*, 47 (48), 43-52, 43–52.

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

Giannaros, T. M., & Melas, D. (2012). Study of the urban heat island in a coastal Mediterranean City: The case study of Thessaloniki, Greece. *Atmospheric Research*, *118*, 103–120. doi:10.1016/j.atmosres.2012.06.006

Giannopoulou, K., Livada, I., Santamouris, M., Saliari, M., Assimakopoulos, M., & Caouris, Y. G. (2011). On the characteristics of the summer urban heat island

in Athens, Greece. *Sustainable Cities and Society*, *1*(1), 16–28. doi:10.1016/j.scs.2010.08.003

Giridharan, R., Lau, S. S. Y., Ganesan, S., & Givoni, B. (2008). Lowering the outdoor temperature in high-rise high-density residential developments of coastal Hong Kong: The vegetation influence. *Building and Environment*, *43*(10), 1583–1595. doi:10.1016/j.buildenv.2007.10.003

Giridharan, R., Lau, S. S. Y., Ganesan, S., & Givoni, B. (2007). Urban design factors influencing heat island intensity in high-rise high-density environments of Hong Kong. *Building and Environment*, *42*(10), 3669–3684. doi:10.1016/j.buildenv.2006.09.011

Giridharan, R., Ganesan, S., & Lau, S. S. . (2004). Daytime urban heat island effect in high-rise and high-density residential developments in Hong Kong. *Energy and Buildings*, *36*(6), 525–534. doi:10.1016/j.enbuild.2003.12.016

Givoni, B. (1994). Building design principles for hot humid regions. *Renewable Energy*, *5*, 908–916.

Givoni, B. (1998). *Climate considerations in building and urban design*. New York: Van Nostrand Reinhold.

Gliah, O., Kruczek, B., Etemad, S. G., & Thibault, J. (2011). The effective sky temperature: An enigmatic concept. *Heat and Mass Transfer*, *47*, 1171–1180. doi:10.1007/s00231-011-0780-1

Golany, G. S. (1996). Urban design morphology and thermal performance. *Atmospheric Environment*, *30*(3), 455–465.

Grimmond, C. S. B., Roth, M., Oke, T. R., Au, Y. C., Best, M., Betts, R., … Voogt, J. (2010). Climate and More Sustainable Cities: Climate Information for Improved Planning and Management of Cities (Producers/Capabilities Perspective). *Procedia Environmental Sciences*, *1*, 247–274. doi:10.1016/j.proenv.2010.09.016

Grimmond, C. S. B., Blackett, M., Best, M. J., Barlow, J., Baik, J. J., Belcher, S. E., … Zhang, N. (2010). The international urban energy balance models comparison project: First results from phase 1. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *49*(6), 1268–1292. doi:10.1175/2010JAMC2354.1

Gropius, W. (1930). Case alte, case medie o case basse? Conferenza tenuta al Terzo congresso internazionale per la Nuova Edilizia a Bruxelles, 1930. In G. Grassi (Ed.), *DAS NEUE FRANKFURT 1926-1931* (I.). edizioni DEDALO.

Gupta, V. (1987). Thermal efficiency of building clusters: an index for non air-conditioned buildings in hot climates. In D. Hawkes (Ed.), *Energy and Urban Built Form* (pp. 133–145). Butterworth-Heinemann. doi:http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-408-00891-4.50012-9

Hacker, J., Belcher, S., & Connell, R. (2005). *Beating the heat: keeping UK buildings cool in a warming climate*. *UKCIP Briefing Report.* Oxford.

Hämmerle, M., Gál, T., Unger, J., & Matzarakis, A. (2011). Comparison of models calculating the sky view factor used for urban climate investigations. *Theoretical and Applied Climatology*, *105*(3-4), 521–527. doi:10.1007/s00704-011-0402-3

Hassid, S., Santamouris, M., Papanikolaou, N., Linardi, A., & Klitsikas, N. (2000). The effect of the Athens heat island on air conditioning load. *Energy and Buildings*, *32*, 131–141.

Hidalgo, J., Masson, V., and Gimeno, L., (2009). Scaling the daytime urban heat island and urban-breeze circulation. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(5),889– 901.

Higueras, E. (2006). *Urbanismo Bioclimatico*. Barcelona: Gustavo Gili.

Hirano, Y., & Fujita, T. (2012). Evaluation of the impact of the urban heat island on residential and commercial energy consumption in Tokyo. *Energy*, *37*(1), 371–383. doi:10.1016/j.energy.2011.11.018

Holden, E., & Norland, I. T. (2005). Three Challenges for the Compact City as a Sustainable Urban Form: Household Consumption of Energy and Transport in Eight Residential Areas in the Greater Oslo Region. *Urban Studies*, *42*(12), 2145–2166.

Hong, S.Y., Noh, Y., and Dudhia, J., (2006).

A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review*, 134 (9), 2318–2341.

Houet, T., & Pigeon, G. (2011). Mapping urban climate zones and quantifying climate behaviors--an application on Toulouse urban area (France). *Environmental Pollution (Barking, Essex : 1987)*, *159*(8-9), 2180–92. doi:10.1016/j.envpol.2010.12.027

Howard, L. (1833). *The climate of London* (IAUC edition). Walkinstown, Dublin: SATTAL. Retrieved from http://www.urban-climate.org/documents/LukeHoward_Climate-of-London-V1.pdf

ISPRA. (2014). *Kyoto , ci siamo quasi*.

ISPRA. (2015). *Il consumo di suolo in Italia*.

ISTAT. (2012). *Le problematiche connesse al consumo del suolo* Audizione del Presidente dell'Istituto nazionale di statistica Enrico Giovannini.

Jacobs, J. (1961). *The Death and Life of Great American cities*. New York: Random House.

Jenks, M., Burton, E., & Katie Williams. (1996). *The compact city: a sustainable urban form?* London: Spon Press.

Johansson, E. (2006). Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco. *Building and Environment*, *41*(10), 1326–1338. doi:10.1016/j.buildenv.2005.05.022

Jusuf, S. K., & Hien, W. N. (2009). Development of empirical models for an estate level air temperature prediction in Singapore. *Presented at the Second International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands,* Berkeley, California. Retrieved from http://www.coolrooftoolkit.org/wp-content/uploads/2012/04/221410-jusuf-doc.pdf

Karaca, M., Tayanc, M., & Toros, H. (1995). Effects of urbanization on climate of Istanbul and Ankara. *Atmospheric Environment*, *29*(23), 3411–3421.

Kastendeuch, P. P. (2013). A method to estimate sky view factors from digital elevation models. *International Journal of Climatology*, *33*(6), 1574–1578. doi:10.1002/joc.3523

Kikegawa, Y., Genchi, Y., Yoshikado, H., & Kondo, H. (2003). Development of a numerical simulation system toward comprehensive assessments of urban warming countermeasures including their impacts upon the urban buildings' energy-demands. *Applied Energy*, *76*(4), 449–466. doi:10.1016/S0306-2619(03)00009-6

Kljun, N., Calanca, P., Rotach, M. W., & Schmid, H. P. (2004). A simple parameterisation for flux footprint prediction. *Boundary-Layer Meteorology*, *112*, 503–523.

Knowles, R. L. (1974). *Energy and form: an ecological approach to urban growth*. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology.

