

POLITECNICO DI TORINO

Facoltà di Architettura

Corso di Laurea Magistrale

Architettura Costruzione Città

a.a 2015-2016



TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**Il consumo energetico per la climatizzazione degli edifici
e la forma urbana. I casi studio di Torino e Dubai.**

Relatore:

Prof.ssa Guglielmina Mutani

Corelatori esterni:

Prof. Andrea Rolando

Prof. Jérôme Henri Kämpf

Silvia Cocco

Candidato

Marta Carozza

Alla mia famiglia

"Would you tell me, please, which way I ought to go from here?"
'That depends a good deal on where you want to get to,' said the Cat.
"I don't much care where -" said Alice.
'Then it doesn't matter which way you go,' said the Cat.
'- so long as I get SOMEWHERE,' Alice added as an explanation.
'Oh, you're sure to do that,' said the Cat, 'if you only walk long enough.'

Lewis Carroll, Alice in Wonderland.

INDICE

| | |
|--|-----|
| 1. INTRODUZIONE | 6 |
| 1.1 Obiettivi e metodologia | 6 |
| 1.2 Breve evoluzione della sostenibilità energetica e il quadro normativo italiano | 9 |
| 1.3 Il fenomeno delle Urban Heat Island e delle Urban Cool Island | 17 |
| 1.4 Lo stato dell'arte | 20 |
| 1.2.1. Dalla forma della città alla forma dell'edificio | 20 |
| 1.2.2. Dalla forma dell'edificio alla forma della città. | 32 |
| 1.4 Il caso studio: Torino | 46 |
| 2. GLI INDICATORI DELLA FORMA URBANA: | 48 |
| L'ANALISI QUANTITATIVA | 48 |
| 2.1 I parametri urbani | 48 |
| 2.1.1. BCR, <i>Building Coverage Ratio</i> [m^2/m^2]: | 49 |
| 2.1.2. BD, <i>Building Density</i> [m^3/m^2]: | 50 |
| 2.1.3. BH, <i>Building Height</i> [m] | 50 |
| 2.1.4. H/W, <i>Aspect Ratio</i> [-] o <i>Urban Horizon Angle</i> (UHA) | 50 |
| 2.2.7. MOS, <i>Main Orientation of Street</i> [-] | 53 |
| 2.2.8. A, <i>Albedo</i> [-] | 53 |
| 2.2.9. UM, <i>Urban Morphology</i> [-] | 54 |
| 2.2.10. Sf, <i>Solar factor</i> [-] | 54 |
| 2.2.11. GUMS, <i>Global Urban Morphology</i> e <i>Solar Factor</i> [-] | 54 |
| 2.2.12. GUMSA, <i>Global Urban Morphology Solar Factor</i> e <i>Albedo</i> [-] | 54 |
| 2.2 Mappature dei parametri urbani per la città di Torino | 56 |
| 2.3 Il calcolo dell'Albedo | 62 |
| 2.3.1. Il Telerilevamento (<i>Termal Remote Sensing</i>) | 64 |
| 2.3.2. Materiale per il calcolo dell'albedo | 68 |
| 2.3.3. Metodologia di calcolo | 69 |
| 3. SCELTA DELLA ZONA DI STUDIO: L'ANALISI QUALITATIVA | 76 |
| 3.1 Breve evoluzione storica e urbana di Torino | 76 |
| 3.1.1. La città antica | 76 |
| 3.1.2. La città medievale | 77 |
| 3.1.3. La città moderna | 78 |
| 3.1.4. La città contemporanea | 79 |
| 3.2 La scelta delle zone di studio | 84 |
| 3.3 Classificazione e distribuzione di frequenza dei parametri urbani | 100 |
| 4. LA CREAZIONE DEL MODELLO TERMICO E LE SIMULAZIONI ENERGETICHE | 113 |
| 4.1 Il software CitySim Pro | 113 |
| 4.2 La creazione del modello termico | 117 |
| 4.2.1 Il file climatico | 117 |
| 4.2.2 La modellazione tridimensionale | 123 |
| 4.2.3 La definizione delle caratteristiche fisico-tecniche degli edifici e del profilo di occupazione. | 127 |
| 4.3 La validazione del modello | 133 |
| 5. FORMA URBANA E VARIAZIONE DEL CONSUMO ENERGETICO | 138 |
| 5.1 La modifica dei parametri urbani | 138 |

| | |
|---|-----|
| 5.1.1 Modifica BCR | 140 |
| 5.1.2 Modifica Aspect Ratio | 141 |
| 5.1.3 Modifica MOS | 142 |
| 5.1.4 Modifica H/Havg | 143 |
| 5.1.5 Modifica ALBEDO | 144 |
| 5.1.6 Modifiche miste | 145 |
| 5.2 Analisi dei risultati | 146 |
| 5.2.1 Andamento dei consumi al variare del BCR | 148 |
| 5.2.2 Andamento dei consumi al variare del H/W | 150 |
| 5.2.3 Andamento dei consumi al variare del H/Havg | 152 |
| 5.2.4 Andamento dei consumi al variare del MOS | 154 |
| 5.2.5 Andamento dei consumi al variare di ALBEDO | 156 |
| 5.2.6 Il calcolo dei consumi energetici in funzione degli indicatori della forma urbana | 158 |
| 6. LA FORMA URBANA E LE URBAN COOL ISLAND. I POSSIBILI SVILUPPI DELLA RICERCA. | 162 |
| 6.1 Il caso studio di Dubai: i quartieri di AlBastakya e Dubai Marina | 164 |
| 6.1.1 La tipologia della casa a corte: una forma bioclimatica? | 164 |
| 6.1.2 Il quartiere vernacolare di AlBastakya | 166 |
| 6.1.3 Il quartiere moderno di Dubai Marina | 168 |
| 6.2 La creazione dei modelli termici | 170 |
| 6.3 I Risultati | 176 |
| 6.3.1 La determinazione dei consumi per raffrescamento. | 176 |
| 6.3.2 La determinazione delle temperature superficiali | 179 |
| 6.4 Conclusioni | 182 |
| 6.5 Bibliografia | 183 |
| 7. CONCLUSIONI | 184 |
| APPENDICE A: procedura di calcolo per la determinazioni dei parametri urbani | 190 |
| A.1. Dati utilizzati per il calcolo | 190 |
| A.2. Software utilizzato | 190 |
| A.3. Procedura di calcolo degli indicatori della forma urbana | 191 |
| APPENDICE B: file .xml per la creazione dei modelli di Torino e Dubai. | 196 |
| B.1. Stralcio del file .xml per il modello di Crocetta. | 196 |
| B.2. Stralcio del file .xml per il modello di Al Bastakya (Dubai). | 198 |
| Bibliografia | 200 |

1. INTRODUZIONE

1.1 Obiettivi e metodologia

Il presente lavoro intende dimostrare la tesi secondo la quale il consumo energetico per la climatizzazione di un edificio sia influenzato non solo dalle sue caratteristiche intrinseche (involucro, impianti e utenza), ma anche dal contesto urbano in cui si inserisce. Il punto di partenza di questo lavoro è dunque la seguente equazione:

$$\text{Consumo}_{\text{MISURATO}} [\text{kWh/m}^2] = \text{Consumo} [\text{kWh/m}^2]_{\text{EDIFICIO}} \pm \text{Consumo} [\text{kWh/m}^2]_{\text{CONTESTO URBANO}}$$

Conoscendo il primo termine dell'equazione, ovvero il consumo energetico derivante dalle caratteristiche dell'edificio, si andrà ad analizzare in che modo la forma urbana del contesto influisce sul consumo energetico per il riscaldamento dell'edificio.

L'obiettivo di questa analisi è di tradurre i risultati ottenuti in nuove linee guida per la pianificazione urbana sostenibile di nuovi quartieri.

Il primo passo per raggiungere l'obiettivo preposto è stato quello di definire la forma urbana, ovvero capire quali sono i parametri che definiscono la morfologia di un tessuto urbano. A seguito di un'attenta lettura dello stato dell'arte in merito al tema, sono stati scelti alcuni parametri che maggiormente influiscono sulla variazione dei consumi:

- Building Coverage ratio, BCR [m^2/m^2]
- Building Density, BD [m^3/m^2]
- Building Height, BH [m]
- Aspect ratio (Urban Horizon Angle, UHA), HW [-]
- Height of building and the average height of the surrounding, HHm [-]
- Main Orientation of the Street, MOS [-]
- Building Orientation, BO [-]
- Albedo, A [-]

Per il calcolo dei parametri è stato usato un Sistema Geografico di Informazio-

ne (GIS), in particolare, il pacchetto ArcMap di ArcGIS. Questo software si è rivelato particolarmente indicato per il calcolo dei parametri urbani in quanto è in grado di incrociare informazioni geografiche (posizione, orientamento, impronta dell'edificio e prossimità con altri oggetti) con gli attributi alfanumerici (altezza, periodo di costruzione, uso) dell'edificio. Per quanto riguarda tutti i dati utilizzati per questa analisi si rimanda alla lettura dell'appendice A. Procedura di calcolo.

Il lavoro prende come caso studio la città di Torino. La città è suddivisa in 10 circoscrizioni, a loro volta suddivise in circa 3.700 sezioni di censimento (unità minima di rilevazione del Comune sulla cui base è organizzata la rilevazione censuaria). Nell'analisi svolta, la sezione di censimento è stata utilizzata come unità minima di riferimento per definizione della forma urbana. In particolare, per quanto riguarda il calcolo dei parametri urbani, ad ogni sezione di censimento sono stati associati i rispettivi valori degli indicatori descritti in precedenza. Dopo il calcolo dei parametri urbani per l'intera città di Torino, si è deciso di limitare l'analisi ad alcune zone di essa. Per la scelta di tali zone sono stati utilizzati una serie di criteri:

- le zone dovevano appartenere alla mappa del teleriscaldamento della città di Torino. Questa scelta è dovuta al fatto che, ai fini dell'analisi, è stato necessario avere i dati di consumo reali, forniti da IREN;
- le zone dovevano avere dimensioni di circa 400X400 metri e dovevano essere caratterizzate da un tessuto urbano omogeneo e dalla presenza di edifici residenziali;
- Le zone dovevano appartenere a delle epoche differenti. Sono state selezionate 4 zone caratterizzate da un'architettura tradizionale: zona corso Raffaello, zona Crocetta, zona via Sacchi e zona via Arquata, e 3 da un'epoca di costruzione più recente: zona corso Mediterraneo, zona Spina 3 e zona Villaggio Olimpico.

Per ognuna di queste zone è stata fatta un'analisi approfondita delle caratteristiche urbane tramite l'utilizzo di un'immagine satellitare, una mappa tematizzata per epoca di costruzione, una vista planivolumetrica, una tabella riepilogativa dei parametri urbani che definiscono l'area di studio, un istogramma degli usi del suolo e un'infografica riassuntiva.

L'idea di partenza è stata quella di confrontare una zona tradizionale con un'altra di più recente costruzione. Dato che non è stato possibile reperire i dati di consumo reali delle zone moderne, l'analisi è stata svolta solo sulle zone tradizionali, tra le quali è stata scelta la zona di Crocetta.

L'ultimo passaggio fondamentale è stato quello di calcolare la distribuzione di frequenza dei parametri urbani per l'intera città di Torino. L'obiettivo è stato capire come tali parametri variano all'interno del tessuto urbano e dove si collocano le sette zone precedentemente scelte.

Una volta scelta la zona di analisi, partendo dalla Carta Tecnica Regionale della città di Torino, è stato creato il modello tridimensionale utilizzando i software Autocad e Rhinoceros. Dopo aver realizzato la geometria, il modello è stato importato sul tool CitySim Pro per l'assegnazione delle caratteristiche fisico-tecniche degli edifici e per svolgere la simulazione dinamica finalizzata al calcolo del consumo energetico per riscaldamento degli edifici.

Per quanto riguarda l'assegnazione delle caratteristiche fisico-tecniche degli edifici, sono state prese in considerazione le normative italiane UNI TR 11552 del 2014 e la UNI TR 11300 del 2014. Nonostante i riferimenti alle normative, è stato fondamentale eseguire la validazione del modello, andando a confrontare i valori di consumo misurati con i valori di consumo reali (ovvero i consumi forniti da IREN), facendo in modo da ridurre la differenza tra di loro. In questo modo sono stati ridotti gli errori ed è stato ottenuto un modello di base funzionante e reale.

Alla fase di validazione del modello è seguita la fase della modifica dei parametri urbani. Dato che le sezioni di censimento scelte per l'analisi sono caratterizzate da una forma urbana molto simile, è stato necessario creare dei modelli fittizi grazie ai quali è stato possibile far variare di molto i parametri urbani. Durante questa fase è stato necessario concentrarsi solo su alcuni edifici per analizzare come cambia il loro consumo per il riscaldamento invernale al variare della forma del contesto urbano. Per fare questo sono state scelte due sezioni di censimento all'interno della zona presa in considerazione e, tenendo invariati le caratteristiche e la forma degli edifici analizzati, è stato modificato il contesto urbano attorno ad essi e analizzata la variazione del loro consumo energetico per il riscaldamento.

Successivamente, sono state analizzate le variazioni del consumo al variare del contesto urbano ed è stata definita l'equazione che permette di calcolare il consumo energetico per il riscaldamento di un edificio a partire dalle caratteristiche urbane del contesto nel quale l'edificio è inserito.

Infine, è stato fatto uno studio preliminare su due quartieri della città di Dubai per cercare di applicare la metodologia anche in contesti caratterizzati da un clima caldo-arido, dove è richiesta una grande quantità di energia per il raffreddamento degli edifici.

1.2 Breve evoluzione della sostenibilità energetica e il quadro normativo italiano

Negli ultimi tempi sono numerose le notizie che fanno riferimento al cambiamento climatico. Si trovano sempre più frequentemente libri, pubblicazioni, articoli, studi e non solo; sono riscontrabili anche eventi naturali che vengono associati agli effetti del cambiamento climatico. Nella prima immagine (Fig.1) si riporta un grafico creato dalla NASA, nel quale si osserva l'evoluzione delle temperature medie annue (linea rossa sottile) e l'evoluzione delle temperature medie dei cinque anni precedenti (linea rossa grossa). Entrambe sono messe a confronto con la temperatura media del periodo va dal 1951 al 1980. Si osserva che dagli anni 80 la temperatura media è in costante crescita.

Nella seconda immagine (Fig. 2) viene evidenziato, quanto più calda oppure più fredda è stata la Terra nell'anno 2015, in relazione alla temperatura media del periodo storico che va dal 1901 al 2000. Secondo l'analisi fatta dalla NASA, il 2015 è stato l'anno più caldo per il continente Asiatico e per quello Sud-Americano; il secondo più caldo per quanto riguarda il continente Europeo, Africano e Nord-Americano. Questo dato mette in evidenza, come sia influente l'incremento, sempre maggiore, dell'emissioni all'atmosfera di CO₂ e gas serra prodotte dalle attività dell'uomo.

Infine, c'è un altro fatto che avvalorava quanto detto precedentemente. Secondo la NASA, il mese di febbraio del 2016 è stato il mese di febbraio più caldo dei 136 anni analizzati. Questo mese è stato 1,35°C più caldo della temperatura media dei mesi di febbraio del periodo 1951-1980. Il mese di febbraio del 1998, il più caldo fino a quest'anno (2015), è stato 0,88°C più caldo dello stesso periodo.

La convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici, tenutasi nell'anno 1992, ha definito nel suo articolo 1, paragrafo 2, nel seguente modo il cambiamento climatico:

«Qualsiasi cambiamento di clima attribuito direttamente o indirettamente ad attività umane, il quale altera la composizione dell'atmosfera mondiale e si aggiunge alla variabilità naturale del clima osservata in periodi di tempo comparabili.»

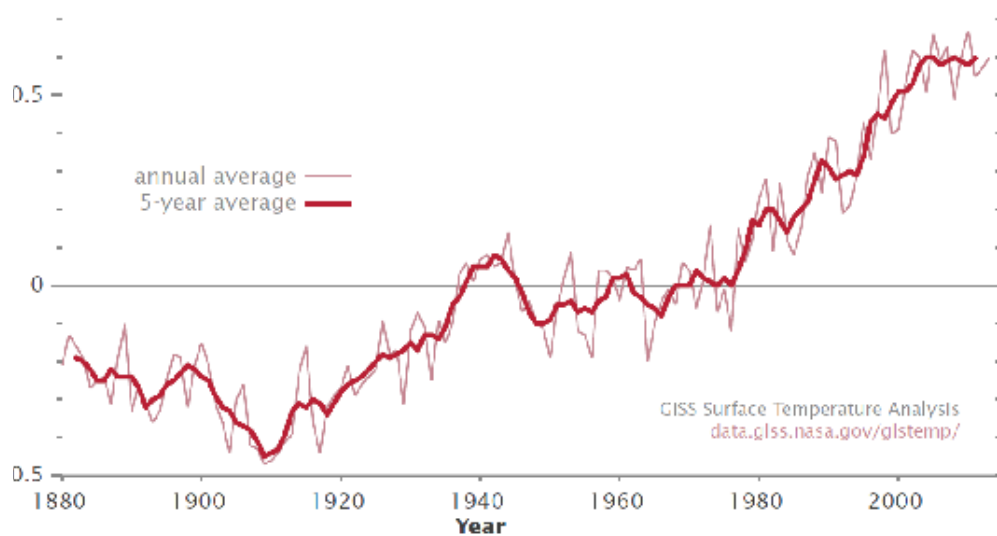


Figura 1. Andamento della temperatura globale.
Fonte: NASA. Earth Observatory.

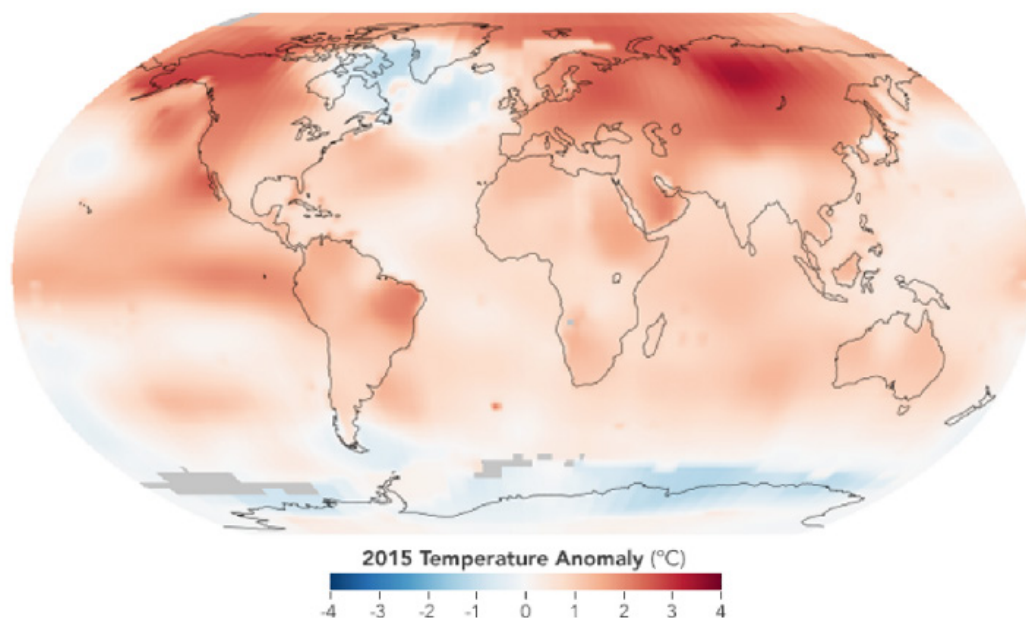


Figura 2. Anomalie di temperature nell'anno 2015 rispetto al periodo 1901-2000.
Fonte: NASA. Earth Observatory

Secondo la Commissione Europea, l'uomo esercita un'influenza crescente sul clima e sulla temperatura terrestre con attività come la combustione di combustibili fossili, la deforestazione e l'allevamento di bestiame.

Queste attività aumentando la concentrazione di alcuni gas serra nell'atmosfera (anidride carbonica, metano, ossido di azoto e gas fluorurati).

La CO_2 è un gas serra prodotto soprattutto dall'attività umana ed è responsabile per il 63% del riscaldamento globale causato dall'uomo. La sua concentrazione nell'atmosfera supera attualmente del 40% il livello registrato agli inizi dell'era industriale.

Gli altri gas serra vengono emessi in quantità minori, ma catturano il calore

maggiormente rispetto alla CO₂, in certi casi fino a mille volte di più. Il metano è responsabile del 19% del riscaldamento globale di origine antropica, l'ossido di azoto del 6%.

In sintesi, le attività umane che maggiormente influiscono sul surriscaldamento globale sono:

- La combustione di carbone, petrolio e gas che producono anidride carbonica e ossido di azoto.
- L'abbattimento delle foreste (deforestazione). Gli alberi aiutano a regolare il clima assorbendo CO₂ dall'atmosfera. Abbattendoli, quest'azione viene a mancare, e la CO₂ contenuta nel legno viene rilasciata nell'atmosfera, alimentando in tal modo l'effetto serra.
- L'allevamento intensivo di bestiame. I bovini e gli ovini producono grandi quantità di metano durante il processo di digestione.
- L'uso di fertilizzanti azotati

Di conseguenza a tali emissioni, l'attuale temperatura media mondiale è più alta di 0,85°C rispetto ai livelli della fine del XIX secolo. Ciascuno degli ultimi tre decenni è stato più caldo dei precedenti decenni, da quando sono iniziate le prime rilevazioni nel 1850.

I più grandi esperti di clima a livello mondiale ritengono che le attività dell'uomo siano quasi certamente la causa principale dell'aumento delle temperature osservato dalla metà del XX secolo.

Un aumento di 2°C rispetto alla temperatura dell'era preindustriale viene considerato dagli scienziati come la soglia oltre la quale vi è un rischio molto alto che si verifichino mutamenti ambientali pericolosi e potenzialmente catastrofici a livello mondiale. Per questo motivo, la comunità internazionale ha riconosciuto la necessità di mantenere il riscaldamento sotto i 2°C.

Nell'ottica di rispettare questo limite, gli organismi a livello mondiale, europeo, nazionale e infine regionale si sono impegnati a promuovere iniziative, ovvero, protocolli, direttive, normative, leggi e decreti che rispecchiano gli sforzi per controllare e ridurre l'emissione di gas climalteranti.

A livello mondiale, i primi passi fatti in questa linea furono i trattati ambientali internazionali, chiamati Convenzioni Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (in inglese, United Nations Framework Convention on Climate Change, da cui l'acronimo UNFCCC o FCCC), svolti per la prima volta a Rio di Janeiro (Brasile) nel 1992. Questi trattati puntano alla riduzione delle emissioni di gas serra e si sono tenuti ogni anno da allora.

Il trattato, come stipulato originariamente, non poneva limiti obbligatori per le

emissioni di gas serra alle singole nazioni; era quindi, sotto questo profilo, legalmente non vincolante. Esso però includeva la possibilità che le parti firmatarie adottassero, in apposite conferenze, protocolli che avrebbero posto i limiti obbligatori di emissioni. Il principale di questi, adottato nel 1997, fu il Protocollo di Kyoto. Tale protocollo ebbe come oggetto il surriscaldamento ambientale e fu redatto l'11 dicembre 1997 nella città giapponese di Kyoto. È entrato in vigore il 16 febbraio 2005, dopo la ratifica da parte della Russia. A maggio 2013 gli stati che hanno aderito e ratificato il protocollo sono 192.

L'ultima Convenzione è stata quella di Parigi, chiamata COP 21 (XXI Conferenza delle Parti dell'UNFCCC). Nella conferenza si è negoziato l'accordo di Parigi, un accordo globale sulla riduzione dei cambiamenti climatici, il cui testo ha rappresentato un consenso dei rappresentanti delle 196 parti partecipanti. L'accordo diventerà giuridicamente vincolante, se ratificato da almeno 55 paesi che insieme rappresentino almeno il 55% delle emissioni globali di gas serra. Le parti dovranno firmare l'accordo a New York tra il 22 aprile 2016 al 21 aprile 2017, e anche adottarlo all'interno dei propri sistemi giuridici (attraverso la ratifica, accettazione, approvazione o adesione).

A livello europeo, gli sviluppi in materia risalgono al 1993 quando venne pubblicata la Direttiva 93/76/CEE, intesa a limitare le emissioni di biossido di carbonio, migliorando l'efficienza energetica (SAVE). Anni più tardi si presentò la Direttiva 2001/77/CE, sulla promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti energetiche rinnovabili nel mercato interno dell'elettricità. Tale direttiva rappresentò una componente essenziale delle misure richieste per il rispetto degli impegni dell'UE a titolo del protocollo di Kyoto.

Ad oggi, la normativa di riferimento per quanto riguarda l'efficienza energetica è la direttiva 2012/27/UE. Invece, per il rendimento energetico nell'edilizia, è la direttiva 2010/31/UE.

È anche importante menzionare il pacchetto Clima-Energia, obiettivo 20/20/20, firmato nel 2008. In questo caso, l'UE si è fissata per il 2020 ridurre del 20% le emissioni di gas a effetto serra, portare al 20% il risparmio energetico e aumentare al 20% il consumo di fonti rinnovabili. Questo pacchetto serve come base a un altro accordo firmato, questa volta nel 2014. Tale accordo, chiamato pacchetto Clima-Energia 2030 fissa tre obiettivi principali da conseguire entro l'anno indicato:

- una riduzione almeno del 40% delle emissioni di gas a effetto serra (rispetto ai livelli del 1990),
- una quota almeno del 27% di energia rinnovabile,

- un miglioramento almeno del 27% dell'efficienza energetica.

Inoltre, è coerente con la prospettiva a lungo termine delineata nella tabella di marcia per passare a un'economia competitiva a basse emissioni di carbonio entro il 2050. Ciò consentirà all'UE di:

- adottare misure efficaci sul piano dei costi che siano funzionali al conseguimento dell'obiettivo a lungo termine di ridurre le emissioni dell'80-95% entro il 2050, nel contesto delle necessarie riduzioni da parte del gruppo dei paesi industrializzati,

- fornire un contributo equo e ambizioso al nuovo accordo internazionale sul clima, che entrerà in vigore nel 2020.

Infine, nel 2009 è stato promosso dai leader dell'UE e il G8, il cosiddetto ROADMAP 2050. L'obiettivo è quello di ridurre le emissioni di gas climalteranti da almeno un 80% dai livelli del 1990 per l'anno 2050.

In ambito nazionale, la prima legge in materia risale all'anno 1976. La Legge 373, per il "Contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici", regolava le caratteristiche di prestazione dei componenti, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici per il riscaldamento degli ambienti e per la produzione di acqua calda per usi igienici e sanitari, alimentati da combustibili solidi, liquidi o gassosi negli edifici pubblici o privati. Qualche anno più tardi, nel 1991, lo stato italiano pubblicò la legge intitolata "Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia", mettendo una pietra miliare su quella che sarebbe diventata in futuro tutta la politica del risparmio energetico nazionale. Poi, negli anni successivi sono state pubblicate diverse attuazioni delle direttive europee approvate. Ad esempio, il Decreto del Presidente della Repubblica 59/09, concernente l'attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia; oppure il Decreto Legislativo 28/11, attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili.

Infine, per citare qualche normativa a livello regionale, nel Piemonte si pubblicò nel 2007 la Legge regionale 28 maggio n. 13, "Disposizioni in materia di rendimento energetico nell'edilizia" e le Deliberazioni della Giunta Regionale del 2009 n. 43-11965 e n. 45-11967 in riferimento alla Legge precedente.

È evidente lo sforzo fatto dagli organismi internazionali, continentali, nazionali e regionali di ridurre le emissioni di gas climalteranti e allo stesso tempo di migliorare l'efficienza energetica promuovendo l'uso di fonti rinnovabili. Tuttavia,

Le misure approvate da qualche decennio hanno significato solo in parte un miglioramento della situazione.

Secondo il Rapporto 220/2015 Emissioni nazionali di gas serra elaborato dall'ISPRA, la drastica contrazione del PIL e l'aumento della quota di consumi di energia di fonti rinnovabili dal 2007 hanno determinato una sensibile riduzione delle emissioni di gas serra. La contrazione delle attività produttive ha avuto un ruolo chiave nella riduzione delle emissioni dopo il 2007. L'analisi dello scenario però, rende evidente che senza la contrazione del PIL, registrata dal 2008, l'effetto dei fattori che riducono le emissioni di gas serra non sarebbe stato sufficiente a portare le emissioni sotto i livelli del 1990.

Se si analizza al dettaglio la situazione energetica nazionale, nel periodo 2008-2012, le emissioni nazionali di origine energetica rappresentano mediamente l'82,8% delle emissioni totali, mentre le emissioni da processi industriali e da processi agricoli rappresentano rispettivamente il 6,3% e il 7,1% (ISPRA, 2015). Per quanto riguarda i combustibili fossili e le fonti rinnovabili, secondo i dati dell'ISPRA, il consumo interno lordo nazionale (Tab. 1) mostra un andamento crescente fino al 2005 quando raggiunge il valore massimo di 187,5 Mtep, successivamente si osserva una riduzione dei consumi accelerata dagli effetti della crisi economica.

Dal 1990 al 2013 il consumo interno lordo è cresciuto del 4,2%. I combustibili di origine fossile rappresentano il principale vettore del sistema energetico nazionale. Storicamente la percentuale di combustibili fossili rispetto al consumo interno lordo è stata superiore al 90%. Tuttavia, dal 1990 al 2013 si osserva un costante declino della componente fossile, diventando particolarmente ripido dal 2007.

Nel caso di energia primaria e finale (Tab. 2 e 3), intesa la prima come il consumo interno lordo al netto dei consumi non energetici, i consumi del periodo 1990-2013 rappresentano il 5,4% del consumo interno lordo, mostrando un andamento in diminuzione dal 1990. Per quanto riguarda, invece, per l'energia disponibile per i consumi finali, al netto delle trasformazioni e delle perdite, costituisce mediamente il 75,7% dell'energia primaria. Entrambe, il consumo di energia primaria e finale, raggiungono il picco nel 2005 per poi declinare successivamente.

Analizzando il consumo finale di energia per i diversi settori (Tab. 4), si osserva che gli andamenti sono differenti, rivelando una struttura piuttosto eterogenea dei settori produttivi. Tra i settori con i maggiori consumi finali, l'industria e i trasporti mostrano nel 2013 una riduzione dei consumi rispetto al 2007. In con-

trotendenza, il settore residenziale mostra un incremento dei consumi finali. Per quanto riguarda le emissioni di gas serra (Tab. 5), le stime preliminari per il 2013 mostrano che le emissioni nazionali di CO₂eq hanno subito una riduzione del 15,6% rispetto a quanto registrato nel 1990 e del 24,1% rispetto al 2004. Tuttavia, il settore civile (residenziale e servizi), diversamente dagli altri settori, mostra un incremento significativo delle emissioni dal 1990 (+10,6%). A fronte di una quota relativa delle emissioni dalle industrie energetiche piuttosto costante, è evidente quindi un incremento del contributo delle emissioni dal settore residenziale e dei servizi.

| Fonte | 1990 | 1995 | 2000 | 2005 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 |
|---------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Solidi | 14.630,2 | 12.277,4 | 12.550,4 | 16.460,6 | 14.170,4 | 15.913,8 | 16.301,5 | 13.993,9 |
| Prodotti petroliferi | 90.069,0 | 93.519,4 | 89.539,7 | 83.963,1 | 69.557,6 | 67.266,4 | 59.941,3 | 57.494,6 |
| Gas naturale | 39.195,7 | 44.868,4 | 57.944,6 | 70.651,2 | 68.056,7 | 63.814,1 | 61.355,6 | 57.386,7 |
| Energia rinnovabile | 6.472,4 | 7.719,2 | 10.112,8 | 11.497,3 | 18.138,4 | 19.968,6 | 23.873,9 | 26.370,6 |
| Energia elettrica | 2.979,8 | 3.218,1 | 3.813,2 | 4.226,6 | 3.797,1 | 3.932,2 | 3.706,2 | 3.623,2 |
| Rifiuti (non rinnovabili) | 164,3 | 162,1 | 258,5 | 672,8 | 1.041,1 | 1.135,1 | 1.132,3 | 1.138,0 |
| Totale | 153.511,4 | 161.764,6 | 174.219,2 | 187.471,6 | 174.761,3 | 172.030,2 | 166.310,8 | 160.007,0 |

Tabella 1. Consumo interno lordo nazionale per fonte energetica (ktep)

Fonte: Rapporto 220/2015. ISPRA

| Fonte | 1990 | 1995 | 2000 | 2005 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 |
|---------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Solidi | 14.630,2 | 12.122,7 | 12.383,9 | 16.297,1 | 14.040,2 | 15.751,0 | 16.160,9 | 13.864,4 |
| Prodotti petroliferi | 81.398,9 | 84.901,9 | 82.254,3 | 76.511,8 | 60.693,7 | 58.668,8 | 52.572,4 | 51.734,3 |
| Gas naturale | 37.518,1 | 43.907,5 | 56.967,5 | 69.658,6 | 67.490,8 | 63.387,4 | 60.984,8 | 56.937,1 |
| Energia rinnovabile | 6.472,4 | 7.719,2 | 10.112,8 | 11.497,3 | 18.138,4 | 19.968,6 | 23.873,9 | 26.370,6 |
| Energia elettrica | 2.979,8 | 3.218,1 | 3.813,2 | 4.226,6 | 3.797,1 | 3.932,2 | 3.706,2 | 3.623,2 |
| Rifiuti (non rinnovabili) | 164,3 | 162,1 | 258,5 | 672,8 | 1.041,1 | 1.135,1 | 1.132,3 | 1.138,0 |
| Totale | 143.163,8 | 152.031,7 | 165.790,3 | 178.864,1 | 165.201,2 | 162.843,2 | 158.430,4 | 153.667,7 |

Tabella 2. Consumo di energia primaria per fonte energetica (ktep)

Fonte: Rapporto 220/2015. ISPRA

| | | | | | | | | |
|---------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Solidi | 4.133,3 | 3.333,1 | 3.380,4 | 3.313,3 | 2.910,2 | 3.412,3 | 3.390,8 | 2.300,3 |
| Prodotti petroliferi | 54.220,7 | 54.060,3 | 57.838,5 | 59.004,6 | 48.733,5 | 48.308,5 | 45.234,0 | 43.756,8 |
| Gas naturale | 29.813,5 | 34.651,7 | 38.022,0 | 40.609,5 | 38.499,4 | 35.534,5 | 35.656,2 | 35.387,5 |
| Calore derivato | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 3.082,3 | 3.332,0 | 3.195,5 | 3.432,7 | 3.702,0 |
| Energia rinnovabile | 929,8 | 1.362,0 | 1.739,6 | 1.934,9 | 5.346,9 | 5.481,0 | 8.587,7 | 8.496,4 |
| Energia elettrica | 18.454,6 | 20.487,7 | 23.471,6 | 25.871,0 | 25.736,3 | 25.952,5 | 25.515,2 | 24.711,8 |
| Rifiuti (non rinnovabili) | 139,1 | 83,0 | 62,1 | 62,1 | 222,7 | 248,8 | 280,7 | 280,9 |
| Totale | 107.710,9 | 114.577,8 | 124.720,2 | 134.544,3 | 124.781,0 | 122.133,7 | 122.103,3 | 118.696,2 |

Tabella 3. Consumo finali di energia per fonte energetica (ktep)

Fonte: Rapporto 220/2015. ISPRA

| Settore | 1990 | 1995 | 2000 | 2005 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 |
|---------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Industria | 35.766,3 | 36.020,1 | 39.737,7 | 39.858,4 | 31.301,5 | 30.167,6 | 29.392,2 | 26.994,8 |
| Trasporti | 34.223,8 | 38.574,0 | 42.519,4 | 44.835,8 | 41.733,7 | 41.821,6 | 39.449,4 | 38.702,5 |
| Residenziale | 26.059,6 | 26.322,2 | 27.590,2 | 31.313,1 | 31.667,1 | 31.321,5 | 34.348,5 | 34.230,6 |
| Servizi | 8.173,9 | 9.816,7 | 11.542,2 | 15.053,3 | 16.978,7 | 15.751,4 | 15.930,5 | 15.846,5 |
| Agricoltura | 2.908,1 | 3.021,6 | 2.905,1 | 3.008,9 | 2.716,4 | 2.702,7 | 2.625,3 | 2.602,2 |
| Pesca | 200,4 | 230,0 | 259,3 | 312,6 | 223,9 | 221,6 | 198,3 | 182,8 |
| Altro | 378,7 | 593,1 | 166,4 | 162,3 | 159,8 | 147,4 | 159,2 | 136,7 |
| Totale | 107.710,9 | 114.577,8 | 124.720,2 | 134.544,3 | 124.781,0 | 122.133,7 | 122.103,3 | 118.696,2 |

Tabella 4. Consumo finali di energia per settore (ktep)

Fonte: Rapporto 220/2015. ISPRA

| Settori | 1990 | 1995 | 2000 | 2005 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013* | Δ% 1990-2013 |
|-------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|
| Industrie energetiche | 137,2 | 140,5 | 152,6 | 160,6 | 133,2 | 131,2 | 126,3 | 114,5 | -16,5% |
| Emissioni fuggitive | 10,8 | 10,1 | 9,0 | 7,8 | 7,5 | 7,4 | 7,2 | 7,3 | -32,1% |
| Industria manifatturiera | 86,9 | 86,6 | 83,8 | 80,2 | 61,4 | 61,2 | 54,9 | 49,4 | -43,2% |
| Trasporti | 104,2 | 115,6 | 123,3 | 128,7 | 119,1 | 117,9 | 106,4 | 104,9 | 0,7% |
| Residenziali e servizi | 69,4 | 68,7 | 72,1 | 85,2 | 85,7 | 77,9 | 77,5 | 76,8 | 10,6% |
| Agricoltura e pesca (energia) | 9,2 | 9,6 | 8,9 | 9,3 | 8,1 | 7,9 | 7,5 | 7,5 | -18,4% |
| Processi industriali | 38,4 | 35,9 | 36,1 | 42,3 | 31,3 | 31,0 | 28,2 | 27,4 | -28,6% |
| Uso di solventi | 2,5 | 2,2 | 2,3 | 2,1 | 1,7 | 1,6 | 1,5 | 1,5 | -37,4% |
| Agricoltura (processi) | 40,8 | 40,6 | 40,2 | 37,4 | 34,3 | 34,4 | 35,4 | 33,1 | -18,9% |
| Rifiuti | 19,7 | 20,4 | 22,9 | 20,5 | 17,7 | 16,7 | 16,2 | 15,4 | -21,5% |
| Totale | 519,1 | 530,3 | 551,2 | 574,3 | 499,8 | 487,5 | 461,2 | 438,0 | -15,6% |

* Stime preliminari

Tabella 5. Emissioni di gas ad effetto serra per settore e variazione percentuale delle emissioni nel periodo 1990-2013.

Fonte: Rapporto 220/2015. ISPRA

In conclusione, si può notare che gli organismi internazionali e i governi stanno promuovendo misure di riduzione delle emissioni di gas climalteranti, ma non solo. Ci sono obiettivi fissati da raggiungere per i prossimi decenni.

Per quanto riguarda questo lavoro, come si osserva dai dati dell'ISPRA, il settore residenziale assume un ruolo importante, sia nell'uso di energia sia nell'emissione di gas serra. È quindi obiettivo di questo studio presentare una comprensione migliore dell'impatto del contesto urbano sul consumo degli edifici in modo tale da definire delle linee guida per una progettazione e una pianificazione più sostenibile.

1.3 Il fenomeno delle Urban Heat Island e delle Urban Cool Island

Circa la metà della popolazione umana vive in aree urbane e nel prossimo futuro ci si aspetta che questo trend salga a causa dello spostamento della popolazione dalla campagna alla città. Di conseguenza non stupisce lo sviluppo della ricerca sugli effetti negativi, in termini ambientali, che tale urbanizzazione potrebbe avere.

L'urbanizzazione influisce negativamente sull'ambiente, principalmente per la produzione di agenti inquinanti, la variazione delle proprietà fisiche e chimiche dell'atmosfera, e l'occupazione del suolo. Considerato come un effetto cumulativo di tutti questi fattori, la Urban Heat Island (UHI) è il fenomeno che determina un microclima più caldo all'interno delle aree urbane cittadine, rispetto alle circostanti zone periferiche e rurali. (figura 3). Anche se le isole di calore si possono formare su una qualsiasi zona rurale o urbana, e a qualsiasi scala, le città sono favorite, dal momento che le loro superfici sono inclini a rilasciare grandi quantità di calore. Ciò nonostante, la UHI ha un impatto negativo non solo su chi vive nella città, ma anche sugli esseri umani e sugli ecosistemi che si trovano lontano dalla città. Infatti, le UHIs sono state indirettamente correlate ai cambiamenti climatici a causa del loro contributo sull'effetto serra, e quindi, sul riscaldamento globale.

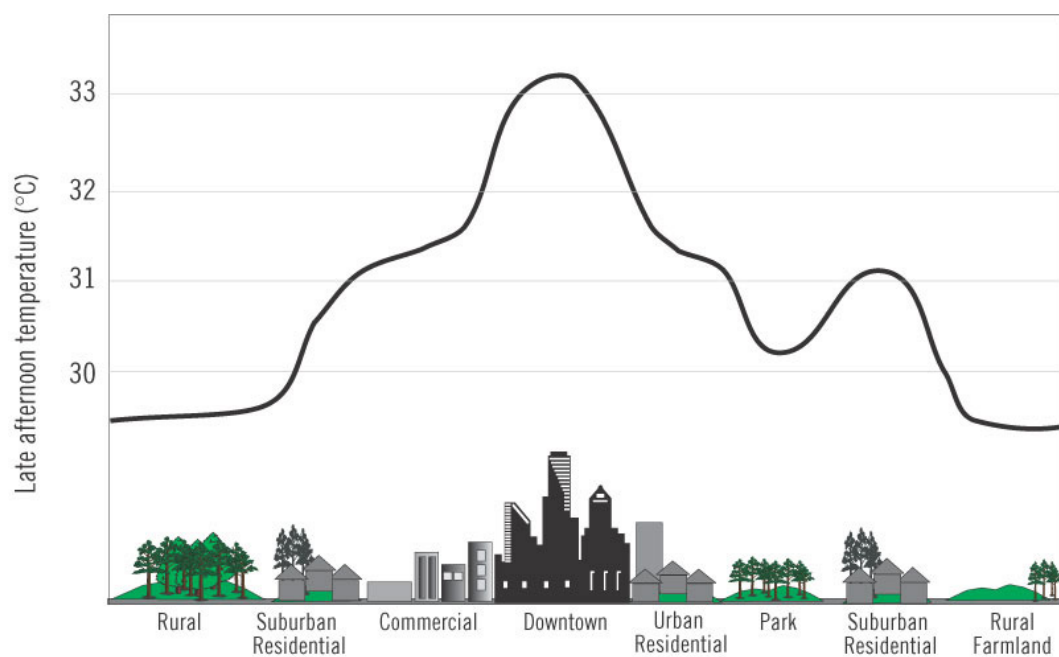


Figura 3 - Il fenomeno UHI nelle aree urbane. Fonte : EPA, 2008

Le maggiori cause del fenomeno della UHI possono essere riassunte in 4 punti:

- La progressiva sostituzione delle superfici naturali con superfici artificiali. Le superfici naturali utilizzano una percentuale relativamente alta di radiazione assorbita nel processo evapotraspirazione e rilasciano vapore acqueo che contribuisce a raffreddare l'aria nelle loro vicinanze. Al contrario, le superfici costruite sono composte da una elevata percentuale di materiali da costruzione non riflettenti e resistenti all'acqua. Come conseguenza, tendono ad assorbire una parte significativa della radiazione incidente, che viene rilasciata sotto forma di calore.
- La diminuzione e la frammentazione delle grandi aree vegetate, come i parchi, inibisce anche il raffreddamento atmosferico dovuto alla circolazione d'aria orizzontale generato dal gradiente di temperatura tra aree verdi e urbanizzate.
- La forma urbana gioca un ruolo importante per la formazione delle UHI. La stretta disposizione degli edifici lungo le strade cittadine forma canyon urbani che inibiscono la fuga della radiazione riflessa dalla maggior parte delle superfici urbane. Questa radiazione è infine assorbita dalle pareti, aumentando così il rilascio di calore.
- La radiazione diffusa ed emessa da inquinanti atmosferici nella zone urbane, la produzione di calore residuo da parte di impianti di condizionamento e refrigerazione, così come da processi industriali e traffico veicolare motorizzato (cioè calore antropico), e l'ostruzione dei flussi di aria rurale da parte delle facce sopravento delle superfici abitate, sono stati riconosciuti come ulteriori cause dell'effetto UHI.