Kolokotroni, M., Ren, X., Davies, M., & Mavrogianni, a. (2012). London's urban heat island: Impact on current and future energy consumption in office buildings. *Energy and Buildings*, *47*, 302–311. doi:10.1016/j.enbuild.2011.12.019

Kolokotroni, M., & Giridharan, R. (2008). Urban heat island intensity in London: An investigation of the impact of physical characteristics on changes in outdoor air temperature during summer. *Solar Energy*, *82*(11), 986–998. doi:10.1016/j.solener.2008.05.004

Kolokotroni, M., Zhang, Y., & Watkins, R. (2007). The London Heat Island and building cooling design. *Solar Energy*, *81*(1), 102–110. doi:10.1016/j.solener.2006.06.005

Kolokotroni, M., Giannitsaris, I., & Watkins, R. (2006). The effect of the London urban heat island on building summer cooling demand and night ventilation strategies. *Solar Energy*, *80*(4), 383–392. doi:10.1016/j.solener.2005.03.010

Kolokotsa, D., Psomas, a., & Karapidakis, E. (2009). Urban heat island in southern Europe: The case study of Hania, Crete. *Solar Energy*, *83*(10), 1871–1883. doi:10.1016/j.solener.2009.06.018

Konopacki, S., & Akbari, H. (2000). Energy Savings Calculations for Heat Island Re-

duction Strategies in Baton Rouge, Sacramento and Salt Lake City. *Lawrence Berkeley National Laboratory*. Retrieved from http://escholarship.org/uc/item/6020m5k9

Los, S. (2007). Città solari: dal passato al futuro. *Iuav Giornale Dell'università*, *42*.

Magli, S., Lodi, C., Lombroso, L., Muscio, A., & Teggi, S. (2015). Analysis of the Impact of Urban Heat Island on Building Energy Consumption. *Energy Environment Engineering*, *6*, 91–99. doi:10.1007/s40095-014-0154-9

March, L., & Martin, L. (1972). *Urban Space and Structures*. Cambridge, UK: University Press.

Masson, V., Gomes, L., Pigeon, G., Liousse, C., Pont, V., Lagouarde, J.-P., … Tulet, P. (2008). The Canopy and Aerosol Particles Interactions in TOulouse Urban Layer (CAPITOUL) experiment. *Meteorology and Atmospheric Physics*, *102*(3), 135–157. doi:10.1007/s00703-008-0289-4

Masson, V. (2000). A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorology*, *94*(3), 357–397. doi:10.1023/A:1002463829265

Matuschek, O., & Matzarakis, A. (2010). Estimation of sky view factor in complex environment as a tool for applied climatological studies. Retrieved from http://www.urbanclimate.net/matzarakis/papers/BIOMET7_Matuschek_Matzarakis_534_539.pdf

Meadows, D. H., & Club of Rome. (1972). *The limits to growth: a report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind.* New York: Universe Books.

Ministerio de Fomento. Gobierno de España. (2007). Documento Básico HE. Ahorro de energía

Ministero dell'ambiente. (2014). *Rapporto sullo stato delle conoscenze scientifiche su impatti , vulnerabilità ed adattamento ai cambiamenti climatici in Italia*.

Ministero dell'Ambiente. (2013). *Elementi per una Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici*.

Montavon, M., Steemers, K., Cheng, V., & Compagnon, R. (2006). "La Ville Radieuse" by Le Corbusier once again a case study. In *PLEA2006 - The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture*. Geneva, Switzerland.

Moonen, P., Defraeye, T., Dorer, V., Blocken, B., & Carmeliet, J. (2012). Urban Physics: Effect of the micro-climate on comfort, health and energy demand. *Frontiers of Architectural Research*, *1*(3), 197–228. doi:10.1016/j.foar.2012.05.002

Moreno-Garcia, M. C. (1994). Intensity and form of the urban heat island in Barcelona. *International Journal of Climatology*, *14*, 705–710. doi:10.1002/joc.3370140609

Morganti, M. (2013). *SUSTAINABLE DENSITY: Form, Built Environment, Energy*. PhD,UPC, SAPIENZA.

Morganti, M., Coch, H., & Cecere, C. (2012). The effect of urban obstruction in Mediterranean climates: built form typology, density and energy. *Architecture, City and Environment*, *19*, 13–26.

Neuman, M. (2005). The Compact City Fallacy. *Journal of Planning Education and Research*, *25*(1), 11–26. doi:10.1177/0739456X04270466

OECD Green Growth Studies. (2012). *Compact City Policies: A Comparative Assessment*. Paris: OECD Publishing.

Oke, T. R. (2006). Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. *Instruments and Observing Methods*, *Report No.*(WMO/TD-No. 1250).

Oke, T. R. (2005). Towards better scientific communication in urban climate. *Theoretical and Applied Climatology*, *84*(1-3), 179–190. doi:10.1007/s00704-005-0153-0

Oke, T. R. (1988). Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings*, *11*, 103–113. doi:10.1016/0378-7788(88)90026-6

Oke, T. R. (1987). *Boundary layer climates*. London: Methuen.

Oke, T. R. (1981). Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison

of scale model and field observations. *Journal of Climatology*, *1*(3), 237–254. doi:10.1002/joc.3370010304

Olgyay, V. (1963). *Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism:* Princeton, N.J: Princeton University Press.

Oxizidis, S., Dudek, a. V., & Papadopoulos, a. M. (2008). A computational method to assess the impact of urban climate on buildings using modeled climatic data. *Energy and Buildings*, *40*, 215–223. doi:10.1016/j.enbuild.2007.02.018

Palme, M., Clemente, C., & Isalgue, A. (2015). Climate Change and Urban Form : Simulation Studies in Temperate. In M. Cucinella, G. Pentella, A. Fagnani, & L. D'Ambrosio (Eds.), *PLEA2015 Architecture in (R) Evolution*. Bologna: Ass. Building Green Futures, Bologna.

Palyvos, J., (2008). A survey of wind convection coefficient correlations for building envelope energy systems' modeling, *Applied Thermal Engineering*, 28 (8–9), 801–808

Papanastasiou, D. K., & Kittas, C. (2012). Maximum urban heat island intensity in a medium-sized coastal Mediterranean city. *Theoretical and Applied Climatology*, *107*(3-4), 407–416. doi:10.1007/s00704-011-0491-z

Pelliccioni, a., Monti, P., Gariazzo, C., & Leuzzi, G. (2012). Some characteristics of the urban boundary layer above Rome, Italy, and applicability of Monin–Obukhov similarity. *Environmental Fluid Mechanics*, *12*(5), 405–428. doi:10.1007/s10652-012-9246-3

Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, *40*(3), 394–398. doi:10.1016/j.enbuild.2007.03.007

Pernigotto, G., & Gasparella, A. (2013). Extensive comparative analysis of building energy simulation codes : Heating and cooling energy needs and peak loads calculation in TRNSYS and EnergyPlus for southern Europe climates. *HVAC&R Research*, (May), 37–41. doi:10.1080/10789669.2013.794088

Petenko, I., Mastrantonio, G., Viola, A., Argentini, S., Coniglio, L., Monti, P., & Leuzzi, G. (2011). Local Circulation Diurnal Patterns and Their Relationship with Large-Scale Flows in a Coastal Area of the Tyrrhenian Sea. *Boundary-Layer Meteorology*, *139*(2), 353–366. doi:10.1007/s10546-010-9577-x

Petralli, M., Massetti, L., & Orlandini, S. (2008). The influence of urban features on air temperature distribution. In *Cimate change and urban design* (pp. 111–118). Oslo, Norway.

Pigeon, G., Legain, D., Durand, P., & Masson, V. (2007). Anthropogenic heat release in an old European agglomeration (Toulouse, France). *International Journal of Climatology*, *27*, 1969–1981. doi:10.1002/joc.1530

Pont, M. B., & Haupt, P. (2010). *Spacematrix: Space, Density and Urban Form*. Rotterdam, Netherlands: NAi Publishers.

Pont, M. B., & Haupt, P. (2009). *Space, Density and Urban Form*. PhD, Technische Universiteit Delft.

Population Reference Boureau. (2015). Urban population. Retrieved from www.prb.org

Ratti, C., Baker, N., & Steemers, K. (2005). Energy consumption and urban texture. *Energy and Buildings*, *37*(7), 762–776. doi:10.1016/j.enbuild.2004.10.010

Ratti, C., Di Sabatino, S., & Britter, R. (2005). Urban texture analysis with image processing techniques: winds and dispersion. *Theoretical and Applied Climatology*, *84*(1-3), 77–90. doi:10.1007/s00704-005-0146-z

Ratti, C., Raydan, D., & Steemers, K. (2003). Building form and environmental performance: archetypes, analysis and an arid climate. *Energy and Buildings*, *35*(1), 49–59. doi:10.1016/S0378-7788(02)00079-8

Real Estate Research Corporation. (1974). *The cost of sprawl: environmental and economic costs of alternative residential development patterns at the urban fringe*. Washington: U.S. Government Printing Office

Rode, P., Burdett, R., Robazza, G., & Schofield, J. (2014). *Cities and Energy: Urban morphology and heat energy demand*. *LSE cities*. London.

Rogora, A. (2013). Un approccio bioclimatico alla trasformazione della città. In *Biourbanistica energia e pianificazione a Faenza*. Faenza: Valfrido Edizioni.

Rogora, A. (2012). *Progettazione bioclimatica per l'architettura Mediterranea* (I.) Wolters Kluwer Italia.

Rogora, A., & Dessì, V. (2005). *Il Comfort Ambientale Degli Spazi Aperti*. EdicomEdizioni.

Rosenfeld, A. H., Akbari, H., Bretz, S., Fishman, B. L., Kurn, D. M., Sailor, D., & Taha, H. (1995). Mitigation of urban heat islands : materials , utility programs , updates. *Energy and Buildings*, *22*, 255–265.

Rosenfeld, A. H., Akbari, H., Romm, J. J., & Pomerantz, M. (1998). Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction. *Energy and Buildings*, *28*, 51–62.

Rotach, M. W., Vogt, R., Bernhofer, C., Batchvarova, E., Christen, a., Clappier, a., … Voogt, J. a. (2005). BUBBLE – an Urban Boundary Layer Meteorology Project. *Theoretical and Applied Climatology*, *81*(3-4), 231–261. doi:10.1007/s00704-004-0117-9

Saaroni, H., Ben-Dor, E., Bitan, A., & Potchter, O. (2000). Spatial distribution and microscale characteristics of the urban heat island in Tel-Aviv, Israel. *Landscape and Urban Planning*, *48*(1-2), 1–18. doi:10.1016/S0169-2046(99)00075-4

Sailor, D. J. (2011). A review of methods for estimating anthropogenic heat and moisture emissions in the urban environment. *International Journal of Climatology*, *31*(2), 189–199. doi:10.1002/joc.2106

Salamanca, F., Martilli, A., & Yag??e, C. (2012). A numerical study of the Urban Heat Island over Madrid during the DESIREX (2008) campaign with WRF and an evaluation of simple mitigation strategies. *International Journal of Climatology*, *32*(15), 2372–2386. doi:10.1002/joc.3398

Salat, S. (2009). Energy loads, CO 2 emissions and building stocks: morphologies, typologies, energy systems and behaviour. *Building Research & Information*, *37*(5-6), 598–609. doi:10.1080/09613210903162126

Sanaieian, H., Tenpierik, M., Linden, K. Van Den, Mehdizadeh Seraj, F., & Mofidi Shemrani, S. M. (2014). Review of the impact of urban block form on thermal performance, solar access and ventilation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *38*, 551–560. doi:10.1016/j.rser.2014.06.007

Santamouris, M. (2014a). Cooling the cities - A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, *103*, 682–703. doi:10.1016/j.solener.2012.07.003

Santamouris, M. (2014b). On the energy impact of urban heat island and global warming on buildings. *Energy and Buildings*, *82*, 100–113. doi:10.1016/j.enbuild.2014.07.022

Santamouris, M. (2007). Heat Island Research in Europe: The State of the Art. *Advances in Building Energy Research*, *1*(March 2015), 123–150. doi:10.1080/17512549.2007.9687272

Santamouris, M., Papanikolaou, N., Livada, I., Koronakis, I., Georgakis, C., Argiriou, a, & Assimakopoulos, D. . (2001). On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings. *Solar Energy*, *70*(3), 201–216. doi:10.1016/S0038-092X(00)00095-5

Sarralde, J. J., Quinn, D. J., Wiesmann, D., & Steemers, K. (2015). Solar energy and urban morphology: Scenarios for increasing the renewable energy potential of neighbourhoods in London. *Renewable Energy*, *73*, 10–17. doi:10.1016/j.renene.2014.06.028

Schmid, H. P. (2002). Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: a review and perspective. *Agricultural and Forest Meteorology*, *113*(1-4), 159–183. doi:10.1016/S0168-1923(02)00107-7

Serra, R. (1999). *arquitectura y climas* (I.). Barcelona: Gustavo Gili, SA.

Sertorio, L. (2002). *Storia dell'abbondanza*. Bollati Boringhieri.

Sobrino, J. A., Oltra-carrió, R., Sòria, G., Jiménez-muñoz, J. C., Franch, B., Hidalgo, V., … Paganini, M. (2013). Evaluation of the surface urban heat island effect in the city of Madrid. *International Journal of Remote Sensing*, *34*(9), 3177–3192. doi:http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2012.716548

Steemers, K., & Baker, N. (2000). *Energy an Environment in Architecture. A technical Design Guide*. London: E & FN SPON.

Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *93*(12), 1879–1900. doi:10.1175/BAMS-D-11-00019.1

Stewart, I., & Oke, T. (2009). classifying urban climate field sites by " local climate zones ": the case of Nagano , Japan. In *Proceedings of the seventh International Conference on urban climate*. Yokohama, Japan.

Stiles, R., Wawrytko, B. G., Hagen, K., Trimmel, H., Loibl, W., Köstl, M., … Feilmayr, W. (2014). Urban Fabric Types and Microclimate Response -Assessment and Design Improvement . Final Report. Vienna.

Street, M., Reinhart, C., Norford, L., & Ochsendorf, J. (2013). Urban heat island in Boston – An evaluation of urban air- temperature models for predicting building energy use. In *Proceedings of BS2013:13th Conference of International Building Performance Simulation Association* (pp. 1022–1029). Chambéry, France.