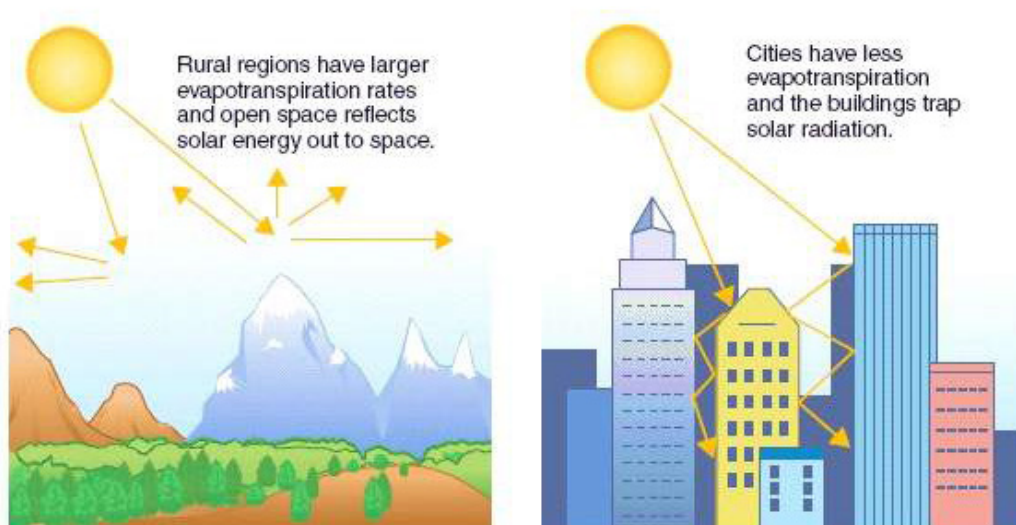


Figura 4 - Schematizzazione del fenomeno dell'isola di calore.

Fonte: http://cimss.ssec.wisc.edu/climatechange/globalCC/lesson7/images/UHI_schematic.gif.

E' stato ampiamente dimostrato che le città con paesaggi e climi variabili possono presentare temperature di parecchi gradi più elevati rispetto al loro ambiente rurale (cioè UHI effetto), un fenomeno che se aumenterà in futuro, può provocare un raddoppiamento del rapporto termico tra la temperatura dell'aria nelle città e quella nelle zone rurali nei decenni successivi. Quindi, la valutazione della UHI e le strategie per attuare la sua mitigazione stanno diventando sempre più importanti per le agenzie governative e ricercatori di molti paesi colpiti. Quello della UHI è un fenomeno che si verifica nelle zone urbane caratterizzate da un clima temperato. Oltre all'isola di calore vi è anche il fenomeno della Urban Cool Island (UCI) che non è stato ancora così ampiamente valutato. La letteratura e gli articoli scientifici a riguardo non sono molto numerosi e sono stati pubblicati in tempi relativamente recenti. Alcuni di questi lavori come quello di Chang (Chang 2007) o quello di Cao (Cao 2010) sono tentativi di quantificare il fenomeno in zone molto urbanizzate come quelle di Tapei. In generale si può dire che l'Urban Cool Island è un fenomeno che si verifica in zone molto urbanizzate, caratterizzate da un clima caldo, e che consiste in un microclima più freddo all'interno delle aree urbane cittadine, rispetto alle circostanti zone periferiche e rurali.

In una parte di questo lavoro verrà presentato uno studio preliminare del fenomeno UCI che interessa la città di Dubai.

1.4 Lo stato dell'arte

Lo sviluppo della ricerca sull'impatto della morfologia urbana sul consumo energetico per la climatizzazione degli edifici, può essere ritenuto relativamente recente, tuttavia la letteratura presente è estesa e varia. I primi studi risalgono agli anni Settanta, quando Martin e March (1972) analizzarono la forma urbana in base all'occupazione del suolo. Anche se questo studio non tenne in considerazione gli effetti della densità urbana sul consumo energetico per la climatizzazione degli edifici, mise le basi per le ricerche future. Uno dei primi studi riguardante l'aspetto energetico, fu quello fatto da Steadman nel 1979.

Negli anni successivi sono state effettuate più ricerche, soprattutto grazie all'avanzamento nello sviluppo dei software di calcolo e al recente implemento dei sistemi GIS (Geographic Information System).

A seguito di una attenta selezione si riportano di seguito gli studi più interessanti che riflettono gli sforzi nella comprensione e nella valutazione dell'impatto della morfologia urbana sul consumo energetico per la climatizzazione degli edifici. Le ricerche proposte successivamente sono solo una parte del materiale esistente. È necessario indicare che non tutti gli articoli qui citati hanno un legame stretto con il lavoro svolto. Il motivo per cui sono stati scelti è perché rappresentano un punto di partenza per studi futuri o che hanno contribuito a un loro ulteriore sviluppo attraverso considerazioni innovative mai trattate prima. Si è ritenuto interessante presentare gli articoli in ordine cronologico in base alla data di pubblicazione. Inoltre, sono stati suddivisi in due grandi categorie: scala "macrourbana" (gruppi di isolati o persino città) e scala microurbana (un isolato o gruppo di edifici). Da come si può dedurre tale suddivisione è interamente soggettiva e fa riferimento alle diverse scale urbane analizzate.

1.2.1. Dalla forma della città alla forma dell'edificio

In questa prima parte vengono presi in considerazione alcuni studi che prendono in considerazione una porzione ampia di città e che cercano di mettere in relazione la complessità di un tessuto urbano con la domanda energetica degli edifici al suo interno.

Nel 2001 Sam C. M. Hui (2001) studiò la possibilità dello sviluppo di edifici a basso consumo energetico nelle città ad alta densità urbana. Secondo l'autore l'utilizzo di energia negli edifici è un fattore chiave per sostenibilità ambientale

urbana. Il disegno e la promozione di fabbricati a basso consumo energetico, attraverso sistemi efficienti e sostenibili, si presenta oggi come un compito arduo per gli architetti e gli altri professionisti del settore della costruzione. Tuttavia, all'epoca in cui la ricerca venne effettuata, vi era una carenza di informazione circa i low energy buildings nelle aree densamente popolate. In tali situazioni di alta densità urbana, infatti, l'efficienza energetica risulta essere ancora più complessa poiché sono presenti limitazioni spaziali. Dunque, l'obiettivo dell'articolo è quello di analizzare il concetto di edificio a basso consumo energetico, studiare come la densità urbana possa influenzare il disegno energetico dell'edificio e discutere le strategie per lo sviluppo di edifici a basso consumo energetico.

A parere dell'autore, il termine low energy è spesso definito in modo poco preciso nella letteratura corrente. Nella progettazione è necessario considerare alcuni requisiti o vincoli, come ad esempio la funzione architettonica, le condizioni dell'ambiente interno, l'efficacia economica, ecc. Di conseguenza, l'obiettivo principale degli edifici a basso consumo energetico deve essere quello di raggiungere la maggiore efficienza energetica con la più bassa domanda di energia possibile, rispettando le ragionevoli limitazioni economiche. Ad ogni modo, non è semplice definire il concetto di low energy esaustivamente misurando e confrontando le prestazioni energetiche degli edifici.

Secondo l'autore è anche importante considerare due argomenti in stretto rapporto tra loro, ovvero i requisiti per il trasporto di energia dovuti ai modelli di progettazione urbana e l'utilizzo di energia necessaria per costruire un edificio e per la sua manutenzione, evidenziando l'importanza del ciclo di vita dei materiali.

Attualmente le città rispondono all'inurbamento con pratiche che incrementano la densità urbana. Gli effetti di essa sulla richiesta totale di energia sono complessi e contraddittori (Tab. 1). Modelli che favoriscono l'alta concentrazione e la compattezza di usi del suolo possono produrre vantaggi per quanto riguarda la distribuzione dell'energia e il disegno dei sistemi di trasporto, allo stesso tempo però, l'affollamento può creare congestioni e un microclima locale indesiderato.

La densità urbana, infatti, è un fattore chiave nel determinare le condizioni di ventilazione urbana, così come la temperatura della città. Sotto certe circostanze, una zona urbana con alta densità può avere una ventilazione insufficiente e un forte effetto isola di calore. Tuttavia, è anche possibile che un'area densamente urbanizzata con un'eterogeneità di altezze nell'edificato, possa avere delle condizioni di ventilazione migliori rispetto a un'area meno densa, ma con

un'altezza più omogenea.

| La densità urbana | |
|---|---|
| Effetti positivi | Effetti negativi |
| <p>Trasporti pubblici Favorire l'utilizzo dei mezzi pubblici riducendo la necessità del mezzo privato e dunque la lunghezza dei tragitti.</p> <p>Infrastrutture Riduzione della superficie necessaria di manto stradale, della lunghezza delle infrastrutture per la fornitura dell'acqua, delle tubazioni fognarie e dell'energia per il pompaggio.</p> <p>Prestazione termiche Gli edifici a multipiani potrebbero ridurre l'area totale dell'involucro e le perdite di calore. L'ombreggiatura tra edifici potrebbe ridurre l'esposizione solare durante l'estate.</p> <p>Illuminazione naturale Sistemi energetici I sistemi di raffreddamento e riscaldamento, che solitamente sono più efficienti energeticamente, sono più fattibili quanto maggiore è la densità.</p> <p>Ventilazione È possibile ottenere un flusso d'aria positivo attorno agli edifici attraverso una buona disposizione dei palazzi a multipiani.</p> | <p>Mezzi di trasporto privati Congestione del traffico nelle aree urbane che incide nell'efficienza del carburante nei veicoli.</p> <p>Trasporto verticale Gli edifici alti implicano ascensori, aumentando così la necessità di energia elettrica per il trasporto verticale.</p> <p>Ventilazione Una forte concentrazione di edifici alti e di grandi dimensioni può impedire la ventilazione urbana</p> <p>Isola di calore urbana Il calore rilasciato e intrappolato nelle aree urbane può incrementare la necessità di utilizzo dell'aria condizionata. Nelle aree urbane dense, l'illuminazione naturale è ridotta, aumentando l'utilizzo di luce artificiale e il carico sul condizionamento dell'aria per eliminare il calore prodotto dalla luce artificiale.</p> <p>Utilizzo dell'energia solare Le superfici esposte e i tetti per la raccolta di energia solare sono limitati.</p> |

Tabella 6. Effetti della densità urbana sulla domanda di energia in città.
Fonte: Sam C.M. Hui (2001)

Ad ogni modo, i modelli urbani densi richiedono un disegno molto attento per massimizzare l'efficienza energetica e soddisfare i requisiti sociali. Tanto è vero che gli aspetti psicologici e sociologici di un'alta densità di popolazione e gli effetti dell'affollamento sono ritenuti di grande interesse per la comunità scientifica.

Successivamente, l'autore presenta le condizioni urbane della città di Hong Kong (Fig. 1), luogo dove si svolge la ricerca, spiegando i parametri che definiscono morfologicamente la città. Dopodiché, l'articolo descrive la situazione energetica di essa.

Infine, Sam C. M. Hui nell'ammettere che non esiste una sola o semplice regola per arrivare all'edificio a basso consumo energetico, stabilisce in compenso dei principi basilari, come ad esempio la minimizzazione della domanda energetica e l'ottimizzazione del rifornimento di energia, attraverso un utilizzo maggiore dalle risorse locali e rinnovabili. Aggiunge inoltre, che la dimensione energetica dovrebbe essere inserita nei processi di sviluppo e progettazione urbana. Infatti, l'autore suggerisce la partecipazione di squadre di progettazione che intra-

prendano processi di disegno energetico e che considerino l'involucro edilizio e i sistemi impiantistici, due aspetti strettamente legati. Oltre a ciò, è evidenziata l'importanza delle considerazioni climatiche nella formulazione di strategie per la sostenibilità energetica e un altro fattore che spesso viene trascurato, vale a dire, la necessità di coinvolgere l'utenza e di renderla consapevole del ruolo che svolge nell'insieme del processo.



Figura 5. Hong Kong da Victoria Peak.
Fonte: <http://raydevlinphotography.com/>

Nel 2005, Carlo Ratti insieme con N. Baker e K. Steemers, presentò un studio sviluppatosi sulle città di Londra, Tolosa e Berlino. La loro motivazione è stata quella di studiare e simulare il comportamento dell'edificio come primo passo per migliorare le prestazioni di esso. Secondo gli autori, si sono sviluppati tanti modelli energetici e tecniche in merito, tuttavia, questi modelli normalmente adottano una prospettiva dal punto di vista del progettista: tendono a considerare l'edificio come un'entità autonoma trascurando l'importanza dei fenomeni che accadono, attorno a esso, a scala urbana. In particolare, l'effetto della forma urbana sul consumo energetico continua a essere poco studiato. Una ragione che giustificerebbe questa situazione potrebbe essere la difficoltà di modellare geometrie urbane complesse.

Lo scopo dell'articolo è quello di cercare di risolvere le criticità legate alla mo-

dell'azione di un contesto urbano complesso attraverso il digital elevation model (DEM). In altre parole, Ratti e i suoi colleghi si chiedono se sia possibile studiare gli effetti del tessuto urbano sul consumo energetico dell'edificio usando il DEM.

Nel lavoro di Baker e Steemers del 2000, gli autori affermano che le prestazioni energetiche dell'edificio dipendono da quattro fattori:

1. Forma urbana, determinata dal progetto dei pianificatori urbani.
2. Forma dell'edificio, determinata dal progetto degli architetti.
3. Efficienza dell'impianto, definita dal progetto degli ingegneri.
4. Comportamento dell'utenza, che dipende dall'utente.

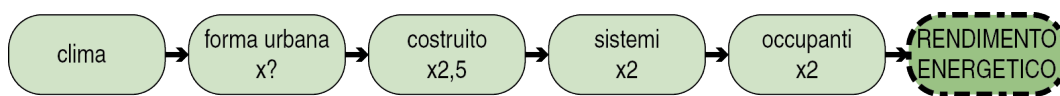


Figura 6. Fattori incidenti nel consumo energetico dell'edificio.

Fonte: C. Ratti et al. (2005)

Ognuno di questi fattori ha un indice di rilevanza differente sul consumo energetico dell'edificio: la forma dell'edificio ha un'indice di rilevanza pari a 2,5. L'efficienza dell'impianto uguale a 2 e infine, quella dovuta al comportamento dell'utenza pari a 2 (Fig. 6). L'effetto congiunto di questi fattori produrrebbe una variazione nel consumo pari a 10. Nella pratica, le differenze di consumo energetico tra edifici con caratteristiche analoghe può essere dell'ordine di 20, dunque, è la forma urbana il fattore (2) mancante?

La metodologia seguita dagli autori è stata quella di assegnare valori predefiniti a tutte le variabili che influiscono nel calcolo del consumo energetico, tranne a quelle legate alla forma urbana, ovvero, i parametri che ricadono nei punti 1 e 2 sopra citati. Lo scopo non è, per tanto, arrivare ad una diagnosi completa, ma è piuttosto quella di trovare valori comparativi e confrontabili.

In questo senso, gli autori fanno riferimento al lavoro svolto negli anni Sessanta da March, nel quale l'autore si interrogava su quale fosse la forma dell'edificio più adatta a ridurre le perdite di calore. Secondo l'autore, costruendo un modello nel quale le trasmittanze termiche degli edifici sono uniformi e non ci sono perdite di calore verso il terreno, la trasmittanza totale può essere valutata attraverso il parametro surface-to-volume ratio;. In questo modo, si ottiene che la forma che minimizza le perdite di calore è la metà di un cubo, se invece fosse considerata la trasmittanza verso il terreno, la forma ottimale sarebbe quella di un cubo. Oltre alla qualità architettonica dell'edificio, la forma del cubo permette una riduzione del consumo energetico per la climatizzazione ma non del consumo energetico complessivo. Ad esempio, per ridurre le perdite di calo-

re durante l'inverno bisognerebbe avere un rapporto superficie-volume molto basso; questo però, comporterebbe una diminuzione dell'involucro dell'edificio, riducendo la capacità di accesso della luce solare e incrementando il consumo energetico per l'illuminazione artificiale, la ventilazione, ecc.

Il quesito posto da March non è dunque di facile risposta in quanto bisogna valutare una serie di fattori. L'autore quindi cerca di trovare una soluzione applicando il metodo Lighting and thermal (LT) che si basa sul concetto di zona passiva e non-passiva (Fig. 7). Secondo l'autore una zona è definita passiva se ha un alto potenziale di ricevere la luce solare e di usufruire di ventilazione naturale, mentre la zona non-passiva necessita di luce e ventilazione artificiali affinché possa essere confortevole. Tale potenziale è definito in base ad alcune regole geometriche e alle ostruzioni presenti. Si deve osservare comunque che si tratta solo di un potenziale: le zone perimetrali dell'edificio ad esempio, potrebbero surriscaldarsi in estate e necessitare di un condizionamento extra per raffreddamento.

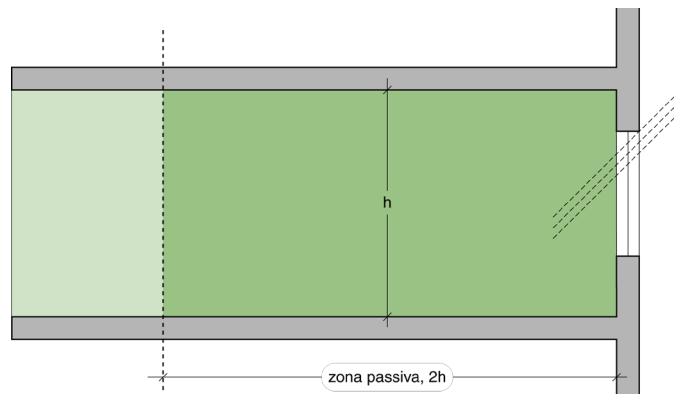


Figura 7. Zona passiva (6m. o due volte l'altezza del piano), quella illuminata e ventilata naturalmente.

Fonte: Ratti et al. (2005). Schema adattato.

Nonostante l'applicazione del modello LT, vi sono ancora due esigenze in conflitto per la riduzione del consumo energetico, ovvero, la riduzione dell'involucro dell'edificio, che permette di avere meno perdite di calore; e l'aumento di esso, vantaggioso per avere più luce e ventilazione naturali. Quale delle due impostazioni predomina nel complesso del consumo energetico dell'edificio?

Il modello LT ha bisogno di numerosi input per poter svolgere i calcoli della simulazione energetica. La maggior parte di essi sono valori predefiniti e quindi bisogna impostare solo quelli dovuti alla forma urbana, come ad esempio, l'orientamento della facciata, l'urban horizon angle (UHA) e l'obstruction sky view (OSV).

Un'altra questione che si pongono gli autori è quella del clima, ovvero quali dati climatici utilizzare per la simulazione. Dato che l'interesse è posto sull'incidenza o meno del tessuto urbano sul consumo energetico, la decisione è stata quella di impostare tutte e tre le postazioni con i dati climatici di Londra.

Le città prese in considerazione sono Londra, Tolosa e Berlino. Esse assicurano una grande gamma di campioni, rappresentando una città medioevale, una Georgiana e una moderna.

Il confronto della variazione del consumo energetico tra tutte e tre le città mostra dei valori poco incidenti rispetto alla variazione del rapporto superficie-volume e del rapporto zona passiva-non passiva. Ciò nonostante, un valore pari al 10% è evidenziato nel consumo di energia per metro quadro all'anno, dovuto solo al fatto della forma urbana diversa tra le città prese in studio.

In conclusione, l'analisi svolta conferma la validità dell'utilizzo del DEM come strumento valido per lo studio della morfologia urbana. Dimostra anche che il rapporto superficie-volume non è valido per descrivere il consumo energetico totale dell'edificio mentre, il rapporto zona passiva-non passiva si rivela come un'indicatore valido. Infine, i risultati della simulazione LT mostrano un basso impatto della forma urbana sul consumo energetico. Tuttavia, è fondamentale però, evidenziare i seguenti aspetti:

- Una variazione del 10% non è da trascurare e può essere di grande importanza nel consumo totale di una città.
- Il lavoro ha considerato solo tre città. Più studi, in altri luoghi, possono evidenziare variazioni più alte.
- Cambiando i dati climatici si possono riscontrare altre variazioni sui risultati finali.

Un altro lavoro interessante è quello svolto da Mariela Arboit et al. (2008). Esso si aggancia alla ricerca iniziata nel 2002 dal gruppo R+D. L'obiettivo di questo gruppo è stato valutare il potenziale di risparmio energetico nella zona urbana di Mendoza, Argentina. Nell'ambito di questo programma viene valutato il rapporto tra la morfologia urbana e l'accesso solare, così come il potenziale solare del fabbricato urbano esistente a bassa densità. Vengono sviluppate, ulteriormente, proposte morfologiche e tecniche per il recupero efficiente del potenziale solare. L'obiettivo è trasmettere queste proposte ai comuni della regione. In questo modo, essi possono aggiornarle, svilupparle e includerle nei piani regolatori dei municipi, che contribuiranno al raggiungimento di un futuro più sostenibile dell'edificato esistente, nel clima temperato-freddo delle latitudini medie delle regioni aride dell'America Latina, in particolare per l'Area

Metropolitana di Mendoza (AMM).

La AMM presenta un sistema energetico che dipende prevalentemente dall'utilizzo intensivo di combustibili fossili. La riduzione del consumo di combustibili fossili e la sostituzione di essi con fonti di energia rinnovabile è assolutamente necessaria. Per sostenere questa affermazione, gli autori presentano i seguenti dati ufficiali rilevati al consumo della città: il settore residenziale, prevalentemente urbano, consuma il 31% dell'energia totale. Di questa percentuale, il 38% è associato al riscaldamento. Considerando il clima della regione e l'abbondante risorsa solare disponibile, si stima che è possibile raggiungere un valore pari al 70% del risparmio energetico, utilizzando solo l'energia solare per il riscaldamento di spazi interni in un edificio residenziale ben progettato. Inoltre, uno degli obiettivi della ricerca svolta da Arboit et al. (2008) è quello di valutare la possibilità di riciclare il costruito esistente per trasformarlo in costruzione passiva.

Di seguito, nell'articolo è descritta la situazione geografica della città di Mendoza, così come gli aspetti climatici che interessano la regione. In più viene descritto il tessuto urbano della città e le caratteristiche che lo definiscono.

La metodologia eseguita consiste nella scelta di 32 isolati urbani a bassa densità, che rappresentano le condizioni urbane e costruttive della città. Si è elaborato un modello tridimensionale, contenente tutta l'informazione dei campioni scelti. Ogni unità dei modelli selezionati contiene al suo interno un gruppo di edifici che sono stati considerati come una sola entità. Le variabili urbane prese in studio sono: la forma dell'isolato urbano, l'orientamento di esso, la larghezza della strada e un aspetto innovativo come l'alberato pubblico (Fig. 8).



Figura 8. Strada alberata di Mendoza.
Fonte: <http://turismo.mendoza.gov.ar/>

Tra le variabili che interessano l'edificio, sono state considerate la morfologia urbana, il fattore di forma (FF), il fattore di occupazione del suolo (SOF) e il fattore totale di occupazione (TOF).

Altre due fattori relativi al sole sono state definiti. Si tratta dell'incidenza solare e degli indicatori solari. Nel primo caso, il gruppo R+D sviluppò un modello grafico-computazionale per calcolare l'area esposta al sole nei paramenti orientati a nord. Il modello è basato sul calcolo delle aree delle prospettive assonometriche, "viste" dal sole durante la stagione del riscaldamento (Fig. 9). Il modello considera soltanto i valori della radiazione diretta in giornate limpide. La seconda entità presa in considerazione è l'indicatore solare. Si sono definiti tre parametri:

- Actual insolation (Mean Insolation Factor, MIF).
- Relative insolation (Useful Insolation Factor, UIF).
- Potential for energy recovery (Potential Energy Savings, PES).

Infine, due insieme di valori sono stati calcolati per ogni unità campione: quella della situazione di riferimento attuale senza cambiamenti e quella della situazione teorica da raggiungere. Oltre ai risultati ottenuti dall'analisi convezionale, per determinare le variabili della morfologia urbana e le combinazioni tra di loro che producono il massimo effetto nel provvedere all'accesso e nell'utilizzo della risorsa solare disponibile, si è ricorso ad un modello statistico di regressione multipla lineare (SMLRM). I valori ottenuti attraverso il modello statistico, mostrano chiaramente che le variabili che interessano la morfologia dell'edificio hanno un impatto significativo sulle prestazioni energetiche, soprattutto sugli indicatori MIF e PES e in secondo luogo sull'indicatore UIF. Dunque, la morfologia dell'edificio è la più influente, seguita dall'orientamento degli isolati e infine dalla larghezza della strada.

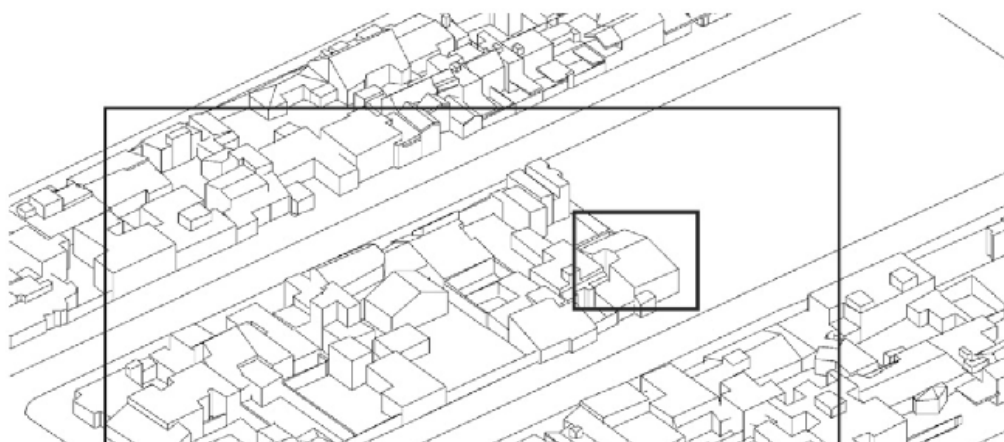


Figura 9. Prospettiva assonometrica di un'isolato "visto" dal sole.

Fonte: Arboit et. al (2008)

Nel 2009 Serge Salat pubblicò un articolo nel quale descrisse il rapporto tra il consumo energetico e i fattori legati alla forma urbana, all'impianto e all'utenza in linee generali.

Oggigiorno, così come nel 2009, il settore edilizio è considerato il settore con il maggiore consumo di energia, inoltre, sia in modo diretto sia in modo indiretto, è anche uno dei maggiori responsabili delle emissioni di CO₂. Questo è dovuto a diversi fattori: la morfologia urbana, la tipologia edilizia, le tecnologie costruttive, i sistemi impiantistici e il comportamento dell'utenza. L'effetto combinato di essi applicato al singolo edificio può rappresentare una variabile sul consumo energetico totale e sulle prestazioni energetiche tra edifici di grande importanza e per tanto non sono da trascurare. Questa eterogeneità di valori può essere osservata a Parigi, luogo dove si è svolto lo studio. A Parigi, ad esempio, il consumo energetico per il riscaldamento rappresenta, sul totale del settore edilizio, il 76% delle emissioni di CO₂.

I fattori che interessano l'impatto sulle emissioni di CO₂ nelle città sono:

- l'efficienza della forma urbana;
- le prestazioni dell'edificio, in particolare quella dell'involucro edilizio;
- l'efficienza dei sistemi impiantistici;
- il modo di agire dell'utenza;
- il tipo di energia utilizzata.

Dunque, per capire come l'emissioni di CO₂ possono essere ridotte, la ricerca quantifica il peso di ogni fattore nel caso studio di Parigi.

Il Centre Scientifique et Technique du Batiment (CSTB) Urban Morphology Laboratory calcolò le caratteristiche urbane dell'intero edificato della città di Parigi. Inoltre, 96.000 edifici residenziali furono modellati per il loro utilizzo di energia termica dall'Atelier Parisien d'Urbanisme (APUR, Agenzia per la pianificazione urbana della città).

Le differenze nelle prestazioni energetiche tra singoli edifici, possono essere valutate attraverso la moltiplicazione dei fattori sopra citati. I fattori non sono totalmente indipendenti tra di loro. Nel caso di Parigi, i fattori trovati nella ricerca confermano i risultati di altri lavori svolti in precedenza (University of Cambridge e Massachusetts Institute of Technology).

La città, attualmente, viene studiata come un'entità omogenea. Tuttavia, in questo modo, viene trascurata la complessità dei legami dei fattori menzionati alle diverse scale urbane, che dipendono dai molteplici rapporti tra energia e le varie forme di densità urbana. Infatti, laddove lo studio sull'"efficientamento" energetico del singolo edificio ha raggiunto considerevoli progressi, pochi

avanzamenti e pochi studi sono stati fatti invece, sulla morfologia urbana. Nonostante ciò, per raggiungere risultati attendibili, è necessario perfezionare e quantificare le descrizioni morfologiche delle diverse densità urbane, in termini del loro impatto sul consumo energetico e sull'emissioni di carbonio.

Questi calcoli comparativi della morfologia urbana e del consumo energetico sono stati avviati tramite l'analisi tra diversi fabbricati urbani, modificando i fattori che riguardano la forma urbana. Di seguito, è stato possibile stimare le prestazioni dell'involucro e in particolare quelle dei valori di trasmittanza, che sono strettamente legati alle prestazioni termiche, per ogni periodo di costruzione: prima del 1945, ove le prestazioni dell'edificio risultano inefficienti ma le perdite per trasmittanza rimangono ragionevoli; tra il 1945 e il 1975, ove le prestazioni sono le peggiori riscontrate; e infine dopo il 1975 (Fig. 10).

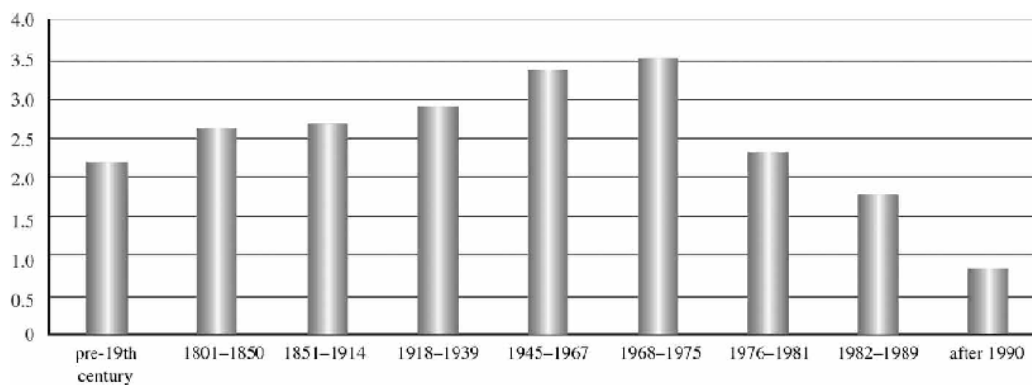


Figura 10. Prestazioni dell'involucro a Parigi (U-values of walls, W/m2/K)

Fonte: Serge Salat (2009): APUR, 2007

Il CSTB ha dimostrato, insieme agli studi dell'Università di Cambridge e del MIT, che il singolo fabbricato urbano efficiente energeticamente, può ridurre il consumo energetico e le emissioni di carbonio in un fattore di due, un fattore da non ignorare. Questo significa che la morfologia urbana sarebbe in grado di ridurre della metà il consumo di energia e le emissioni di carbonio della città.

In conclusione, il metodo per valutare il consumo energetico può essere anche utilizzato come uno strumento integrativo, nella pianificazione e nella gestione urbana. Nella pianificazione di nuove città, l'ottimizzazione dei parametri della forma urbana è ovviamente richiesta. Nelle città esistenti, i modelli del fabbricato urbano possono rendere possibile la quantificazione del consumo energetico; ulteriormente è possibile valutare l'impatto sulle prestazioni al variare di certi parametri (i.e. doppi vetri, efficienza del boiler, ecc.) Infine, questo approccio permette di misurare a una scala urbana maggiore, l'influenza del rinnovamento di un fabbricato urbano o di una tipologia.

Il lavoro sviluppato da Rode et al. (2014) parte dall'ipotesi che la configurazione

base del costruito residenziale nelle città, ovvero la morfologia urbana alla scala del quartiere abbia un impatto significativo nella domanda di energia termica, legato al singolo edificio, essendo la forma urbana compatta quella che presenta un'efficienza energetica maggiore rispetto alla configurazione urbana moderna, come ad esempio, le torri residenziali oppure le case a schiera.

Per validare o meno l'ipotesi, viene studiata la domanda teorica di energia termica per le diverse tipologie residenziali più rappresentative delle città di Parigi, Londra, Berlino e Istanbul in aree di 500m per 500m. Sono state identificate le tipologie edilizie più rappresentative per ogni città (Fig. 11), assicurando così un'ampia gamma di configurazioni, la maggior parte delle quali appartengono agli ultimi 150 anni, un periodo in cui è stata posta poca o nessuna attenzione alla domanda di energia termica.

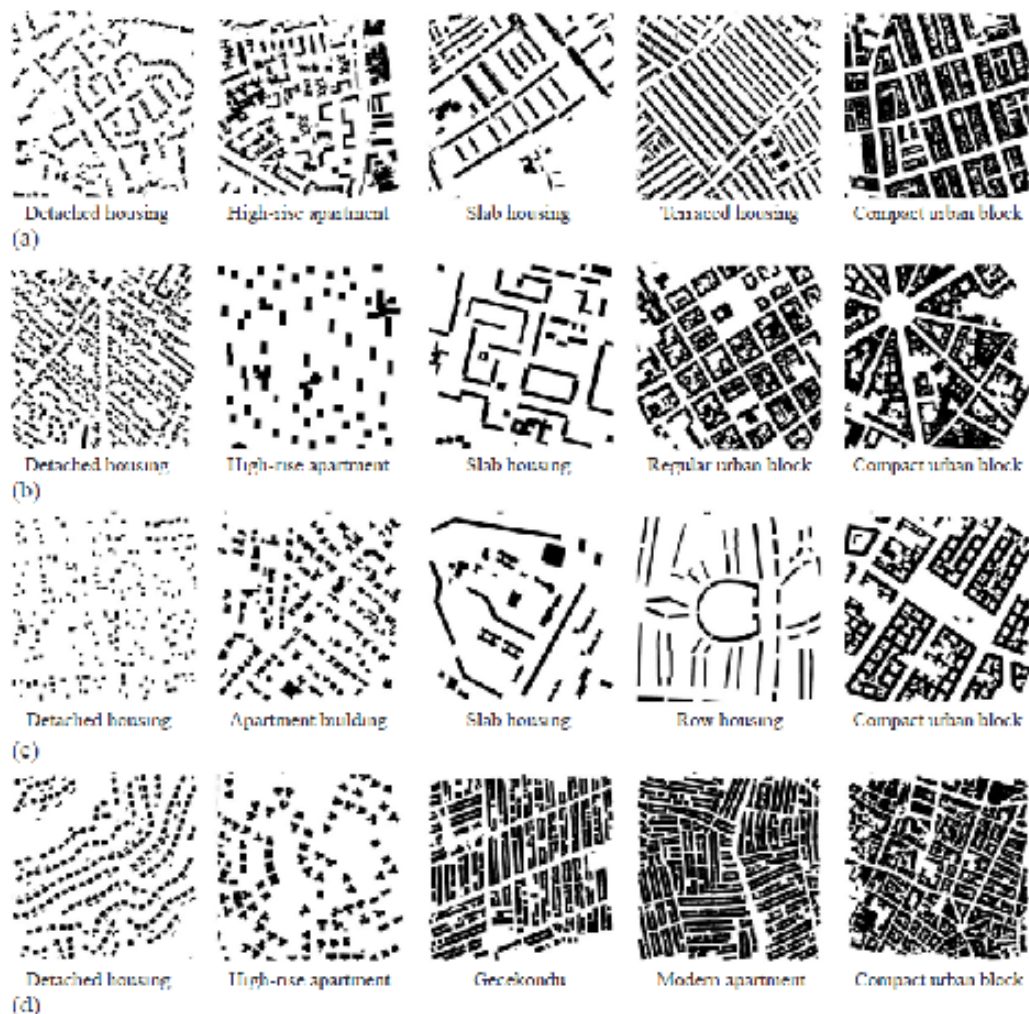


Figura 11. Tipologie edilizie per le città di Londra (a), Parigi (b), Berlino (c) e Istanbul (d).
Fonte: Rode et al. (2014)

Tra i parametri qualitativi urbani studiati per la scelta dei campioni si individuano: la tipologia edilizia (dimensione, forma, volume), numero di piani, larghezza della strada, densità urbana, tessuto urbano, ecc. Una volta individuate e modellate le tipologie esisistenti più caratteristiche, si sono creati dei modelli idealizzati in base ai valori medi dei campioni reali scelti. Per rappresentare questi modelli si è usato il digital elevation model (DEM). Secondo gli autori i modelli idealizzati hanno il vantaggio di isolare l'impatto della forma e il volume, ammettendo una perdita di informazione e una decontestualizzazione dal loro ambiente.

La descrizione quantitativa delle tipologie urbane scelte si è concentrata su cinque indicatori dell'ambiente costruito, ovvero, building density, building height, building coverage ratio, surface-to-volume ratio e open space ratio.

In seguito alla descrizione qualitativa e quantitativa, sono state elaborate le simulazioni energetiche per poter confrontare le prestazioni termiche. Nella prima fase sono stati fissati tutti i parametri, tranne quelli che interessano la forma urbana, incluse le condizioni climatiche. Si è calcolato, dunque, la domanda media annuale di energia termica per metro quadro, attraverso la modellazione degli apporti passivi solari e le perdite complessive di calore di entrambi i modelli, quello reale e quello ideale. In un'ulteriore fase si sono analizzati gli effetti dell'isolamento delle pareti, il valore di trasmittanza della finestra e il rapporto di superficie vetrata, lasciando sempre la forma urbana come unica variabile.

Riassumendo, l'articolo identifica un'ottima efficienza energetica raggiunta sia per contesti con densità urbana alta (isolato urbano compatto), sia per edifici alti con una bassa densità urbana (pur non riuscendo a trovare un rapporto tra l'incremento della densità e la diminuzione dei consumi per il condizionamento dell'edificio). Infine, si evidenzia il fatto che è possibile raggiungere alte prestazioni energetiche attraverso tipologie urbane miste, confermando ulteriormente gli altri studi fatti in merito.

1.2.2. Dalla forma dell'edificio alla forma della città.

Uno dei primi testi pubblicati in questo ambito risale all'anno 1984. Vinod K. Gupta presentò allora uno studio nel quale cercò di definire la forma edilizia più efficiente in un clima caldo come quello della città di Jaisalmer (India). Nel suo studio l'autore osserva come la temperatura dell'aria nelle strade, era di diversi gradi inferiore alla temperatura dell'aria rilevata attorno agli edifici della periferia della città. Questa differenza dipende, tenendo alcuni fattori costanti, solo dalla disposizione degli edifici. È dunque importante, secondo l'autore, capire

come il disegno urbano possa aiutare a ridurre sia gli apporti eccessivi di calore dell'edificio, sia a ridurre la temperatura dell'aria in ambienti urbani.

L'autore descrive la letteratura più interessante dell'epoca per poi farne una critica. Ad esempio, sempre secondo V. K. Gupta, i concetti assunti per edifici dotati di aria condizionata, non sono necessariamente applicabili a edifici senza un sistema di aria condizionata in ambienti caldi e inoltre la forma e l'orientamento che sono ottimi per il singolo edificio, ancora una volta non sono necessariamente validi quando interessano un gruppo di edifici. Negli edifici non dotati di aria condizionata, il flusso di calore è verso l'interno durante il giorno e verso l'esterno durante la notte, al contrario di ciò che succede negli edifici climatizzati. Nel tessuto urbano, l'ombra prodotta da un edificio sul contesto, può formare situazioni dove le condizioni di radiazione solare attorno ad un edificio sono decisamente diverse rispetto ad un edificio non ombreggiato. Per queste due motivazioni è necessario capire se le linee guida progettuali, derivate dal disegno di edifici con aria condizionata, rimangano valide per gli edifici privi di condizionamento.

Per portare avanti la ricerca, l'autore prende come spunto il lavoro svolto da Martin e March (1972), nel quale si effettuò un'analisi generale della forma costruita dal punto di vista dell'uso del suolo. Gli autori classificarono i fabbricati in tre categorie di base, ossia Pavilions, Streets e Courts (Fig. 12), ognuna delle quali può essere definita attraverso delle variabili (Fig. 13). Se invece vengono considerati gruppi di edifici, devono essere introdotte altre due variabili: il numero di fabbricati e la larghezza della strada, oppure lo spazio aperto tra gli edifici (è anche possibile definire la larghezza della strada come il rapporto tra l'altezza del edificio e la larghezza di essa, ovvero H/W).

Per poter paragonare le prestazioni delle tre tipologie edilizie rispetto alle variabili definite, l'autore definisce un edificio di riferimento. Esso viene descritto mediante un volume e una superficie di pavimento (floor area). Successivamente, è possibile costruire o definire le combinazioni andando a modificare le variabili indicate nell'articolo.

In seguito, l'autore definisce il modo in cui è stata fatta l'analisi della radianza solare e della esposizione solare. Un altro aspetto definito da V. K. Gupta è l'ombreggiamento reciproco tra edifici. Le proprietà termiche di un'aggregazione di palazzi possono essere determinate dall'analisi del singolo edificio; questo procedimento però non è possibile con la radianza solare dovuta, appunto, all'ombreggiamento reciproco che vi è tra gli edifici. Per risolvere questa difficoltà, l'autore fa riferimento al metodo usato da Ralph L. Knowles (1974).

Egli utilizzò una tecnica fotografica per analizzare le ombre di forme complesse. Ricostruendo un modello a scala del fabbricato e mettendolo in un "heliodon", il modello viene ruotato e fotografato dal punto di vista dal quale il sole "vederebbe" l'oggetto. L'area totale dell'edificio risultante nella fotografia rappresenta l'area proiettata delle sue parti esposte al sole.

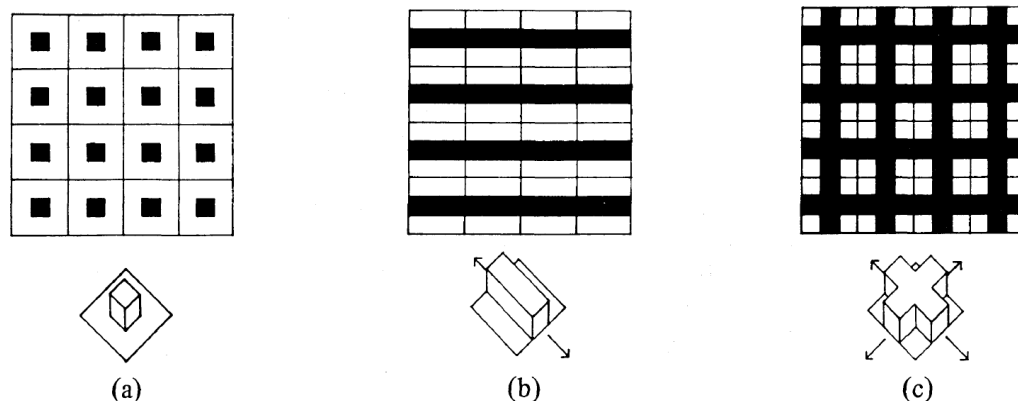


Figura 12. Disposizioni della forma urbana: Pavilion (a), Street (b), Court (c)

Fonte: V. K. Gupta (1984)

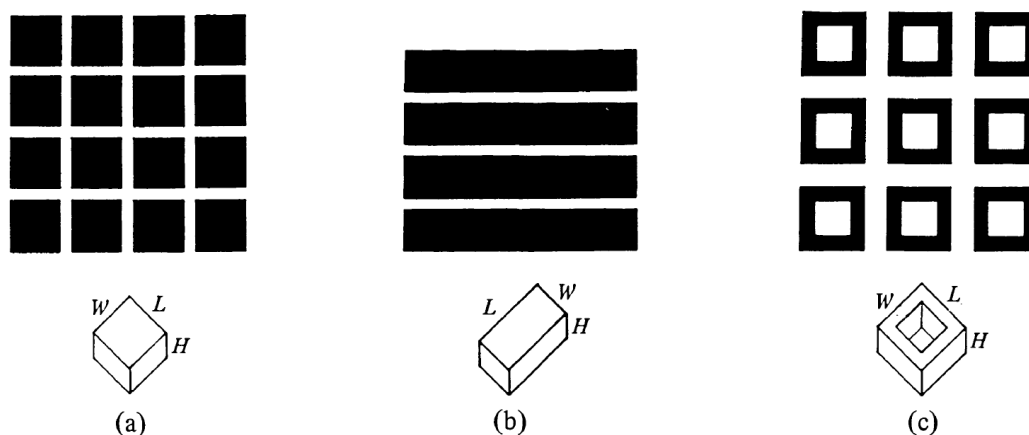


Figura 13. Definizione delle variabili: (L) length, (W) width, (H) height; delle disposizioni urbane Pavilion (a), Street (b), Court(c)

Fonte: V. K. Gupta (1984)

Un'ultima considerazione fatta dall'autore, riguarda l'efficienza della forma urbana. Per ovvie ragioni, gli edifici più alti hanno un'esposizione solare maggiore rispetto a quelli più piccoli. Dunque, per studiare l'efficienza relativa delle diverse forme del costruito è consigliabile avere una caratteristica non dimensionale che permetta di indicare le proprietà solari. In un clima caldo, dove il riscaldamento in inverno non è necessario, l'efficienza della climatizzazione deve essere valutata minimizzando l'esposizione solare in estate, la quale dipende dalla superficie di pavimento dell'edificio di riferimento e a sua volta dal volume. Infine, V. K. Gupta elenca le conclusioni del suo lavoro, che vengono riportate di seguito:

Climi caldi

- Le forme architettoniche più prestanti per l'ottimizzazione degli apporti solari sono quella "Court" e "Street", mentre la tipologia "Pavilion" è la meno efficiente.
- L'orientamento dell'edificio è importante per la tipologia "single Street", il cui orientamento dovrebbe essere in direzione est-ovest. Le "Courts" possono essere orientate in qualsiasi direzione. Le "Multiple Streets" possono avere un'orientamento est-ovest oppure nord-sud con uguale efficienza.
- La larghezza delle strade nella direzione est-ovest non è importante dal punto di vista dell'efficienza solare. Le strade nella direzione nord-sud, però, devono essere le più strette possibile.
- Devono essere adottate tecniche per ombreggiare il tetto, altrimenti gli edifici devono avere un'altezza minima di quattro piani.
- Nella tipologia "Courts", è preferibili un numero alto di isolati con cortili di piccole dimensione.
- La pianificazione urbana della città di Jaisalmer è molto efficiente nel ridurre gli apporti solari.