Strømann-Andersen, J., & Sattrup, P. a. (2011). The urban canyon and building energy use: Urban density versus daylight and passive solar gains. *Energy and Buildings*, *43*(8), 2011–2020. doi:10.1016/j.enbuild.2011.04.007

Taha, H. (1997). Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and Buildings*, *25*(2), 99–103. doi:10.1016/S0378-7788(96)00999-1

Takebayashi, H., & Moriyama, M. (2012). Relationships between the properties of an urban street canyon and its radiant environment: Introduction of appropriate urban heat island mitigation technologies. *Solar Energy*, *86*(9), 2255–2262. doi:10.1016/j.solener.2012.04.019

Tayanc, M., & Toros, H. (1997). Urbanization effects on regional climate change in the case of four large cities of turkey. *Climatic Change*, *35*(4), 501–524. doi:Doi 10.1023/A:1005357915441

Theeuwes, N. E., Steeneveld, G. J., Ronda, R. J., Heusinkveld, B. G., van Hove, L. W. a, & Holtslag, a. a M. (2014). Seasonal dependence of the urban heat island on the street canyon aspect ratio. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, (October), 2197–2210. doi:10.1002/qj.2289

Tombolini, I., Zambon, I., Ippolito, A., Grigoriadis, S., Serra, P., & Salvati, L. (2015). Revisiting "Southern" Sprawl: Urban Growth, Socio-Spatial Structure and the Influence of Local Economic Contexts. *Economies*, *3*(4), 237–259. doi:10.3390/economies3040237

UNEP. (2004). Impacts of summer 2003 heat wave in Europe. *Environment Alert Bulletin*

Unger, J. (2009). Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database. *Environment and Pollution*, *36*, 59–80.

Unger, J. (2004). Intra-urban relationship between surface geometry and urban heat island : review and new approach. *Climate Research*, *27*, 253–264.

United Nations. (2014). *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision*. United Nations, New York.

Van Esch, M. M. E., Looman, R. H. J., & De Bruin-Hordijk, G. J. (2012). The effects of urban and building design parameters on solar access to the urban canyon and the potential for direct passive solar heating strategies. *Energy and Buildings*, *47*, 189–200. doi:10.1016/j.enbuild.2011.11.042

Vandentorren, S., Suzan, F., Medina, S., Pascal, M., Maulpoix, A., Cohen, J. C., & Ledrans, M. (2004). Mortality in 13 French cities during the August 2003 heat wave. *American Journal of Public Health*, *94*(9), 1518–1520. doi:10.2105/AJPH.94.9.1518

Vermeulen, T., Knopf-Lenoir, C., Villon, P., & Beckers, B. (2015). Urban layout optimization framework to maximize direct solar irradiation. *Computers, Environment and Urban Systems*, *51*, 1–12. doi:10.1016/j.compenvurbsys.2015.01.001

Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, *30*(1), 79–82. doi:10.3354/cr030079

Wong, N. H., Jusuf, S. K., Syafii, N. I., Chen, Y., Hajadi, N., Sathyanarayanan, H., & Manickavasagam, Y. V. (2011). Evaluation of the impact of the surrounding urban morphology on building energy consumption. *Solar Energy*, *85*(1), 57–71. doi:10.1016/j.solener.2010.11.002

Wong, N. H., Jusuf, S. K., & Tan, C. L. (2011). Integrated urban microclimate assessment method as a sustainable urban development and urban design tool. *Landscape and Urban Planning*, *100*(4), 386–389. doi:10.1016/j.landurbplan.2011.02.012

World Bank. (2014). Databases. Retrieved from http://databank.worldbank.org/data/databases.aspx

Zachariadis, T., & Hadjinicolaou, P. (2014). The effect of climate change on electricity needs – A case study from Mediterranean Europe. *Energy*, *76*, 899–910. doi:10.1016/j.energy.2014.09.001

Zhang, A., Gao, C., & Zhang, L. (2005). Numerical simulation of the wind field around different building arrangements. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, *93*(12), 891–904. doi:10.1016/j.jweia.2005.09.001

Zhang, J., Heng, C. K., Malone-Lee, L. C., Hii, D. J. C., Janssen, P., Leung, K. S., & Tan, B. K. (2012). Evaluating environmental implications of density: A comparative case study on the relationship between density, urban block typology and sky exposure. *Automation in Construction*, *22*, 90–101. doi:10.1016/j.autcon.2011.06.011

Zoulia, I., Santamouris, M., & Dimoudi, a. (2009). Monitoring the effect of urban green areas on the heat island in Athens. *Environmental Monitoring and Assessment*, *156*, 275–292. doi:10.1007/s10661-008-0483-3