Climi-monsonici

- La tipologia ideale per la migliore efficienza invernale (Ew) è "Street".
- A seconda della latitudine, la distanza tra edifici deve essere definita con attenzione per evitare ombre indesiderate in inverno. Nella latitudine 29° (nord o sud), una larghezza di strada due volte l'altezza degli edifici garantisce le condizioni di assenza di ombreggiamento.
- L'orientamento della tipologia "Streets" deve essere direzione est-ovest. Nel caso di "Courts", l'orientamento non è importante.
- Per entrambi "Courts" e "Streets", una grande suddivisione non incide nell'efficienza solare. Non è desiderata, invece per la tipologia "Pavilions".
- La pianificazione urbana della città di Jaisalmer non è adatta.

Nel 2001, in linea con il lavoro svolto nel 1997, Capeluto e Shaviv analizzano la possibilità di determinare il massimo volume solare di un edificio che permette l'accesso della radiazione solare anche nei palazzi circostanti, durante un certo periodo dell'anno, attraverso un modello computerizzato sviluppato da Shaviv (1984) chiamato SustArc e concentrando l'analisi sul clima di Israele.

Gli autori evidenziano il fatto che durante l'iter progettuale dei quartieri urbani, il progettista deve definire alcuni parametri che riguardino la geometria dell'edificio. Tali indicatori sono chiaramente legati all'orientamento e alla larghezza

della strada. Essi, a loro volta, dipendono da altri fattori e sono dipendenti tra di loro. Partendo da questa premessa, gli autori si sono posti due questioni:

- È possibile conservare i “diritti solari” di ogni edificio e del marciapiede contemporaneamente al raggiungimento di un' alta densità urbana?
- Quale fabbricato urbano assicura il mantenimento dei “diritti solari” dell'edificio e del marciapiede sfruttando la densità urbana più alta possibile?

Nel loro lavoro gli autori fanno riferimento a due concetti già introdotti nei loro lavori del 1997:

- **Solar right envelope (SRE):** definisce la massima altezza di un edificio, tale per cui esso non nega i diritti di accesso della radiazione solare in nessun altro edificio nelle vicinanze, durante un determinato periodo dell'anno (Fig. 11).
- **Solar collection envelope (SCE):** definisce la superficie più bassa possibile nella quale si possono collocare finestre oppure installare collettori solari, in modo da non venire ombreggiati dal contesto urbano durante un determinato periodo dell'anno (Fig 11).
- **Solar Volume (SV),** definito come il volume al cui interno sono contenuti tutti gli edifici della massima altezza che garantiscono l'accesso della luce solare a ogni edificio circostante e allo stesso tempo non sono ombreggiati dal fabbricato del contesto urbano durante un periodo pre-stabilito dell'anno (Fig. 14).

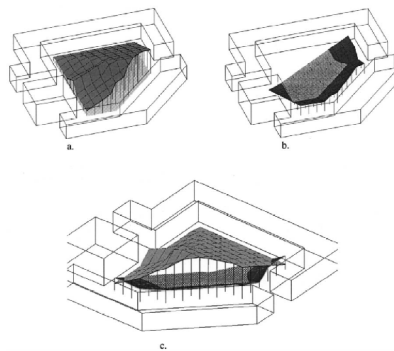
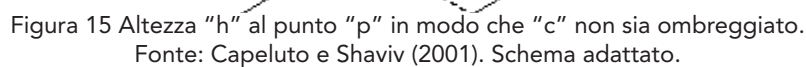


Figura 14. (a) Solar right envelope, (b) Solar collection envelope, (c) Solar volume.
Fonte: Capeluto e Shaviv (2001). Immagine riadattata.

Dunque, qual è l'altezza massima di un edificio che non produce mai ombra su un punto qualsiasi predefinito? Per risolvere il quesito, cioè, per calcolare il “volume solare”, gli autori utilizzano il modello SustArc. Quest'ultimo, sviluppato da Shaviv (1984), considera una serie di aste messe in una rete di punti. Per ognuno di questi punti, l'altezza dell'asta è calcolata in modo che l'ombra

Il modello di Capeluto e Shaviv si pone due obiettivi: il primo, esporre la facciata sud dell'edificio al sole in inverno, in modo da permettere il riscaldamento passivo solare, e il secondo, progettare almeno un marciapiede soleggiato di inverno. Lo studio ha tenuto in considerazione l'orientamento della strada e quello degli edifici lungo di essa e la distanza tra gli edifici. Altri due parametri considerati sono la larghezza della strada e l'angolo tra la facciata dell'edificio e il marciapiede.



Il costruito all'interno di tale volume non è ombreggiato dal contesto durante un periodo di tempo predefinito, è dunque in grado di usufruire dell'energia solare e adatto per l'installazione di tecnologie passive a basso costo energetico. Oltre a provvedere ad una crescita sostenibile, il SE potrebbe aprire nuove possibilità estetiche per l'architettura e il disegno urbano.

La nascita del concetto di "involucro solare" è motivata per via della predilezione della società verso la crescita piuttosto che la manutenzione, mettendo in crisi la volontà di poter crescere in modo sostenibile. In altre parole: "grow cheap and maintain expensive" (Knowles 1974).

Garantire l'accesso della luce solare è essenziale per il risparmio energetico e per la qualità della vita. Il SE è un modello spazio temporale definito dai limiti fisici delle proprietà del contesto e dal periodo di esposizione alla luce solare. Queste due entità, se combinate, determinano la forma e la dimensione dell'involucro finale. In primo luogo, il solar envelope (Fig. 16) evita ombre non desiderate su dei confini definiti, chiamati shadow fences. L'altezza delle shadow fences può rispondere a una qualsiasi condizione del contesto. La loro altezza può anche venire modificata a seconda degli usi del suolo nelle vicinanze. In secondo luogo, l'"involucro" offre la possibilità di sviluppare il massimo volume possibile all'interno dei vincoli temporali, chiamati "cut-off times". Il SE raggiunge queste due condizioni definendo il contenitore teorico più grande possibile non ombreggiato dal contesto in un periodo di tempo predefinito del giorno. La dimensione del SE, e dunque il potenziale di sviluppo, varia con il variare dell'orientamento delle strade.

Lo studio Knowles si è svolto a Los Angeles. Sono stati presi in considerazione due indicatori della forma urbana, ovvero, il rapporto superficie volume e la densità urbana. La ricerca afferma che gli edifici fra tre e sette piani, sono quelli più adatti per l'installazione di sistemi passivi e a basso consumo energetico e che hanno maggiori potenzialità in termini di implementazione di tecniche per la riduzione del consumo di energia.

L'obiettivo dell'articolo è quello di collegare la zonizzazione all'accesso della luce solare in base ai ritmi naturali. Lavori precedenti avevano già accennato all'importanza dell'accesso all'energia solare per lo sviluppo urbano. Lavori attuali confermano il legame architettonico tra i ritmi solari e il disegno degli edifici, prevedendo una struttura dinamica ulteriore per lo sviluppo di strategie sostenibili. In conclusione, la forma e la dimensione del SE può variare senza negare l'accesso della luce solare, arricchendo le prestazioni energetiche dell'edificio e migliorando la qualità della vita. Lo spazio risultante del solar envelope

permette ai fabbricati di cambiare, spostarsi o smontarsi in risposta alla stagione dell'anno, consentendo agli architetti di concepire un paesaggio cinetico legato ai ritmi della natura.

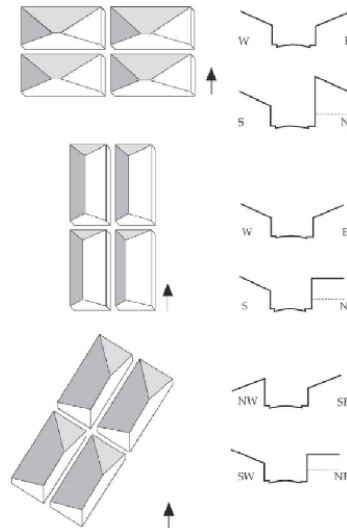


Figura 16. Diversi orientamenti della strada producono diverse forme urbane del SE.
Fonte: Ralph L. Knowles (2003)

Anche la ricerca sviluppata da Ratti e Morello (2005) si pone in accordo con il lavoro svolto da Capeluto e Shaviv nel 2001. Essa individua la capacità di accesso della luce solare come uno dei fattori chiave nella generazione della forma urbana e descrive gli studi precedenti di Ralph L. Knowles (1974) sul solar envelope. Tale concetto illustra il comportamento di una superficie tridimensionale, che in un luogo qualunque, non produce ombra per più di n ore nelle vicinanze. Ratti e Morello introducono però delle problematiche circa l'applicabilità di questo concetto. Evidenziano il fatto che il calcolo del solar envelope è complesso su aree urbane estese. Inoltre, mettono in rilievo le problematiche della quantificazione dell'energia solare poiché il Sole a mezzogiorno ha effetti diversi rispetto al Sole al tramonto.

Tuttavia, gli autori accettano la validità degli "involucri" dal punto di vista teorico e, usando il digital elevation model (DEM), cercano di capire se le problematiche riscontrate possono essere superate, riproponendo la definizione dei parametri introdotti da Knowles, Capeluto e Shaviv nel seguente modo:

- Iso-solar Right Surfaces (ISRS), è l'involucro geometrico 3D che definisce la massima altezza dell'involucro, determinando a sua volta la massima altezza edificabile che preserva sul contesto una quantità definita di irradiazione.
- Iso-solar Collection Surfaces (ISCS), è la minima superficie possibile

che raccoglie una quantità definita di irradiazione solare. Questo parametro è simmetrico al ISRS e descrive l'effetto di ombra prodotta per il contesto su un dato luogo.

Secondo gli autori, il concetto di iso-solar surfaces possiede maggiori vantaggi dato che permette una quantificazione più accurata degli apporti solari. La possibilità di misurare i guadagni solari attraverso questo indicatore, rappresenta altresì un nuovo modo di stimolare alte prestazioni nella pianificazione urbana. Un altro studio che ha indagato l'influenza della densità urbana sulla capacità di un edificio nell'usufruire degli apporti solari è quello condotto da Cheng et al. (2006). La ricerca, svoltasi a San Paolo (Brasile), definisce 18 modelli ipotetici in base a due parametri legati alla densità, ovvero, il plot ratio (rapporto tra la superficie totale lorda di pavimento e l'area del lotto), del quale si definiscono tre valori; e il site coverage (rapporto tra l'area dell'impronta dell'edificio e l'area del lotto), del quale si individuano due indici. Si sono poi elaborate quattro disposizioni in base al plot ratio e al site coverage, ovvero, un layout uniforme-uniforme, uniforme-casuale, casuale-uniforme e casuale-casuale (Fig. 17).

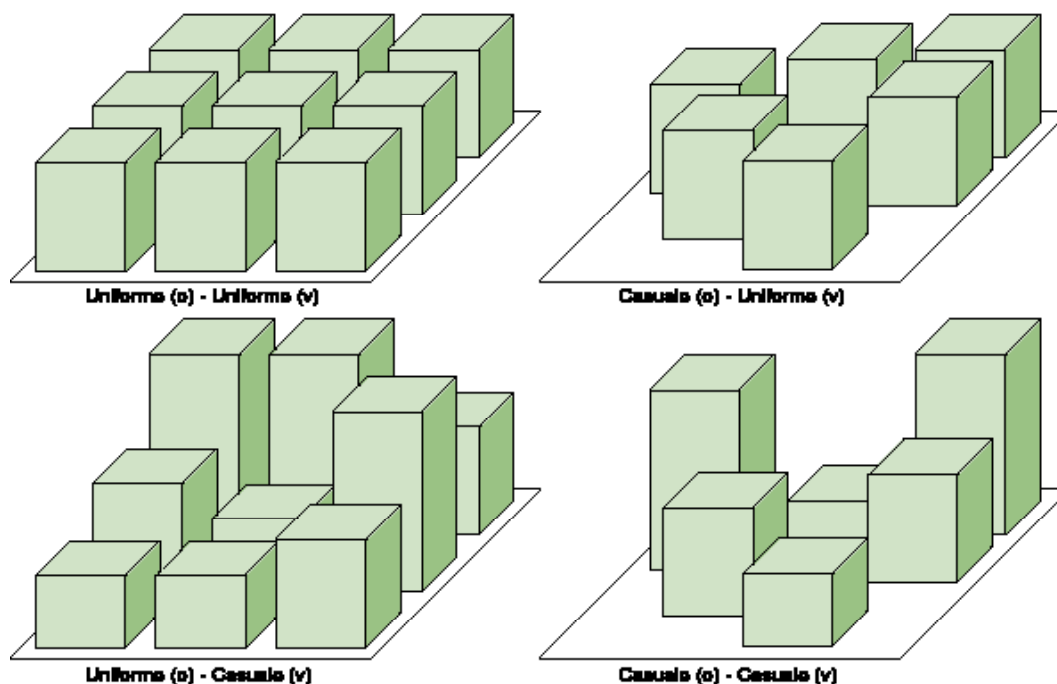


Figura 17. Diverse disposizioni considerate.
Fonte: Cheng et al. (2006). Schema adattato.

Le simulazioni sono state fatte con il programma PPF, uno strumento per la validazione della luce giornaliera e dell'irradianza solare, e con il digital elevation model (DEM). Sono stati studiati, dunque, come vengono modificati secondo i diversi modelli ipotizzati, tre parametri:

- Sky view factor (SVf), è la misura dell'apertura di una superficie verso la volta celeste. Un valore di 1, segnala una zona senza ostruzioni verso il cielo. Un valore di 0, invece, indica una zona completamente ostruita.
- facade daylight availability (DA), è definito come il rapporto tra l'illuminazione globale di una facciata e quella di una superficie orizzontale non ostruita.
- photovoltaic potential (PV) oppure solar potential, definito come la percentuale di involucro che riceve una quantità di radiazione solare superiore o uguale alla soglia predefinita.

Con questo studio gli autori sono stati in grado di presentare una serie di raccomandazioni: in primo luogo, sono consigliate disposizioni casuali in orizzontale; in secondo luogo, sono preferite le disposizioni con edifici alti, site coverage basso e maggiori spazi aperti e infine, viene ritenuta vantaggiosa una disposizione verticale casuale. Nonostante i risultati, l'articolo riporta una serie di limitazioni legate alla localizzazione geografica del caso studio e specifica che la ricerca è stata condotta fondamentalmente utilizzando simulazioni computerizzate.

È altresì interessante menzionare la ricerca svolta da Ahmad Okeil (2010) nella quale egli propone un approccio olistico dell'efficienza energetica dell'edificio. Okeil descrive i tre grandi campi di studio che riguardano i consumi energetici presenti attualmente. Il primo gruppo riguarda la problematica legata al comfort umano, all'interno di un singolo edificio, attraverso l'utilizzo di strategie passive. Il secondo gruppo è incentrato sulla questione dell'accesso della luce solare, a scala microurbana, come requisito fondamentale per l'utilizzo dell'energia solare nel riscaldamento. Il terzo gruppo, è focalizzato nel capire gli effetti dell'inurbamento sul clima della città a scala macrourbana; in particolare, sullo studio della mitigazione dell'urban heat island (UHI) attraverso la vegetazione, green roofs e flussi d'aria fra gli edifici. L'autore, dalla sua ricerca, estrae delle conclusioni e si pone delle domande chiave per un possibile sviluppo futuro nel settore:

- Dato che ci sono linee guida per minimizzare i guadagni solari e favorire le perdite termiche d'estate, e allo stesso tempo, ci sono linee guida per minimizzare le perdite termiche e massimizzare gli apporti solari di inverno: quale tipo di edificio può rispondere meglio ad entrambe le impostazioni e presentare una prestazione elevata durante tutto l'anno?
- Le ricerche solitamente si concentrano su un unico indicatore oppure su una sola strategia: può essere creata una sinergia se si adotta un ap-

proccio olistico?

- Sono necessari più studi sulla scala dell'isolato urbano ove le linee guida per la pianificazione e il disegno del costruito non siano efficienti; quindi, come può essere ottimizzata la forma urbana di un isolato (o di un'aggregazione di più isolati) per aumentarne le prestazioni energetiche?

Per poter rispondere a questi quesiti, Okeil studia il rapporto tra la forma costruita e l'efficienza energetica di tre forme generiche: due convenzionali e un'altra proposta dall'autore. Essa viene chiamata Residential solar block (RSB) e si configura come un edificio costruito per raggiungere i vantaggi funzionali, spaziali, sociali e visuali che possiede l'isolato urbano convenzionale, con i vantaggi prestazionali dell'isolato urbano lineare (Fig. 18).



Figura 18. Parametri urbani del RSB.
Fonte: Okeil (2010)

L'articolo tratta, inoltre, la tematica dell'isola urbana di calore e quali sono le cause che favoriscono questo effetto e le strategie per mitigarlo.

In conclusione, il RSB viene presentato come una possibile risposta alle problematiche legate al consumo energetico in funzione della forma urbana, producendo prestazioni superiori a quelle prodotte dall'isolato urbano convenzionale e aiutando in più a mitigare l'effetto dell'isola di calore.

Nel 2014 S. Jige Quan et al. pubblica uno studio nel quale analizza l'impatto del contesto urbano nel consumo energetico dell'edificio. Studiando l'ombreggiamento esterno, la forma urbana generata dalla pianificazione urbana e il clima locale, presentò tre questioni principali: come la densità edilizia influisce nel consumo energetico nell'insieme; come una densità definita può generare forme urbane alternative che hanno diversi effetti nella prestazione energetica, e infine, come tipologie diverse modificano il rapporto energia-densità.

Questo studio prende come premessa il fatto che l'utilizzo di energia negli edifici rappresenta una percentuale importante del consumo energetico urbano. Si ritiene che ci siano quattro fattori che interessano la prestazione energetica dell'edificio, vale a dire, il disegno dell'edificio, i sistemi di condizionamento ambientale, il comportamento dell'utenza e il contesto urbano. Gli autori sostengono che gli studi rivolti all'influenza del contesto urbano nel consumo

energetico dell'edificio sono scarsi e insufficienti.

Per risolvere questa mancanza, lo studio utilizza un'analisi parametrica per indagare come la densità, la forma e la tipologia edilizia, nell'insieme, influiscono nella prestazione energetica dell'edificio. Il lavoro svolto segue il metodo sviluppato da Martin e March (1972), disegnando una matrice 3 x 3 di blocchi urbani, prendendo il blocco centrale come caso studio. Vengono studiate quindi quattro tipologie edilizie diverse (Fig. 19).

Gli autori, in conclusione, rispondono alle tre domande poste all'inizio. Nel caso della prima domanda (come la densità edilizia influisce nel consumo energetico nell'insieme), quando il fattore floor area ratio (FAR) cresce il consumo energetico si abbassa. Questo rapporto viene modificato quando il FAR raggiunge un determinato valore. (Fig. 20).



Figura 19. Le tipologie; da sinistra a destra: Pavillion, SlabH, SlabV, Courtyard.
Fonte: Jige Quan (2014)

Infine, per la seconda e terza domanda (come una densità definita può generare forme urbane alternative che hanno diversi effetti nella prestazione energetica, e come tipologie diverse modificano il rapporto energia-densità), l'articolo afferma che il fattore FAR non è l'unico fattore che influisce nella prestazione energetica dell'edificio, ma ci sono altre variabili, come il building coverage ratio (BCR) e la tipologia edilizia, che hanno un ruolo importante.

Infine, l'articolo menziona altre variabili che possono essere aggiunte in futuri studi: orientamento ed effetto isola di calore.

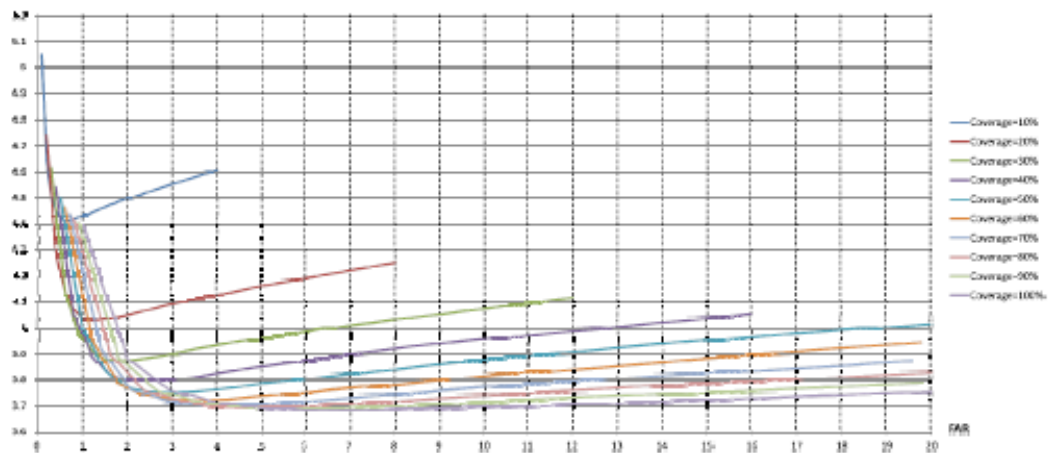


Figura 20. Rapporto energia-FAR con diversi BCR.
Fonte: Jige Quan (2014)

| AUTORI | ANNO | LUOGO | SCOPO | PARAMETRO | COME |
|-------------------|------|--------------------------|---|---|------------------------|
| V. K. Gupta | 1984 | Jaisalmer (India) | Trovare, attraverso lo studio della forma urbana, la tipologia edilizia efficiente | Longitudine, Altezza, Numero di moduli, HW | - |
| Capeluto & Shaviv | 2001 | Israel | Studio del massimo "solar volume" permesso senza negare l'accesso solare ad altri palazzi | MOS, distanza tra edifici, larghezza della strada (W) | SustArc model |
| Sam C.M. Hui | 2001 | Hong Kong | Possibilità di sviluppo di edifici a basso consumo energetico in ambienti con alta densità urbana | Densità urbana | - |
| Ralph L. Knowles | 2003 | Los Angeles | Dimostrare la validità del Solar Envelope | SVf, densità | - |
| Ratti et al. | 2005 | Londra, Tolosa e Berlino | Studiare l'incidenza del consumo energetico sul tessuto urbano | Passive to Non-passive ratio, Orientamento della facciata, UHA, OSV | DEM, LT method, Matlab |
| Ratti e Morello | 2005 | Milano (Italia) | Investigare se è possibile superare le limitazioni del solar envelope proponendo due nuovi concetti | ISRS, ISCS | DEM |
| Cheng et al. | 2006 | San Paolo (Brasile) | Studiare l'influenza della densità del costruito nell'accesso alla luce solare | Plot ratio, site coverage, SKf, DA, PV | PPF, DEM |
| Arboit et al. | 2008 | Mendoza (Argentina) | Valutare il potenziale solare degli ambienti urbani a bassa densità | MIF, UIF, PES | CAD, SMLRM |
| Serge Salat | 2009 | Parigi | Dimostrare l'influenza della forma urbana sul consumo energetico totale | Shape factor, Passive Volume | - |
| Arboit et al. | 2010 | Mendoza (Argentina) | Collegare l'irradianza solare durante la stagione di riscaldamento e il volume da riscaldare | Volumetric Insolation Factor (VIF) | Analisi statistica |
| Okeil | 2010 | 48° latitudine | Necessità di un'approccio olistico all'efficienza energetica della forma costruita. Definizione del Residential Solar Block (RSB) | Parametri legati alla situazione geografica ed al percorso solare | Cityshadows, Envy-Met |

| | | | | | |
|---------------------|------|-----------------------------------|---|---|-------------------------------|
| Futcher J. et al. | 2013 | Regno Unito | Analisi dell'influenza della forma urbana come variabile nella gestione dell'energia | Fisica dell'edificio, Apporti solari, Temperatura | Virtual Environment |
| Jige Quan S. et al. | 2014 | Portland (USA) | Studio del impatto del contesto urbano sul consumo energetico dell'edificio | BCR, FAR, BH | AutoCAD, MATLAB, EnergyPlus 8 |
| Rode et al. | 2014 | Parigi, Londra, Berlino, Istanbul | Efficienza energetica teorica in funzione della configurazione spaziale della città | BD, BH, BCR, SVr, OSr | DEM, GIS |
| Boehme P. et al. | 2015 | Singapore | Studio del consumo di energia negli edifici come contributo nell'effetto isola di calore | Sup. Lorda Pavimento (SLP), Uso Energia | GIS |
| Delmastro et al. | 2015 | Torino (Italia) | Rapporto tra il consumo energetico per il riscaldamento e la forma urbana | BD, BH, BCR, HWr, A, SVf, UM, S | GIS |
| Delmastro et al. | 2015 | Torino (Italia) | Analisi dell'impatto della forma urbana sul consumo energetico | BD, BH, BCR, HWr, BO, MOS, A, UM, S | GIS |
| Fang C. et al. | 2015 | Cina | Analisi della correlazione tra forma urbana ed emissioni di CO ₂ | Tot. area, AWMS index, MPA ratio, PA index, A index, LS index, Contiguity | GIS |
| Nault E. et al. | 2015 | Svizzera | Analisi dell'efficienza energetica dell'edificio alla scala urbana | Fisica dell'edificio, Apporti solari, Clima, Tasso Occupazione | Rhinoceros, Grasshopper |
| Nouvel R. et al. | 2015 | Olanda | Studio della richiesta di energia/potenziale di risparmio nell'edificato | Tipologia, epoca costruzione, occupanti | GIS, CityGML |
| Touchaei A. et al. | 2015 | Montréal (Canada) | Effetto dell'Albedo sul consumo di energia negli edifici | Fisica dell'edificio, Albedo, Impianto | DOE-2 |
| Pei-Ju Yang P. | 2015 | Stati Uniti | Raggiungere ottime prestazioni energetiche attraverso lo studio della forma urbana e la sua progettazione | BCR, BD, BH, SVf | - |
| Ye et al. | 2015 | Xiamen (Cina) | Studio della compattezza urbana dall'Urban Household Energy Use Carbon Emission (UHEUCE) | NCI, Connectivity of Green Space (GS), Connectivity of Water Bodies (WB) | GIS |

1.4 Il caso studio: Torino

Torino, capoluogo della Regione Piemonte, è una Città Metropolitana di circa 900.000 abitanti. Ha un'estensione di circa 130 km² al cui interno sono state classificate circa 500.500 unità abitative di categoria catastale A. È posizionata in zona climatica E e con 2348 gradi giorno riferiti all'anno 2012/2013.

Il Gruppo IREN, grazie agli impianti di cogenerazione e degli impianti di integrazione e riserva, è in grado teleriscaldare una volumetria di circa 80 milioni di metri cubi, pari a una popolazione servita di 700.000 persone, raggiunte da 800 chilometri di reti di trasposto e di distribuzione.

A Torino, il calore prodotto dagli impianti di cogenerazione di Moncalieri e Torino Nord, viene distribuito tramite un vasto impianto di reti sotteranee che si estendono per circa 500 chilometri, in grado di servire 56 milioni di metri cubi (oltre il 56% della volumetria totale di Torino, rendendola la Città più teleriscaldata d'Italia ed una delle metropoli più teleriscaldate d'Europa), corrispondenti ad una popolazione servita di oltre 560.000 abitanti. In base alla suddivisione per epoca di costruzione del patrimonio edilizio della città di Torino, si può osservare che l'86% degli edifici residenziali è stato costruito prima degli anni Settanta. Analizzando il fattore di forma, si denota come il 43% degli edifici abbia un indice di S/V inferiore a 0,45, che indica una tipologia edilizia di tipo compatto.

| EDIFICI RESIDENZIALI IN TORINO | | | | | |
|--------------------------------|------------|----|------------------------|------------|----|
| Epoca | n° edifici | % | S/V [m ⁻¹] | n° edifici | % |
| Fino al '18 | 5849 | 14 | <= 0.45 | 17767 | 43 |
| 1919-1945 | 9002 | 22 | 0.45<S/V<=0.56 | 6268 | 15 |
| 1946-1960 | 11941 | 29 | 0.56<S/V<=0.71 | 6110 | 15 |
| 1961-1970 | 8865 | 22 | S/V>=0.71 | 11490 | 28 |
| 1971-1980 | 3927 | 9 | TOTALE | 41635 | |
| 1981-1990 | 1164 | 3 | | | |
| 1991-2000 | 598 | 2 | | | |
| 2001-2005 | 195 | 1 | | | |
| dal 2006 | 94 | <1 | | | |
| TOTALE | 41635 | | | | |

Tabella 7 - Patrimonio edilizio della città di Torino diviso per epoca di costruzione e rapporto S/V - [Fracastoro G. V., Mutani G., V. Verda, and G. Vicentini, 2013, "Piano d'Azione per l'energia sostenibile della Provincia di Torino".]

In base alla legislazione in materia, distinguendo gli edifici in base all'anno di costruzione è possibile associare il sistema costruttivo al patrimonio edilizio, per poter valutare le caratteristiche dell'involucro degli edifici. Il "Piano d'azione per l'energia sostenibile della provincia di Torino" (Fracastoro et al., 2013) suddivide il patrimonio edilizio in 5 categorie:

- Prima del 1918: edifici a struttura portante;
- 1910-1972: presenza sia di murature portanti sia strutture in cemento armato con murature di tamponamento;
- 1973-1990: strutture in cemento armato con pareti di tamponamento isolate dopo la Legge 373/76;
- 2004: pareti di tamponamento più isolate allo scopo di ridurre dei consumi energetici (grazie alla Legge 10/91);
- Dopo il 2005: con l'introduzione della Direttiva Europea 2002/91/CE si utilizzano materiali isolanti ancora più performanti e si installano impianti più efficienti (recepita in Italia dal D.Lgs 192/2005 e s.m.i.).

Come anticipato nell'introduzione, il calcolo dei parametri urbani è stato effettuato per l'intera città, mentre l'analisi energetica si è concentrata su una zona più ristretta, per istanze di praticità. In particolare, è stata scelta la zona di Crocetta, un quartiere storico di Torino caratterizzato da edifici antecedenti al 1918 e del primo dopoguerra, principalmente residenziali e da un tessuto urbano abbastanza omogeneo.

Nei prossimi capitoli verrà illustrata nel dettaglio la metodologia che ha portato alla scelta del quartiere della Crocetta.

2. GLI INDICATORI DELLA FORMA URBANA: L'ANALISI QUANTITATIVA

2.1 I parametri urbani

Storicamente per il calcolo del consumo energetico sono state considerate esclusivamente le caratteristiche dell'edificio, come ad esempio, la sua forma più o meno compatta, il suo orientamento, la qualità dell'impianto, i valori di trasmittanza termica dei materiali che dipendono dalla sua epoca di costruzione e infine il comportamento dell'utente.

Negli ultimi anni sono state svolte ricerche e studi che hanno dimostrato come sul consumo energetico, oltre a queste componenti, incide il contesto urbano in cui è inserito l'edificio. È possibile, quindi, definire il consumo energetico attraverso la seguente formula:

$$[KWh]_{TOT} = [KWh]_{EDIFICIO} + f[KWh]_{CONTESTO URBANO}$$

Il contesto urbano è definito attraverso diverse caratteristiche, fra le più importanti ci sono il rapporto tra gli edifici e gli spazi aperti e il tipo di materiale usato per le superfici esterne. La prima caratteristica descrive l'esistenza di un'ostruzione che può essere: permanente nel caso di una densità alta dell'edificato; o stagionale nel caso di vegetazione decidua; in più incide anche sul microclima urbano e quindi sull'effetto "canyon" e isola di calore. Il secondo fattore, invece, ripercuote nell'assorbimento solare da parte delle diverse superfici e quindi sulla riflettanza delle stesse (albedo).

L'analisi svolta cerca di dimostrare come a parità di $[KWh]_{EDIFICIO}$ il variare della funzione $[KWh]_{CONTESTO URBANO}$ comporta un aumento o una diminuzione del consumo energetico a scala urbana.

È necessario, dunque, definire la forma urbana attraverso una serie di indicatori. Sono stati ritenuti più adatti i seguenti fattori per descrivere quantitativamente un contesto urbano.

2.1.1. BCR, *Building Coverage Ratio* [m^2/m^2]:

Definisce il rapporto tra l'area dell'impronta dell'edificio e la sua superficie di riferimento (Fig. 20), che in questo caso è la sezione di censimento. Il valore può variare da zero (0) a uno (1), zero (0) se l'area è totalmente libera (non edificata) e uno (1) se è totalmente coperta.

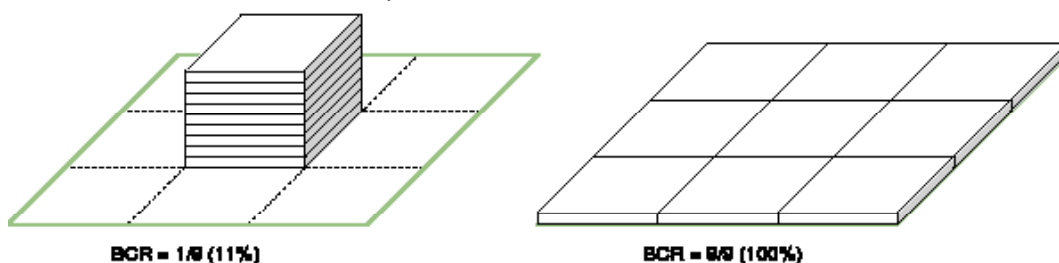


Figura 20. Valori di BCR per due impostazioni diverse.

Fonte: www.densityatlas.org (schema adattato)

Anche se in questo lavoro non si è tenuto conto del "floor area ratio" (FAR) si è considerato interessante farne riferimento dato che è un indicatore ricorrente nella letteratura esistente. Il FAR è il rapporto tra l'area costruita totale e l'area di studio in cui si trova l'edificio (Fig. 22). È un indicatore usato dai pianificatori per distinguere l'intensità di occupazione. Tuttavia, non basta per descrivere la densità urbana.

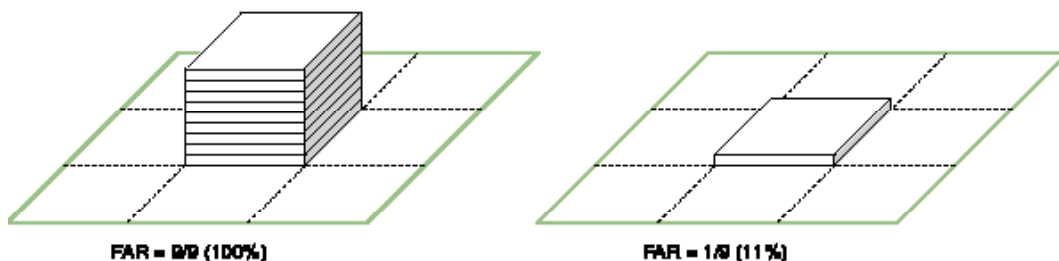


Figura 22. Valori di FAR per due impostazioni diverse.

Fonte: www.densityatlas.org (schema adattato)

Nella città di Torino le zone con un rapporto di copertura più alto sono situate nel centro della città, ovvero corrispondono ai quartieri storici all'interno del quadrilatero romano, mentre nelle zone più periferiche e nella collina si osserva un tessuto urbano meno denso.

2.1.2. BD, *Building Density* [m^3/m^2]:

Descrive il rapporto tra il volume totale degli edifici considerati e la sua superficie di riferimento, la sezione di censimento (Fig. 23). I valori più alti andranno a sottolineare un contesto urbano molto denso, al contrario, i valori più bassi indicheranno un ambito poco denso. Ciò nonostante, per comprendere meglio il BD, è opportuno, confrontarlo con altri parametri, ad esempio con il BCR.

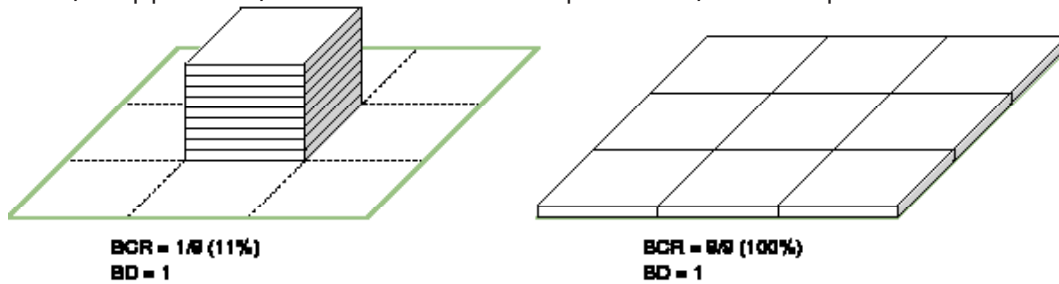


Figura 23 - Diversi valori di BD.

Figura 3. Valori di BD per due impostazione diverse con riferimento al BCR.

2.1.3. BH, *Building Height* [m]

Indica l'altezza media degli edifici nella superficie di riferimento, ovvero la sezione di censimento (fig. 24).

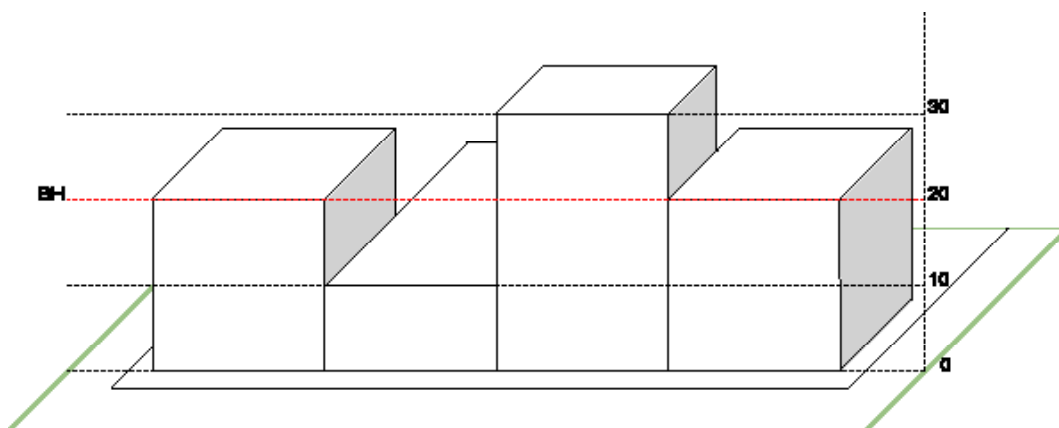


Figura 24. Valore di BH per una determinata impostazione.

2.1.4. H/W, *Aspect Ratio* [-] o *Urban Horizon Angle* (UHA)

Definisce il rapporto di un edificio con il suo contesto, tenendo in considerazione l'altezza dell'edificio e la distanza con gli edifici intorno (Fig. 25). Se il risultato è alto vorrà dire che il valore dell'altezza dell'edificio è maggiore rispetto alla distanza fra esso e gli edifici circostanti, ottenendo così una situazione compatta. Viceversa, un aspect ratio basso mostra una distanza maggiore fra gli edifici e quindi una situazione meno densa. Serve anche a capire i flussi d'aria in un contesto urbano.

Questo fattore è uno dei più rilevanti nel calcolo, infatti, risulta essere tra quelli più studiati ed analizzati in molti studi del nord Europa negli ultimi quindici anni.

Il parametro dell'Aspect Ratio è direttamente collegato al fenomeno dell' Urban Canyon. Quest'ultimo è un luogo dove la strada è fiancheggiata da edifici su entrambi i lati che creano un ambiente simile a quello di un canyon. I classici esempi di questa situazione si hanno per alti valori di H/W , soprattutto in prossimità di grattacieli. I canyon urbani influenzano diverse condizioni locali, tra cui la temperatura, il vento, la qualità dell'aria e la ricezione radio, compresi i segnali GPS.

L'Urban Canyon contribuisce all'effetto isola di calore urbana. La temperatura all'interno del canyon può essere anche di 2-4 ° C più alta. Per alti valori di Aspect Ratio, ovvero in presenza di edifici alti e strade strette, i canyon urbani trattengono più calore durante il giorno poiché "intrappolano" la radiazione solare producendo un surriscaldamento delle pareti esterne degli edifici che formano il canyon (Fig. 25)

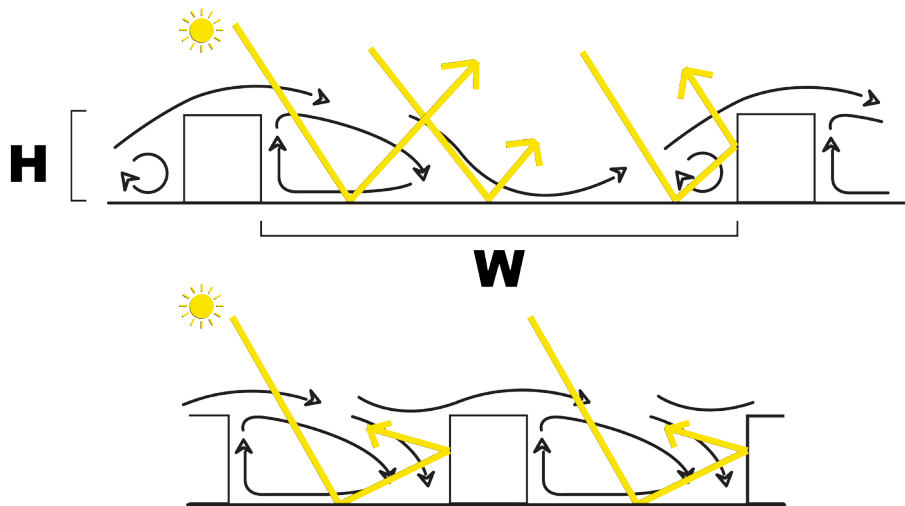


Figura 25 - L'effetto dell'urban canyon sulla temperatura dell'aria. All'interno del canyon la radiazione solare rimane "intrappolata" determinando un innalzamento delle temperature.

Oltre che sulla temperatura dell'aria il canyon urbano può avere effetti anche sulla modifica della direzione e della velocità del vento, (Fig. 26) anche se questo fenomeno non risulta interessante ai fini della nostra analisi.

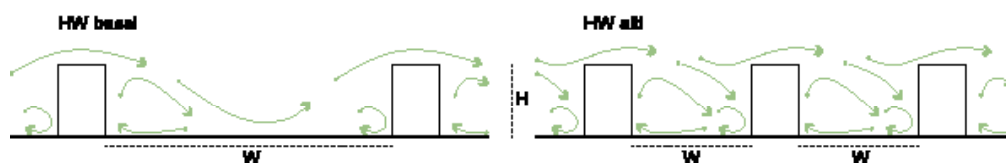


Figura 26. Comportamento dei flussi d'aria secondo due impostazioni di HW.
Fonte: T.R. Oke, 1978 (shcema adattato)

2.2.5. $H/H_{average}$, *Building height and the average height of the surrounding* [-]

Descrive l'altezza dell'edificio rispetto all'altezza media degli edifici circostanti (Fig. 27). Più il valore è vicino a uno e più la situazione è omogenea in altezza. Un valore maggiore di uno (1) indica che l'edificio in considerazione è superiore (in altezza) al contesto, al contrario un HHm inferiore a uno (1) descrive un contesto in cui l'edificio è più basso rispetto al suo contesto. È un valore che permette di stimare la capacità degli apporti solari all'edificio.

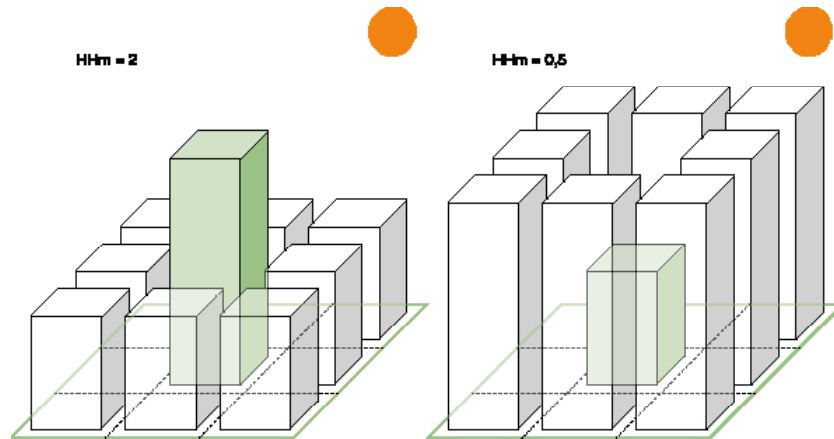


Figura 27. Comparativa di due valori di HHm

2.2.6. BO, *Building Orientation* [-]

Indica l'orientamento prevalente dell'edificio (Fig. 28). Sono stati presi in considerazione sei orientamenti in modo che venga favorito l'orientamento Est-Ovest, più ottimale in termini di apporti solari (tab. 1).