FMFODP EFMMF GJHVSF

Figura 1 ROADMAP 2050. Fonte: OMA per European Climate Foundation, 2010 ..... 25;
Figura 2 Dimensione dei terriotri in proporzione rispettivamente alla popolazione presente, al consumo di carburante, alla quantità di emissioni e all'impronta eocologica prodotta. 35;
Figura 3 Forma dei tetti e tipologie costruttive in funzione del clima di riferimento, Golany,1996 ..... 36;
Figura 4 Ostuni, Casares e Marrakesh: esempi di insediamenti compatti in clima caldo 37;
Figura 5 Urbanizzazione e consumo di energia dal 1860 ad oggi, APUR 2012 ..... 38;
Figura 6 Sperimentazioni sulla tipologia del grattacielo. In alto progetti per il concorso del *Chicago Tribune,* di Eliel Saarinen, Walter Gropius e Adolf Loos. In basso la *Ville Radieuse* e *Plan Voisin* per Parigi di Le Corbusier 40;
Figura 7 Aumento della popolazione urbana e consumi energetici, da De Pascali 2008 ..... 41;
Figura 8 Uso di energie da fonte rinnovabile o non rinnovabile e proporzione tra popolazione urbana e rurale, Fernández J. E. 2014 ..... 41;
Figura 9 Effetti della crisi petrolifera del 1973, Fonte: http://www.qualenergia.it 42;
Figura 10 La nuova relazione tra morfologia urbana e clima - Sullo sfondo: produzione di petrolio dal 1859 al 2050 ..... 42;
Figura 11 A sinistra: Fattori che determinano la vulnerabilità alle ondate di calore: densità di popolazione e scarsità di vegetazione. A destra: Apparente spostamento verso sud delle città europee a causa di cambiamenti climatici, proiezione 2070-2100. Fonte: EEA 2009 ..... 44;
Figura 12 (**a**) Crescita della popolazione in sei città del porgetto *Urban Age - LSECities* (**b**) livello relativo di urbanizzazione nei corrispondenti paesi (**c**) Incremento della Temperatura media annuale in Italia. (**d**) Incremento percentuale della popolazione e delle superfici costruite nei paesi OECD, 2000-2050, ... 45;
Figura 13 *The endless city* (Burdett & Sudjic, 2007) 46;
Figura 14 Il riscaldamento globale, rappresentazione di Andy Singer (2005) 46;
Figura 15 Smog a Pechino durante la conferenza sul Clima a Parigi (COP21) Fonte: http://www.repubblica.it/ambiente/ 47;
Figura 16 Variazione delle emissioni nel 2012 rispetto al 1990 per settore, Fonte: ISPRA 2012 ..... 47;
Figura 17 RoadMap 2050, Fonte: European Climate Foundation, http://www.roadmap2050.eu/ 48;
Figura 18 Impatti dei cambiamenti climatici, EEA 2012 ..... 49;
Figura 19 "Where we live". Fonte: *Urban Age Project - LSECities*, Burdett & Sudjic, 2007 ..... 53;
Figura 20 "Global Energy Use". Fonte: *Urban Age Project - LSECities*, Burdett & Sudjic, 2007 ..... 53;
Figura 21 Fattori che contribuiscono alla "percezione" della densità, Fonte: Alexander, Reed, Murphy, 1988 ..... 55;
Figura 22 Possibili misure della "Densità fisica", Fonte: MIT DENSITYatlas, http://densityatlas.org/measuring/metrics.shtml 55;
Figura 23 Densità di popolazione e consumo energetico per il trasporto: Fonte: Emmanuelle Bournay, UNEP/GRID-Arendal 56;
Figura 25 Distribuzione della densità nelle 6 città di U*rban Age Project - LSECities*, Burdett & Sudjic, 2007 ..... 56;
Figura 24 Numero di auto ogni 1000 abitanti. Fonte: Urban Age Project - LSE Cities, Burdett & Sudjic, 2007 ..... 56;
Figura 26 Mobilità nelle 6 città di U*rban Age Project - LSECities*, Burdett & Sudjic, 2007 ..... 57;
Figura 27 Distribuzione delle funzioni nelle 6 città di U*rban Age Project - LSECities*, Burdett & Sudjic, 2007 ..... 57;
Figura 28 Costi energetici associati a diversi livelli di densità nello studio The cost of sprawl, 1974. Tratto da De Pascali, 2008 ..... 58;
Figura 29 Viste Aeree di Città del Messico e Barcellona 59;
Figura 30 Figura che illustra il concetto di densità e prossimità, Fonte: OECD Green Growth Studies, 2012 ..... 60;
Figura 31I tre principali parametri di densità per l'analisi della forma urbana e delle prestazioni urbane nella ricerca S*pacematrix* (Pont & Haupt, 2010) 61;
Figura 32 Analisi delle tipologie urbane mediante il grafico *Spacemate*, (Pont & Haupt, 2010) 62;
Figura 33 Livelli di riduzione delle emissioni fissati in diverse città Italiane e Spagnole, Fonte: De Gregorio Hurtado, 2015 ..... 65;
Figura 34 Proporzione per settore delle emissioni del Comune di Genova. Fonte: PAES del Comune di Genova 65;
Figura 35 Distibuzione della temperatura media massima mensile ad Atene nel mese di agosto. Fonte: Giannopoulou et al. 2011 ..... 74;
Figura 36 Risultati delle principali campagne di misurazione dell'isola di calore in diverse città del mondo 75;
Figura 37 Scale climatiche: Mesoscala, scala locale e microscala. Fonte: Oke 1987 ..... 77;
Figura 38 Profilo della velocità del vento e scale verticali di riferimento in un'area densamente urbanizzata, Fonte: Oke 2006 ..... 78;
Figura 39 Schematizzazione dell'Urban Canyon. Fonte: Takebayashi & Masakazu 2012 ..... 78;
Figura 40 Bilancio energetico alle superfici del canyon. Fonte: Oke 1987 ..... 78;
Figura 41 Relazione tra consumo di energia e isola di calore, Fonte: Bozonnet 2008 ..... 80;
Figura 42 Risparmi energetici ed economici prefigurati da una campagna di sensibilizzazione per l'incremento dell'albedo delle coperture,"The white roof project" http://www.whiteroofproject.org/ 81;
Figura 43 Foto e termografia di uno spazio pubblico caratterizzato da diversi materiali di finitura, APUR 2012 ..... 82;
Figura 44 Campagne di sensibilizzazione per l'applicazione diffusa dei tetti verdi a Beirut e New York (..... 83;
Figura 45 Informazioni minime necessarie per la descrizione dell'area di riferimento di una stazione meterologica urbana come definite nella guida del WMO (Oke 2006) 84;
Figura 46 Rappresentazione del canyon urbano e dei parametri geometrici che ne individuano le caratteristiche: il rapporto di verticalità H/W e lo Sky View Factor (SVF), Fonte: Erell 2011 ..... 86;
Figura 47 Definizione geometrica dello Sky View Factor. Fonte: Zhang et al., 2012 ..... 86;
Figura 48 Fenomeni termici e meccanici che si producono nella canpoia urbana in funzione della geometria del canyon. Elaborazione personale. 88;

Figura 49 Schemi del flusso dell'aria nella canopia urbana per differenti proporzioni dei canyon urbani. Fonte: Oke 1988 ....8 8 ;
Figura 50 Riflessioni multiple della radiazione in canyon urbani di differente proporzione. Fonte : Givoni 1998 ....8 9 ;
Figura 51 Relazione tra SVF e isola di calore massima notturna secondo Oke. Fonte: Givoni 1998 ....8 9 ;
Figura 52 Correlazione lineare tra SVF e UHI individuata da Chao e Liang (2011) per la città di Hong Kong, ...8 9 ;
Figura 53 Studio della relazione tra altezza e distanza dei fabbricati in funzione del soleggiamento minimo invernale, Gropius 1930. ....9 2 ;
Figura 55 Possibili conformazioni per un'occupazione del suolo dal 10% al 90% attraverso la ripetizione delle forme archetipe del "Pavilion" e della "Court", Martin and March (1972) ....9 2 ;
Figura 56Variazione dello SVF nelle tre configurazioni, Ratti (2003) ....9 3 ;
Figura 57 Peso relativo dei fattori che influenzano la performance energetica secondo Steemers e Backer (2000) e contributi mancante del contesto urbano investigato da Ratti (2005)....9 4 ;
Figura 58 Analisi energetiche sui DEMs per Londra, Tolosa e Berlino. Fonte: Ratti 2005, ...9 4 ;
Figura 59 Incidenza della morfolgia urbana nella determinazione della performance energetica secondo Ratti (2005) e Salat (2009). Fonte: Salt 2009, ...9 4 ;
Figura 60 Variazione del fattore di luce naturale in funzione della proporzione del canyon a Copenaghen ....9 5 ;
Figura 61Consumi energetici estivi ed invernali stimati in presenza o in assenza di ostruzione urbane. Fonte Morganti 2012 ....9 5 ;
Figura 62 Domanda di raffrescamento in funzione di differenti rapporti di verticalità del canyon nello studio di Allegrini et al. 2012 ....9 6 ;
Figura 63 In basso: modellazione della morfologia urbana per le città di Londra, Parigi, Berlino e Istanbul e analisi della performance energetica invernale in relazione all'altezza media degli e difici e al'idice FAR (Floor area ratio). Fonte: LSE Cities, Rode 2014 ....9 6 ;
Figura 64 Esempi di configurazioni dell'edificato uniformi o casuali utilizzati come caso di studio per l'analisi del fattore di luce naturale e del potenziale solare dell'involcro da Cheng et al. 2006. In basso indicazioni progettuali sulla base dei risultati....9 8 ;
Figura 65 Campo delle velocità del vento a 2m dal livello terra in funzione della disposizione degli edifici e della direzione del vento nello studio di Zhang et al. 2005....9 8 ;
Figura 66 Temperature medie mensili per Roma (celeste) e Barcellona (grigio), dati IWEC per Barcellona e IGDG per Roma 113;
Figura 67In alto: Principali profili topografici di Barcellona, elaborazione dati estratti da Google Earth . In basso: Distribuzione annuale della direzione del vento (%). Dati riferiti alla stazione meteorologica dell'aeroporto Barcelona El Prat per gli anni 2000-2015 ....114;
Figura 68 A sinistra : Roma e Barcellona, comparazione della proporzione di area costruita, area agricola e altre aree naturali. Fonte: Tombolini, 2015. A destra: distribuzione dell'edificato di Roma, elaborazione con il software gvSIG 2.2.....115;
Figura 69 Nella pagina accanto: altezza e distribuzione degli edifici in due aree centrali di Roma e Barcellona Elaborazione propria con il software gvSIG 2.2. ....117;
Figura 70 Barcellona: isoterme nel 12 Febbraio 1986. Fonte: Moreno-Garcia, 1994 ....117;
Figura 71 Roma. isoterme delle temperature derivate da misurazioni effettuate a via Arenula (A) e Villa Ada, e dall'applicazione di un modello di canopia urbana. Fonte: Bonacquisti et al. 2006 ....117;
Figura 72 Localizzazione delle stazioni meteorologiche di riferimento a Roma e Barcellona 119;
Figura 73 A sinistra: Localizzazione della stazione meteorologica dell''aeroporto Barcellona El Prat (codice stazione WMO LEBL). A destra: Localizzazione della stazione meteorologica all'aeroporto di Roma Ciampino (codice stazione WMO LIRA)....120;
Figura 74 Posizione delle stazioni meteorologiche a Barcellona: in alto la stazione di Gracia, in basso la stazione di Raval - METEOCAT....121;
Figura 75 La stazione meteorologica di Raval - METEOCAT....121;
Figura 76 La stazione meteorologica di Gracia 121;
Figura 77 Posizione delle stazioni meteorologiche a Roma: in alto la stazione di Via Boncompagni, in basso la stazione di Via Arenula 122;
Figura 78 Caratteristiche delle stazioni meteorologiche urbane di riferimento....123;
Figura 79 Barcellona:Temperatura media, massima e minima del 2014 rispetto alle medie relative agli anni 1981-2010. ....123;
Figura 80 Temperature orarie medie mensili misurate all'aeroporto (linea nera tratteggiata), nella stazione di Raval (linea azzurra) e di Gracia (linea rossa) nel 2014 ....124;
Figura 81Massima intensità dell'isola di calore misurata durante i mesi invernali del 2014 a Barcellona....125;
Figura 82 Massima intensità dell'isola di calore misurata durante i mesi estivi del 2014 a Barcellona....126;
Figura 83 A sinistra: andamento della velocità media oraria del vento nell'arco dell'anno 2014 all'Aeroporto di Barcellona A desta: direzione prevalente del vento (percentuale) nella fascia oraria tra le 12 e le 18. Nei mesi estivi, in tale fascia oraria, si assiste ad un repentino aumento della velocità del vento con direzione Sud Sud-ovest, che corrisponde all'innesco del fenomeno di brezza. 126;
Figura 84 Temperature orarie medie mensili misurate all'aeroporto di Ciampino (linea nera tratteggiata) e alla stazione di Via Arenula (linea azzurra) nel 2003 ....128;
Figura 85 Temperature orarie medie mensili misurate all'aeroporto di Ciampino (linea nera tratteggiata) e alla stazione di Via Boncompagni (linea azzurra) nel 2013....129;
Figura 86 Canyon analizzati a Gracia e Raval 131;
Figura 87 Nella pagina accanto: Caratteristiche dei canyon della campagna di misurazione. Lo Sky View Factor è stato calcolato con il sofware Heliodon2.6 (Beckers & Masset, 2006) sulla base di modelli semplificati dei canyon urbani 133;
Figura 88 Temperatura, velocità e direzione del vento rilevate nelle stazioni meteorologiche fisse durante i giorni di misurazione 133;
Figura 90 Confronto tra canyon con alto rapporto di verticalità e stesso orientamento ma situati in quartieri differenti (San Pere Martir e Carrer de Jesus a Gracia e Carrer del Notariat e Carrer d'Elisabets a Raval) 136;
Figura 91 Andamento delle temperature in canyon dal differente rapporto di verticalità a Raval (sopra) e Gracia (sotto) 137;