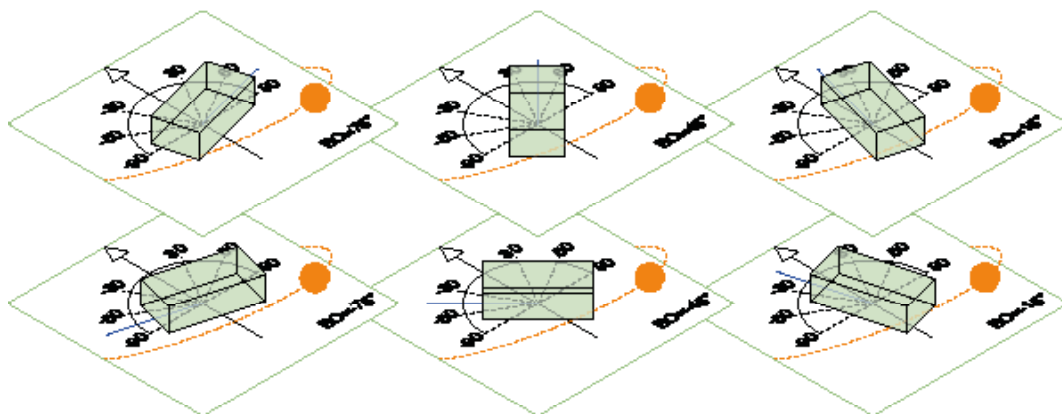


Figura 28. Schemi delle diverse impostazioni.

2.2.7. MOS, Main Orientation of Street [-]

Definisce l'orientamento prevalente della strada. Sono stati presi in considerazione sei orientamenti in modo che venga favorito l'orientamento Est-Ovest, più ottimale in termini di apporti solari (Tab. 8).

| Orientamento (da Nord) | Parametro |
|------------------------|-----------|
| 0°/30° | 0,8 |
| 30°/60° | 1,0 |
| 60°/90° | 1,2 |
| 0°/-30° | 0,9 |
| -30°/-60° | 1,1 |
| -60°/-90° | 1,3 |

Tabella 8 - Valori di BO/MOS per i diversi orientamenti.

2.2.8. A, Albedo [-]

Descrive il rapporto tra la radianza riflessa e la radianza incidente, determinata dai materiali che compongono le superfici esterne. Indica, quindi, il potere riflettente di una superficie. L'albedo massimo è uno (1) quando tutta la luce incidente viene riflessa, ad esempio, la neve ha valori di albedo alto, vicino a uno (1). L'albedo minimo è zero (0), quando nessuna frazione della luce viene riflessa; l'asfalto ha un albedo molto basso.

Si riporta in seguito una tabella (Tab. 9) riepilogando i valori di albedo per diverse superficie, estratta da la normativa UNI 8477:

| Tipo di superficie | |
|---|------|
| Neve (caduta di fresco o con film di ghiaccio) | 0.75 |
| Superficie acquose | 0.07 |
| Suolo (creta, marne) | 0.14 |
| Strade sterrate | 0.04 |
| Bosco di conifere d'inverno | 0.07 |
| Bosco in autunno/campi con raccolti maturi e piante | 0.26 |
| Asfalto invecchiato | 0.10 |
| Calcestruzzo invecchiato | 0.22 |
| Foglie morte | 0.30 |
| Erba secca | 0.20 |
| Erba verde | 0.26 |
| Tetti o terrazzi in bitume | 0.13 |
| Pietrisco | 0.20 |

| | |
|--|------|
| Superficie scure di edifici (mattoni scuri, vernici scure...) | 0.27 |
| Superficie chiare di edifici (mattoni chiari, vernici chiare...) | 0.60 |

Tabella 9. Valori di riflettanza ρ per diverse superficie.
Fonte: UNI 8477 parte 1 del 1983

I valori fino ad ora riportati servono a descrivere la forma urbana. Per permettere di descrivere la forma urbana in maniera più appropriata, vengono introdotti dei parametri adimensionali che derivano dal prodotto dei parametri introdotti. Questi parametri, riportati di seguito, permettono di definire la morfologia urbana prendendo in riferimento più parametri alla volta.

2.2.9. UM, *Urban Morphology* [-]

Sintetizza in un unico valore alcuni parametri urbani connessi fra loro: building coverage ratio (BCR), aspect ratio (H/W), building density (BD).

$$UM = BCR \times (H/W) = BD/W$$

2.2.10. Sf, *Solar factor* [-]

Rappresenta il contributo dell'irradianza solare per ridurre l'uso di energia termica in un edificio. Dipende dall'orientamento della strada e dal rapporto tra le altezze degli edifici (H/H_{avg}). Il "Solar factor" è più alto nei contesti in cui l'orientamento prevalente è est-ovest e contemporaneamente vi sono edifici con maggior capacità di apporto solare ($H/H_{avg} > 1$).

$$S = (MOS \times HHm)_{SEZIONE\ CENSIMENTO} \times BO_{EDIFICIO}$$

Attraverso questi ultimi due parametri è possibile individuare altri due fattori che descrivono in modo completo le caratteristiche dell'isolato:

2.2.11. GUMS, *Global Urban Morphology e Solar Factor* [-]

E' definito come il prodotto fra l'"Urban morphology" e il "Solar factor".

$$GUMS = UM \times S$$

2.2.12. GUMSA, *Global Urban Morphology Solar Factor e Albedo* [-]

E' definito come il prodotto fra l'urban morphology, il solar factor e l'albedo.

$$GUMSA = UM \times S \times A$$

Per calcolare questi parametri è stato utilizzato il software ArcGIS versione 10.2.1 (ESRI), la procedura dettagliata è descritta nell'appendice A. Tutti i valori dei parametri calcolati prendono come unità minima la sezione di censimento. Di seguito verranno riportate le mappe generate da GIS a seguito del calcolo dei parametri.

Si rimanda all'appendice A. Procedura di Calcolo, ove è descritta la metodologia eseguita per il calcolo degli indicatori precedentemente citati.

2.2 Mappature dei parametri urbani per la città di Torino

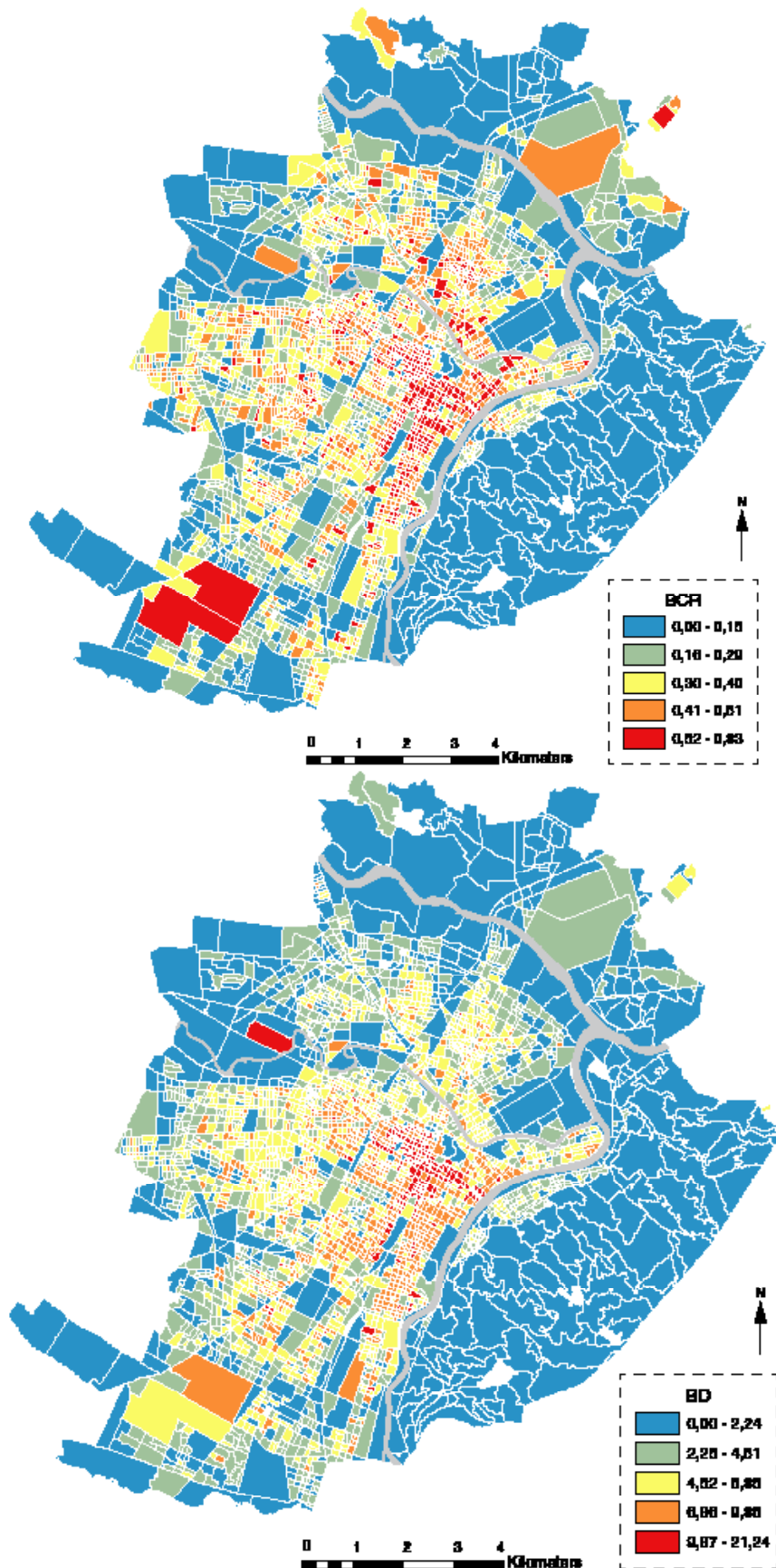


Figura 29 - Mappe dei parametri BCR (sopra) e BD calcolate con ArcGis

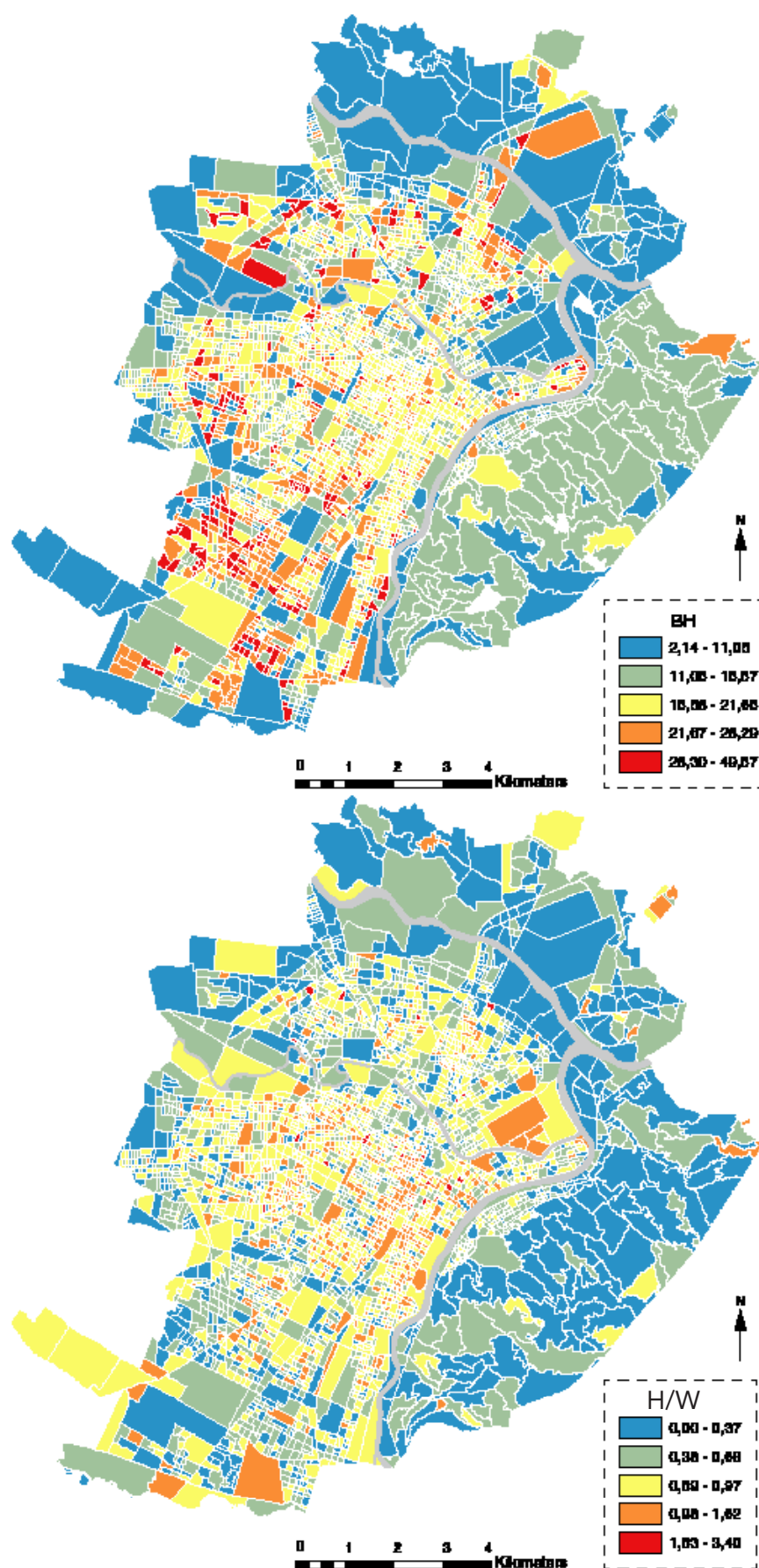


Figura 30 - Mappe dei parametri BH (sopra) e H/W (sotto) calcolate con ArcGis

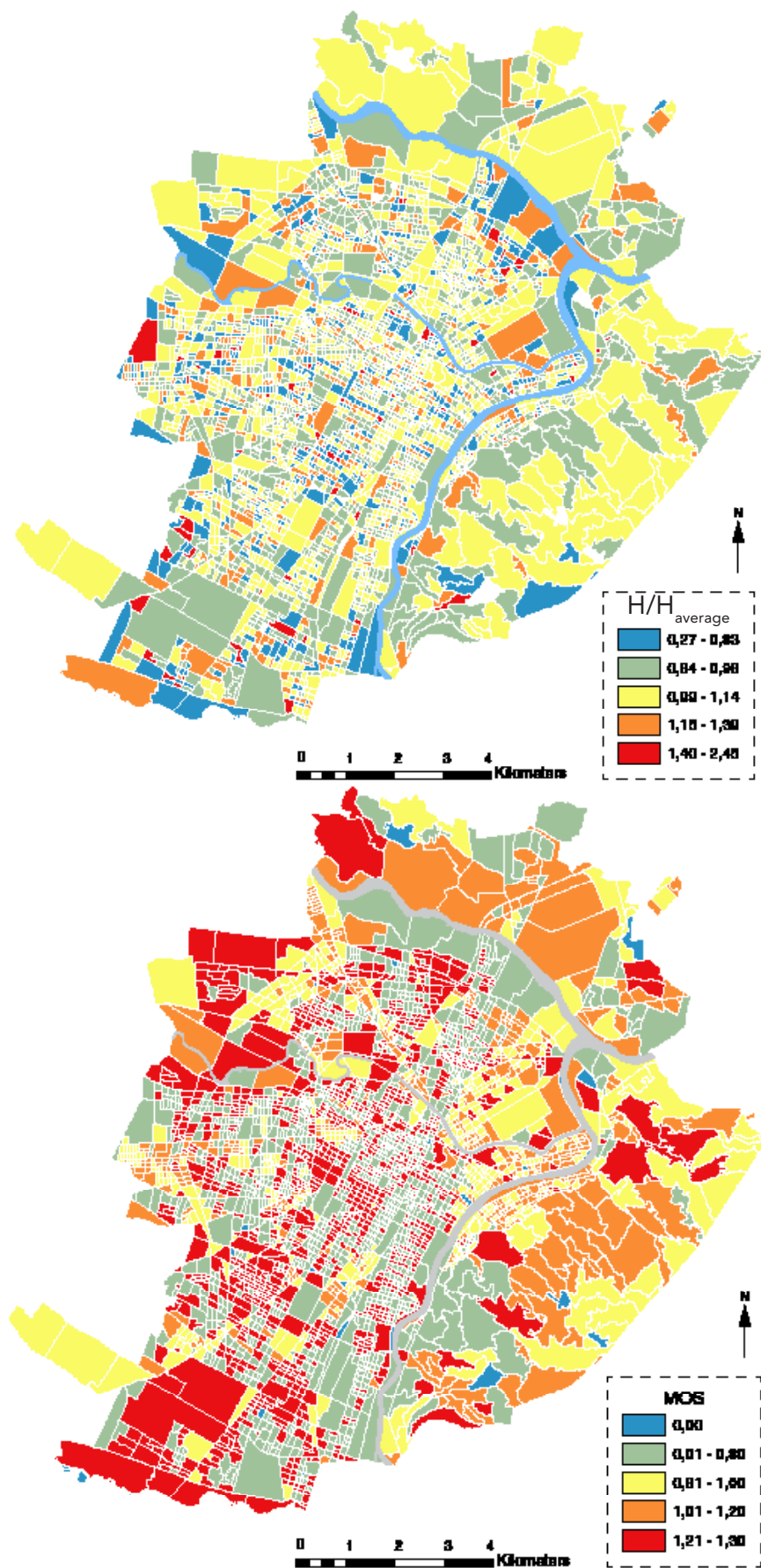


Figura 31 - Mappe dei parametri H/H_{avg} (sopra) e MOS (sotto) calcolate con ArcGis

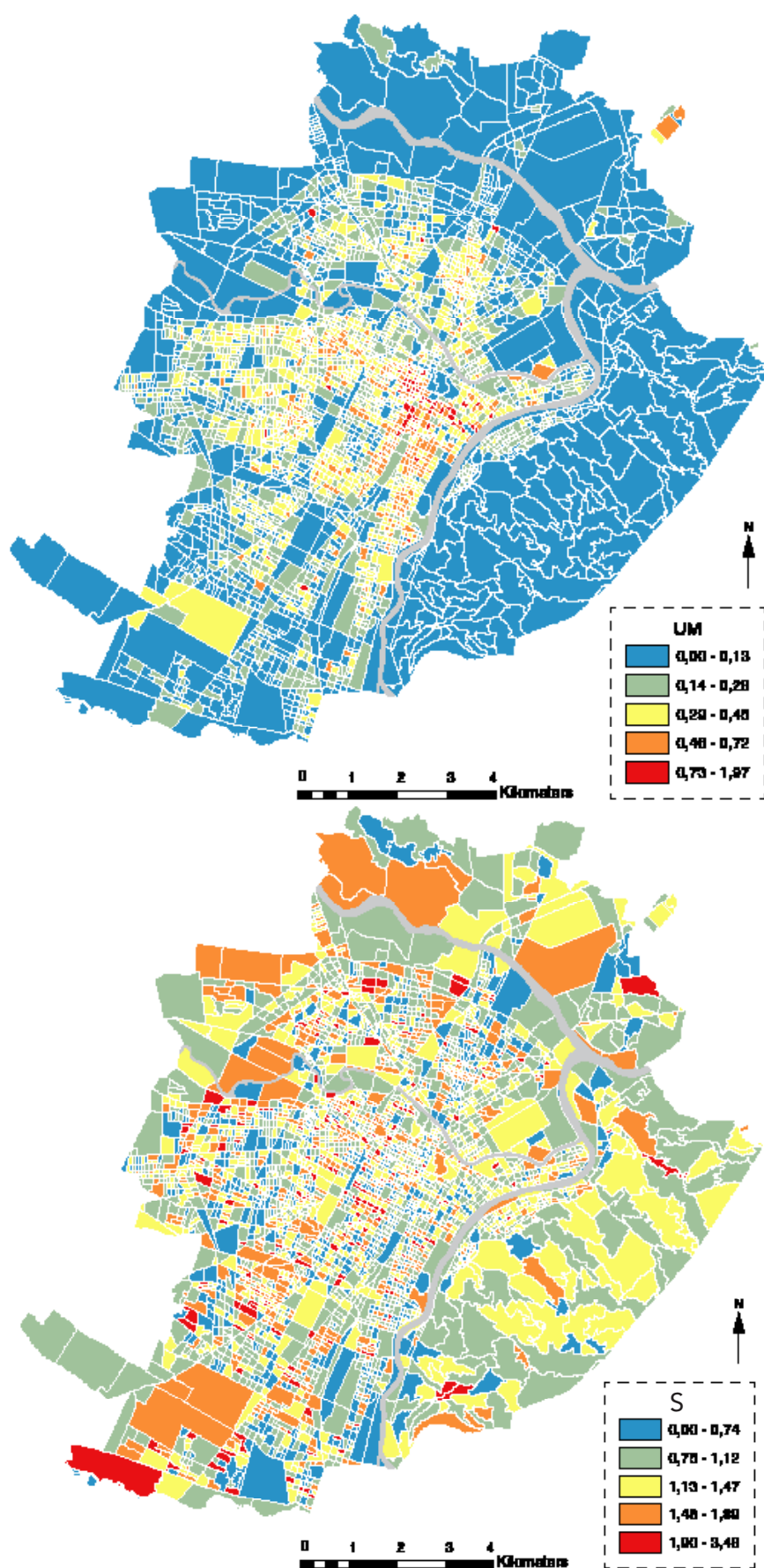


Figura 32 - Mappe dei parametri UM(sopra) e S (sotto) calcolate con ArcGis

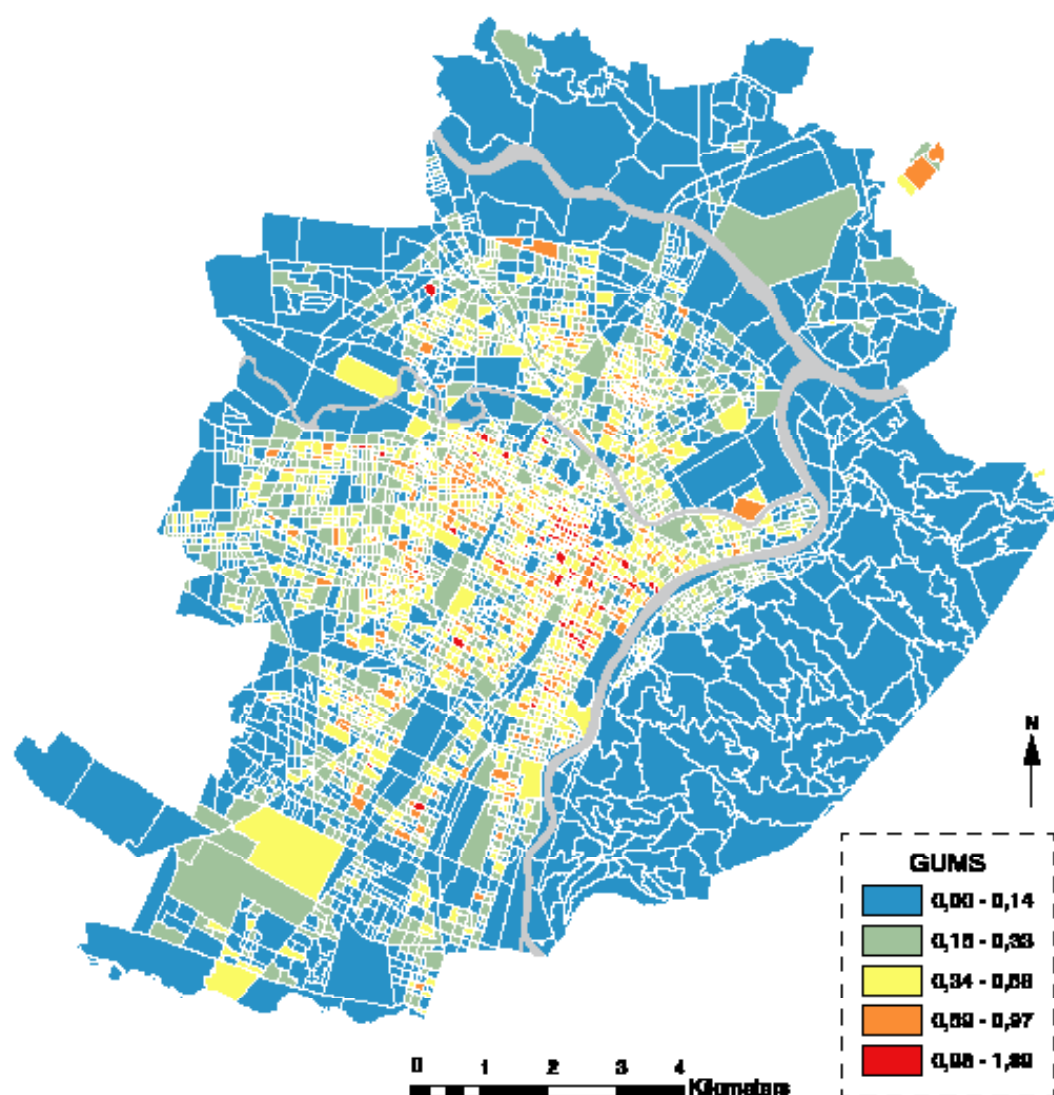


Figura 33 - Mappe del parametri GUMS calcolata con ArcGis

Le mappe appena presentate sono state generate dal software ArcGis a seguito del calcolo dei parametri urbani (si rimanda all'appendice per la procedura di calcolo per tali parametri).

Tali mappe sono utili per avere una lettura immediata della situazione Torinese per quanto riguarda la forma urbana e per individuare anche la situazione specifica che caratterizza le diverse sezioni di censimento.

Torino, infatti, è una città che presenta un numero di situazioni diversificate per quanto riguarda le caratteristiche del tessuto urbano. Essa infatti è caratterizzata dalla presenza di quattro fiumi (il Po, la Dora, il Sangone e la Stura), una zona collinare a sud-est, alcune zone industriali come quella di Mirafiori, un tessuto urbano molto denso nel centro della città antica (il quadrilatero romano) e il tessuto meno denso delle zone più periferiche.

Analizzando la mappa del BCR e del BD, ad esempio, si può notare come le zone centrali della città siano caratterizzate da un rapporto di copertura molto alto rispetto al resto della città, in particolare rispetto alla collina che ha i valori di BCR e BD più bassi di tutta Torino.

Per quanto riguarda i parametri $H_{average}$ e $H/H_{average}$ si può notare come il centro della città sia caratterizzato da edifici medio-bassi e da un tessuto omogeneo in altezza, mentre le zone più periferiche e di nuova costruzione hanno dei valori più alti.

Per quanto riguarda la mappa del MOS si può notare come Torino sia una città caratterizzata da un orientamento prevalente delle strade est-ovest ($MOS=1.3$) e nord-sud ($MOS=0.8$), soprattutto per quanto riguarda il centro della città. Questi dati dimostrano che la disposizione prevalente degli edifici è una disposizione a corte.

Gli altri parametri adimensionali (Solar Factor, UM e GUMS) sono direttamente collegati ai parametri da cui derivano. Ad esempio, si può notare come bassi valori di Solar factor si trovino nella zona centrale della città, caratterizzata da valori di $H/H_{average}$ bassi.

Queste mappe sono servite come studio preliminare per la scelta delle zone sulle quali concentrare l'analisi e per avere un quadro generale sulla forma urbana che caratterizza le diverse zone di Torino. Tali dati calcolati possono risultare uno strumento utile anche per ricerche future sul tema della forma urbana e sul suo impatto sul consumo degli edifici.

2.3 Il calcolo dell'Albedo

Il fattore di Albedo o Land Surface Albedo (LSA) è stata definita come una delle variabili climatiche essenziali (Essential Climate Variables) dal Global Climate Observing System (GCOS) (Tab. 10). Di conseguenza, l'albedo è uno degli elementi chiave per studiare e comprendere i cambiamenti del clima urbano.

L'albedo (dal latino albedo, "bianchezza", da album, "bianco") di una superficie è la frazione di luce o, più in generale, di radiazione solare incidente che viene riflessa. Questa indica, dunque, il potere riflettente di una superficie. L'esatto valore della frazione dipende, per lo stesso materiale, dalla lunghezza d'onda della radiazione considerata. Se la parola "albedo" viene utilizzata senza ulteriori specifiche, si intende la frazione di luce riflessa nell'infrarosso (IR, Infrared).

L'albedo massima è uno (1) quando tutta la radiazione incidente viene riflessa; si verifica nel caso di un oggetto perfettamente bianco. L'albedo minima è zero (0) quando nessuna frazione della radiazione viene riflessa, in questo caso si verifica quando un oggetto è perfettamente nero.

L'albedo e la temperatura sono due elementi correlati tra loro; infatti, la temperatura urbana è influenzata da diversi fattori, tra cui la radiazione solare incidente che, a seconda dei materiali impiegati, può essere trasmessa, riflessa ed assorbita. L'albedo rappresenta, appunto, quanto un materiale è in grado di riflettere la radiazione solare incidente, e dunque, illustra quella proprietà dei materiali che permette di capire quanto essi possano incidere sulla temperatura urbana. Nelle zone in cui la temperatura superficiale è più alta, si conferma un basso coefficiente di albedo (e.g. zone urbane con superfici asfaltate e presenza di cemento). Al contrario, le superfici più fredde hanno coefficienti di albedo maggiori (e.g. aree rurali con forte presenza di vegetazione).

| Dominio | GCOS Variabili Climatiche Essenziali |
|---|---|
| Atmosferico (terra, mare e ghiaccio) | <p><u>Superficie</u>: temperatura dell'aria, velocità e direzione del vento, vapore acqueo, pressione, precipitazioni, bilancio radiativo terrestre.</p> <p><u>Aria</u>: temperatura, velocità e direzione del vento, vapore acqueo, proprietà delle nubi, bilancio radiativo della terra (compressa irraggiamento solare).</p> <p><u>Composizione</u>: anidride carbonica, metano e altri gas serra longevi, ozono e aerosol, sostenuti dai loro precursori.</p> |
| Oceanico | <p><u>Superficie</u>: temperatura superficiale del mare, salinità della superficie del mare, livello del mare, stato del mare, ghiaccio marino, corrente superficiale, colore dell'oceano, pressione parziale di anidride carbonica, acidità degli oceani, fitoplancton.</p> <p><u>Sub-superficie</u>: temperatura, salinità, corrente, nutrienti, pressione parziale di anidride carbonica, acidità degli oceani, ossigeno, oligoelementi.</p> |
| Terrestre | Portata dei fiumi, uso dell'acqua, acque sotterranee, laghi, copertura di neve, ghiacciaio e calotta di ghiaccio, lastre di ghiaccio, permafrost, albedo, copertura del suolo (compreso il tipo di vegetazione), FAPAR, LAI, biomassa fuori terra, carbonio nel suolo, incendi, umidità del terreno. |

Tabella 10. GCOS Essential Climate Variables (ECV)

Fonte: <http://www.wmo.int/pages/prog/gcos/index.php?name=EssentialClimateVariables>

L'albedo superficiale terrestre può essere osservato utilizzando due tecniche: l'osservazione in situ e l'osservazione satellitare. La prima tecnica consiste nell'utilizzo di strumenti che sono in grado di misurare la radiazione riflessa dalle superfici in maniera diretta, un esempio è l'albedometro. Questo strumento permette di calcolare la radiazione netta ottenuta facendo la differenza tra la radiazione globale incidente e la radiazione globale riflessa, in genere è montato su una stazione fissa, ma può anche essere spostato per effettuare misurazioni localizzate.

L'altra tecnica consiste nell'analizzare dati forniti tramite telerilevamento satellitare (Franch e Gras, 2013; Jacobsen, Carstensen, e Kamper, 2012, Román et al., 2013); questa tecnica ormai sta diventando la più utilizzata in quanto permette di ottenere risultati più attendibili con margini di errore ridotti rispetto alla tecnica in situ. Le immagini che vengono analizzate sono immagini ASTER con bande Visible Near Infrared (VNIR), con lunghezze d'onda che vanno dal visibile al vicino infrarosso.

2.3.1. Il Telerilevamento (*Thermal Remote Sensing*)

2.3.1.1. Nascita e generalità

Se oggi siamo in grado di conoscere e studiare i diversi aspetti della luce, è dovuto all'astronomo William Herschel, che nel 1800 scoprì l'infrarosso e le sue caratteristiche. Durante i suoi esperimenti, partendo dalla considerazione che la luce solare è composta da tutti i colori dello spettro elettromagnetico, e che allo stesso tempo, rappresenta una fonte di calore, cercò di capire quale relazione esisteva tra i colori e l'aumento della temperatura. Attraverso un prisma, un cartone ed alcuni termometri con il bulbo colorato di nero, l'astronomo riuscì a misurare le diverse temperature dei colori. In maniera molto semplice, l'astronomo arrivò alla conclusione che spostando il termometro dal viola al rosso, all'interno dell'arcobaleno formato dalla luce passante per il prisma, si otteneva un aumento delle temperature.

Sostanzialmente Herschel poté affermare che le temperature più elevate corrispondevano al colore rosso, ma la radiazione da cui scaturiva tale riscaldamento, non era visibile ad occhio nudo. Oggi quella radiazione, che lui chiamò "raggi calorifici", è conosciuta come radiazione infrarossa.

Il telerilevamento effettuato con sensori che acquisiscono nella regione dello spettro elettromagnetico corrisponde all'infrarosso termico (*Thermal Infrared*, *TIR*), viene definito Telerilevamento Termico (*Thermal Remote Sensing*, *TRS*) e rappresenta una parte complementare al telerilevamento nel campo delle microonde e del visibile.

I dati che si ottengono studiando le lunghezze d'onda del *TIR* sono fortemente correlati con gli aspetti termici del corpo che si sta studiando. Ogni corpo, che abbia una temperatura maggiore allo zero, emette una quantità di energia che varia in base alla lunghezza d'onda e alla temperatura del corpo preso in considerazione.

2.3.1.2. Spettro elettromagnetico

Il famoso esperimento di Newton, in cui la luce passa attraverso un prisma, provò che la luce del Sole è in realtà composta di una mescolanza di radiazioni di svariati colori, che sono anche i colori dell'arcobaleno. Newton adottò la parola latina "spectrum" per descrivere l'insieme di questi colori, che è quindi lo spettro, l'immagine, della luce bianca.

Quando poi si è scoperto che la luce visibile non è che una piccola parte di una più vasta gamma di fenomeni, vale a dire che è un caso particolare di onde elettromagnetiche, il significato della parola spettro si è esteso per descrivere le diverse bande di frequenza delle radiazioni elettromagnetiche.

Lo spettro elettromagnetico, in sostanza, rappresenta una distribuzione mono-dimensionale continua dell'energia elettromagnetica, ordinata per lunghezze d'onda (λ) e suddiviso in diversi intervalli chiamati bande (Brivio et al., 2006).

La radiazione infrarossa (IR) è la radiazione elettromagnetica con lunghezza d'onda maggiore rispetto a quella del visibile, minore rispetto a quella di micro-onde e onde radio. Ogni corpo con temperatura superiore allo zero assoluto, quindi qualsiasi oggetto reale, emette spontaneamente radiazione in questa banda; all'aumentare della temperatura la lunghezza d'onda diminuisce, e si sposta sempre più verso il visibile fino al punto in cui l'oggetto non diventa incandescente, con lunghezze d'onda nel rosso visibile.

La regione del visibile è compresa tra 0,38 e 0,75 μm ., ed è subito seguita dalla regione dell'infrarosso che è suddivisa in sotto bande più piccole (Fig. 34).

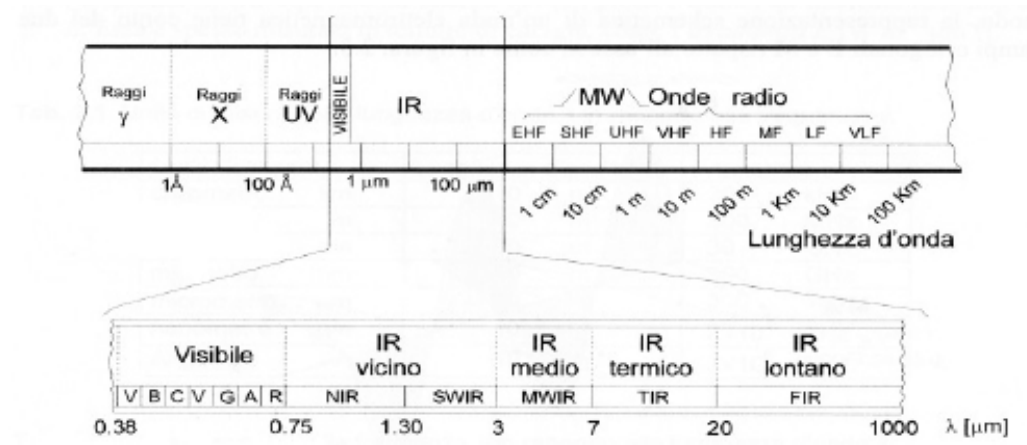


Figura 34 - Spettro elettromagnetico, in dettaglio il range del visibile e dell'infrarosso.

Fonte: <http://amslaurea.unibo.it/2007/>

Come si può notare dalla fig. 34, all'interno della banda dell'infrarosso si possono distinguere quattro sotto bande principali:

- Infrarosso vicino (Near Infrared, NIR).
- A onde corte (Short-wave Infrared, SWIR).

Entrambe impiegate nel telerilevamento per fenomeni esclusivamente di tipo riflesso. Sono caratterizzate da una forte componente di riflessione oltre che alla parte di radiazione emessa (fattore di albedo).

- A onde medie (Mid-wave Infrared, MWIR) per fenomeni sia di tipo riflesso sia di tipo emesso.
- A onde lunghe o IR termico (Thermal Infrared, TIR) per fenomeni essenzialmente emissivi, essendo le radiazioni emesse dalla superficie terre-

stre predominanti rispetto alla componente di radiazione solare riflessa. Un'altra sottobanda che esiste ma è veramente poco utilizzata, è rappresentata dall'IR lontano (Far Infrared, FIR) oltre i 20 μ m. di lunghezza d'onda (Brivio et al. 2006).

Di solito, lo studio delle caratteristiche termiche del suolo, delle acque e delle nuvole si basa su dati raccolti nella regione dell'infrarosso termico, con un range di lunghezza d'onda compreso tra i 3 μ m. ed i 35 μ m. (Quattrochi, Luvall 2009).

2.3.1.3. Piattaforme satellitari utilizzate per l'analisi dei dati

Inizialmente il telerilevamento era utilizzato soprattutto in campo militare, la tecnologia venne sviluppata intorno agli anni '50 nella banda compresa tra i 3 e i 14 micron. Verso la metà degli anni '60 iniziarono le prime applicazioni in campo civile; la NASA svolse un ruolo fondamentale in quanto, nel 1978, raccolse immagini termiche sia diurne che notturne ad una risoluzione di 600m. per applicazioni geologiche. Successivamente i satelliti iniziarono a registrare dati in modo periodico e per lunghi periodi di tempo e a diverse risoluzioni. La piattaforma presa in considerazione in questo lavoro è quella attraverso cui sono stati analizzati i dati: ASTER.

ASTER significa Advances Spaceborne Thermal Emission and Reflected Radiometer e rappresenta uno dei cinque sensori montati a bordo del satellite Terra (EOS AM-1). Questo è il satellite principale del programma di studio Earth Observing System (EOS) della NASA, lanciato in orbita il 18 dicembre 1999 che iniziò a ricevere e mandare dati nel febbraio del 2000, volando ad un'altitudine approssimativamente di 700km. ASTER acquisisce un'immagine di 60km. per 60 km. Il progetto ASTER nasce da una collaborazione fra la NASA, il ministero dell'economia giapponese del commercio e dell'industria (Ministry of Economy, Trade and Industry, METI) e l'agenzia giapponese Earth Remote Sensing Data Analysis Center (ERSDAC).

Attraverso i dati ASTER si è riusciti ad ottenere mappe dettagliate della temperatura superficiale dei territori, riflettanza e quote altimetriche. Il programma EOS ha l'obiettivo di analizzare e osservare come la terra sta cambiando e prevedere le conseguenze che questo cambiamento porterà sullo stile e la qualità di vita degli abitanti.

Lo strumento ASTER è stato sviluppato per migliorare la qualità dei dati rispetto al Thematic Mapper montato su Landsat 4 e 5; infatti, ASTER, acquisisce immagini ad alta risoluzione spaziale in 14 bande dello spettro elettromagnetico, dal visibile all'infrarosso termico. Un ulteriore utilizzo dei dati ASTER è quello per la costruzione dei digital elevation model (DEM) sia per calibrare che per validare

informazioni ottenute tramite altri sensori.

Lo strumento Aster è formato da tre sottosistemi differenti e separati tra loro. Ognuno di questi opera in una regione spettrale diversa, le caratteristiche radiometriche di ogni banda sono descritte nella Tabella 11.

Capire le sue caratteristiche permette di determinarne l'uso più appropriato.

| Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) | | | |
|--|-------|------------------------|------------------|
| Sottosistema | Banda | Lunghezza d'onda (µm.) | Risoluzione (m.) |
| VNIR | 1 | 0,52 - 0,60 | 15 |
| | 2 | 0,63 - 0,69 | |
| | 3N | 0,76 - 0,86 | |
| | 3B | 0,76 - 0,86 | |
| SWIR | 4 | 1,600 - 1,700 | 30 |
| | 5 | 2,145 - 2,185 | |
| | 6 | 2,185 - 2,225 | |
| | 7 | 2,235 - 2,285 | |
| | 8 | 2,295 - 2,365 | |
| | 9 | 2,360 - 2,430 | |
| TIR | 10 | 8,125 - 8,475 | 90 |
| | 11 | 8,475 - 8,825 | |
| | 12 | 8,925 - 9,275 | |
| | 13 | 10,25 - 10,95 | |
| | 14 | 10,95 - 11,65 | |

Tabella 11. Caratteristiche del sensore ASTER.
Fonte: <https://asterweb.jpl.nasa.gov/characteristics.asp>

I tre sottosistemi sono:

- Visible Near Infrared (VNIR), questo sottosistema opera in tre bande spettrali ovvero la banda 1, 2 e 3 alle lunghezze d'onda del visibile (VIS) e del vicino infrarosso (NIR), con una risoluzione di 15 metri. L'utilizzo delle bande 2 e 3N serve, ad esempio, per calcolare l'indice di vegetazione.
- Short-Wave Infrared (SWIR) opera in sei bande spettrali nella regione del vicino IR che fornisce immagini con risoluzione pari a 30 metri.
- Thermal Infrared (TIR) opera in cinque bande nella regione dell'infrarosso termico con un telescopio a risoluzione 90 metri. L'applicazione di queste bande può esser utilizzata per monitorare le anomalie termiche ed atmosferiche.

Bisogna fare un'ultima precisazione riguardante il sottosistema SWIR. Questo sottosistema dal 12 gennaio 2009 non è più in funzione in quanto ha

fallito la sua missione di ricezione delle bande, e il sistema è stato chiuso; mentre il VNIR e il TIR sono tutt'ora operativi e funzionanti. Di conseguenza i nostri dati sono del 22 Luglio 2004.

2.3.2. Materiale per il calcolo dell'albedo

Sono stati forniti i dati di una scena acquisita in periodo estivo dal satellite ASTER recepita dal CSI Piemonte nel 2012 nell'ambito di un progetto di investimento.

La scena intera originale, acquisita il 22 Luglio 2004, comprende le bande dallo strumento:

- Visible and Near-Infrared Radiometer (VNIR), ovvero le bande 1-3;
- Short-Wave Infrared Radiometer (SWIR), ovvero le bande 4-9;
- Thermal Infrared Radiometer (TIR), ovvero le bande 10-14.

In seguito si sono ritagliate le porzioni di territorio che coprono i comuni di Torino. Si riportano a continuazione alcune informazioni sui dati forniti e i dati originali:

- Immagini satellitari: dati ripresi dal satellite ASTER strumenti SWIR (6 bande), TIR (5 bande), VNIR (3 bande).
- Livello di elaborazione del dato originale acquisito dal CSI Piemonte: LEVEL 1B.
- Granule ID: ASTL1B 0407221034171111280092.
- Data acquisizione scene satellitari (aaaammgg): 20040722.
- Sistema di riferimento in cui è stato riproiettato il dato: UTM 32N WGS84 (EPSG 32632).

Dati forniti:

- VNIR_b..ritaglio dalla scena originale sull'area di Torino e Settimo Torinese, non è stato effettuato alcun ricampionamento dei valori originali.
- TIR_b..ritaglio dalla scena originale sull'area di Torino e Settimo Torinese, non è stato effettuato alcun ricampionamento dei valori originali.
- SWIR_b..ritaglio dalla scena originale sull'area di Torino e Settimo Torinese, non è stato effettuato alcun ricampionamento dei valori originali.
- prbr0132.brs: metadato associato alla scena originale.
- scena_originale.shp: rappresentazione delle aree coperta dalle scene originali in formato shape file.
- Formato dei dati raster: GeoTiff
- Risoluzione radiometrica: 8 bit per i dati VNIR e SWIR, 16 bit per i dati TIR.

2.3.3. Metodologia di calcolo

Per calcolare il fattore di albedo partendo da immagini ASTER L1B è necessario far riferimento alla letteratura e nello specifico a Abduwasit Ghulam (2009) e a Liang che nel 2000 formulò un algoritmo in grado di convertire la riflettanza spettrale in albedo.

Per il calcolo dell'albedo è stato necessario procurarsi le immagini raster che corrispondono alle bande dalla 1 alla 14 (VNIR 1-3, SWIR 4-9 e TIR 10-14) e caricarle in ArcMap 10.2.1. Le immagini raster contengono in ogni loro pixel dei Digital Number (DN). Per poter lavorare con questi valori, una volta caricati su ArcMap 10.2.1, sono stati trasformati in poligoni.

Una volta convertiti in poligoni è stato possibile procedere con il calcolo dell'albedo con la seguente modalità:

2.3.3.1. Calcolo della radianza spettrale (Abduwasit Ghulam, 2009).

Da DN a radianza spettrale: per ogni immagine poligonizzata si è modificata la tabella degli attributi aggiungendo un nuovo campo chiamato "Lrad", calcolato nel seguente modo:

$$Lrad,j = (DN_j - 1) * UCC_j [1]$$

Dove:

- $Lrad,j$; è la radianza spettrale ASTER misurata in una longitudine di onda "j" a una determinata apertura del sensore [$Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$];
- j; è la banda numerica ASTER;
- DN_j ; è il valore dimensionale DN per la banda "j" [-];
- UCC_j ; è il Coefficiente di Conversione Unitario [$Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$] dal ASTER Users Handbook, i valori presi in considerazione sono quelli della collona Normal Gain della Tabella 12.

| Coefficiente di Conversione Unitario ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$) | | | | |
|--|-----------|-------------|------------|------------|
| Banda | High gain | Normal gain | Low gain 1 | Low gain 2 |
| 1 | 0,676 | 1,688 | 2,25 | - |
| 2 | 0,708 | 1,415 | 1,89 | - |
| 3N | 0,423 | 0,862 | 1,15 | - |
| 3B | 0,423 | 0,862 | 1,15 | - |
| 4 | 0,1087 | 0,2174 | 0,2900 | 0,290 |
| 5 | 0,0348 | 0,0696 | 0,0925 | 0,409 |
| 6 | 0,0313 | 0,0625 | 0,0830 | 0,390 |

| | | | | |
|----|--------|----------|--------|-------|
| 7 | 0,0299 | 0,0597 | 0,0795 | 0,332 |
| 8 | 0,0209 | 0,0417 | 0,0556 | 0,245 |
| 9 | 0,0159 | 0,0318 | 0,0424 | 0,265 |
| 10 | - | 0,006822 | - | - |
| 11 | - | 0,006780 | - | - |
| 12 | - | 0,006590 | - | - |
| 13 | - | 0,005693 | - | - |
| 14 | - | 0,005225 | - | - |

Tabella 12 - Coeff. di Conversione Unitario (UCC) per ogni banda del satellite ASTER L1B.
Fonte: <http://www.pancroma.com/downloads/ASTER%20Temperature%20and%20Reflectance.pdf>

Da radianza spettrale a riflettanza TOA (Top-of-atmosphere reflectance): per ogni immagine poligonizzata si è modificata la tabella degli attributi aggiungendo un nuovo campo chiamato "ρTOA" anche riflettanza planetaria, riflettanza apparente o riflettanza TOA per una banda specifica. È calcolata usando la equazione standard Landsat:

$$TOA_j = (\pi \times L_{rad,j} \times d^2) / (E_{sun,j} \times \cos(\theta)) \quad [2]$$

Dove:

- ρTOA_j; è la riflettanza planetaria adimensionale [-];
- π; [-]
- L_{rad,j}; è la radianza spettrale ASTER misurata in una longitudine di onda "j" a una determinata apertura del sensore [W m⁻² sr⁻¹ μm⁻¹];
- j; è la banda numerica ASTER;
- d; è la distanza dal sole alla terra in unità astronomica [UA]. Valore preso dalla Tabella 4; in caso necessario i valori devono essere interpolati. L'immagine è stata rilevata il giorno 22 Luglio, corrisponde con il giorno 203 dell'anno. Di conseguenza il valore risulta pari a 1,015846.
- E_{sun,j}; è l'irradianza solare exoatmosferica [W m² μm⁻¹]. Tabella 13;

Distanza Terra-Sole (Unità Astronomica)

| Giorno | Distanza | G | Distanza | G | Distanza | G | Distanza | G | Distanza |
|--------|----------|-----|----------|-----|----------|-----|----------|-----|----------|
| 1 | 0,98331 | 74 | 0,99446 | 152 | 1,01403 | 227 | 1,01281 | 305 | 0,99253 |
| 15 | 0,98365 | 91 | 0,99926 | 166 | 1,01577 | 242 | 1,00969 | 319 | 0,98916 |
| 32 | 0,98536 | 106 | 1,00353 | 182 | 1,01667 | 258 | 1,00566 | 335 | 0,98608 |
| 46 | 0,98774 | 121 | 1,00756 | 196 | 1,01646 | 274 | 1,00119 | 349 | 0,98426 |
| 60 | 0,99084 | 135 | 1,01087 | 213 | 1,01497 | 288 | 0,99718 | 365 | 0,98333 |

Tabella 13 - Valori della distanza Sole-Terra in Unità Astronomica (UA).

Fonte: <http://www.pancroma.com/downloads/ASTER%20Temperature%20and%20Reflectance.pdf>

| E_{SUN} - Irradianza Solare Spettrale ($\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$) | | | |
|---|---------|------------------|------------------|
| Banda | Smith | Thome et al. (A) | Thome et al. (B) |
| 1 | 1845,99 | 1847 | 1848 |
| 2 | 1555,74 | 1553 | 1549 |
| 3N | 1119,47 | 1118 | 1114 |
| 3B | - | - | - |
| 4 | 231,25 | 232,5 | 225,4 |
| 5 | 79,81 | 80,32 | 86,63 |
| 6 | 74,99 | 74,92 | 81,85 |
| 7 | 68,66 | 69,20 | 74,85 |
| 8 | 59,74 | 59,82 | 66,49 |
| 9 | 56,92 | 57,32 | 59,85 |
| 10 | - | - | - |
| 11 | - | - | - |
| 12 | - | - | - |
| 13 | - | - | - |
| 14 | - | - | - |

Tabella 14 - Valori dell'irradianza solare spettrale.

Fonte: <http://www.pancroma.com/downloads/ASTER%20Temperature%20and%20Reflectance.pdf>

- θ_s ; è l'angolo zenitale solare in gradi [°]. L'angolo zenitale è uguale a 90° meno l'angolo dell'elevazione solare, ed è un dato che si trova nei metadata. In questo caso l'angolo zenitale è di 45° .

2.3.3.2. Calcolo Albedo.

Per il calcolo dell'albedo si è fatto riferimento all'articolo di Liang et al. (2000) "Narrowband to broadband conversions of landsurface albedo". In questo articolo vengono descritte le equazioni che permettono di convertire i valori precedentemente calcolati in albedo, partendo dalle bande del sensore ASTER: VNIR, SWIR, TIR. Per ognuna di esse è stato calcolato un valore nel modo seguente:

1. Per le short-wave broadband albedo:

$$\alpha_{\text{ASTER}} = 0,484_1 + 0,335_3 - 0,324_5 + 0,551_6 + 0,305_8 - 0,367_9 - 0,0015 [3]$$

2. Per il total visible albedo:

$$\alpha_{\text{ASTER}} = 0,820_1 + 0,183_2 - 0,034_3 - 0,085_4 - 0,298_5 + 0,352_6 + 0,239_7 - 0,240_9 - 0,0001 [4]$$

3. Per il total near-IR broadband albedo:

$$\alpha_{\text{ASTER}} = 0,654_3 + 0,264_4 - 0,391_5 + 0,500_6 - 0,002 [5]$$

Dove:

- α^{ASTER} ; è il fattore di albedo nei diversi spettri (onde corte, visibile, vicino infrarosso);
- pn; è la riflessione planetaria adimensionale;
- n; corrisponde con il numero della banda.

2.3.3.3. Verifica dei valori di albedo.

I coefficienti moltiplicativi per ogni banda, prima presentati, sono valori standard presi dal lavoro di Liang per convertire i valori delle immagini ASTER in valori di albedo. In seguito, nella Tabella 15, si può notare che, nonostante i valori di albedo sono diversi per ognuna delle tre bande, differiscono di poco, presentando il total visible albedo con valori più bassi.

I luoghi scelti per definire la tabella sono le stazioni climatiche presenti a Torino.

| Stazione Meteo | C | SC | SW Albedo | TVIS Albedo | NIR Albedo |
|---------------------|---|------|-----------|-------------|------------|
| Via della Consolata | 1 | 14 | 0,14801 | 0,13103 | 0,16183 |
| Giardini Reali | 1 | 66 | 0,20094 | 0,13499 | 0,24940 |
| Buon Pastore | 1 | 152 | 0,17543 | 0,13044 | 0,21188 |
| Politecnico | 1 | 797 | 0,17650 | 0,15236 | 0,19328 |
| Alenia | 4 | 2414 | 0,16903 | 0,14026 | 0,17627 |
| Reiss Romoli | 5 | 1886 | 0,19560 | 0,16584 | 0,21263 |
| Italgas | 7 | 960 | 0,16712 | 0,14445 | 0,17706 |
| Vallere SMAT | 9 | 2295 | 0,17452 | 0,10699 | 0,22467 |

Tabella 15. Valori di Albedo per VNIR, SWIR e TIR. (C: Circoscrizione; SC: Sezione di Censimento; SW: Short-Wave; TVIS: Total Visible; NIR: Near Infrared)

Dato che è fondamentale avere i dati attendibili, i valori di albedo calcolati sono

stati confrontati con quelli mostrati nella normativa UNI 8477. Contemporaneamente, si è definito quale banda scegliere per i calcoli successivi, in funzione della validità dei valori controllati.

I valori di albedo presi in considerazione sono riportati nelle Tabelle 16 e 17.

| num. | Tipo di superficie | Albedo |
|------|--|--------|
| 1 | Neve (caduta di fresco o con film di ghiaccio) | 0.75 |
| 2 | Superficie acquose | 0.07 |
| 3 | Suolo (creta, marne) | 0.14 |
| 4 | Strade sterrate | 0.04 |
| 5 | Bosco di conifere d'inverno | 0.07 |
| 6 | Bosco in autunno/campi con raccolti maturi e piante | 0.26 |
| 7 | Asfalto invecchiato | 0.10 |
| 8 | Calcestruzzo invecchiato | 0.22 |
| 9 | Foglie morte | 0.30 |
| 10 | Erba secca | 0.20 |
| 11 | Erba verde | 0.26 |
| 12 | Tetti o terrazzi in bitume | 0.13 |
| 13 | Pietrisco | 0.20 |
| 14 | Superficie scure di edifici (mattoni scuri, vernici scure...) | 0.27 |
| 15 | Superficie chiare di edifici (mattoni chiari, vernici chiare...) | 0.60 |

Tabella 16. Valori di albedo ρ per diverse superficie. Fonte: UNI 8477-1 del 1983

| num. | Tipo di superficie | Albedo |
|------|--|-------------|
| 1 | Ghiaccio | 0.69 |
| 2 | Acqua | 0.05 |
| 3 | Terreno arido | 0.10 |
| 4 | Asfalto chiaro con ghiaia (Richmond, USA) | 0.11 |
| 5 | Foreste | 0.1 |
| 6 | | |
| 7 | Asfalto invecchiato di 3 anni | 0.08 |
| 8 | Calcestruzzo grigio, liscio | 0.36 |
| 9 | | |
| 10 | Erba secca | 0.20 |
| 11 | Erba molto verde | 0.22 |
| 12 | | |
| 13 | Ghiaia | 0.22 |
| 14 | Mattoni marroni con giunti in malta grigia - Pannelli in legno scuro | 0.28 - 0.26 |
| 15 | Mattoni chiari con giunto in malta - Intonaco bianco | 0.51 - 0.71 |

Tabella 17. Valori di albedo per diverse superficie.

Fonte: H. Taha, D. Sailor, H. Akbari (1992), "High-Albedo Materials for Reducing Building Cooling Energy Use", Energy and Environment Division, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California.

Di seguito verranno riportate una mappa di Torino con i valori di Albedo_{NIR} e tre immagini satellitari con la corrispondente mappa della zona tematizzata con i valori di Albedo NIR, in modo da avere un confronto immediato tra la realtà e i calcoli. Sono state scelte tre zone ben definite: zona nord (ufficio aziendale IVECO Italia), zona centro e zona sud (sede Fiat Chrysler). Inoltre, i colori con cui è stata tematizzata la mappa sono stati modificati per facilitarne la lettura: rosso scuro valori bassi di albedo (superfici scure, corsi d'acqua), mentre colori arancioni tendenti al blu/verde indicano superfici con albedo alto (superfici chiare)

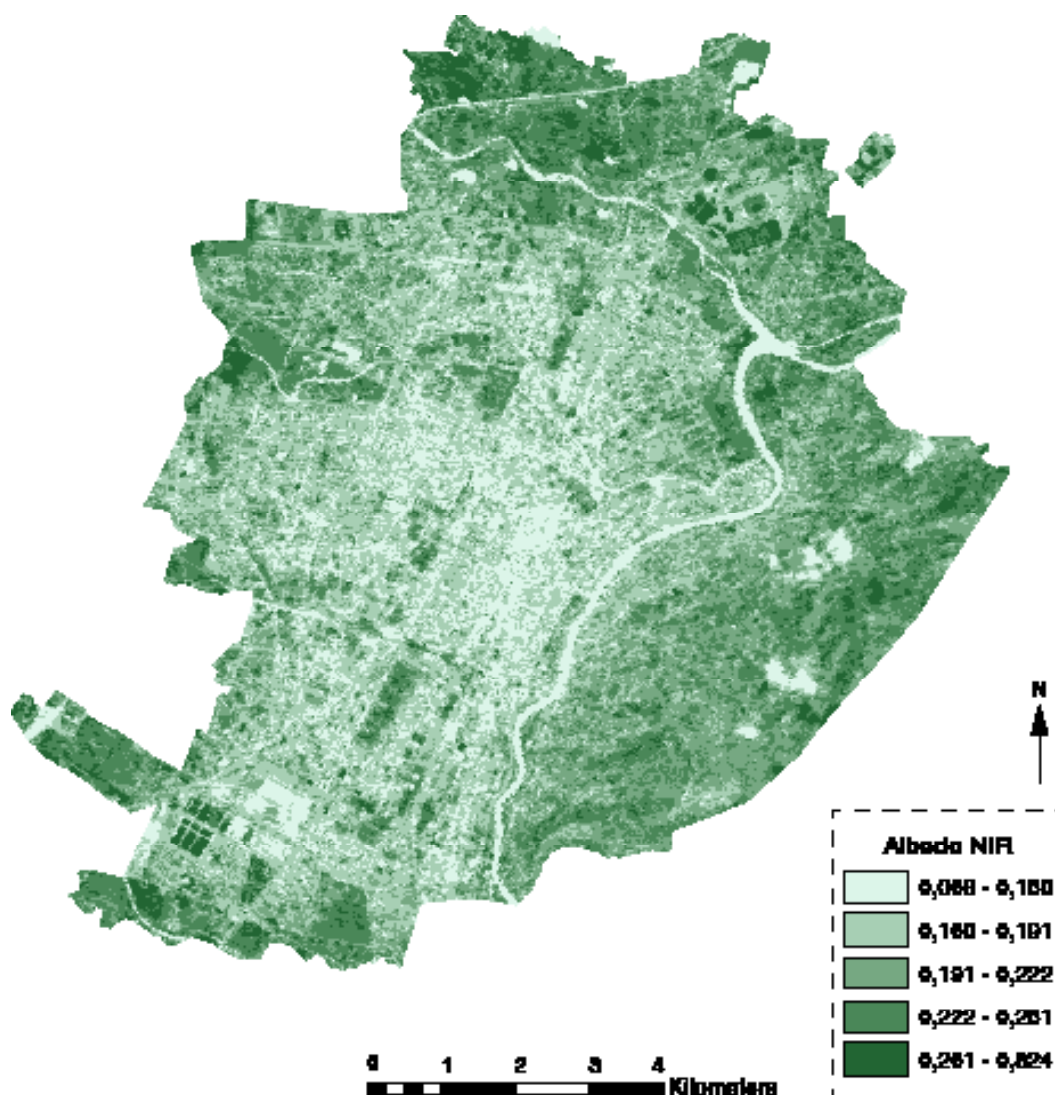


Figura 35. Mappa di Torino tematizzata con i valori di Albedo NIR.

- Zona centro: Porta Nuova (1), Politecnico di Torino (2), parco Cavalieri di Vittorio Veneto (3), fiume Po (4).

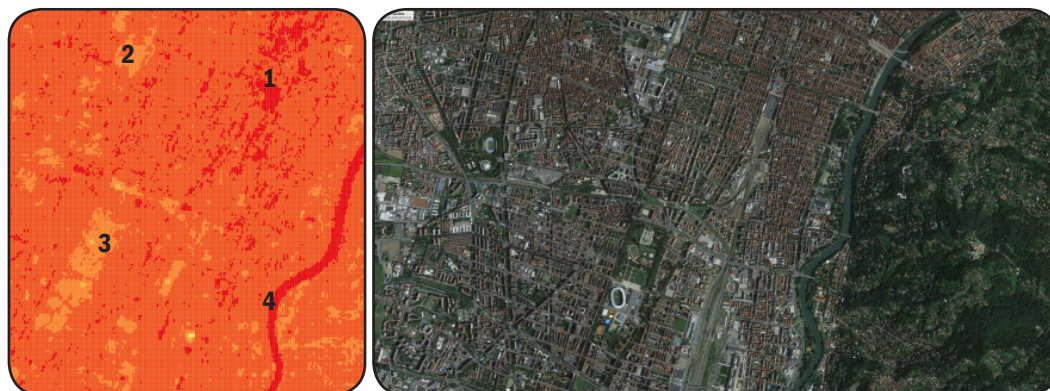


Figura 36 - Confronto tra la mappa generata a seguito del calcolo dell'albedo e l'ortofoto della medesima zona. Ad alti valori di albedo corrisponde un rosso meno chiaro.

Nell'immagine di sinistra è riportata una parte della mappa ricavata da ArcGis a seguito del calcolo dell'albedo, mentre a destra è riportata un'ortofoto della stessa zona considerata. Nella mappa con i valori di albedo calcolati, ad alti valori di albedo (superfici chiare) corrisponde un colore di rosso più chiaro, mentre a bassi valori di albedo (superfici scure) corrisponde un colore rosso scuro. Questo raffronto è stato utile per validare i calcoli effettuati, assicurandoci così di aver trovato dei risultati che si avvicinano molto alla realtà. Nella seguente tabella viene fatto un confronto tra il valore di albedo calcolato secondo la metodologia appena descritta e il valore di albedo per la stessa superficie indicata dalla normativa.

| zona | tipo di superficie | $A_{\text{calcolato}}$ | $A_{\text{reale*}}$ |
|----------------|--------------------|------------------------|---------------------|
| 1. Porta Nuova | asfalto scuro | 0.12 | 0.10 |
| 2. Politecnico | tetto in bitume | 0.15 | 0.13 |
| 3. Parco | erba verde | 0.28 | 0.26 |
| 4. Fiume | acqua | 0.09 | 0.07 |

Tabella 18 - Valori calcolati e valori reali messi a confronto per la validazione del calcolo dei valori di Albedo. *valori presi dalla normativa UNI 8477 parte 1 del 1983.

3. SCELTA DELLA ZONA DI STUDIO: L'ANALISI QUALITATIVA

3.1 Breve evoluzione storica e urbana di Torino

3.1.1. La città antica

Torino venne fondata nella seconda metà del I secolo a.C. come Augusta Taurinorum. Grazie alla sopravvivenza di molti tratti della cerchia delle mura della città romana è possibile definire le dimensioni di Augusta Taurinorum come uno spazio rettangolare di circa 700 x 750 m con l'angolo nord-est tagliato in diagonale: questo tratto obliquo delle mura, situato in corrispondenza degli odierni Giardini Reali, può essere stato imposto dalla prossimità allo sbalzo di quota del terrazzo fluviale. Delle quattro porte principali poste a capo del cardine massimo, ricalcato dalle vie San Tommaso e Porta Palatina, e del decumano massimo, l'attuale via Garibaldi, si conservano la Porta Palatina e quella inglobata in Palazzo Madama.

La trama delle strade era regolare e riflessa nella cadenza delle torri di cortina. L'ortogonalità del reticolo viario dell'attuale "Torino quadrata", riflette ancora l'assetto romano, ma va considerato che in buona parte è frutto dei "dirizzamenti" della seconda metà del Settecento, che riallinearono le facciate sulle principali arterie stradali modificate in epoca medievale, e dei "risanamenti" ottocenteschi del superstite tessuto medievale, che invece aveva alterato nei secoli il disegno urbano originale.

Risalgono certamente all'epoca augustea i primi interventi di costruzione della cinta muraria, uno dei maggiori segni lasciati dall'impianto romano alla città moderna. In questa epoca le infrastrutture urbane erano praticamente assenti. Negli ultimi decenni del I secolo d.C. viene ultimata la cortina muraria e a ridosso del lato orientale si formano presto zone di scarica. Contemporaneamente viene avviata un'importante ristrutturazione urbana che vede la realizzazione di un'articolata rete fognaria e, probabilmente, dell'acquedotto; le strade vengono pavimentate con grosse pietre e una via pubblica larga tra i 55 e i 60 piedi romani corre all'interno lungo tutto il circuito murario.

3.1.2. La città medievale

Durante il periodo delle invasioni barbariche il sistema delle città entra in crisi. Molti insediamenti urbani scompaiono, quelli rimasti vedono ridursi notevolmente sia il numero degli abitanti che la superficie di aree edificate. In seguito, con la ripresa economica e culturale di tutta l'area europea, la città riprende a crescere, ma il nucleo edificato di Torino rimarrà sempre confinato entro la cinta muraria romana.

L'alterazione delle insule romane deriva dalla trasformazione della colonia militare romana in cittadina a prevalente carattere artigianale e commerciale. Lo sfruttamento dello spazio disponibile entro le mura antiche, col crescere della popolazione e con l'aumentare delle botteghe, diventa problematico. I tracciati viari interni ricalcheranno quelli precedenti assumendo però un andamento meno regolare, con linee spezzate e lati obliqui, caratteristico di tutti i centri storici medievali. La bottega al piano terra si affacciava necessariamente sulla via, mentre le attività produttive si svolgevano nelle zone interne e nei cortili. Spesso, ed è il caso di Torino, l'unica possibilità di ulteriore ampliamento era costituita dallo sviluppo in altezza e sul fronte della via; per aumentare l'affaccio su strada, utile alla bottega, si preferiva creare un lato obliquo. Vengono così a formarsi tessuti urbani caratteristici del medioevo per le strade strette, irregolari e tortuose; i numerosi cortili, piccoli ma comunicanti tra loro tramite passaggi interni; alta densità edilizia, ecc.

L'avvento dei Savoia coincise, nel Quattrocento, con la trasformazione di Torino da piccola città, al centro di uno dei più importanti crocevia dell'Italia occidentale, diventando capitale, non per motivi economici o di importanza storica, ma a fini strategici e politici. Questa situazione comporterà una caratterizzazione monoculturale che perdurò fino alla metà dell'Ottocento.

Nel cinquecento la città si presenta ancora con le stesse caratteristiche del periodo medievale, e i Savoia decidono di adattarla alle esigenze del nuovo rango di capitale del ducato attraverso una trasformazione preordinata e non casuale. Le prime preoccupazioni sono di tipo militare: si realizza una nuova cinta con mura bastionate più adatta alle nuove tecniche militari; poi, in soli due anni, si realizza la "Cittadella": un baluardo particolarmente fortificato dove si concentrano le maggiori risorse belliche della città.

Alla fine del Cinquecento gli abitanti erano passati dai 5.000 del borgo quattrocentesco agli oltre 20.000, tutti ammassati entro il ristretto ambito del quadrato romano.

Il nuovo status di capitale richiede necessariamente la disponibilità di nuove

aree abitative. I Savoia vogliono che lo sviluppo della città avvenga secondo un piano preordinato. Tra i diversi progetti, viene scelto quello che prosegue il tracciato ortogonale romano integrandosi con l'abitato pre-esistente e verrà concretizzato in tre tappe successive. I tre ampliamenti, infatti, pur essendo stati realizzati in epoche diverse e con caratteristiche distinte, vanno letti come fasi di un unico processo unitario che si concluderà nel settecento con la cosiddetta "forma a mandorla" della città. Ciascun intervento di addizione sarà caratterizzato dalla presenza di un asse principale che assolve la funzione di connettere i quartieri di recente costruzione con il nuovo centro della città.

3.1.3. La città moderna

Il primo ampliamento orientato a levante sull'asse della Contrada nuova e di piazza San Carlo è nelle mani degli ingegneri militari che si occupano di definire modelli vincolanti per il disegno delle facciate.

Questo ampliamento si concentrò su un asse viario chiamato via Nuova, l'attuale via Roma, e su un fulcro urbano che corrisponde a piazza San Carlo. Via Roma fu posta esattamente in asse con l'ingresso del palazzo ducale, in modo da creare una continuità fisica e visiva tra il luogo principale del potere e l'area destinata ad ospitare le abitazioni della nobiltà e dei funzionari posti a governo del ducato. Gli isolati dovevano essere grandi e gli edifici ampi.

Il secondo ampliamento fu avviato nel Seicento sull'asse dello stradone militare di Po. Questa, diversamente da tutte le altre strade, fu realizzata obliquamente, non rispettando l'ortogonalità del tessuto urbano circostante, perché doveva seguire il tracciato di una strada preesistente che collegava la porta della città vecchia con il ponte sul fiume Po. Inoltre, la piazza del Castello venne raddoppiata e assunse un ruolo di baricentro urbano che in precedenza non aveva. Anche in questo ampliamento gli isolati erano ampi, dotati di grandi ed eleganti cortili o giardini.

Via Po ad oggi è una strada porticata eccezionalmente larga per gli standard di quel periodo, poiché la sua larghezza corrisponde all'altezza dell'affaccio degli edifici.

Il terzo ampliamento a occidente detto di Porta Susina, da realizzarsi sui terreni inediti compresi entro il perimetro della struttura difensiva già innalzata, conferendo definitivamente alla città barocca quella forma "a mandorla" discussa nel corso di tutto il Seicento. La densità edilizia è notevole: le vie sono strette, gli isolati piccoli, così come i cortili al loro interno; gli alloggi hanno l'ingresso "a ballatoio" per sfruttare al massimo la volumetria costruita. Si tratta

di abitazioni destinate a classi sociali decisamente meno agiate rispetto a quelle dei primi due ampliamenti.

Nel corso del Settecento maturano piani urbanistici e progetti architettonici alle diverse scale: dal territorio alla città, ai complessi monumentali e al tessuto edilizio. Se si escludono due momenti di stasi edilizia, (coinvolgimento del Piemonte sabaudo nelle guerre di successione polacca e di successione austriaca), il periodo è contrassegnato dal consolidarsi delle linee già tracciate. Sono le magistrature e le strutture burocratiche centralizzate, sostenute da valenti architetti di sicura professionalità, a programmare e gestire il progetto di trasformazione della città dell'assolutismo, fino agli anni della dominazione francese. Risponde al volere del sovrano l'aderenza ad un unico progetto globale, restituito dalla morfologia stessa della città fortificata d'impianto ellittico, organizzata al suo interno secondo una rigida struttura viaria centripeta, sostenuta da assi rettori che collegano le quattro porte urbane alla piazza Castello con il Palazzo Reale.

3.1.4. La città contemporanea

Con la definitiva annessione del Piemonte alla Francia, nel 1802, per Torino iniziò una fase nuova. Non più capitale e fortezza, ma centro di servizi e snodo commerciale tra l'Italia e la Francia, la città assunse una forma diversa: mentre si avviava lo smantellamento dei bastioni, attorno alle cerniere degli antichi attestamenti viari fuori porta, furono realizzate alcune grandi piazze, collegate tra loro da un sistema di promenades alberate esterne. Torino ereditò le scelte francesi per la sistemazione e l'uso dei terreni liberati o ancora da liberare in seguito all'abbattimento delle mura. Furono realizzati la Piazza d'armi presso la Cittadella e lo spianamento dei terreni presso Porta Susa. Con il miglioramento della congiuntura economica, diverse aree, tra esse quella del Borgo Nuovo tra Porta Nuova e il Po, conobbero un'intensa edificazione, stimolata dalla ripresa demografica e l'abbattimento delle fortificazioni e successiva vendita dei terreni. Secondo le direttive della corte, alla metà degli anni Venti iniziò la realizzazione di Piazza di Po (ora Vittorio Veneto), mentre il Municipio intervenne nella realizzazione della piazza e del tempio della Gran Madre di Dio sulla sponda opposta del fiume.

All'inizio degli anni Quaranta lo spazio entro la circonvallazione napoleonica a sud (viale del Re, attuale corso Vittorio Emanuele II) e a nord (attuali corsi Principe Eugenio, Regina Margherita e San Maurizio) risultava edificato. Alcune costruzioni isolate stavano sorgendo oltre tale demarcazione, prime segnali dell'avvio di un nuovo ciclo di espansione. Il problema dell'ampliamento del

perimetro di Torino aveva iniziato a essere posto con varie ipotesi di espansione per le zone fuori Porta Nuova, Vanchiglia e fuori Porta Susa e regione Valdocco. La prima delle tre zone, quella fuori Porta Nuova, fu caratterizzata dall'attestazione sull'asse del viale del Re dello scalo della ferrovia di Genova. Parallelamente fu definita la sistemazione della zona di Vanchiglia, che dai primi anni Quaranta era al centro dell'interesse di un'iniziativa di privati. In entrambi i casi le trattative furono condotte tra il governo centrale e i privati, con l'esclusione della Città, e portarono all'approvazione di due piani edilizi nel 1846. Ma la Città si oppose, sia per l'insoddisfazione riguardo alla soluzione adottata per lo scalo ferroviario, che interrompeva la continuità del viale del Re, sia nel timore che la realizzazione del nuovo quartiere di Vanchiglia erodesse i profitti dei proprietari delle case del centro.

Torino, capitale dell'unico stato italiano che avesse mantenuto le libertà introdotte nel 1848, ebbe un'accelerata crescita demografica, interrotta bruscamente nel 1864 a causa della perdita di questo ruolo. Ne seguì un massiccio esodo di popolazione e la ristrutturazione del sistema economico, fino ad allora fortemente caratterizzato dai servizi alla corte e dalla presenza degli apparati di governo. Dalla crisi Torino si riprese lentamente, durante gli anni Settanta, come centro manifatturiero, nel quale iniziava a delinearsi la dicotomia tra la città borghese delle nuove aree residenziali e le zone suburbane delle borgate operaie. Negli anni Ottanta iniziò una nuova fase, caratterizzata da alcuni processi simultanei: la crescita di borghi operai all'interno e soprattutto all'esterno della cinta daziaria, la prima urbanizzazione della zona pedecollinare sulla destra del Po, l'avvio dei dibattiti ispirati da propositi di risanamento igienico, ma anche da forti interessi fondiari, che porteranno alla realizzazione della rete fognaria e ai "tagli" diagonali di via Pietro Micca e di via IV Marzo.

L'amministrazione locale di quegli anni fu impegnata nel miglioramento dei collegamenti ferroviari, dell'istruzione e dell'assistenza sociale. In quegli anni nasceva anche l'industria automobilistica: la FIAT.

Accanto alla FIAT nacquero anche la Lancia e l'Itala. La municipalizzazione dei trasporti urbani e la statalizzazione delle ferrovie contribuirono alla nascita di un'industria meccanica torinese. La nuova città industriale attraeva popolazione dalle campagne e, nei primi anni del secolo cresceva al ritmo di 9.000 persone l'anno.

Questa fase può considerarsi conclusa nel 1908, con l'approvazione del nuovo Piano regolatore e lo scoppio della crisi dell'industria automobilistica, appena nata, che determinerà negli anni seguenti una profonda riorganizzazione degli

insediamenti produttivi, ispirata al modello fordista.

Per lunga parte del Novecento, Torino è la ville industriale per antonomasia. La configurazione della città-fabbrica e la sua immagine totalizzante guiderà Torino fino alla crisi di sistema che si apre alla fine degli anni settanta.

La fase che si apre dopo il primo conflitto mondiale vede innanzitutto un processo di riorganizzazione delle strutture produttive sorte durante l'iniziale fase di industrializzazione di fine Ottocento e inizio Novecento. Simboli di questa fase sono gli stabilimenti di Fiat Lingotto e Fiat Mirafiori.

La trama che in qualche modo regge e orienta l'ampliamento della città è sempre quella del Piano regolatore del 1906-08, insieme ai tracciati dei grandi assi storici e dei fiumi.

Il dato di novità profonda sta però nel fatto che si tratta di una trasformazione per grandi "tasselli" (quelli dell'industria, dei quartieri di edilizia popolare pianificata, dei grandi servizi collettivi, del tempo libero) che operano simultaneamente per sovrapposizione rispetto al palinsesto storico rurale preesistente e per giustapposizione nei confronti dell'edificato di bordo delle barriere operaie. È una modalità di costruzione della città (per "concentrazione di funzioni" e contemporaneamente per "dispersione nello spazio") che inizia a dissolvere la logica della crescita per ampliamenti contigui e per regole morfologiche tradizionali.

La Torino che dal secondo dopoguerra si spinge attraverso il boom economico fino alla fine degli anni Settanta si connette alla città precedente senza soluzione di continuità. Al tema della crescita si aggiunge però quello della quantità. Quantità determinata dagli ingenti processi di connessione allo sviluppo della grande industria, e che generano una domanda di abitazioni e servizi che per lungo tempo costituirà una delle criticità dello spazio urbano torinese.

Ripercorrendo i punti principali della relazione del Piano Regolatore del 1956 si rileva una organizzazione del territorio a settori, abitazioni e industria, intervallati da profondi cunei verdi che penetravano il più possibile all'interno della città. Tale composizione, che in futuro si sarebbe accentuata con l'indispensabile espansione del piano attraverso il piano intercomunale, era un sistema stellare assimilabile alla forma di una mano. Per lunghi anni la circolarità e sovrapposizione tra spazi del lavoro e della residenza (industrie e quartieri operai) pare essere totale e assoluta. In questo quadro le celebrazioni per il centenario dell'Unità d'Italia diventano occasione per la costruzione di un momento "altro" rispetto all'immagine totalizzante della città-fabbrica. Italia '61 resta l'unico episodio urbano pianificato e di matrice pubblica non riconducibile alle sole

ragioni della produzione e della crescita.

La crisi di sistema della seconda metà degli anni settanta fa implodere il gigantismo industriale dei decenni precedenti: svuotando le retrovie industriali consolidate, la crisi rende per la prima volta fragile la linea del costruito che avanza nelle campagne.

La crisi viene interpretata come un'occasione per ripensare radicalmente la struttura produttiva e morfologica di Torino e della sua area metropolitana. Diversificare e articolare la matrice economica e sociale, riscrivendo e riconfigurando la strutturazione fisica guidano il cambiamento.

A orientare e promuovere la mutazione è il dibattito che, tra anni ottanta e novanta, porta all'approvazione del nuovo Piano regolatore della città (1995), il quale fungendo da scenario di riferimento mette in relazione i molteplici progetti di trasformazione, che pongono l'accento sul telaio del trasporto pubblico (il passante e il servizio ferroviario metropolitano, le linee della metropolitana), sulla riscrittura dei tessuti industriali (il riuso del Lingotto, le Spine, le zone urbane di trasformazione), sulla trama storico-ambientale (il sistema delle residenze sabaude, Corona Verde e i fiumi), sulla riqualificazione del centro e sull'offerta culturale (i musei dentro i grandi complessi del Barocco e dell'Ottocento, l'arte contemporanea e il cinema, le istituzioni universitarie e la "movida" per i giovani).

Centrale in questa fase è il ruolo di indirizzo e supporto giocato dal settore pubblico, con i grandi eventi (dai Giochi olimpici invernali al 150° dell'Unità d'Italia) che diventano occasione per sostenere questo disegno di cambiamento.

Il primo importante evento per il processo di rinnovo di Torino è stato rappresentato dai Giochi Olimpici Invernali del 2006. La Città di Torino ha inquadrato organicamente il programma dei siti olimpici all'interno del progetto di ridisegno urbano e di riconversione funzionale di parti consistenti della Città che è stato avviato alla fine degli anni '90 dopo l'approvazione del Piano regolatore. L'approccio non si esprime attraverso una semplice progettazione puntuale in quanto le singole opere trovano integrazione e coerenza funzionale all'interno dell'intero progetto urbano che coinvolge tutta la città. Nell'ambito di questo disegno generale la Città di Torino ha impostato il programma delle strutture olimpiche dal punto di vista:

- della localizzazione urbana;
- del riuso post-olimpico e della relativa funzione all'interno di un processo di sviluppo economico-sociale e urbano;
- del percorso progettuale, con l'obiettivo di garantire risultati di qualità

architettonica in rapporto al contesto urbano della città.

Fin dall'inizio, la definizione dei siti olimpici ha puntato, oltre agli aspetti inerenti le funzioni olimpiche, a definire destinazioni post olimpiche nel quadro della loro integrazione urbana e funzionale con attività già in atto.

Le trasformazioni iniziate nell'ultimo decennio del Novecento mettono in gioco una dimensione realmente metropolitana dell'area torinese, che necessita di essere morfologica e politica al contempo.

All'interno di questo ineludibile processo di "metropolizzazione", che dovrebbe determinare una riscrittura del costruito evitando nuovi consumi di suolo verso l'esterno, alcuni progetti di grande scala possono venire ad assumere il ruolo di telaio entro cui collocare le singole trasformazioni.

Strategico, in questo senso, è il Servizio ferroviario metropolitano, che sfruttando grazie al Passante le linee ferroviarie radiocentriche innervate su Torino, rappresenta una straordinaria occasione non solo per riconfigurare in maniera più sostenibile la mobilità dell'area metropolitana, ma anche per un profondo ripensamento delle gerarchie e strutturazioni del territorio torinese.

Un secondo progetto-telaio è quello di Corona Verde, che muovendo dai fuochi delle residenze sabaude della «Corona di delitie» ambisce a costruire un anello ambientale capace di riqualificare e dare senso a frange e periferie dell'area metropolitana.

Un progetto che si unisce a quello di Torino Città d'Acque, che utilizza i quattro fiumi come corridoi ambientali per la qualità del sistema urbano. Su questi telai e armature si inseriscono i singoli progetti: tra tutti, quello fondamentale della Linea 2 della metropolitana, con la riqualificazione dei quartieri dell'area nord e il riuso delle immense piastre industriali dismesse poste a sud e a nord della città.

In definitiva la visione delle tre centralità lineari nord-sud che erano alla base del Piano regolatore Gregotti-Cagnardi del 1995, la Spina centrale allungata al Lingotto, il nuovo asse di corso Marche, il Progetto Po.

3.2 La scelta delle zone di studio

Il lavoro prende come caso studio la città di Torino. Quest'ultima è suddivisa in 10 circoscrizioni, a loro volta suddivise in circa 3.700 sezioni di censimento (unità minima di rilevazione del Comune sulla cui base è organizzata la rilevazione censuaria). Nell'analisi svolta, la sezione di censimento è stata utilizzata come unità minima di riferimento per definizione della forma urbana. In particolare, per quanto riguarda il calcolo dei parametri urbani, ad ogni sezione di censimento sono stati associati i rispettivi valori degli indicatori descritti in precedenza.

Dopo il calcolo dei parametri urbani per l'intera città di Torino, si è deciso di limitare l'analisi ad alcune zone di essa. Per la scelta di tali zone sono stati utilizzati una serie di criteri:

- le zone devono appartenere alla mappa del teleriscaldamento della città di Torino. Questa scelta è dovuta al fatto che, ai fini dell'analisi, è stato necessario avere i dati di consumo reali, forniti da IREN;

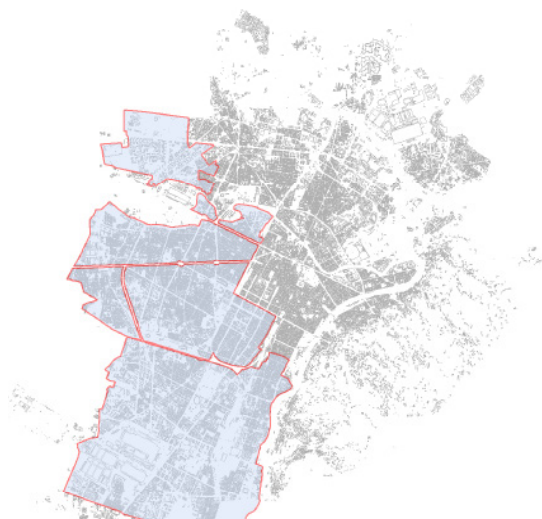


Figura 37 - Mappa della rete di teleriscaldamento IREN

- le zone devono avere dimensioni di circa 400X400 metri e dovevano essere caratterizzate da un tessuto urbano omogeneo e dalla presenza di edifici residenziali;
- Le zone devono appartenere a delle epoche differenti. Sono state selezionate 4 zone caratterizzate da un'architettura tradizionale: zona corso Raffaello, zona Crocetta, zona via Sacchi e zona via Arquata, e 3

da un'epoca di costruzione più recente: zona corso Mediterraneo, zona Spina 3 e zona Villaggio Olimpico.