Figura 92 Radiazione solare diretta accumulata dalle superfici (strada e pareti) di canyon con diverso rapporto di verticalità. A sinistra C. de Elisbets e Rambla del Raval, a Raval e a destra C. de Jesus e Tr. de dalt a Gracia. 138;
Figura 93 Schema dell'interazione tra i moduli di calcolo di UWG e dei flussi di calore considerati. 145;
Figura 94 In alto: Flussi energetici considerati per la determinazione della temperatura media omogenea nella canopia urbana – In basso: Rappresentazione dei domini fisici dei 4 moduli di calcolo, Fonte: Bueno, 2013....146;
Figura 95 Variabili influenti nello studio del clima urbano alle differenti scale di analisi: mesoscala, scala locale e microscala. La scala locale e la microscala possiedono un dominio orizzontale che, in parte, si interseca. Fonte: elaborazione propria 148;
Figura 96 Rappresentazione dell'area di infleneza ("Source area" o "Footprint") di un radiometro e di un termometro 151;
Figura 97Nella pagina accanto: individuazione dell'area di riferimento per il calcolo dei parametri morfologici in ciascuno dei 4 siti analizzati. Gli angoli dei settori presi in considerazione sono 180°- 315° per Barcellona (Direzione prevalente vento Sud-Sud Ovest e Nord Ovest) e 225° - 360° per Roma (Direzione prevalente vento Sud Ovest e Nord). 153;
Figura 98 Costruzione del modello CAD (Via Boncompagni e Gracia) per il computo delle superfici urbane ed il calcolo dei parametri morfologici 153; Figura 99 Footprint delle stazioni meteorologiche rurali di riferimento, rispettivamente all'aeroporto di Barcellona-El Prat e all'aeroporto di Roma Ciampino....154;
Figura 100 **Raval:** temperature medie orarie mensili nei mesi di gennaio e luglio 2014. Comparazione tra temperature all'aeroporto (linea nera tratteggiata), temperature misurate a Raval (linea azzurra) e temperature calcolate con UWG (linea puntinata rossa). 155;
Figura 101 **VIA Boncompagni:** temperature medie orarie mensili nei mesi di febbraio e agosto 20113. Comparazione tra temperature all'aeroporto (linea nera tratteggiata), temperature misurate a Via Boncompagni (linea azzurra) e temperature calcolate con UWG (linea puntinata rossa). 156; Figura 102: Inquadramento urbano della stazione meteorologica (WS) di Via Boncompagni in cui è possibile vedere la vicinanza del parco di Villa Borghese 157;
Figura 103 **Via Arenula:** temperature medie orarie mensili nei mesi di febbraio e agosto 2013. Comparazione tra temperature all'aeroporto (linea nera tratteggiata), temperature misurate a Via Arenula (linea azzurra) e temperature calcolate con UWG (linea puntinata rossa). 158;
Figura 104 In basso: campagna di misurazione a Gracia e Raval: Comparazione temperature misurate nei canyon (media delle misurazioni), alla rispettiva stazione meteorologica in copertura (linea rosa), simulate con UWG (linea tratteggiata) e all'aeroporto (linea nera) 158;
Figura 105 Esempio di morfologie urbane con stesso rapporto di verticalità del canyon ma caratteristiche differenti. Nel caso a) due tessuti che presentano la stessa proporzione dei canyon ma sono composti da tipologie edilizie differenti per profondità. Nel caso b) tessuti con lo stesso rapporto di propozione ma di dimensioni differenti, sia rispetto all'impronta a terra dell'edificato, che all'altezza e alla profondità del canyon .167;
Figura 106 I parametri morfologici utilizzati nel calcolo di UWG. 168;
Figura 107 Parametrizzazione del TEB utilizzata nel modello UWG. 168;
Figura 108 Rappresentazione grafica del significato morfologico dei tre parametri. Il rapporto di copertura è un indice di "densità orizzontale" mentre il rapporto di facciata e l'altezza media sono indici di "densità verticale". 170;
Figura 109 I tessui urbani di Roma e Barcellona oggetto di studio 171;
Figura 111 In basso a destra: intervallo di variazione di ciascun parametro morfologico nel campione di tessuti analizzati 172;
Figura 112 Isola di calore media mensile calcolata per ciascun caso di studio....174;
Figura 113 Borrel y Soler e Raval; comparazione tra i due casi di studio estremi in quanto a densità e isola di calore indotta 175;
Figura 114 Esempio di tessuto con UHI costante (Gracia) o variabile (Don Bosco) tra estate ed inverno 175;
Figura 115 Isola di calore media, massima e minima ad agosto e gennaio per ciascun caso di studio....176;
Figura 116 Comparazione tra l'intensità media di isola di calore invernale (gennaio) ed estiva (agosto) per ciascun caso di studio....176;
Figura 117 Correlazione tra l'isola di calore media dei casi di studio ed parametri morfologici (rapporto di copertura e raporto di facciata) 177;
Figura 118 Performance climatica delle morfologie di Barceloneta e Ensanche....178;
Figura 119 Variazione dell'isola di calore media massima in funzione di ρurb e VHurb, per diversi valori degli altri due parametri....180;
Figura 120 Statistiche e risultati della regressione lineare applicata ai risultati dell'isola di calore invernale....182;
Figura 121 Statistiche e risultati della regressione lineare applicata ai risultati dell'isola di calore estiva....182;
Figura 122 Rappresentazione grafica tridimensionale dei risultati: le superfici rappresentano l'andamento dell'isola di calore in funzione dei valori di VHurb e ρurb , con Hbld costante (18m) 183;
Figura 123 Nella pagina accanto: grafici che rappresentano le isoterme dell'isola di calore in funzione dei parametri VHurb e ρurb, per altezze pari a 12, 18 e 24m....185;
Figura 124 Valutazione della performance climatica di Gracia e Prati mediante i grafici bidimensionali dell'isola di calore....185;
Figura 125 I contributi della morfologia urbana nella determinazione della performance energetica. Elaborazione personale sulla base della rappresentazione gafica dei fattori che concorrono alla determinazione della performance energetica, Ratti, 2005. ....192;
Figura 127 Posizioni dell'appartamento all'interno del canyon....193;
Figura 128 Temperature all'aeroporto (nero) e nel canyon Carrer de Jesus (rosso) nei giorni di simulazione 194;
Figura 129 Guadagni termici solari per le quattro posizioni nel canyon: P1- primo piano SE, P2 - primo piano NO, P3 - ultimo piano SE, P4- ultimo piano NO 195;
Figura 130 Domanda di raffrescamento oraria per le 4 posizioni nel giorno 10 Luglio. La linea nera e rossa rappresentano l'andamento delle temperature rispettivamente all'aeroporto e nel canyon urbano. La linea grigia e gialla rappresentano la domanda di raffrescamento oraria calcolata rispettivamente con le temperature dell'aeroporto e con le temperature del canyon 195;
Figura 131 Domanda di raffrescamento oraria per il 17 Luglio. La linea nera e rossa rappresentano l'andamento delle temperature rispettivamente all'aeroporto e nel canyon urbano. La linea grigia e gialla rappresentano la domanda di raffrescamento oraria calcolata rispettivamente con le