Per ogni zona è stato fatto un inquadramento satellitare, sono state individuate le epoche di costruzione di ciascun edificio suddividendole in 5 classi:

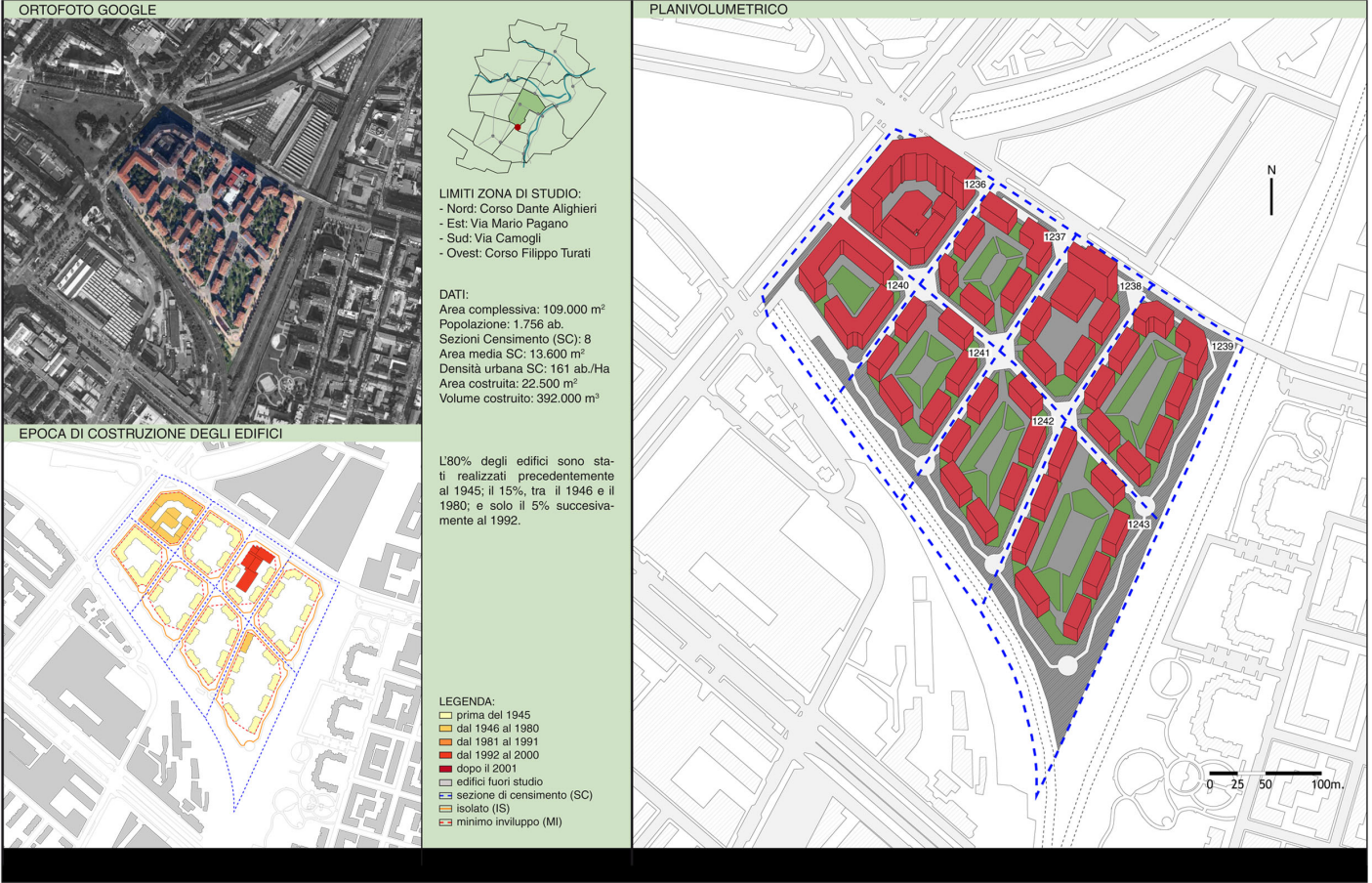
- Precedenti al 1945
- Dal 1946 al 1980
- Dal 1981 al 1991
- Dal 1992 al 2000
- Posteriori al 2001

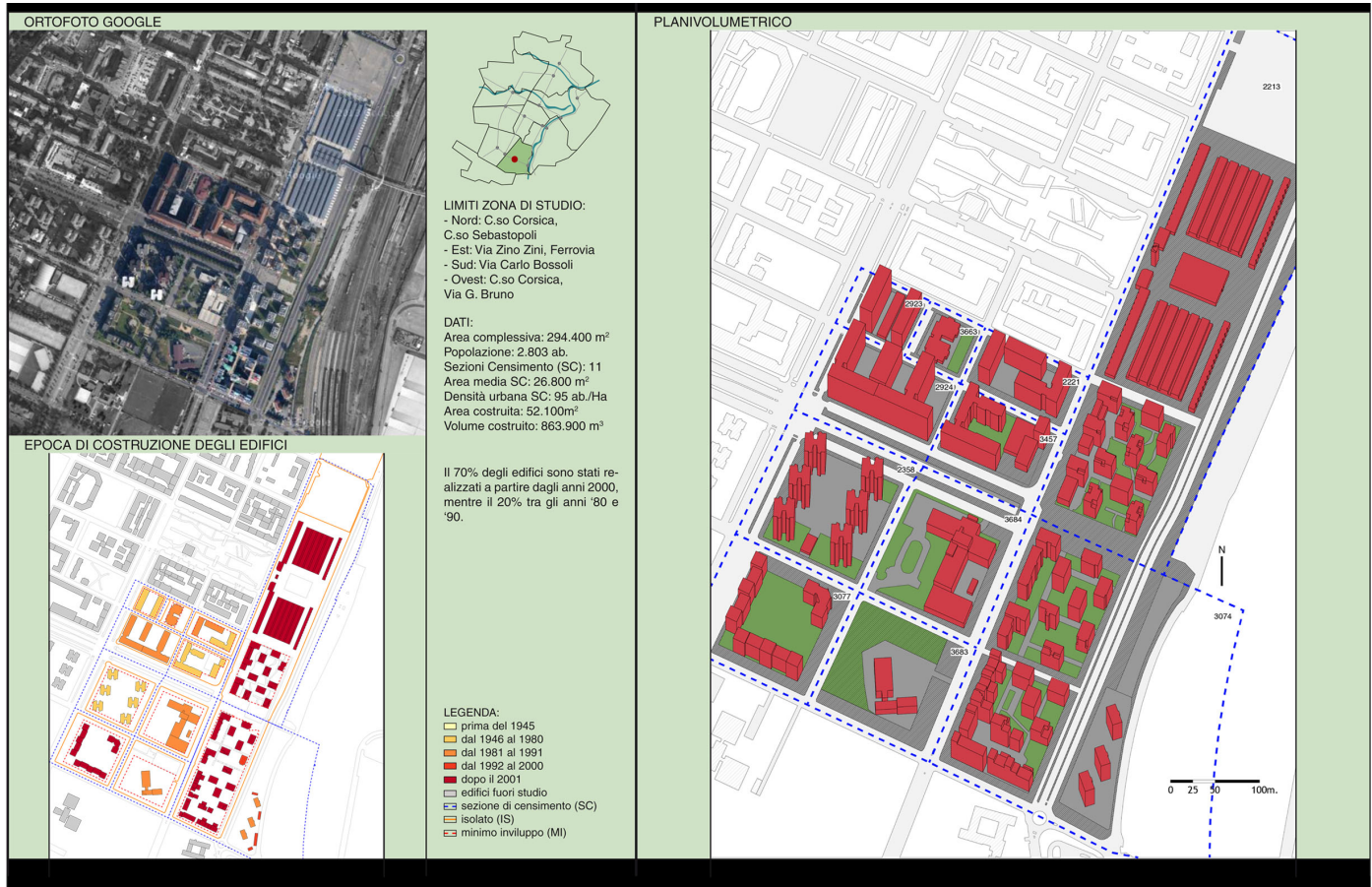
Successivamente si è creato un modello planivolumetrico e un istogramma, che descrivono in modo qualitativo e quantitativo, rispettivamente, le seguenti unità dell'area di studio:

- Superficie Lorda pavimentata
- Superficie privata permeabile
- Superficie privata impermeabile
- Superficie pubblica permeabile
- Superficie pubblica impermeabile
- Strada
- Ferrovia

Nell'istogramma sono stati riportati i valori che descrivono le superfici sopra citate in percentuale, in modo da permetterne una lettura immediata per poter confrontare gli usi del suolo di ogni sezione di censimento.

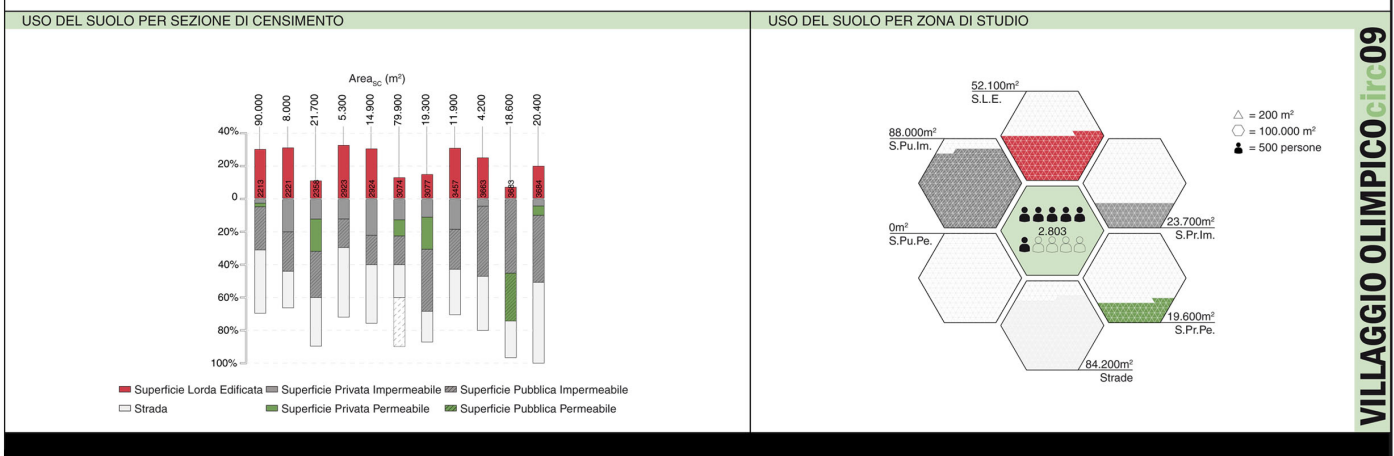
Inoltre, è stata riportata la tabella con gli indicatori di forma urbana e in conclusione, si è elaborato un'infografica che riassume le caratteristiche essenziali di ogni zona.

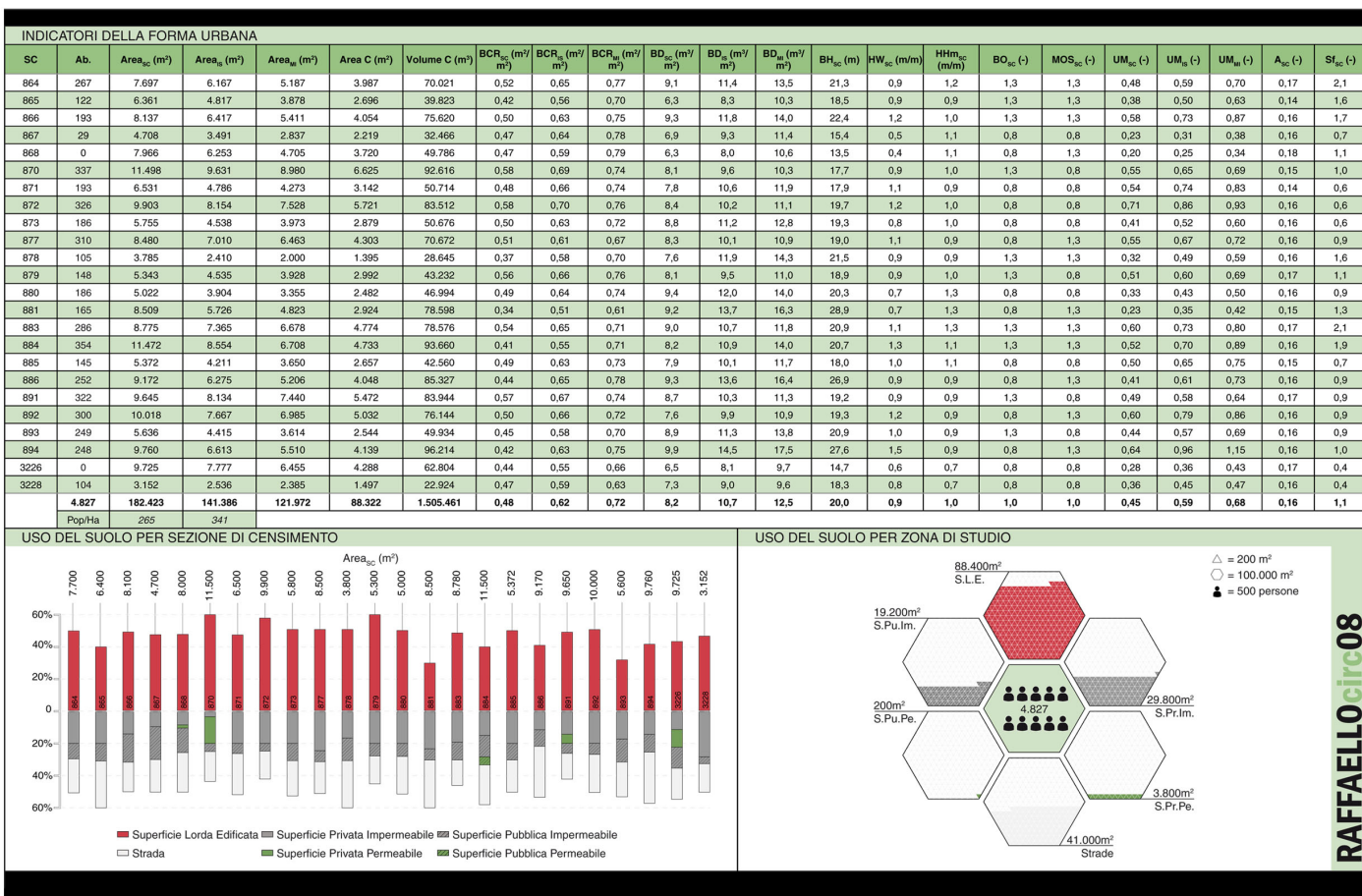


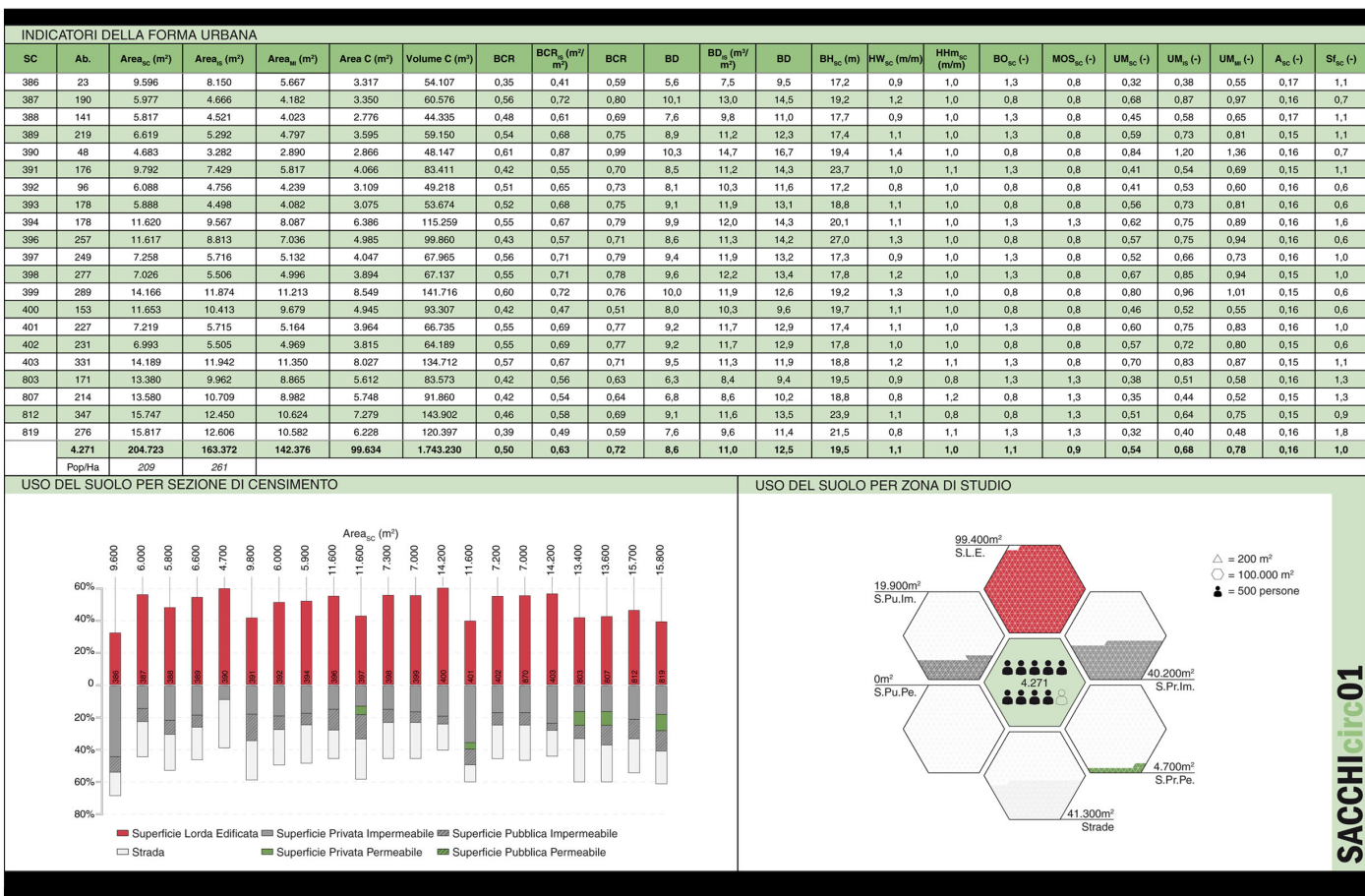
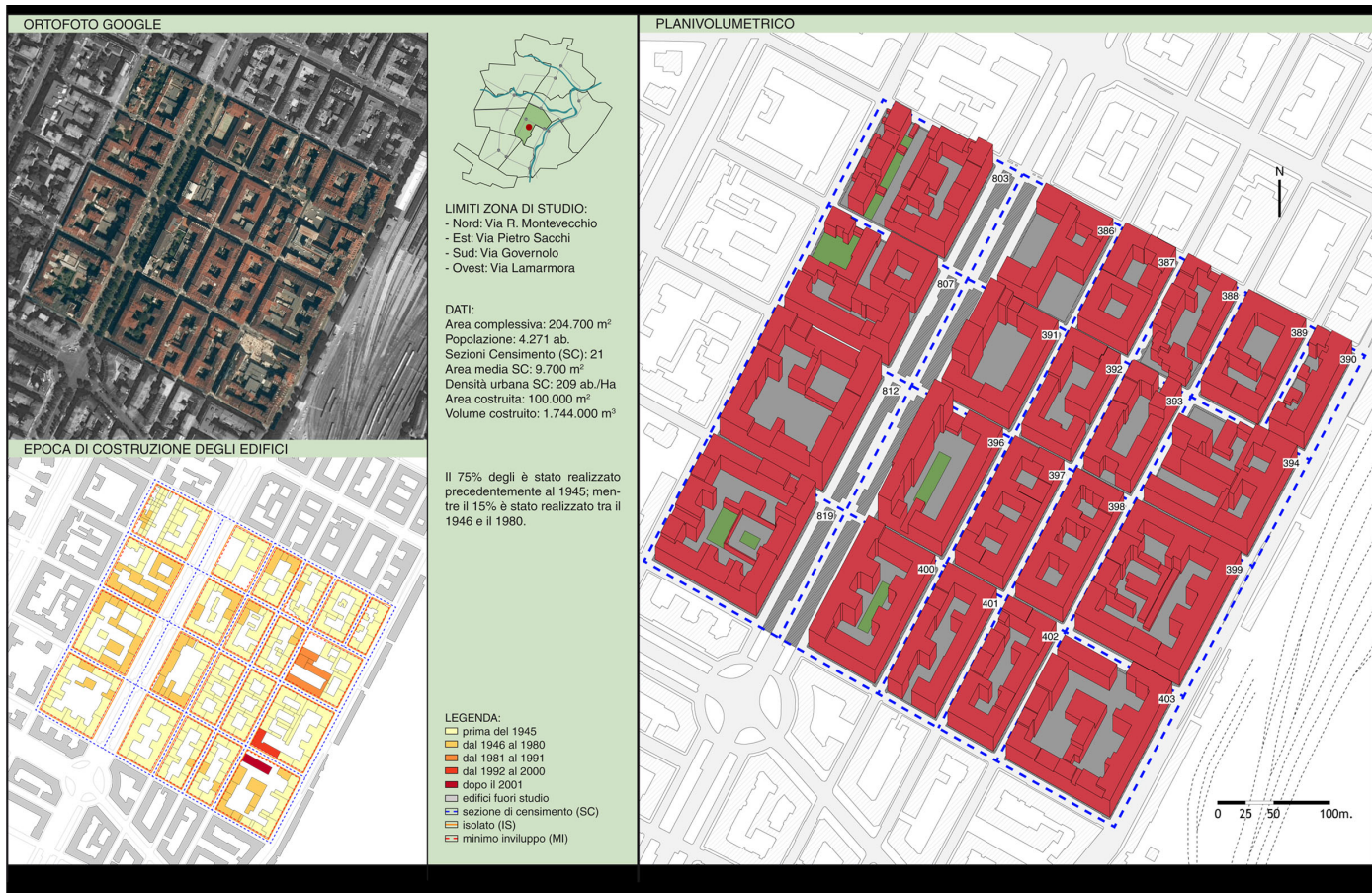


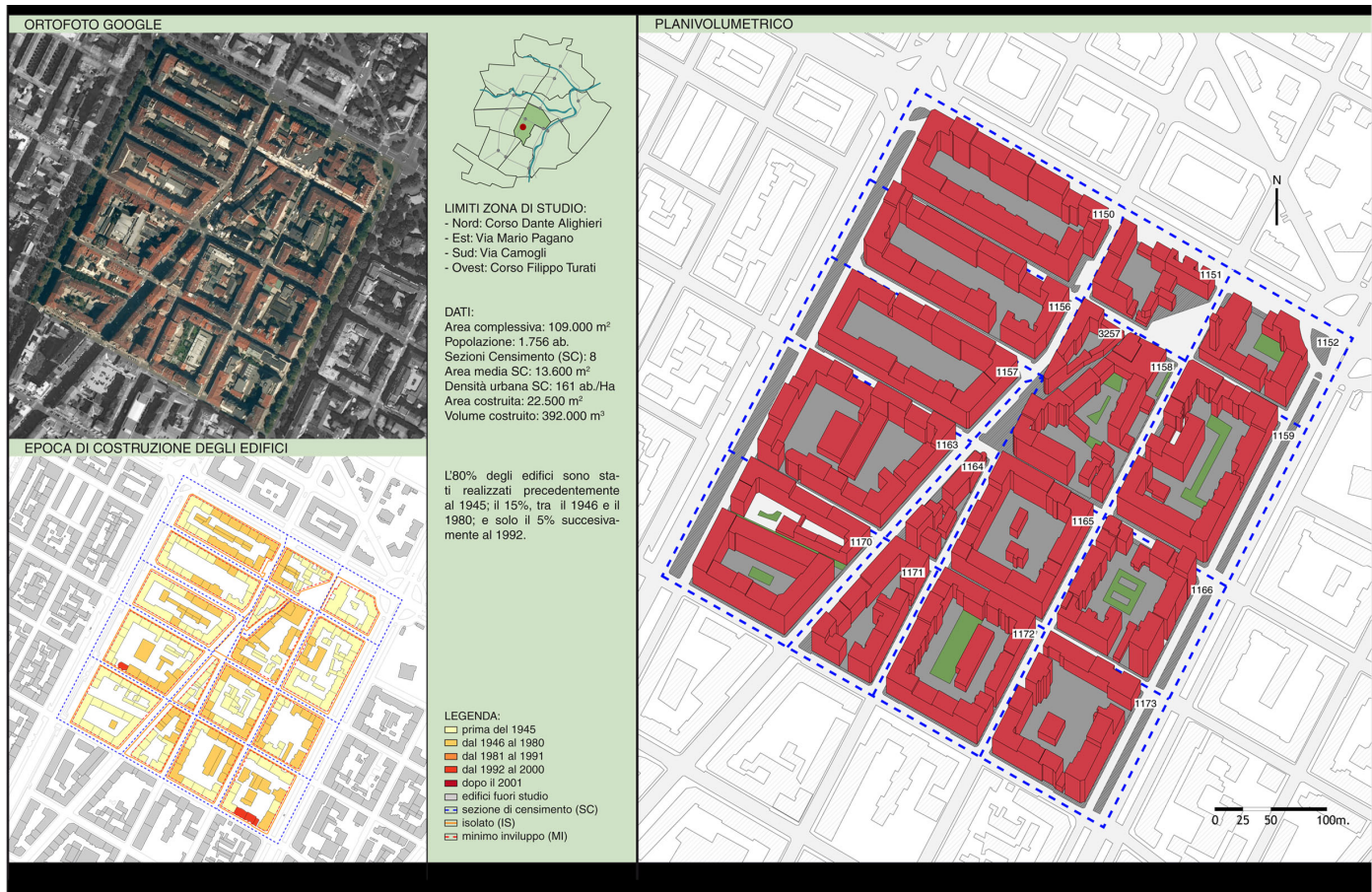
| INDICATORI DELLA FORMA URBANA | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------|---------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|---|
| SC | Ab. | Area _{sc} (m²) | Area _{sc} (m²) | Area _{sc} (m²) | Area C (m²) | Volume C (m³) | BCR _{sc} (m²/m²) | BCR _{sc} (m²/m²) | BCR _{sc} (m²/m²) | BD _{sc} (m²/m²) | BD _{sc} (m²/m²) | BD _{sc} (m²/m²) | BH _{sc} (m) | HW _{sc} (m/m) | HHm _{sc} (m/m) | BO _{sc} (-) | MOS _{sc} (-) | UM _{sc} (-) | UM _{sc} (-) | UM _{sc} (-) | UM _{sc} (-) | A _{sc} (-) | S |
| 2213 | 32 | 90.112 | 58.417 | 35.105 | 21.686 | 197.585 | 0.24 | 0.37 | 0.62 | 2.2 | 3.4 | 5.6 | 13.1 | 0.3 | 1.0 | 0.9 | 0.7 | 0.07 | 0.11 | 0.18 | 0.22 | 0.6 | |
| 2221 | 185 | 8.033 | 6.167 | 5.193 | 2.160 | 54.322 | 0.27 | 0.35 | 0.42 | 6.8 | 8.8 | 10.5 | 25.2 | 0.4 | 1.0 | 1.1 | 1.3 | 0.12 | 0.15 | 0.18 | 0.19 | 1.4 | |
| 2358 | 463 | 21.686 | 15.146 | 12.333 | 2.585 | 84.910 | 0.12 | 0.17 | 0.21 | 3.9 | 5.6 | 6.9 | 35.3 | 0.6 | 1.2 | 0.8 | 1.3 | 0.07 | 0.09 | 0.12 | 0.18 | 1.2 | |
| 2923 | 141 | 5.293 | 3.264 | 2.475 | 1.834 | 39.198 | 0.35 | 0.56 | 0.74 | 7.4 | 12.0 | 15.8 | 28.4 | 0.5 | 0.9 | 0.7 | 1.3 | 0.18 | 0.29 | 0.38 | 0.17 | 0.9 | |
| 2924 | 615 | 14.903 | 9.927 | 7.583 | 3.829 | 126.728 | 0.26 | 0.39 | 0.51 | 8.5 | 12.8 | 16.7 | 33.7 | 0.5 | 1.2 | 1.0 | 1.3 | 0.13 | 0.20 | 0.26 | 0.16 | 1.5 | |
| 3074 | 679 | 79.857 | 62.570 | 17.924 | 8.184 | 170.339 | 0.10 | 0.13 | 0.46 | 2.1 | 2.7 | 9.5 | 22.1 | 0.4 | 1.3 | 1.0 | 1.3 | 0.04 | 0.05 | 0.18 | 0.20 | 1.7 | |
| 3077 | 247 | 19.352 | 15.482 | 12.584 | 2.468 | 50.806 | 0.13 | 0.16 | 0.20 | 2.6 | 3.3 | 4.0 | 20.9 | 0.4 | 0.8 | 0.9 | 1.3 | 0.05 | 0.06 | 0.07 | 0.19 | 1.0 | |
| 3457 | 326 | 11.848 | 8.313 | 5.478 | 3.213 | 71.245 | 0.27 | 0.39 | 0.59 | 6.0 | 8.6 | 13.0 | 29.6 | 0.5 | 1.1 | 1.2 | 1.3 | 0.12 | 0.17 | 0.26 | 0.19 | 1.7 | |
| 3663 | 115 | 4.281 | 3.061 | 2.542 | 1.010 | 11.838 | 0.24 | 0.33 | 0.40 | 2.8 | 3.9 | 4.7 | 4.4 | 0.1 | 0.2 | 0.7 | 1.3 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.18 | 0.1 | |
| 3683 | 0 | 18.634 | 12.722 | 9.467 | 1.240 | 11.515 | 0.07 | 0.10 | 0.13 | 0.6 | 0.9 | 1.2 | 9.7 | 0.1 | 0.5 | 0.9 | 1.3 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.20 | 0.6 | |
| 3684 | 0 | 20.403 | 15.134 | 12.048 | 3.888 | 45.442 | 0.19 | 0.26 | 0.32 | 2.2 | 3.0 | 3.8 | 12.7 | 0.2 | 0.4 | 1.1 | 1.3 | 0.04 | 0.05 | 0.06 | 0.21 | 0.7 | |
| | 2.803 | 294.404 | 210.203 | 122.733 | 52.096 | 863.928 | 0.20 | 0.29 | 0.42 | 4.1 | 5.9 | 8.3 | 21.4 | 0.4 | 0.9 | 0.9 | 1.3 | 0.08 | 0.11 | 0.16 | 0.19 | 1.0 | |
| Pop/Ha | | 95 | 133 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

SC: Sezione di censimento; Ab.: Residenti; Area_{sc}: Area della sezione di censimento; Area_{sc}: Area dell'isolato; Area_{sc}: Area del minimo involucro (area di pertinenza privata); Area C: Area costruita (al piano terra); Volume C: Volume costruito; BCR_{sc}: Building Coverage Ratio della sezione di censimento; BCR_{sc}: Building Coverage Ratio dell'isolato; BCR_{sc}: Building Coverage Ratio del minimo involucro; BD_{sc}: Building Density della sezione di censimento; BD_{sc}: Building Density dell'isolato; BD_{sc}: Building Density del minimo involucro (area di pertinenza privata); BH_{sc}: Building Height della sezione di censimento; HW_{sc}: Aspect Ratio della sezione di censimento; HHm_{sc}: Height of a building and the average height of the surrounding della sezione di censimento; BO_{sc}: Building Orientation della sezione di censimento; MOS_{sc}: Main Orientation of the Street della sezione di censimento; UM_{sc}: Urban Morphology della sezione di censimento; UM_{sc}: Urban Morphology dell'isolato; UM_{sc}: Urban Morphology del minimo involucro; A_{sc}: Albedo medio della sezione di censimento; Sf_{sc}: Solar factor della sezione di censimento



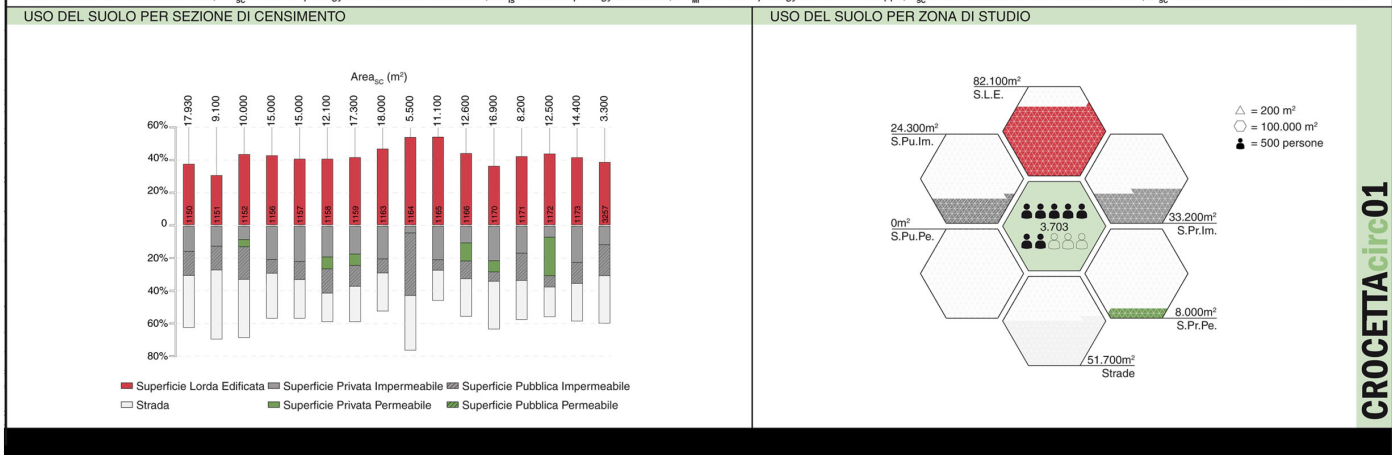


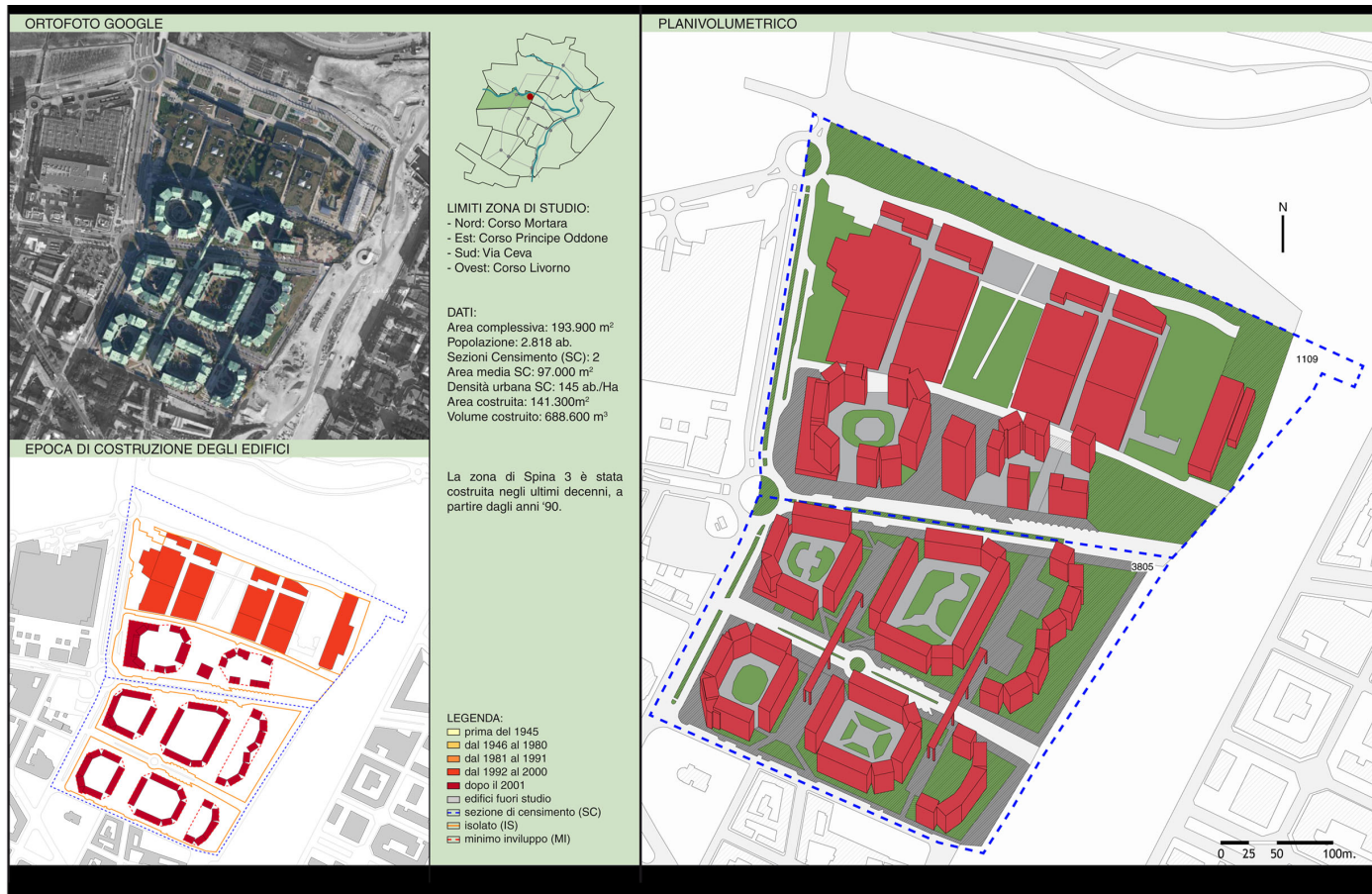




| INDICATORI DELLA FORMA URBANA | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|--------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------|---------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|------------|----------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| SC | Ab. | Area _{sc} (m²) | Area _{sc} (m²) | Area _{sc} (m²) | Area C (m²) | Volume C (m³) | BCR _{sc} (m²/m²) | BCR _{sc} (m²/m²) | BCR _{sc} (m²/m²) | BD _{sc} (m²/m²) | BD _{sc} (m²/m²) | BD (m²/m²) | BH _{sc} (m) | HW _{sc} (m/m) | HHm _{sc} (m/m) | BO _{sc} (-) | MOS _{sc} (-) | UM _{sc} (-) | UM _{sc} (-) | UM _{sc} (-) | UM _{sc} (-) | A _{sc} (-) | Sf _{sc} (-) |
| 1150 | 420 | 17.931 | 12.190 | 9.535 | 6.752 | 141.209 | 0,38 | 0,55 | 0,71 | 7,9 | 11,6 | 14,8 | 25,5 | 1,1 | 1,0 | 1,3 | 1,3 | 0,37 | 0,61 | 0,78 | 0,2 | 1,7 | |
| 1151 | 117 | 9.078 | 5.269 | 3.912 | 2.799 | 38.953 | 0,31 | 0,53 | 0,72 | 4,3 | 7,4 | 10,0 | 17,6 | 1,1 | 1,1 | 0,8 | 1,3 | 0,27 | 0,57 | 0,76 | 0,2 | 1,2 | |
| 1152 | 53 | 10.093 | 6.532 | 4.534 | 3.291 | 51.451 | 0,33 | 0,50 | 0,73 | 5,1 | 7,9 | 11,3 | 18,3 | 0,5 | 1,5 | 1,3 | 1,3 | 0,31 | 0,28 | 0,40 | 0,2 | 2,6 | |
| 1156 | 329 | 15.052 | 10.894 | 9.619 | 6.541 | 110.312 | 0,43 | 0,60 | 0,68 | 7,3 | 10,1 | 11,5 | 20,6 | 1,0 | 0,8 | 1,3 | 1,3 | 0,32 | 0,58 | 0,66 | 0,2 | 1,3 | |
| 1157 | 209 | 14.977 | 11.139 | 9.464 | 6.220 | 98.812 | 0,42 | 0,56 | 0,66 | 6,6 | 8,9 | 10,4 | 18,8 | 0,9 | 0,8 | 1,3 | 1,3 | 0,34 | 0,49 | 0,58 | 0,2 | 1,3 | |
| 1158 | 243 | 12.156 | 10.073 | 8.296 | 5.073 | 85.148 | 0,42 | 0,50 | 0,61 | 7,0 | 8,5 | 10,3 | 21,4 | 0,9 | 0,7 | 1,1 | 0,8 | 0,31 | 0,48 | 0,58 | 0,2 | 0,6 | |
| 1159 | 283 | 17.303 | 13.688 | 11.406 | 7.252 | 129.298 | 0,42 | 0,53 | 0,64 | 7,4 | 9,4 | 11,3 | 21,0 | 0,9 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,47 | 0,48 | 0,58 | 0,2 | 0,4 | |
| 1163 | 320 | 18.080 | 13.691 | 12.224 | 8.580 | 121.638 | 0,47 | 0,63 | 0,70 | 6,7 | 8,9 | 10,0 | 19,6 | 0,8 | 1,5 | 1,3 | 1,3 | 0,50 | 0,51 | 0,58 | 0,2 | 2,6 | |
| 1164 | 71 | 5.472 | 3.636 | 1.542 | 1.313 | 22.977 | 0,24 | 0,36 | 0,85 | 4,2 | 6,3 | 14,9 | 19,9 | 0,7 | 1,4 | 1,0 | 0,8 | 0,17 | 0,27 | 0,63 | 0,2 | 1,1 | |
| 1165 | 295 | 11.117 | 9.948 | 8.287 | 6.040 | 94.267 | 0,54 | 0,67 | 0,73 | 8,5 | 10,4 | 11,4 | 19,5 | 1,1 | 1,4 | 1,3 | 0,8 | 0,61 | 0,74 | 0,81 | 0,2 | 1,5 | |
| 1166 | 231 | 12.612 | 9.706 | 8.292 | 5.627 | 93.468 | 0,45 | 0,58 | 0,68 | 7,4 | 9,6 | 11,3 | 23,3 | 0,9 | 1,3 | 0,8 | 1,3 | 0,34 | 0,49 | 0,58 | 0,2 | 1,3 | |
| 1170 | 301 | 16.892 | 11.812 | 10.956 | 6.211 | 111.084 | 0,37 | 0,53 | 0,57 | 6,6 | 9,4 | 10,1 | 20,0 | 0,7 | 0,8 | 1,3 | 1,3 | 0,36 | 0,37 | 0,39 | 0,2 | 1,3 | |
| 1171 | 275 | 8.266 | 6.282 | 4.914 | 3.531 | 69.358 | 0,43 | 0,56 | 0,72 | 8,4 | 11,0 | 14,1 | 20,6 | 1,1 | 0,7 | 1,3 | 1,0 | 0,43 | 0,63 | 0,81 | 0,2 | 0,9 | |
| 1172 | 276 | 12.502 | 10.211 | 9.422 | 5.569 | 93.005 | 0,45 | 0,55 | 0,59 | 7,4 | 9,1 | 9,9 | 19,0 | 0,8 | 0,7 | 1,3 | 0,8 | 0,35 | 0,41 | 0,45 | 0,2 | 0,7 | |
| 1173 | 230 | 14.390 | 11.044 | 9.176 | 5.987 | 104.253 | 0,42 | 0,54 | 0,65 | 7,3 | 9,4 | 11,4 | 23,7 | 1,0 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,24 | 0,53 | 0,64 | 0,2 | 0,4 | |
| 3257 | 50 | 3.334 | 2.359 | 1.712 | 1.343 | 18.883 | 0,40 | 0,57 | 0,78 | 5,7 | 8,0 | 11,0 | 16,1 | 0,7 | 1,4 | 0,8 | 0,8 | 0,35 | 0,41 | 0,56 | 0,2 | 0,9 | |
| | 3.703 | 199.256 | 147.575 | 123.291 | 82.130 | 1.384.116 | 0,41 | 0,55 | 0,69 | 6,7 | 9,1 | 11,5 | 20,3 | 0,9 | 1,0 | 1,1 | 1,1 | 0,36 | 0,49 | 0,61 | 0,2 | 1,2 | |
| | Pop/Ha | 186 | 251 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

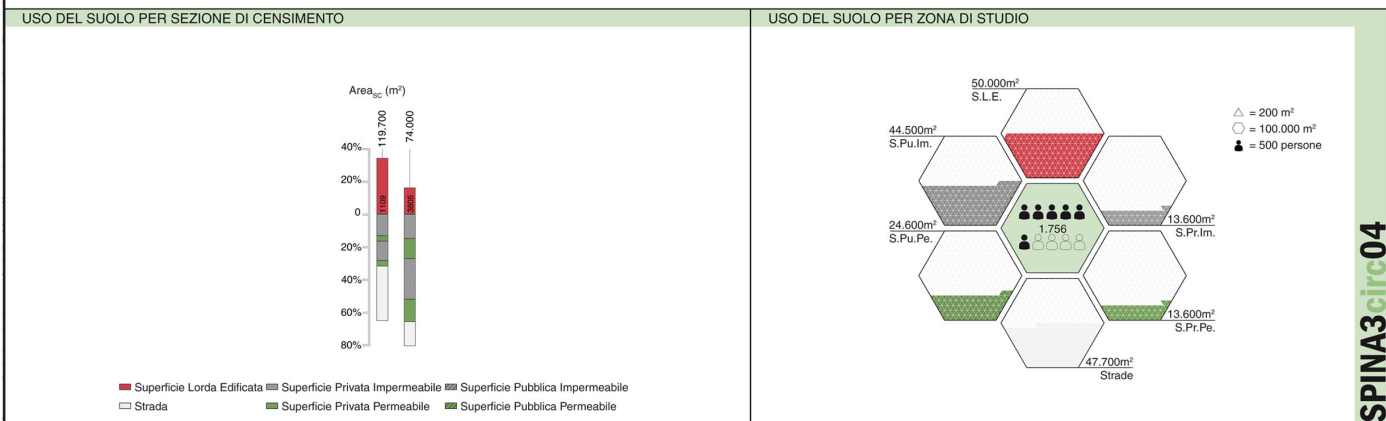
SC: Sezione di censimento; Ab.: Residenti; Area_{sc}: Area della sezione di censimento; Area_{sc}: Area dell'isolato; Area_{sc}: Area del minimo inviluppo (area di pertinenza privata); Area C: Area costruita (al piano terra); Volume C: Volume costruito; BCR_{sc}: Building Coverage Ratio della sezione di censimento; BCR_{sc}: Building Coverage Ratio dell'isolato; BCR_{sc}: Building Coverage Ratio del minimo inviluppo; BD_{sc}: Building Density della sezione di censimento; BD_{sc}: Building Density dell'isolato; BD_{sc}: Building Density del minimo inviluppo; BH_{sc}: Building Height della sezione di censimento; HW_{sc}: Aspect Ratio della sezione di censimento; HHm_{sc}: Height of a building and the average height of the surrounding della sezione di censimento; BOS_{sc}: Building Orientation della sezione di censimento; MOS_{sc}: Main Orientation of the Street della sezione di censimento; UM_{sc}: Urban Morphology della sezione di censimento; UM_{sc}: Urban Morphology dell'isolato; UM_{sc}: Urban Morphology del minimo inviluppo; A_{sc}: Albedo medio della sezione di censimento; Sf_{sc}: Solar factor della sezione di censimento