temperature dell'aeroporto e con le temperature del canyon 196;
Figura 132 Struttura delle simulazioni e parametri testati per l'analisi di sensibilità della domanda energetica alle temperature esterne e alla radiazione incidente..... 198;
Figura 133 A sinistra :Appartamento tipo modellato in Design Builder con l'esposizione Nord-Est Nord-Ovest. A destra: esposizioni analizzate NE-NO, NO-SO, SO-SE e SE-NE 199;
Figura 134 Tessuti urbani di riferimento e modelli tipologici normalizzati. In azzurro è evidenziala la porzione modellata in Design Builder, in giallo gli edifici considerati per ciascuna esposizione. 200;
Figura 135 Comparazione tra le temperature di input usate per le simulazioni: la linea nera tratteggiata rappresenta l'andamento delle temperature medie annue a Roma-Ciampino, quella azzurra l'incremento medio di 2°C applicato alle temperature di Roma-Ciampino per le analisi di sensibilità, quella rossa le temperature medie annuali calcolate da UWG considerando i parametri morfologici corrispondenti al caso di studio di Gracia e le temperature di Roma-Ciampino come stazione meteorologica rurale..... 200;
Figura 136 Modalità di realizzazione delle simulazioni energetiche utilizzando i casi di studio per evidenziare l'effetto diretto, indiretto e globale della morfologia urbana sulla domanda energetica annuale 201;
Figura 137 Analisi di sensibilità della domanda energetica in funzione di un incremento costante delle temperature rispetto a quelle rurali 202;
Figura 138 Variazione della domanda energetica in funzione delle temperature urbane calcolate da UWG, che tengono in conto dell'effetto di isola di calore determinato dalla morfologia dei tessuti di riferimento 202;
Figura 139 Parametri morfologici e effetto indiretto sulla domanda energetica. La linea rossa tratteggiata rappresenta la domanda calcolata con le temperature rurali. Gli indicatori corrispondono alla domanda energetica media al variare dell'effetto dell'isola di calore, calcolato con UWG per ciascun caso di studio. 204;
Figura 140 Analisi di sensibilità della domanda energetica in funzione di una riduzione teorica della radiazione solare incidente 205;
Figura 141 Variazione della domanda energetica in funzione dell'ostruzione della radiazione determinato dalla morfologia dei 5 casi di studio.
205; Figura 142 Parametri morfologici e effetto diretto sulla domanda energetica. La linea rossa tratteggiata rappresenta la domanda calcolata con in assenza del contesto urbano. Gli indicatori corrispondono alla domanda energetica che ti che tiene in conto dell'ostruzione della radiazione determinata dal contesto morfologico dei 5 casi di studio, nella media delle 4 esposizioni 207;
Figura 144 Variazione della domanda energetica globale in funzione del rapporto di copertura dei tessuti studiati. Risultato medio tra le 4 esposizioni 209;
Figura 145 Variazione della domanda energetica globale in funzione del rapporto di facciata dei tessuti studiati. Risultato medio tra le 4 esposizioni..... 209;
Figura 146 Parametri morfologici e effetto globale sulla domanda energetica: variazione della domanda energetica estiva ed invernale per le esposizioni Nord Est-Nord Ovest e Nord Ovest-Sud Ovest 209;
Figura 147 Parametri morfologici e effetto globale sulla domanda energetica: variazione della domanda energetica estiva ed invernale per le esposizioni Sud Ovest-Sud Est e Sud Est-Nord Est 210;
Figura 148 Rappresentazione dello strato limite urbano in condizioni stabili e convettive. 246;
Figura 149 Circolazione urbana indotta dalla presenza dell'isola di calore (buoyancy driven) 246;
Figura 150 Bilancio energetico alle superfici del volume di controllo. In blu sono evidenziati i termini in cui sono coinvolti i parametri morfologici
249; Figura 151 Ralazione tra i parametri di calcolo di UWG e i fenomeni termici che determinano la formazione dell'isola di calore. Per ciascun parametro è stato indicato attraverso quale "causa" contribuisce all'innalzamento delle temperature (1, 2,3 ..etc) e quale termine del bilancio energetico urbano interessa 255;
Figura 152 Criteri di individuazione dei parametri principali su cui svolgere le analisi di sensibilità del modello UWG. 256;
Figura 153 Isola di calore media mensile per differenti valori del raggio della città 260;
Figura 154 Isola di calore media mensile in funzione delle differenti morfologie urbane analizzate 261;
Figura 155 Isola di calore media mensile in funzione delle differenti percentuali di superficie alberata 261;
Figura 156 Raval e Borrel y Sorel : tessuti con valori massimi e minimi dei parametri morfologi e della presenza di alberature 261;
Figura 157 Estremi di variazione del parametro "Cooling set point"..... 262;
Figura 158 Variazione del parametro che indica la modalità di rilascio del calore di scarto nel canyon (Heat released to canyon) 262;
Figura 159 Variazione dell'isola di calore media mensile in funzione dei valori di "cooling set point" (sopra) e "Heat released to canyon" (sotto)
262; Figura 160 Variazione dell'isola di calore media mensile in funzione dell'inerzia della parete 263;
Figura 161 Variazioni cromatiche di pareti, tetti e strade in ambito urbano..... 263;
Figura 162 Sintesi dei risultati: variazione dell'isola di calore media mensile in funzione dei valori massimi e minimi assunti dai parametri considerati. Le barre nere indicano l'incremento di isola di calore generata dal valore massimo del parametro rispetto a quello corrispondente al minimo. Tanto maggiore risulta tale differenza, tanto maggiore sarà la rilevanza del parametro rispetto alla determinazione dell'isola di calore in clima Mediterraneo 264;
Figura 163 Stazione Gracia: Inquadramento urbano, footprint della stazione e modello CAD per il calcolo dei parametri morfologici 268;
Figura 164 Stazione Raval: Inquadramento urbano, footprint della stazione e modello CAD per il calcolo dei parametri morfologici 271;
Figura 165 Stazione Boncompagni: Inquadramento urbano, footprint della stazione e modello CAD per il calcolo dei parametri morfologici ..274;
Figura 166 Stazione Arenula: Inquadramento urbano, footprint della stazione e modello CAD per il calcolo dei parametri morfologici 2 7 7

FMFODP EFMMF UBCFMMF

Tabella 1 I contributi della Città Compatta alla sostenibilità urbana, Fonte: OECD Green Growth Studies, 2012 ..... 60 ;
Tabella 2 Intensità media dell'isola di calore, sulla base della review di Dorer & Allegrini 2012. ..... 75 ;
Tabella 3 Correlazioni tra SVF o H/W e temperatura dell'aria negli studi analizzati da Unger, 2004 ..... 90 ;
Tabella 4 Medie climatologiche mensili (1981-2010) per Barcellona Aeroporto, fonte Agencia Estatal de Meteorologia — AEMET 113;
Tabella 5 Medie climatologiche mensili (1961-1990) per l'osservatorio di Collegio Romano, fonte ENEA http://clisun.casaccia.enea.it 113;
Tabella 6 Isola di calore media mensile e media massima alla stazione di Raval nel 2014 ..... 124;
Tabella 7 Isola di calore media mensile e media massima alla stazione di Gracia nel 2014 ..... 124;
Tabella 8 Isola di calore media mensile e media massima alla stazione di Arenula (quota stradale) nel 2003 ..... 128;
Tabella 9 Isola di calore media mensile e media massima alla stazione di Via Boncompagni (in copertura) nel 2013 ..... 128;
Tabella 11 Risultati dei precedenti studi di validazione, rispetto a misurazioni a Singapore e Tolosa e Basilea. L'errore del modello è stato valutato con il "Root mean square error" (RMSE) e il "Mean Bias Error "(MBE). 147;
Tabella 12 Parametri morfologici relativi alle 4 stazioni meteorologiche urbane .....
153; Tabella 13 Performance del modello UWG rispetto all'andamento orario delle temperature medie mensili misurate a Raval: *Mean-Bias Error* e il *Root Mean Squared Error* 155;
Tabella 14 Isola di calore media mensile misurata e simulata a Raval 155;
Tabella 15 Performance del modello UWG rispetto all'andamento orario delle temperature medie mensili misurate a Via Boncompagni: *Mean-Bias Error* e il *Root Mean Squared Error* 156;
Tabella 16 Isola di calore media mensile misurata e simulata a Via Boncompagni. 156;
Tabella 17 Performance del modello UWG rispetto all'andamento orario delle temperature medie mensili misurate a Via Arenula: *Mean-Bias Error* e il *Root Mean Squared Error* 158;
Tabella 18 Isola di calore media mensile misurata e simulata a Via Arenula. 158;
Tabella 19 Performance del modello UWG rispetto all'andamento orario delle temperature misurate alla quota stradale ed in copertura nei quartieri di Raval e Gracia a Luglio 2014: *Mean-Bias Error* e il *Root Mean Squared Error*..... *159;*
Tabella 20 Valori dei tre parametri morfologici per ciascun caso di studio 172;
Tabella 21 Parametri costanti utilizzati per le simulazioni dell'isola di calore con UWG 173;
Tabella 22 Isola di calore media annuale, estiva ed invernale per ciascun caso di studio 174;
Tabella 23 Intensità dell'isola di calore media e massima in inverno (gennaio) ed agosto per ciascuna morfologia urbana 176;
Tabella 24 Valori dei parametri morfologici per la costruzione della matrice delle simulazioni 181;
Tabella 25 Valori delle variabili morfologiche standardizzate 182;
Tabella 26 Assunzioni del modello energetico 194;
Tabella 27 Domanda di raffrescamento giornaliera in funzione delle differenti posizioni e temperature. L'errore relativo è dato dalla differenza tra la domanda calcolata con le temperature dell'aeroporto e quella calcolata con le temperature del canyon urbano 196;
Tabella 28 Assunzioni del modello energetico per le analisi di sensibilità 199;
Tabella 29 Isola di calore media annuale, invernale ed estiva calcolata con UWG per i casi di studio 202;
Tabella 30 Variazione della domanda energetica in funzione dell'isola di calore calcolata per i 5 casi di studio. Er % indica l'errore relativo che si commette calcolando la domanda energetica omettendo l'effetto dell'isola di calore urbana 203;
Tabella 31 Ostruzione della radiazione determinato dalla morfologia dei 5 casi di studio per l'appartamento posto al primo piano 205;
Tabella 32 Variazione della domanda energetica in funzione dell'ostruzione della radiazione solare determinata dalla morfologia urbana dei 5 casi di studio. La colonna Er % indica l'errore relativo che si commette calcolando la domanda energetica omettendo la presenza del contesto urbano
206; Tabella 33 Variazione della domanda energetica in funzione del contributo globale della morfologia urbana. La colonna Er % indica l'errore relativo che si commette calcolando la domanda energetica omettendo entrambi gli effetti indotti della morfologia urbana. 210;
Tabella 34 Coefficienti superficiali (Csurf) per il calcolo della θ_{eq} in ogni condizione. D, Acity and Pcity sono rispettivamente il diametro, l'area e il perimetro della città. u_{wind} è la velocità dell'aria misurata alla stazione meteorologica rurale. Fonte: Bueno, 2013. ..... 246;
Tabella 35 Parametri morfologici test per l'analisi di sensibilità di UWG 261;
Tabella 36 Stratigrafie considerate per il tipo di parete "pesante" e "leggera" 263;
Tabella 37 Parametri mrofologici relativi alla footprint della stazione Gracia 268;
Tabella 38 Parametri mrofologici relativi alla footprint della stazione Raval 271;
Tabella 39 Parametri mrofologici relativi alla footprint della stazione Boncompagni 274;
Tabella 40 Parametri mrofologici relativi alla footprint della stazione Arenula 277