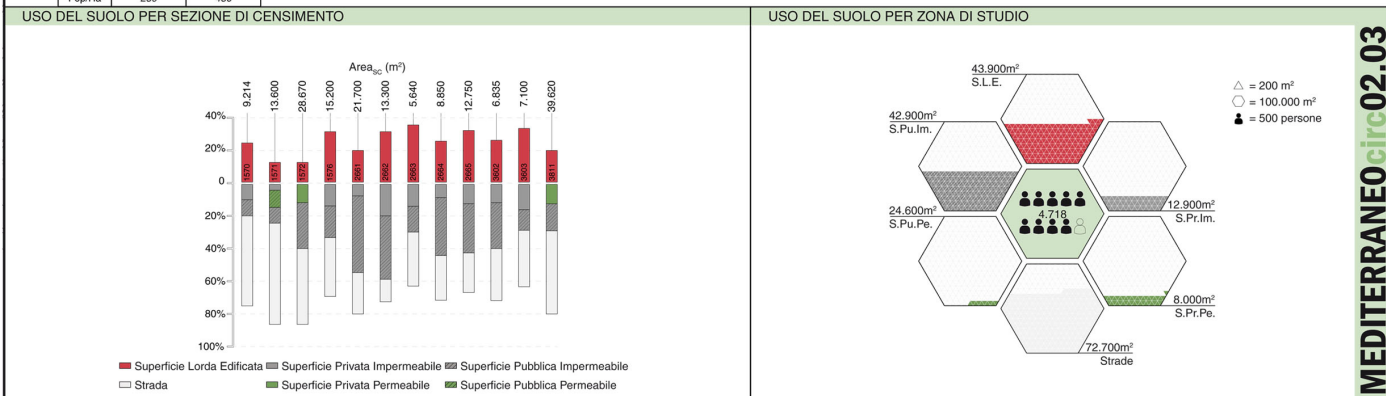
| INDICATORI DELLA FORMA URBANA | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|--------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|----------------------------|---|---|---|-----|--|------|----------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| SC | Ab. | Area _{sc} (m ²) | Area _{sc} (m ²) | Area _{sc} (m ²) | Area C (m ²) | Volume C (m ³) | BCR _{sc} (m ² /m ²) | BCR _{sc} (m ² /m ²) | BCR _{sc} (m ² /m ²) | BD | BD _{sc} (m ² /m ²) | BD | BH _{sc} (m) | HW _{sc} (m/m) | HHm _{sc} (m/m) | BO _{sc} (-) | MOS _{sc} (-) | UM _{sc} (-) | UM _{sc} (-) | UM _{sc} (-) | A _{sc} (-) | St _{sc} (-) |
| 1109 | 950 | 119.647 | 83.791 | 57.216 | 37.089 | 359.703 | 0,30 | 0,44 | 0,65 | 3,0 | 4,3 | 6,3 | 19,3 | 0,5 | 0,9 | 0,8 | 1,3 | 0,14 | 0,27 | 0,30 | 0,23 | 0,9 |
| 1109a | | | | 5.637 | 2.730 | 61.698 | | | 0,48 | | | 10,9 | 19,3 | 0,5 | 0,9 | 0,8 | 1,3 | | | 0,22 | 0,23 | 0,9 |
| 1109b | | | | 8.109 | 3.702 | 83.295 | | | 0,46 | | | 10,3 | 19,3 | 0,5 | 0,9 | 0,8 | 1,3 | | | 0,21 | 0,23 | 0,9 |
| 1109c | | | | 43.470 | 30.657 | 214.599 | | | 0,71 | | | 4,9 | 19,3 | 0,5 | 0,9 | 0,8 | 1,3 | | | 0,32 | 0,23 | 0,9 |
| 3805 | 1868 | 74.232 | 62.403 | 32.736 | 12.841 | 299.324 | 0,14 | 0,21 | 0,39 | 3,2 | 4,8 | 9,1 | 23,3 | 0,9 | 1,0 | 1,3 | 1,3 | 0,12 | 0,22 | 0,35 | 0,22 | 1,7 |
| 3805a | | | | 2.620 | 1.148 | 26.760 | | | 0,44 | | | 10,2 | 23,3 | 0,9 | 1,0 | 1,3 | 1,3 | | | 0,39 | 0,22 | 1,7 |
| 3805b | | | | 6.166 | 2.372 | 55.291 | | | 0,38 | | | 9,0 | 23,3 | 0,9 | 1,0 | 1,3 | 1,3 | | | 0,34 | 0,22 | 1,7 |
| 3805c | | | | 4.964 | 2.268 | 52.867 | | | 0,46 | | | 10,7 | 23,3 | 0,9 | 1,0 | 1,3 | 1,3 | | | 0,41 | 0,22 | 1,7 |
| 3805d | | | | 4.737 | 1.920 | 44.755 | | | 0,41 | | | 9,4 | 23,3 | 0,9 | 1,0 | 1,3 | 1,3 | | | 0,36 | 0,22 | 1,7 |
| 3805e | | | | 8.942 | 3.098 | 72.214 | | | 0,35 | | | 8,1 | 23,3 | 0,9 | 1,0 | 1,3 | 1,3 | | | 0,31 | 0,22 | 1,7 |
| 3805f | | | | 5.307 | 2.035 | 47.436 | | | 0,38 | | | 8,9 | 23,3 | 0,9 | 1,0 | 1,3 | 1,3 | | | 0,34 | 0,22 | 1,7 |
| | 2.818 | 193.878 | 146.194 | 89.952 | 49.930 | 659.027 | 0,22 | 0,32 | 0,52 | 3,1 | 4,5 | 7,7 | 21,3 | 0,7 | 1,0 | 1,1 | 1,3 | 0,13 | 0,25 | 0,32 | 0,23 | 1,3 |
| | Pop/Ha | 145 | 193 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

SC: Sezione di censimento; Ab.: Residenti; Area_{sc}: Area della sezione di censimento; Area_{sc}: Area dell'isolato; Area_{sc}: Area del minimo involucro (area di pertinenza privata); Area C: Area costruita (al piano terra); Volume C: Volume costruito; BCR_{sc}: Building Coverage Ratio della sezione di censimento; BCR_{sc}: Building Coverage Ratio dell'isolato; BCR_{sc}: Building Coverage Ratio del minimo involucro; BD_{sc}: Building Density della sezione di censimento; BD_{sc}: Building Density dell'isolato; BD_{sc}: Building Density del minimo involucro; BH_{sc}: Building Height della sezione di censimento; HW_{sc}: Aspect Ratio della sezione di censimento; HHm_{sc}: Height of a building and the average height of the surrounding della sezione di censimento; BO_{sc}: Building Orientation della sezione di censimento; MOS_{sc}: Main Orientation of the Street della sezione di censimento; UM_{sc}: Urban Morphology della sezione di censimento; UM_{sc}: Urban Morphology dell'isolato; UM_{sc}: Urban Morphology del minimo involucro; A_{sc}: Albedo medio della sezione di censimento; St_{sc}: Solar factor della sezione di censimento





| INDICATORI DELLA FORMA URBANA | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|--------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------|---------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|-----|
| SC | Ab. | Area _{sc} (m²) | Area _{sc} (m²) | Area _{sc} (m²) | Area C (m²) | Volume C (m³) | BCR _{sc} (m²/m²) | BCR _{sc} (m²/m²) | BCR _{sc} (m²/m²) | BD _{sc} (m²/m²) | BD _{sc} (m²/m²) | BD _{sc} (m²/m²) | BH _{sc} (m) | HW _{sc} (m/m) | HHm _{sc} (m/m) | BO _{sc} (-) | MOS _{sc} (-) | UM _{sc} (-) | UM _{sc} (-) | UM _{sc} (-) | A _{sc} (-) | St _{sc} (-) | |
| 1570 | 328 | 9.214 | 6.734 | 5.490 | 3.834 | 62.645 | 0.42 | 0.57 | 0.70 | 6,8 | 9,3 | 11,4 | 19,1 | 1,0 | 1,1 | 1,3 | 1,3 | 0,41 | 0,56 | 0,69 | 0,19 | 1,9 | |
| 1571 | 186 | 13.597 | 7.643 | 5.630 | 3.146 | 37.883 | 0,23 | 0,41 | 0,56 | 2,8 | 5,0 | 6,7 | 15,9 | 0,7 | 0,8 | 1,3 | 0,8 | 0,15 | 0,27 | 0,37 | 0,18 | 0,8 | |
| 1571a | | | | 930 | 745 | 2.980 | | | 0,80 | | | | 3,2 | 4,0 | 0,7 | 0,8 | 1,3 | 0,8 | | | 0,52 | 0,18 | 0,8 |
| 1571b | | | | 4.700 | 2.401 | 34.903 | | | 0,51 | | | | 7,4 | 17,0 | 0,7 | 0,8 | 1,3 | 0,8 | | | 0,33 | 0,18 | 0,8 |
| 1572 | 150 | 28.670 | 15.494 | 7.325 | 4.150 | 96.978 | 0,14 | 0,27 | 0,57 | 3,4 | 6,3 | 13,2 | 23,6 | 0,4 | 1,0 | 1,3 | 1,3 | 0,06 | 0,11 | 0,23 | 0,21 | 1,7 | |
| 1572a | | | | 4.150 | 2.490 | 54.785 | | | 0,60 | | | | 13,2 | 22,0 | 0,4 | 1,0 | 1,3 | 1,3 | | | 0,24 | 0,21 | 1,7 |
| 1572b | | | | 3.175 | 1.660 | 42.194 | | | 0,52 | | | | 13,3 | 25,0 | 0,4 | 1,0 | 1,3 | 1,3 | | | 0,21 | 0,21 | 1,7 |
| 1576 | 758 | 15.205 | 9.916 | 6.773 | 4.468 | 116.501 | 0,29 | 0,45 | 0,66 | 7,7 | 11,7 | 17,2 | 31,4 | 0,9 | 1,1 | 0,9 | 0,9 | 0,25 | 0,39 | 0,58 | 0,18 | 0,9 | |
| 2661 | 317 | 21.693 | 12.810 | 5.680 | 4.175 | 98.359 | 0,19 | 0,33 | 0,74 | 4,5 | 7,7 | 17,3 | 31,6 | 0,7 | 1,2 | 0,8 | 0,8 | 0,14 | 0,24 | 0,54 | 0,17 | 0,7 | |
| 2662 | 769 | 13.337 | 9.781 | 6.500 | 4.119 | 111.329 | 0,31 | 0,42 | 0,63 | 8,4 | 11,4 | 17,1 | 29,3 | 1,0 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,30 | 0,40 | 0,61 | 0,16 | 0,5 | |
| 2663 | 116 | 5.640 | 3.706 | 2.816 | 2.052 | 54.770 | 0,36 | 0,55 | 0,73 | 9,7 | 14,8 | 19,4 | 29,5 | 1,0 | 0,8 | 1,3 | 0,8 | 0,35 | 0,54 | 0,71 | 0,15 | 0,8 | |
| 2664 | 563 | 8.854 | 6.009 | 2.918 | 2.146 | 63.350 | 0,24 | 0,36 | 0,74 | 7,2 | 10,5 | 21,7 | 32,9 | 1,0 | 0,7 | 1,3 | 0,8 | 0,24 | 0,36 | 0,75 | 0,17 | 0,8 | |
| 2665 | 489 | 12.748 | 8.275 | 5.366 | 4.016 | 113.652 | 0,32 | 0,49 | 0,75 | 8,9 | 13,7 | 21,2 | 29,0 | 1,0 | 0,7 | 1,3 | 0,8 | 0,31 | 0,47 | 0,73 | 0,16 | 0,8 | |
| 2665a | | | | 2.850 | 2.112 | 52.800 | | | 0,74 | | | | 18,5 | 25,0 | 1,0 | 0,7 | 1,3 | 0,8 | | | 0,73 | 0,16 | 0,8 |
| 2665b | | | | 2.516 | 1.904 | 60.852 | | | 0,76 | | | | 24,2 | 30,0 | 1,0 | 0,7 | 1,3 | 0,8 | | | 0,74 | 0,16 | 0,8 |
| 3602 | 106 | 6.835 | 4.691 | 2.373 | 1.822 | 54.509 | 0,27 | 0,39 | 0,77 | 8,0 | 11,6 | 23,0 | 30,3 | 1,1 | 1,3 | 0,8 | 0,8 | 0,30 | 0,44 | 0,87 | 0,17 | 0,9 | |
| 3603 | 131 | 7.071 | 4.672 | 3.602 | 2.458 | 68.540 | 0,35 | 0,53 | 0,68 | 9,7 | 14,7 | 19,0 | 32,3 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 0,8 | 0,39 | 0,59 | 0,77 | 0,14 | 1,3 | |
| 3811 | 805 | 39.602 | 20.080 | 12.425 | 7.528 | 139.815 | 0,12 | 0,25 | 0,61 | 3,1 | 6,2 | 11,3 | 25,5 | 0,5 | 1,2 | 1,3 | 1,3 | 0,06 | 0,12 | 0,30 | 0,16 | 2,1 | |
| 3811a | | | | 8.420 | 5.383 | 70.584 | | | 0,64 | | | | 11,4 | 25,0 | 0,5 | 1,2 | 1,3 | 1,3 | | | 0,32 | 0,16 | 2,1 |
| 3811b | | | | 4.005 | 2.145 | 53.625 | | | 0,54 | | | | 13,4 | 25,0 | 0,5 | 1,2 | 1,3 | 1,3 | | | 0,27 | 0,16 | 2,1 |
| 3811c | | | | 2.601 | 2.601 | 15.606 | | | 1,00 | | | | 6,0 | 6,0 | 0,5 | 1,2 | 1,3 | 1,3 | | | 0,50 | 0,16 | 2,1 |
| | 4.718 | 182.466 | 109.811 | 66.898 | 43.915 | 1.018.331 | 0,27 | 0,42 | 0,68 | 6,7 | 10,2 | 16,6 | 27,5 | 0,9 | 1,0 | 1,1 | 1,1 | 0,9 | 0,25 | 0,38 | 0,60 | 0,17 | 1,1 |
| | Pop/Ha | 259 | 430 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |



Come descritto in precedenza, le schede presentate riassumono l'analisi svolta per ognuna delle zone scelte per l'analisi.

Lo studio fatto attraverso queste tavole è stato di fondamentale importanza per lo sviluppo del lavoro.

L'idea principale, infatti, era quella di confrontare una zona tradizionale con una zona contemporanea. Dato che non è stato possibile ottenere i dati di consumo reale per le zone di più recente costruzione, si è optato per la scelta di una zona tradizionale, in particolare tra le quattro è stata scelta la zona di Crocetta.

3.3 Classificazione e distribuzione di frequenza dei parametri urbani

In precedenza è stato sviluppato il calcolo dei parametri urbani relativi ad ogni sezione di censimento della città di Torino. Per analizzare quali sono i valori che si ripetono con maggiore frequenza e come si distribuiscono tali valori nella città si è fatto ricorso all'elaborazione delle curve di frequenza. Per fare questo sono state definite quattro classi per ogni parametro e, sempre per ogni parametro, è stata disegnata la curva di distribuzione di frequenza.

Le classi sono state definite prendendo in considerazione la media di ogni parametro per l'intera città e la deviazione standard. Gli intervalli di valori delle classi sono stati definiti come descritto nella Tabella 19:

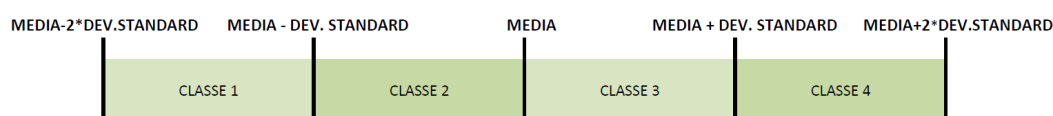


Tabella 19. Definizione delle classi dei valori dei parametri urbani.

La curva di distribuzione di frequenza ha sull'asse "y" i valori del parametro ordinati dal più piccolo al più grande e sull'asse delle "x" i dati distribuiti dallo 0% fino al 100%.

Di seguito verranno riportati, per ogni parametro, le classi dei valori e la distribuzione di frequenza. Dato che, ai fini della nostra analisi, sono state scelte tre zone di Torino caratterizzate da epoche di costruzione recenti (anni '90 in poi) e quattro da un'epoca precedente, vi saranno, per ogni parametro, una curva di distribuzione di frequenza relativa alle zone meno recenti e una relativa a quelle più recenti. Si è deciso di effettuare questa scelta per riportare i dati separatamente in modo da analizzare al meglio le differenze tra un tessuto urbano contemporaneo da uno più tradizionale.

Insieme con grafico viene presentata anche una tabella riassuntiva dei dati calcolati per l'intera città di Torino. Si specificano le classi risultanti e il numero di sezioni di censimento (SC) che ricadono in ogni classe e la percentuale corrispondente.

Distribuzione di frequenza del BUILDING COVERAGE RATIO (BCR)

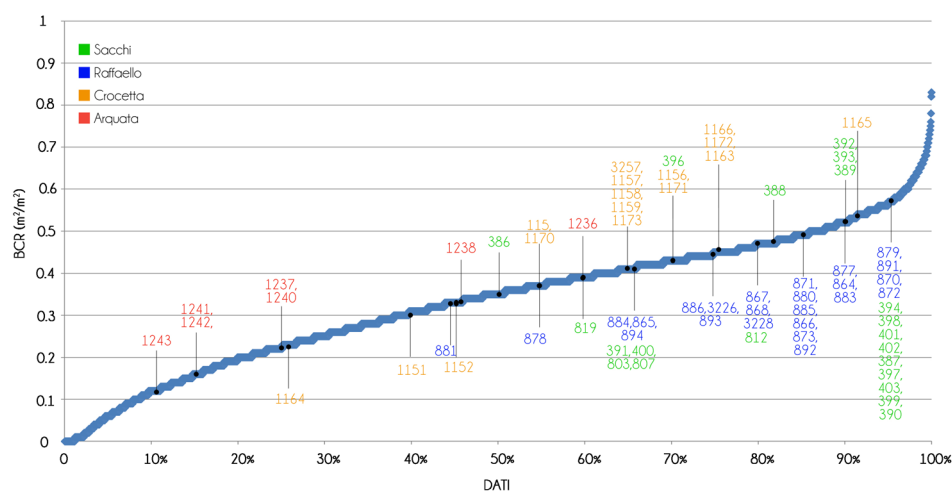


Grafico 1 - Curva di distribuzione di frequenza per le zone di Arquata, Raffaello, Crocetta e Sacchi. I numeri indicano la sezione di censimento (SC).

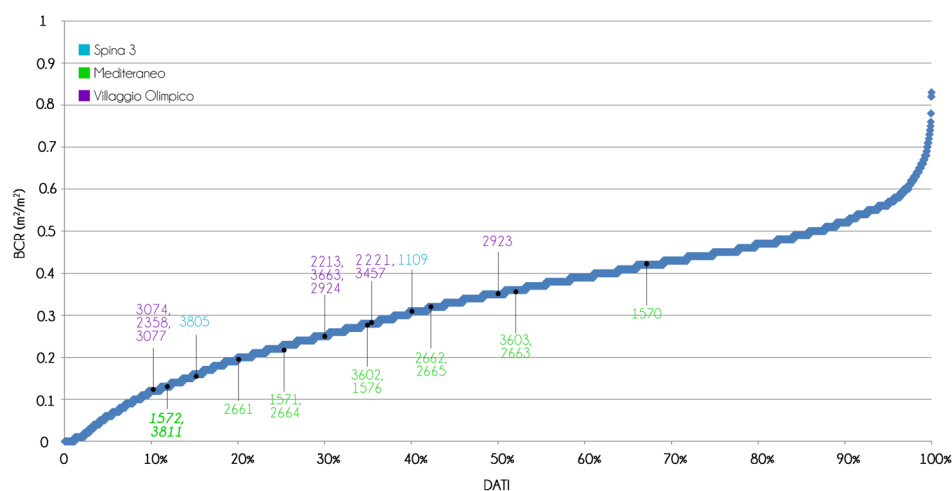


Grafico 2 - Curva di distribuzione di frequenza per le zone di Mediterraneo, Spina 3 e Villaggio Olimpico. I numeri indicano la sezione di censimento (SC).

| BCR (m ² /m ²) | CLASSE 1 | CLASSE 2 | CLASSE 3 | CLASSE 4 |
|--|------------|-------------------|-------------------|------------|
| | BCR ≤ 0,18 | 0,18 < BCR ≤ 0,34 | 0,34 < BCR ≤ 0,49 | BCR > 0,49 |
| Num. SC | 687 | 1115 | 1405 | 529 |
| % | 18 | 30 | 38 | 14 |

Tabella 20 - Tabella riassuntiva per il parametro BCR, calcolato per l'intera città di Torino.

Distribuzione di frequenza del BUILDING DENSITY (BD)

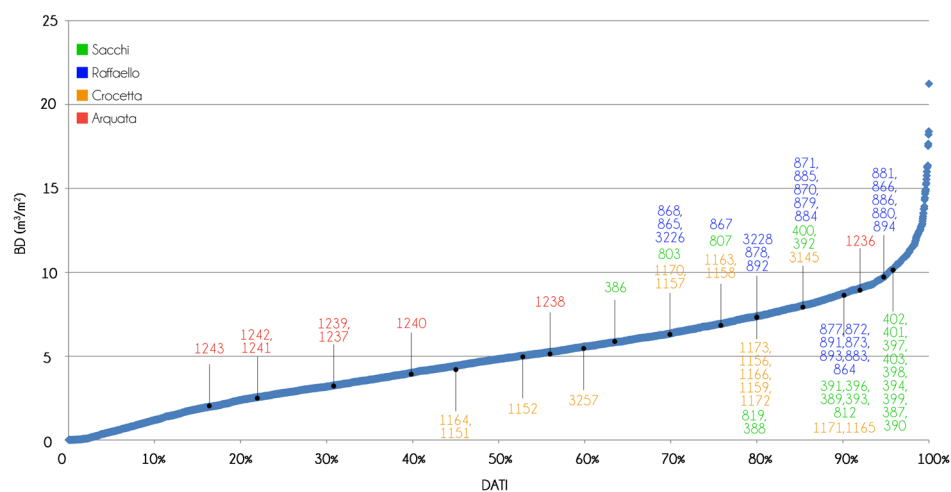


Grafico 3 - Curva di distribuzione di frequenza per le zone di Arquata, Raffaello, Crocetta e Sacchi. I numeri indicano la sezione di censimento (SC).

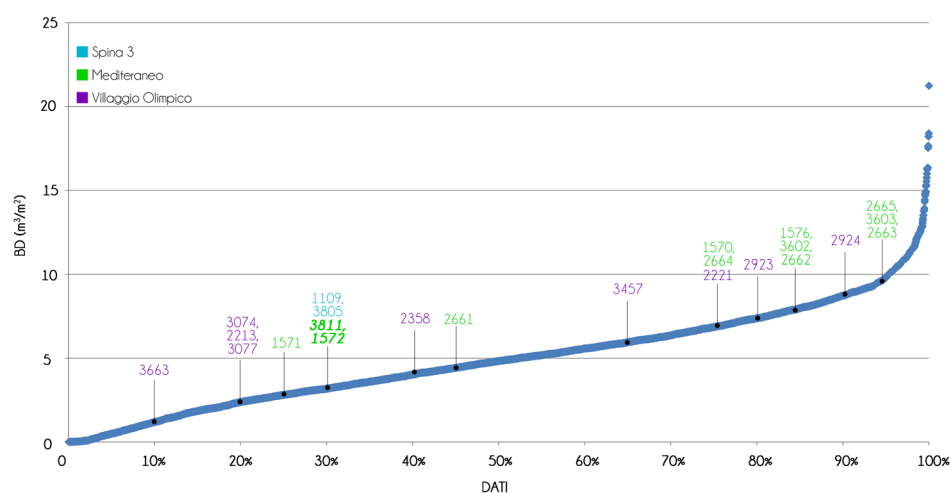


Grafico 4 - Curva di distribuzione di frequenza per le zone di Mediterraneo, Spina 3 e Villaggio Olimpico. I numeri indicano la sezione di censimento (SC).

| BD (m³/m²) | CLASSE 1 BD≤2,0 | CLASSE 2 2,0<BD≤5,0 | CLASSE 3 5,0<BD≤7,9 | CLASSE 4 Bd>7,9 |
|---------------|--------------------|------------------------|------------------------|--------------------|
| Num. SC | 644 | 1.337 | 1.186 | 569 |
| % | 17 | 36 | 32 | 15 |

Tabella 21. Tabella riassuntiva per il parametro BD, calcolato per l'intera città di Torino.

Distribuzione di frequenza del BUILDING HEIGHT (BH)

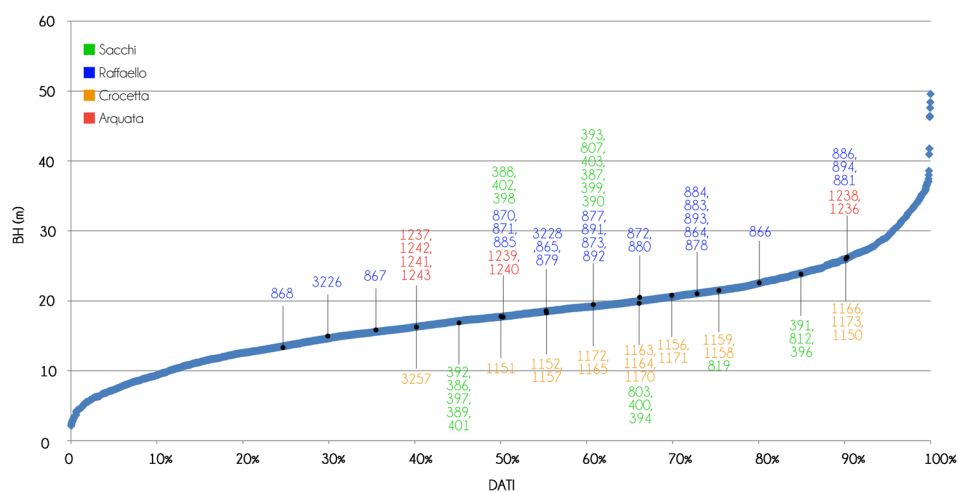


Grafico 5 - Curva di distribuzione di frequenza per le zone di Arquata, Raffaello, Crocetta e Sacchi. I numeri indicano la sezione di censimento (SC).

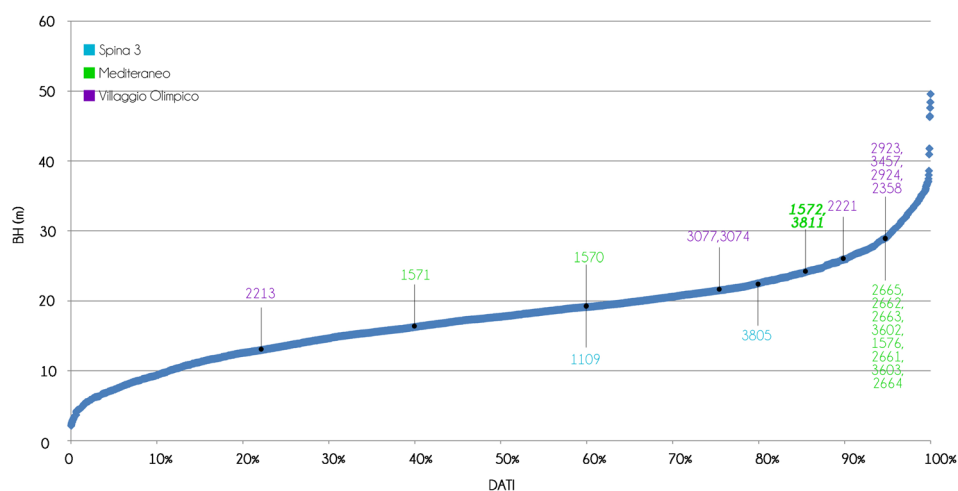


Grafico 6 - Curva di distribuzione di frequenza per le zone di Mediterraneo, Spina 3 e Villaggio Olimpico. I numeri indicano la sezione di censimento (SC).

| BH (m) | CLASSE 1 | CLASSE 2 | CLASSE 3 | CLASSE 4 |
|-----------|----------------|-----------------------|-----------------------|-------------|
| | $BH \leq 11,3$ | $11,4 < BH \leq 17,8$ | $17,9 < BH \leq 24,3$ | $BH > 24,4$ |
| Num. SC | 571 | 1.328 | 1.315 | 522 |
| % | 15 | 36 | 35 | 14 |

Tabella 22 - Tabella riassuntiva per il parametro BH, calcolato per l'intera città di Torino.

Distribuzione di frequenza dell'ASPECT RATIO (HW)

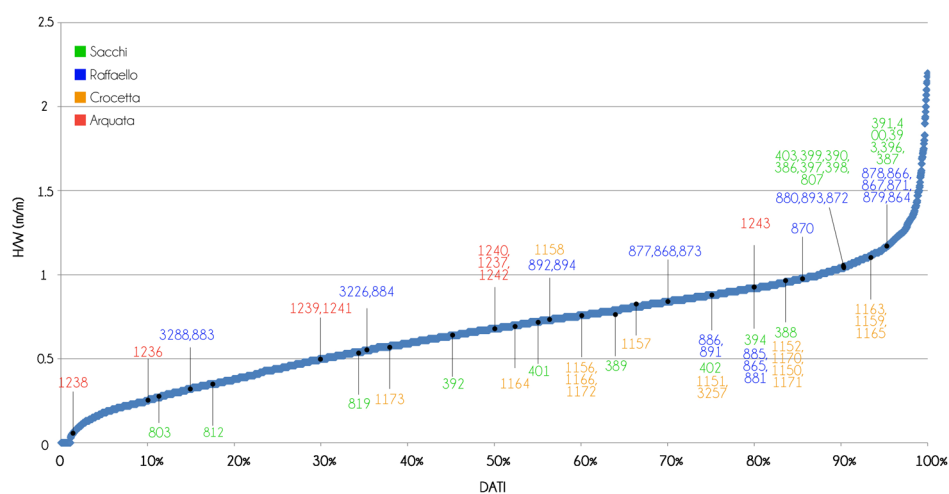


Grafico 7 - Curva di distribuzione di frequenza per le zone di Arquata, Raffaello, Crocetta e Sacchi. I numeri indicano la sezione di censimento (SC).

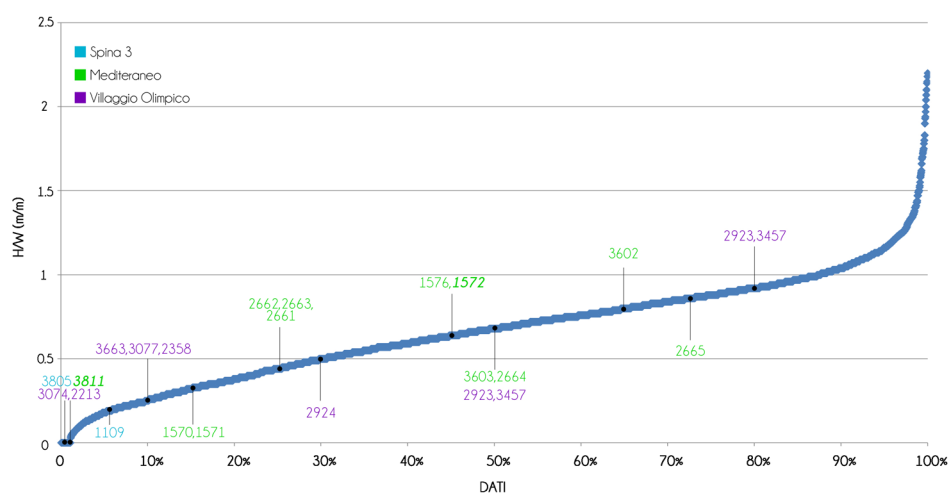


Grafico 8 - Curva di distribuzione di frequenza per le zone di Mediterraneo, Spina 3 e Villaggio Olimpico. I numeri indicano la sezione di censimento (SC).

| HW (-) | CLASSE 1 | CLASSE 2 | CLASSE 3 | CLASSE 4 |
|-----------|---------------|---------------------|---------------------|------------|
| | $HW \leq 0,3$ | $0,3 < HW \leq 0,7$ | $0,7 < HW \leq 1,0$ | $HW > 1,0$ |
| Num. SC | 633 | 1.536 | 1.207 | 360 |
| % | 17 | 41 | 32 | 10 |

Tabella 23 - Tabella riassuntiva per il parametro HW, calcolato per l'intera città di Torino.

Distribuzione di frequenza dell'H/Hav

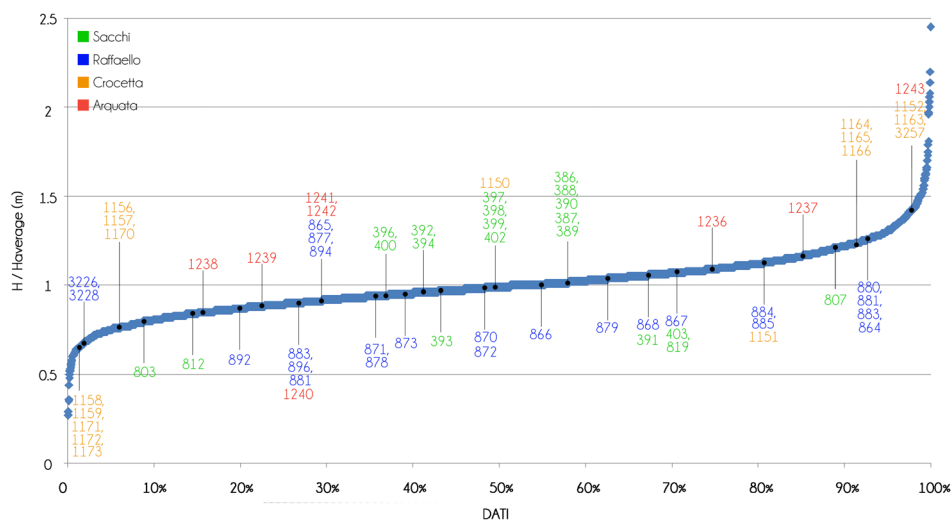


Grafico 9 - Curva di distribuzione di frequenza per le zone di Arquata, Raffaello, Crocetta e Sacchi. I numeri indicano la sezione di censimento (SC).

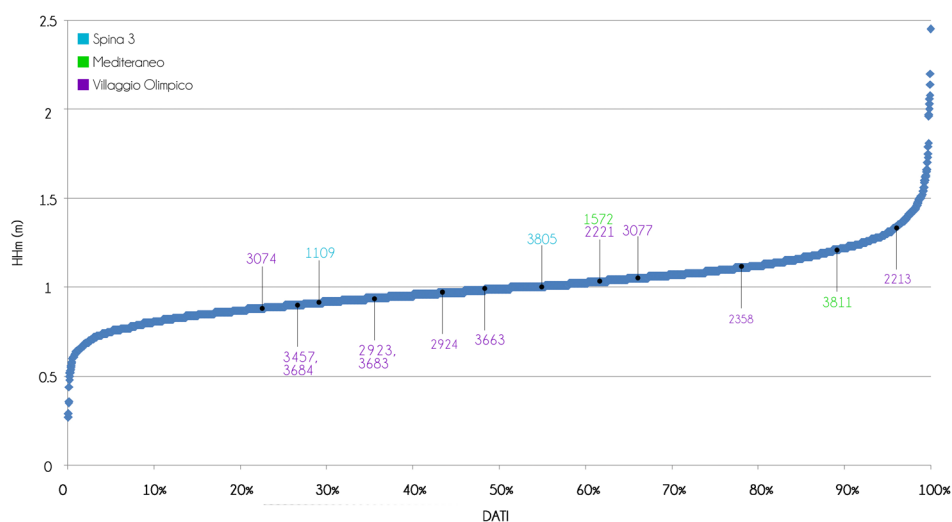


Grafico 10 - Curva di distribuzione di frequenza per le zone di Mediterraneo, Spina 3 e Villaggio Olimpico. I numeri indicano la sezione di censimento (SC).

| HHm (-) | CLASSE 1 | CLASSE 2 | CLASSE 3 | CLASSE 4 |
|------------|-----------------|------------------------|------------------------|--------------|
| | $HHm \leq 0,83$ | $0,83 < HHm \leq 1,00$ | $1,00 < HHm \leq 1,18$ | $HHm > 1,18$ |
| Num. SC | 455 | 1.612 | 1.189 | 480 |
| % | 12 | 43 | 32 | 13 |

Tabella 24 - Tabella riassuntiva per il parametro HHm, calcolato per l'intera città di Torino.

Distribuzione di frequenza del BUILDING ORIENTATION (BO)

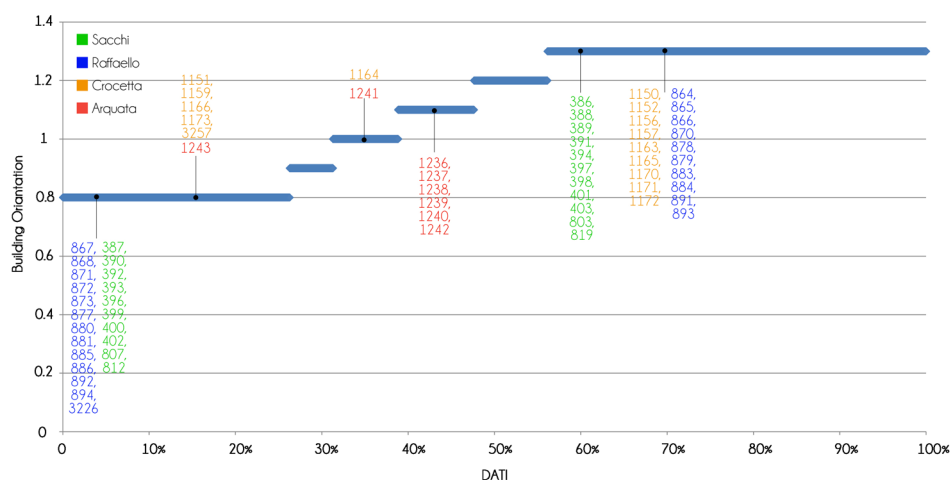


Grafico 11 - Curva di distribuzione di frequenza per le zone di Arquata, Raffaello, Crocetta e Sacchi. I numeri indicano la sezione di censimento (SC).

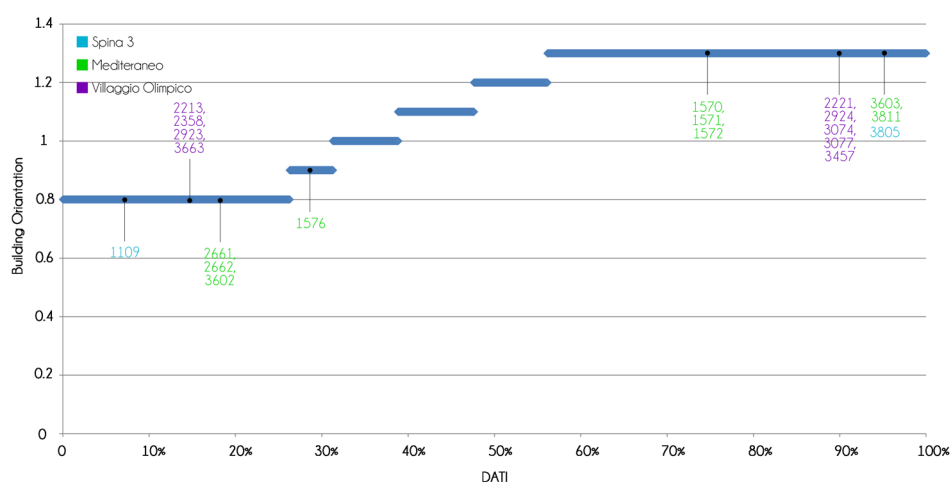


Grafico 12 - Curva di distribuzione di frequenza per le zone di Mediterraneo, Spina 3 e Villaggio Olimpico. I numeri indicano la sezione di censimento (SC).

| BO dal Nord (-) | | Valore BO | Num. SC | % |
|-----------------|------------------|-----------|---------|----|
| 60°/90° | Nord-Est/Est | 1,2 | 318 | 9 |
| 30°/60° | Nord-Est | 1,0 | 282 | 8 |
| 0°/30° | Nord/Nord-Est | 0,8 | 982 | 26 |
| -60°/-90° | Nord-Ovest/Ovest | 1,3 | 1.639 | 44 |
| -30°/-60° | Nord-Ovest | 1,1 | 328 | 9 |
| -30°/0° | Nord/Nord-Ovest | 0,9 | 187 | 5 |

Tabella 25 - Tabella riassuntiva per il parametro BO, calcolato per l'intera città di Torino.

Distribuzione di frequenza del MAIN ORIENTATION OF STREET (MOS)

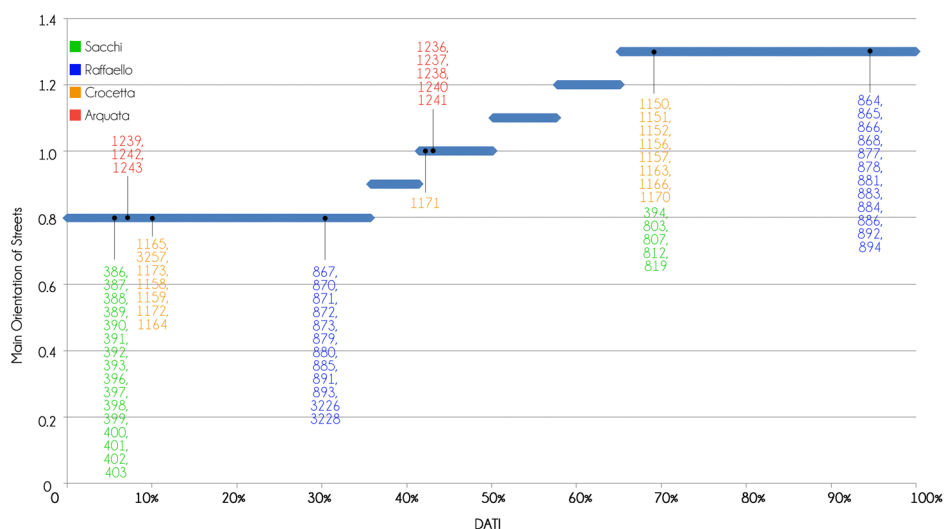


Grafico 13 - Curva di distribuzione di frequenza per le zone di Arquata, Raffaello, Crocetta e Sacchi. I numeri indicano la sezione di censimento (SC).

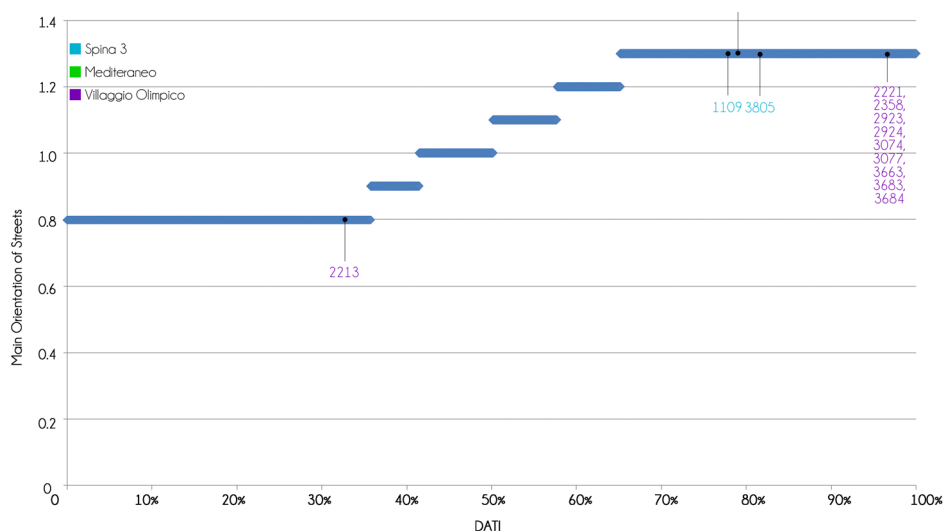


Grafico 14 - Curva di distribuzione di frequenza per le zone di Mediterraneo, Spina 3 e Villaggio Olimpico. I numeri indicano la sezione di censimento (SC).

| MOS dal Nord (-) | | Valore BO | Num. SC | % |
|------------------|------------------|-----------|---------|----|
| 60°/90° | Nord-Est/Est | 1,2 | 279 | 7 |
| 30°/60° | Nord-Est | 1,0 | 325 | 9 |
| 0°/30° | Nord/Nord-Est | 0,8 | 1.335 | 36 |
| -60°/-90° | Nord-Ovest/Ovest | 1,3 | 1.302 | 35 |
| -30°/-60° | Nord-Ovest | 1,1 | 281 | 8 |
| -30°/0° | Nord/Nord-Ovest | 0,9 | 214 | 6 |

Tabella 26 Tabella riassuntiva per il parametro MOS, calcolato per l'intera città di Torino.

Distribuzione di frequenza dell'ALBEDO (A)

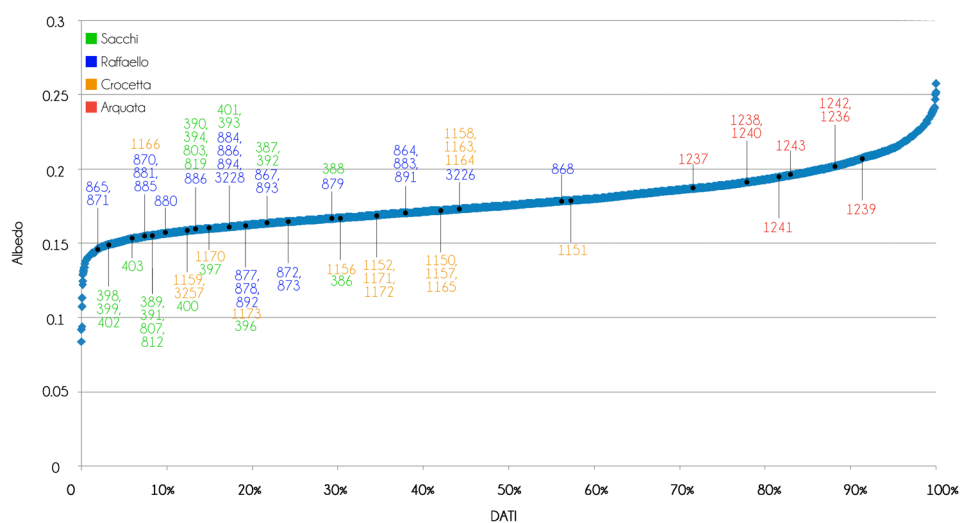


Grafico 15 - Curva di distribuzione di frequenza per le zone di Arquata, Raffaello, Crocetta e Sacchi. I numeri indicano la sezione di censimento (SC).

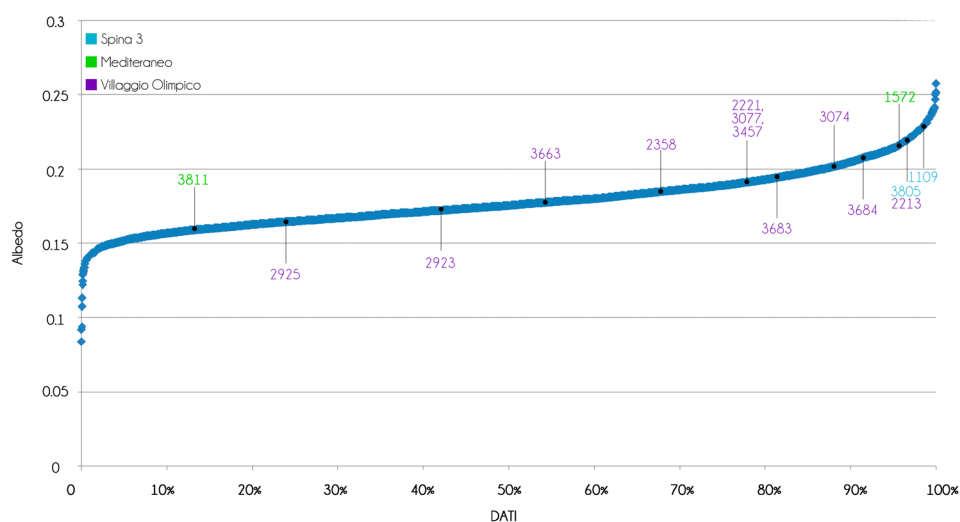


Grafico 16 - Curva di distribuzione di frequenza per le zone di Mediterraneo, Spina 3 e Villaggio Olimpico. I numeri indicano la sezione di censimento (SC).

| A (-) | CLASSE 1 | CLASSE 2 | CLASSE 3 | CLASSE 4 |
|----------|---------------|----------------------|----------------------|------------|
| | $A \leq 0,16$ | $0,16 < A \leq 0,18$ | $0,18 < A \leq 0,20$ | $A > 0,20$ |
| Num. SC | 492 | 1.595 | 1.494 | 155 |
| % | 13 | 43 | 40 | 4 |

Tabella 27 - Tabella riassuntiva per il parametro Albedo, calcolato per l'intera città di Torino.

Distribuzione di frequenza dell'URBAN MORPHOLOGY (UM)

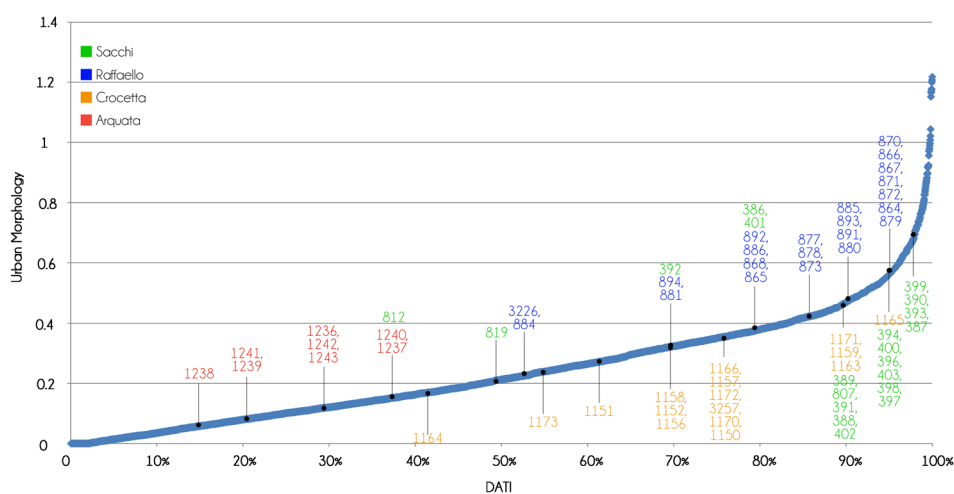


Grafico 17 - Curva di distribuzione di frequenza per le zone di Arquata, Raffaello, Crocetta e Sacchi. I numeri indicano la sezione di censimento (SC).

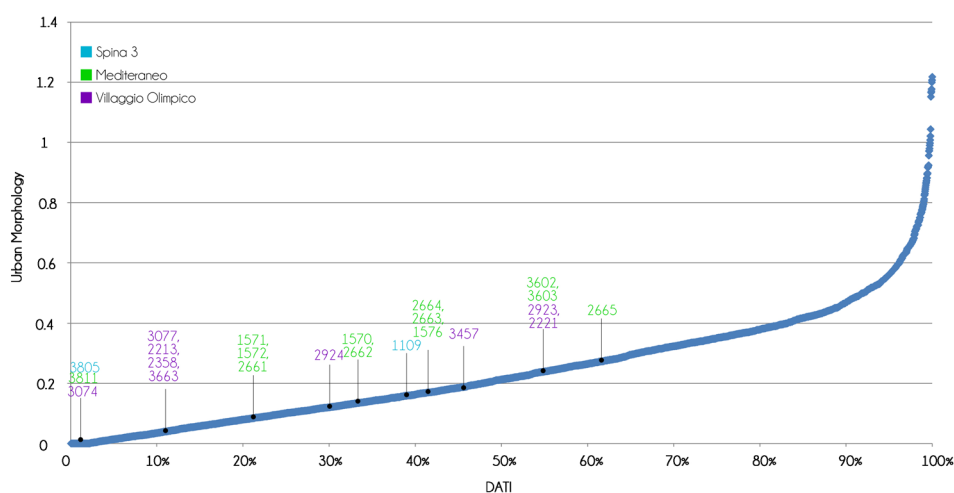


Grafico 18. Curva di distribuzione di frequenza per le zone di Mediterraneo, Spina 3 e Villaggio Olimpico. I numeri indicano la sezione di censimento (SC).

| UM (-) | CLASSE 1 | CLASSE 2 | CLASSE 3 | CLASSE 4 |
|-----------|----------------|-----------------------|-----------------------|-------------|
| | $UM \leq 0,06$ | $0,06 < UM \leq 0,24$ | $0,24 < UM \leq 0,42$ | $UM > 0,42$ |
| Num. SC | 628 | 1.470 | 1.118 | 520 |
| % | 17 | 39 | 30 | 14 |

Tabella 28 - Tabella riassuntiva per il parametro UM, calcolato per l'intera città di Torino.

Distribuzione di frequenza del SOLAR FACTOR (Sf)

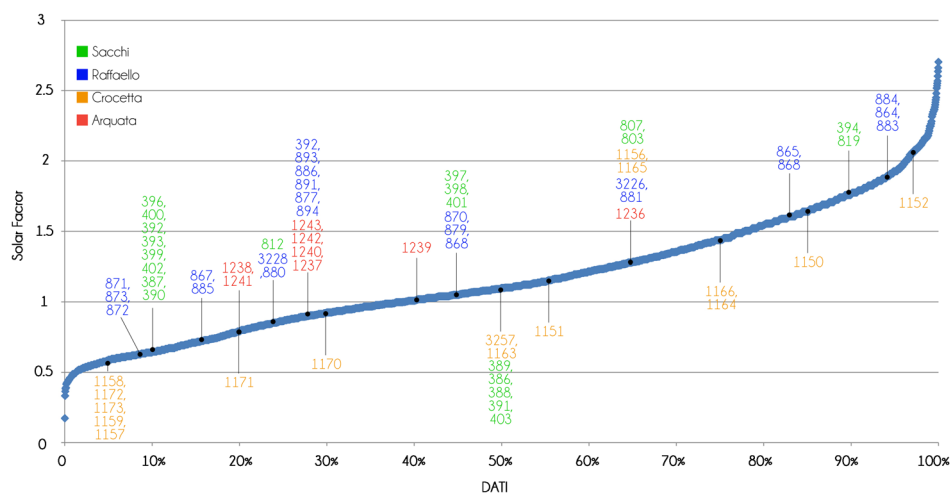


Grafico 19 - Curva di distribuzione di frequenza per le zone di Arquata, Raffaello, Crocetta e Sacchi. I numeri indicano la sezione di censimento (SC).

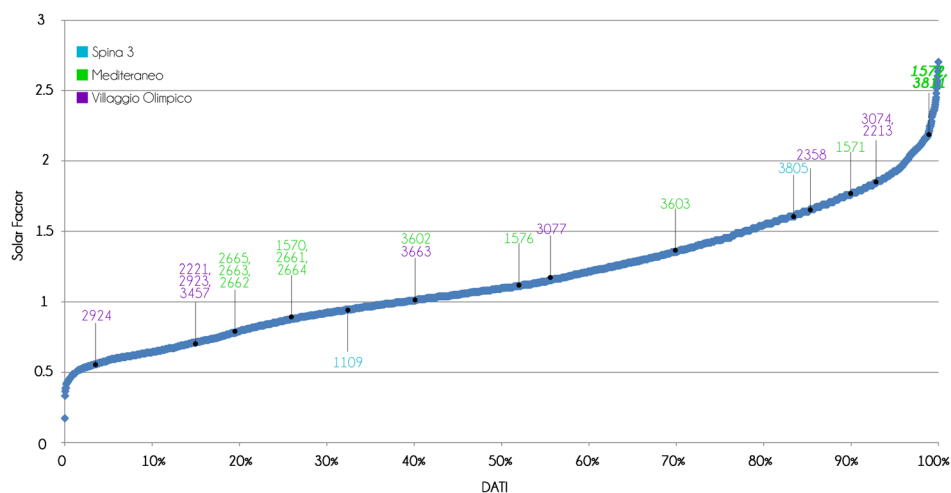


Grafico 20. Curva di distribuzione di frequenza per le zone di Mediterraneo, Spina 3 e Villaggio Olimpico. I numeri indicano la sezione di censimento (SC).

| Sf (-) | CLASSE 1 | CLASSE 2 | CLASSE 3 | CLASSE 4 |
|---------|---------------|---------------------|---------------------|------------|
| | $Sf \leq 0,7$ | $0,7 < Sf \leq 1,2$ | $1,2 < Sf \leq 1,6$ | $Sf > 1,6$ |
| Num. SC | 663 | 1.679 | 841 | 553 |
| % | 18 | 45 | 23 | 15 |

Tabella 29 - Tabella riassuntiva per il parametro Sf, calcolato per l'intera città di Torino.

Dall'analisi di questi dati è emerso che per ogni parametro, le classi prevalenti sono la seconda e la terza ovvero quelle che si avvicinano maggiormente alla media dei valori.

Le curve di distribuzione di frequenza sono state utili per capire quanto varia la forma urbana delle zone che sono state scelte per l'analisi. Per quanto riguarda il parametro del Building Coverage Ratio, circa il 70% dei dati, ovvero delle sezioni di censimento, ricade nel range che va da 0,19 a 0,49. Facendo un confronto tra le zone tradizionali e quelle contemporanee possiamo notare che, tendenzialmente, le zone nuove sono caratterizzate da valori di BCR bassi e che si discostano dai valori medi della città: questo indica che, nei nuovi modi di progettare, si predilige un tessuto urbano meno denso caratterizzato da spazi aperti comuni e spazi verdi più numerosi. Le zone di Sacchi, Raffaello e Arquata hanno valori di BCR poco comuni e si collocano agli estremi del grafico: Arquata infatti, nonostante sia caratterizzata da un'epoca di costruzione risalente agli anni 20 del secolo XX, presenta un tessuto urbano poco denso caratterizzato da grandi spazi aperti, mentre le zone di Sacchi e Raffaello hanno un BCR alto rispetto al valore medio della città. Crocetta, invece è la zona più ordinaria della città, caratterizzata da valori di BCR che si avvicinano ai valori medi di Torino.

Per quanto riguarda il Building Density la curva è più schiacciata, quindi all'interno della città vi sono valori più omogenei. L'andamento della curva in ogni caso, è simile a quella del BCR in quanto i due parametri sono direttamente collegati. Il terzo parametro analizzato è quello del Building Height (BH), ovvero dell'altezza media degli edifici in una sezione di censimento. In questo caso, nella zone tradizionali l'altezza media degli edifici si avvicina al valore medio dell'intera città, mentre nelle zone nuove il BH è più alto e supera il range di valori delle classi più comuni. I picchi del grafico corrispondono alle sezioni di censimento dove sono gli edifici più alti della città (la Mole Antoneliana, il palazzo della Rai o le torri Lavazza)

L'Aspect Ratio (HW) è un parametro che indica il rapporto tra l'altezza degli edifici e la distanza tra essi. Dall'analisi è emerso che nelle zone tradizionali, Arquata e Crocetta presentano dei valori ordinari mentre Sacchi e Raffaello hanno valori molto alti di Aspect Ratio in quanto sono caratterizzati dalla presenza di strade molto strette. Nelle zone contemporanee, i valori del rapporto H/W sono bassi in quanto gli edifici di queste zone sono molto distanti tra loro grazie alla presenza di molti spazi aperti.

Il quinto parametro analizzato è quello dell' H/Hmedia, ovvero il rapporto tra l'altezza dell'edificio e l'altezza media degli edifici intorno ad esso. In questo

caso i valori sono molto omogenei e non abbiamo una variazione significativa di valori all'interno del tessuto cittadino. I valori di questo parametro, per quanto riguarda le zone prese in considerazione, sono molto vicini ai valori medi dell'intera città, ovvero la maggior parte degli edifici ha un'altezza omogenea rispetto all'altezza degli edifici del contesto.

Il Building Orientation (BO) indica la qualità dell'orientamento degli edifici tramite 6 classi, come precedentemente descritto. Per quanto riguarda l'intera città di Torino la classe prevalente è quella di 1.3, questo indica che la maggior parte delle sezioni di censimento della città hanno un orientamento ottimale ovvero quello est-ovest. La seconda classe è quella 0.8 che indica il fatto che in Torino gli edifici sono disposti "a corte". Le zone di Crocetta, Sacchi e Raffaello hanno l'orientamento tipico dell'intera città di Torino mentre la zona di Arquata ha un orientamento anomalo pari a 1.1. Le sezioni di censimento delle zone contemporanee hanno, anch'esse, sono caratterizzate da valori di BO di 1.3 e 0.8.

Il discorso fatto per l'orientamento degli edifici è simile a quello del Main Orientation of Street (MOS) in quanto l'ingombro degli edifici definisce l'andamento delle strade.

I valori di Albedo sono molto simili nelle sezioni di censimento della città di Torino in quanto i materiali utilizzati per le coperture e la pavimentazione sono i medesimi per tutta la città. Per quanto riguarda le zone nuove, ovvero quelle di Mediterraneo, Spina 3 e Villaggio olimpico, il grafico non è significativo in quanto i dati Aster utilizzati per il calcolo dell'Albedo sono del 2004, mentre le zone prese in considerazioni sono state ultimate dopo il 2005. Per le zone tradizionali tutti i valori ricadono nel range delle classi più comuni della città di Torino, eccezion fatta per la zona di Arquata caratterizzata da ampi spazi verdi con valori di Albedo più alti.

Infine, l'Urban Morphology e il Solar factor sono parametri indiretti, ossia non sono valori misurati ma sono stati calcolati indirettamente tramite delle equazioni di cui si è parlato in precedenza. L'andamento delle curve di distribuzione quindi, è simile quello dei parametri ai quali sono direttamente collerati.

4. LA CREAZIONE DEL MODELLO TERMICO E LE SIMULAZIONI ENERGETICHE

4.1 Il software CitySim Pro

Come descritto in precedenza, la letteratura a riguardo del tema affrontato in questa tesi (come la forma urbana influisce sul consumo per la climatizzazione degli edifici) è di recente sviluppo ed è strettamente collegata alla sviluppo di nuovi software in grado di tenere conto di tutte le specificità e le complessità di un tessuto urbano (Rode e al. 2013).

Ai fini della nostra analisi è stato fondamentale scegliere un software di calcolo appropriato. Sono state analizzate quindi le caratteristiche di tre software: Energy Pro Forma, UMI e CitySim Pro.

Energy Proforma nasce da un'indagine pluriennale del MIT in collaborazione con l'Tsinghua University, la Shandong University e la Beijing Normal University sulla progettazione urbana di quartieri e sulla valutazione del loro consumo. Energy Proforma (versione 3.0) è uno strumento per la valutazione rapida del rendimento energetico del quartiere: permette di esplorare e valutare istantaneamente le relazioni tra la forma urbana e l'energia necessaria nell'area analizzata, così da permettere un confronto interattivo per valutare i costi, il ciclo di vita e gli indicatori del piano regolatore. L'interfaccia di Energy Proforma si presenta come una pagina web disponibile sui principali browser. Il procedimento per svolgere l'analisi energetica parte da una semplice modellazione di volumi su Google SketchUp, la quale viene successivamente caricata all'interno del programma. Questo, attraverso un modello di regressione lineare restituisce una serie di risultati in tempo reale, modificabili anche in un secondo tempo al fine di giungere ad una migliore soluzione energetica al momento della progettazione.

Il secondo software analizzato è UMI 2.0, rilasciato dal Sustainable Design Lab, presso Massachusetts Institute of Technology (con il supporto del National Science Foundation EFRI_SEED project, il MIT Energy Initiative, il Kuwait-MIT Center, il Center for Complex Engineering Systems ed infine il Transsolar Climate Engineering and United Technologies Corporation). Viene utilizzato da

architetti e urbanisti al fine di valutare il consumo di energia operativa e interiorizzata, dalla mobilità pedonale e veicolare, e dal potenziale solare dei quartieri urbani.

Il programma lavora all'interno di Rhinoceros e Grasshopper, leader nel settore del design urbano e dell'architettura, che permettono una modellazione semplice ottimale e rapida. UMI 2.0 È un plug-in inserito all'interno di Rhinoceros composto da quattro icone: "Project", "Building settings", "Simulate" e "Results" che permettono di scegliere il file climatico, assegnare le caratteristiche agli edifici, lanciare le simulazioni energetiche e ottenere i risultati.

L'ultimo programma analizzato è quello che alla fine è stato scelto per lo sviluppo del lavoro, anche a seguito di una collaborazione con gli stessi sviluppatori del software. CitySimPro è un programma sviluppato dal Laboratorio di Energia Solare e Fisica dell'edificio (LESO-PB) presso l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, e portato avanti dalla società svizzera Kaemco, che fornisce consulenze nel settore dell'energia e della fisica urbana.

Il software è stato concepito per supportare la progettazione sostenibile degli insediamenti urbani e l'ottimizzazione dei flussi delle risorse urbane. Questa versione si focalizza sulla simulazione dei flussi di energia che interessano gli edifici ma sono già state avviate ricerche per il calcolo dell'embodied energy dei materiali, i flussi di acqua e rifiuti e le interrelazioni tra questi flussi.

CitySimPro è basato sul linguaggio di programmazione Java con un'interfaccia grafica (Graphical User Interface anche GUI) che permette all'utente di interagire con la macchina controllando oggetti grafici convenzionali (pulsanti, campi testo). L'utilizzo del software è simulare e ottimizzare i flussi di energia relativi all'edificio, secondo quattro fasi fondamentali:

- La definizione del sito e i dati climatici associati.
- La scelta e gli aggiustamenti dei dati di default per i tipi e le categorie di età degli edifici da studiare.
- La definizione della geometria degli edifici, degli impianti di condizionamento, e degli attributi degli edifici.
- Controllo dei dati in formato XML inviati dall'interfaccia GUI verso il software C++ per la simulazione dei flussi di dati, che arrivano dall'oggetto di studio con cadenza oraria.

La scala dell'analisi può variare da pochi edifici al quartiere fino ad un'intera città ma, in ogni caso, il funzionamento alla base della modellazione e i dati necessari sono sempre simili.

Il funzionamento di CitySimPro ha alla base tre sistemi chiave:

- Il modello termico.
- Il modello radiativo.
- Il modello comportamentale.

Il modello termico si basa sull'analogia con un circuito elettrico; più specificatamente una rete elettrica resistenza-capacità (RC). In questo caso, un muro può essere rappresentato da uno o più punti corrispondenti. Il flusso di calore tra il muro e l'aria esterna può essere rappresentato come una corrente elettrica che passa attraverso una resistenza posta tra i due nodi corrispondenti e l'inerzia del muro può essere rappresentata con una capacità collegata a uno dei nodi di temperatura. Nel modello termico mono-zona di Kaempfer e Robinson (Kaempfer e Robinson, 2007) vengono definiti cinque nodi: T_{ext} , T_{os} , T_w , T_{is} , T_a . Il T_{ext} rappresenta il nodo relativo alla temperatura dell'aria esterna che è connesso con il nodo della temperatura della superficie esterna del muro chiamata T_{os} , attraverso uno strato limitare esterno caratterizzato da una conduttanza K_e , la quale varia a seconda della velocità e della direzione del vento. La temperatura esterna del muro, che è influenzata anche dal flusso di calore dovuto dalle shortwave e dalle longwave, è connesso a un nodo del muro T_w di capacità C_w , attraverso una conduttanza definita dalla parte esterna del muro modello. La stessa situazione si rispecchia nel lato interno del muro, quindi abbiamo delle connessioni simili tra un nodo di temperatura interna T_a di capacità C_i attraverso un nodo di temperatura superficiale interna T_{is} . T_a tiene conto degli apporti di calore dovuti dalle radiazioni a onde corte assorbite, dagli occupanti e dagli sistemi di condizionamento dell'aria (Fig. 38).

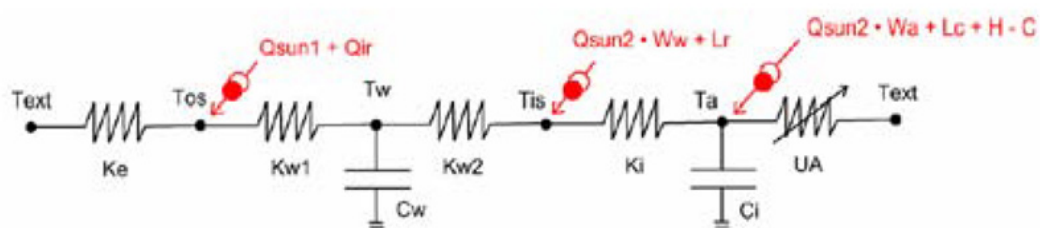


Figura 38 - Modulo del circuito elettrico del modello termico di CitySim.
Fonte: immagine adattata da Robinson D. et al., 2009,

Per un intero edificio i nodi di temperatura dell'aria di ogni zona sono connessi tra di loro attraverso le conduttanze dei muri separatori. In questo caso, il calcolo è molto più complesso ed è stato adottato un modello matriciale differenziale dell'andamento dinamico della temperatura (e scambio di essa) all'interno degli strati del muro.

Il modello radiativo si basa sul Simplified Radiosity Algorithm (SRA) il quale è uti-

lizzato per calcolare l'irradianza incidente delle onde corte e delle onde lunghe sulle superfici che definiscono la scena. Tale algoritmo prende in considerazione lo Sky View Factor di ogni superficie, l'angolo d'incidenza della radiazione e l'irradianza.

Il modello comportamentale, infine, si basa su un algoritmo che prende in considerazione una serie di parametri che dovrebbero definire il comportamento degli occupanti di un edificio, ovvero:

- Presenza: gli apporti interni dovuti al metabolismo e agli agenti inquinanti.
- Finestre: l'infiltrazione d'aria.
- Oscuranti: irradianza diretta e diffusa.

Il procedimento per la realizzazione del modello verrà descritto in maniera approfondita nel paragrafo seguente.

È interessante notare che CitySim Pro restituisce vari tipi di risultati. Infatti a seguito di un'unica simulazione energetica (di un edificio o di una parte di città) si possono ottenere output riguardanti:

- il potenziale solare per la produzione di energia elettrica;
- i consumi per riscaldamento e raffrescamento degli edifici;
- le temperature superficiali delle superfici esterne;
- l'irradianza incidente sulle superfici esterne (shortwave reflectance e longwave reflectance)

I dati di output sono relativi ad ogni ora dell'anno, il che vuol dire che si tratta sempre di simulazioni dinamiche che tengono conto della variazione di temperatura oraria dell'ambiente esterno. I risultati vengono restituiti in forma di immagini correlate dalla relativa legenda e in forma di un file di testo editabile su excel.

Infine, è giusto ricordare che CitySim Pro, così come Energy Proforma e UMI sono software in via di sviluppo che devono perfezionarsi e che sono continuamente aggiornati dagli sviluppatori.

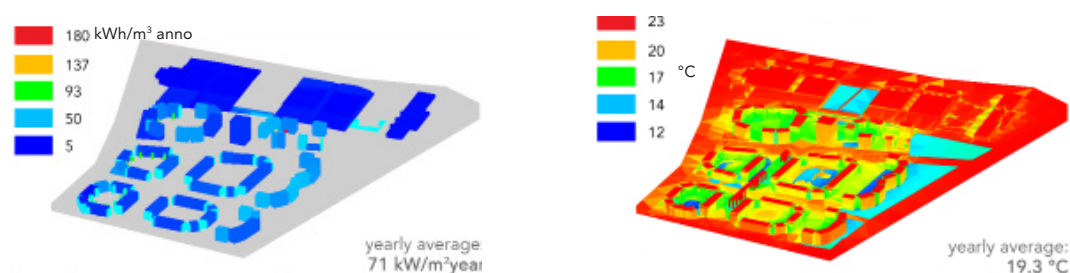


Figura 39 - Esempi della restituzione grafica dei risultati del software CitySimPro. A sinistra un esempio della determinazione dei consumi per riscaldamento, a destra la determinazione delle temperature superficiali.

4.2 La creazione del modello termico

4.2.1 Il file climatico

Il software CitySimPro necessita di un file climatico con estensione .cli per effettuare le simulazioni dinamiche durante il corso dell'anno. Il suddetto file viene generato da METEONORM, un programma capace di calcolare la temperatura dell'aria, l'irradiazione solare, la velocità del vento, riferita ad ogni ora dell'anno.

Il file climatico è un file di testo che può essere aperto, e quindi modificato, tramite Excel. Nel nostro caso, data la disponibilità di dati climatici misurati dalle stazioni meteo di Torino, il file .cli è stato modificato in base a questi dati.

Di seguito verrà spiegato nel dettaglio il file climatico e la procedura adottata per modificare le temperature dell'aria.

Il programma CitySimPro utilizza diversi file climatici a seconda della città nella quale si vuole fare la simulazione. Tali file sono generati da METEONORM, ovvero un programma capace di calcolare, a seconda della posizione geografica desiderata, una serie di parametri meteorologici (Tab. 30) per ogni ora dell'anno.

I dati calcolati da METEONORM derivano da una media fatta in un determinato periodo di tempo e interpolata per diverse stazioni meteo della città di cui si vuole calcolare il file climatico. Nel caso di Torino, ad esempio, l'ultima versione di METEONORM (METEONORM 7) calcola la media dei dati in un periodo di tempo che va dal 1991 al 2010, utilizzando i dati di tre stazioni meteo di Torino.

| Parametro | Global Radiation Horizontal | Diffuse Radiation Horizontal | Temperature | Relative Humidity | Precipitation | Wind speed |
|-----------|-----------------------------|------------------------------|-------------|-------------------|---------------|------------|
| Abbrev. | Gh | Dh | Ta | RH | RR | FF |
| U.M. | kWh/m ² | kWh/m ² | °C | % | mm | m/s |

Tabella 30 - Parametri presente nel file climatico calcolato tramite METEONORM.

Fonte: METEONORM.

Il file finale generato da METEONORM è, dunque, relativo ad un "anno tipo" nel quale i parametri meteorologici sono il frutto di una media fatta in venti anni, partendo dai dati misurati da tre stazioni meteo. Tale file ha un'estensione .cli e può essere direttamente inserito dall'interfaccia di CitySimPro per effettuare la simulazione, oppure può essere aperto utilizzando Excel e subire

eventuali modifiche.

Come abbiamo visto, Il software METEONORM genera un file climatico prendendo in considerazione i dati misurati in un periodo di tempo che è molto antecedente rispetto al momento nel quale vogliamo svolgere la nostra analisi. Per ovviare questo problema e per costruire un file climatico che si avvicina maggiormente alla realtà dell'anno naturale preso in considerazione, ovvero gli anni dal 2014 al 2015, abbiamo deciso di correggere il file climatico in base ai dati di temperatura dell'aria misurati dalle stazioni meteorologiche di Torino.

Il primo passo è stato quello di georeferenziare le diverse stazioni meteo della città tramite il software GIS ArcMap 10.2 e reperire i dati misurati delle temperature medie dell'aria relative ai vari mesi degli anni dal 2012 al 2015. Nella città di Torino sono presenti otto centraline (Tab. 31 e Fig. 40) di rilevamento meteorologico gestite dall'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale (ARPA) che rilevano i dati climatici della città.

Nessuna delle stazioni meteo della città di Torino ricade nelle zone prese in considerazione per l'analisi. Per la scelta della centralina più idonea, quindi, sono stato confrontati i parametri urbani delle sezioni di censimento nelle quali vi sono le stazioni meteo e i parametri urbani delle sezioni di censimento che ricadono nelle zone prese in analisi.

| Stazione Me-teo | Circ | SC | BCR (m ² /m ²) | BD (m ³ /m ²) | BH (m) | H/Hm (m/m) | BO (-) | MOS (-) | A (-) | H/W (-) | S | UM |
|---------------------|------|------|---------------------------------------|--------------------------------------|--------|------------|--------|---------|-------|---------|-----|------|
| Via Della Consolata | 1 | 14 | 0,43 | 7,3 | 17,6 | 1,0 | 1,0 | 1,3 | 0,15 | 0,80 | 1,8 | 0,35 |
| Giardini Reali | 1 | 66 | 0,01 | 0,1 | 13,1 | 1,1 | 1,0 | 1,1 | 0,21 | 0,18 | 1,3 | 0,00 |
| Reiss Romoli | 5 | 1886 | 0,32 | 4,0 | 18,2 | 1,0 | 1,0 | 1,1 | 0,20 | 0,56 | 0,9 | 0,18 |
| Vallere SMAT | 9 | 2295 | 0,14 | 1,0 | 8,4 | 0,8 | 1,0 | 0,8 | 0,20 | 0,58 | 0,5 | 0,08 |
| Alenia | 4 | 2414 | 0,36 | 4,2 | 13,5 | 1,4 | 1,0 | 0,8 | 0,19 | 0,47 | 0,9 | 0,17 |
| Buon Pastore | 1 | 152 | 0,26 | 3,1 | 15,9 | 1,1 | 1,0 | 1,3 | 0,17 | 0,66 | 1,8 | 0,17 |
| Italgas | 7 | 960 | 0,18 | 1,3 | 9,8 | 0,9 | 1,0 | 1,3 | 0,18 | 0,19 | 1,5 | 0,03 |
| Politecnico | 1 | 797 | 0,50 | 7,1 | 17,9 | 0,9 | 1,0 | 0,8 | 0,17 | 0,54 | 0,9 | 0,21 |

Tabella 32 - parametri urbani relativi alle sezioni di censimento nelle quali vi sono le stazioni meteorologiche

| Zona | BCR (m ² /m ²) | BD (m ³ /m ²) | BH (m) | H/Hm (m/m) | BO (-) | MOS (-) | A (-) | H/W (-) | Sf | UM |
|---------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--------|------------|--------|---------|-------|---------|-----|------|
| Via Della Consolata | 0,43 | 7,3 | 17,6 | 1,0 | 1,3 | 1,3 | 0,15 | 0,80 | 1,8 | 0,35 |
| Crocetta | 0,41 | 6,9 | 20,3 | 1,0 | 1,3 | 1,3 | 0,17 | 0,90 | 1,7 | 0,4 |

Tabella 33 - confronto dei parametri urbani relativi alla sezione di censimento in cui vi è la stazione meteo di Via della consolata e i valori medi dei parametri urbani di Croce

| Bacino | Cod. Staz. | Stazione | SC | Lat. N | Lon. E | Quota (m) | Data inizio | Data fine | Indirizzo |
|--------------|------------|---------------------|------|---------|--------|-----------|-------------|------------|---------------------------------|
| Dora Riparia | S4294 | Alenia | 2414 | 45.0451 | 7.3642 | 320 | 31/05/2005 | - | Corso Marche, 41 |
| Dora Riparia | 446 | Giardini Reali | 66 | 45.0418 | 7.4123 | 239 | 05/08/2004 | - | Giardini Reali |
| Dora Riparia | S3869 | Reiss Romoli | 1886 | 45.0645 | 7.4015 | 270 | 17/12/2003 | - | Via Cardinal Massaia, 59 |
| Dora Riparia | 153 | Buon Pastore | 152 | 45.0449 | 7.4025 | 240 | 22/03/1989 | 03/08/2004 | Corso Regina Margherita 153/Bis |
| Dora Riparia | 145 | Italgas | 960 | 45.0426 | 7.4207 | 240 | 10/11/1992 | 22/03/2001 | Corso Regina Margherita 52 |
| Po | 249 | Vallere | 2295 | 45.0104 | 7.4029 | 239 | 17/05/2001 | - | Le Vallere. Vallere SMAT |
| Po | S3447 | Via della Consolata | 14 | 45.0436 | 7.4046 | 290 | 18/12/2003 | - | Via della Consolata, 10 |
| | | Politecnico | 797 | | | 251 | 01/01/2010 | | Politecnico di Torino |

Tabella 31 - Stazioni meteo di Torino.

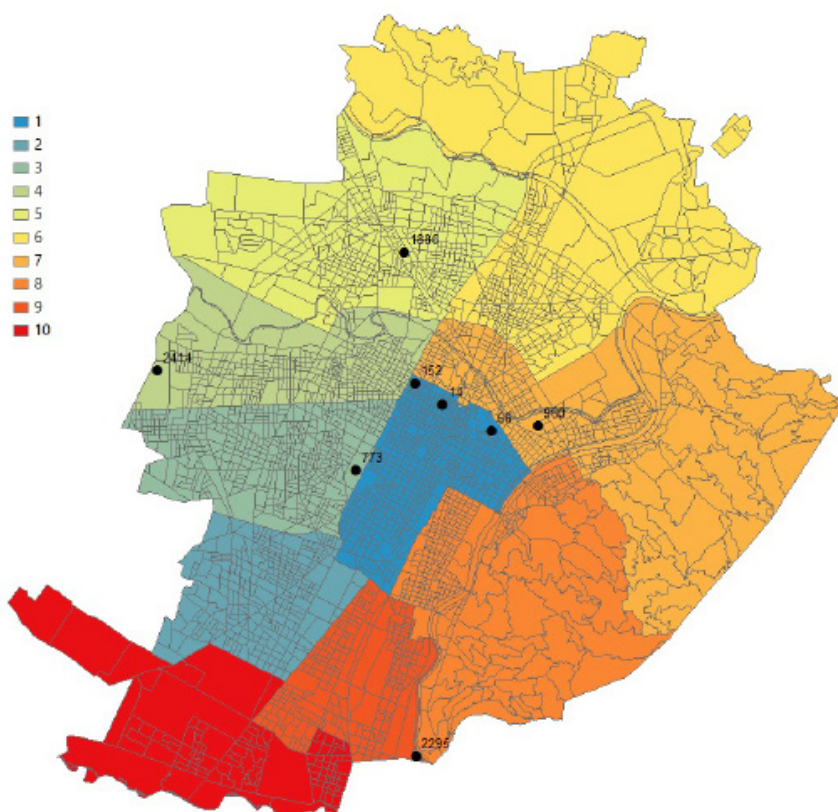


Figura 40 - Stazioni meteo. di Torino. Tematizzata per Sezione di Censimento (SC)

Dal confronto dei parametri urbani si evince che la stazione meteo di Via della Consolata è la scelta più idonea per la zona presa in analisi. I parametri urbani della sezione di censimento in cui si trova la centralina sono molto simili ai valori medi degli stessi parametri delle sezioni di censimento della zona di cui ci occupiamo. Di conseguenza, possiamo assumere che i valori di temperatura dell'aria, misurati dalla stazione meteo di Via della Consolata, siano molto simili a quelli che si hanno nella realtà in Crocetta.

Una volta individuata quale delle sette centraline prendere in considerazione, siamo andati a cambiare i valori di temperatura dell'aria nel file climatico generato da METEONORM 7. Per fare questo, siamo partiti dalle temperature medie, minime e massime mensili fornite dall'ARPA. Successivamente, attraverso la funzione "risolutore" del software Excel, si è trovato un coefficiente correttivo tale per cui le temperature orarie, del file METEONORM potessero essere modificate per raggiungere una media mensile uguale a quella dell'ARPA, così che il calcolo svolto da CitySim potesse essere calibrato sull'anno 2014/15.

| Periodo | 2014 | | | | | | 2015 | | | | | |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | Lugo | Agoo | Set | Ott | Nov | Dic | Gen | Feb | Mar | Apr | Mag | Giu |
| T _{media} (C) ARPA | 22,6 | 22,2 | 20,1 | 16,2 | 10,6 | 6,3 | 5,6 | 5,4 | 10,8 | 15,1 | 19,2 | 23,4 |
| T _{massima} (C) ARPA | 33,1 | 31,2 | 30 | 25,8 | 20,3 | 13,7 | 24,2 | 14,7 | 26,9 | 27,2 | 28,3 | 35,1 |
| T _{minima} (C) ARPA | 14,2 | 15,8 | 12 | 6 | 5,1 | -2,5 | -1,9 | -1,5 | 2,4 | 4,4 | 9,1 | 15,6 |
| T _{media} (C) METEONORM | 25,9 | 24,6 | 19,9 | 15 | 10 | 3,9 | 4,6 | 3,9 | 7,9 | 13,6 | 16 | 22,4 |
| T _{massima} (C) METEONORM | 33,7 | 33,6 | 28,5 | 25,7 | 20,6 | 14,1 | 15,2 | 15,5 | 20 | 23,5 | 26,3 | 33,4 |
| T _{minima} (C) METEONORM | 18,1 | 10,3 | 12 | 4,7 | -1 | -4,7 | -2,9 | -5,6 | -1,4 | 3,4 | 5,7 | 12 |
| fattore di correzione | 1 | 0,5 | 1 | 0,9 | 0,5 | 0,7 | 0,98 | 0,7 | 0,9 | 1 | 0,9 | 0,7 |
| T _{media} (C) corretta | 26,9 | 22,2 | 20,1 | 16,2 | 10,6 | 6,3 | 5,6 | 5,4 | 10,8 | 15,1 | 19,2 | 23,4 |
| T _{massima} (C) corretta | 34,7 | 26,3 | 28,3 | 25,8 | 15,9 | 13,7 | 16,1 | 13,8 | 20 | 25,4 | 28,3 | 31,6 |
| T _{minima} (C) corretta | 19,1 | 15,8 | 12,5 | 6,9 | 5,1 | 0 | -1,9 | -1,5 | 2,4 | 4,6 | 10,1 | 15,6 |

Tabella 34 - Temperature medie, minime e massime misurate dalla centralina di Via della Consolata, calcolate da METEONORM 7 e corrette secondo un fattore correttivo.

Una volta corrette le temperature le si sostituiscono all'interno del file .cli, prodotto da METEONORM, lasciando invariati gli altri dati che il file contiene come descritto in precedenza.

Per individuare il periodo di riscaldamento si fa riferimento ai Gradi-Giorno, parametro direttamente collegato al fabbisogno termico degli edifici. Gli impianti di riscaldamento devono compensare le dispersioni termiche, che possono avvenire attraverso l'involucro edilizio (opaco e trasparente), per ventilazione naturale e infiltrazioni d'aria. Vi sono, inoltre, fattori positivi, che riducono il consumo dell'impianto di riscaldamento, ovvero gli apporti gratuiti di calore interni ed esterni (la luce, le apparecchiature interne, la presenza degli occupanti e la radiazione solare).

Dato che il bilancio energetico di un edificio dipende dal gradiente di temperatura tra interno e esterno, sono stati introdotti i Gradi-Giorno che rappresentano la sommatoria, durante il periodo di riscaldamento, della differenza di temperatura interne e la media giornaliera esterna:

$$GG = \sum t(T_{RIF} - T_E) [GG]$$

dove:

- T_{RIF} indica la temperatura di riferimento [°C];
- T_E indica la temperatura media giornaliera esterna [°C];
- t indica il periodo di riscaldamento [giorni].

Il periodo di riscaldamento t è determinato sulla base della fascia climatica del Comune, che varia in base ai Gradi-Giorno calcolati con una temperatura di riferimento pari a 20°C.

| Fascia Climatica | GG | Ore riscal./giorno | Stagione di riscaldamento |
|------------------|-----------|--------------------|---------------------------|
| A | <600 | 6 | 1 dic - 15 mar |
| B | 600-900 | 8 | 1 dic - 31 mar |
| C | 900-1400 | 10 | 15 nov - 31 mar |
| D | 1400-2100 | 12 | 1 nov - 15 apr |
| E | 2100-3000 | 14 | 15 ott - 15 apr |
| F | >3000 | 16 | - |

Tabella 35. Zone climatiche sul territorio italiano.

Fonte: Torino, Quarto rapporto sull'energia: Programma Energetico Provinciale, 2013.

I Comuni della città di Torino appartengono delle fasce E e F, nei quali i Gradi-Giorno variano da 2478 GG a 5165 GG. La tabella mostra il periodo di

riscaldamento per i comuni di fascia E, che va dal 15 di Ottobre fino al 15 di Aprile (183 giorni), mentre per i Comuni di fascia F, non sono presenti dei limiti legislativi. Nella zona presa in esame, i Gradi-Giorno sono stati calcolati tramite la stazione meteorologica Arpa situata in via della Consolata, che risultano essere 2516 per l'anno di riscaldamento 2012/2013 (il decreto legge per la Città di Torino ne attribuisce 2617).

Il file METEONORM così come i dati delle stazioni meteo sono dati orari, ovvero che tengono conto della variazione di temperatura dell'ambiente esterno per ogni ora dell'anno. Le simulazioni fatte utilizzando tali file climatici sono quindi simulazioni dinamiche nelle quali il gradiente di temperature esterno-interno è differente per ogni ora dell'anno.

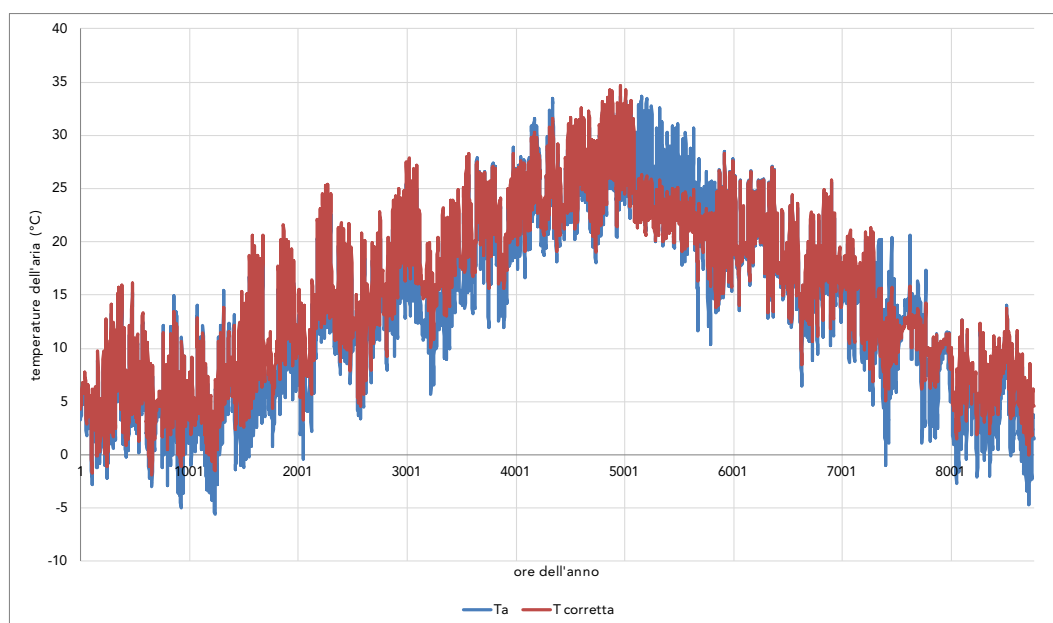


Grafico 19 - Variazione oraria delle temperature della stazione meteo della stazione di via della Consolata durante la stagione di riscaldamento 2014-2015.

4.2.2 La modellazione tridimensionale

La realizzazione del modello prevede una serie di passaggi che iniziano dalla creazione della geometria fino all'attribuzione delle caratteristiche fisico tecniche degli edifici.

Durante la prima fase, bisogna creare la geometria del modello utilizzando AutoCAD di Autodesk, partendo dalla CTR di Torino ed estrudendo le polilinee dell'altezza degli edifici. Quest'ultimi saranno, in questo modo, caratterizzati da un tetto piano, quindi bisogna fare particolare attenzione ad approssimarne l'altezza per non commettere errori nella stima del fabbisogno di energia. Il passaggio successivo è quello di eliminare dal modello tutte le pareti adiabatiche, ovvero le pareti in contatto con uno o più edifici. Questo passaggio è fondamentale in quanto CitySimPro considera tutte le superfici come disperdenti verso l'esterno. Per fare questa operazione, il modello tridimensionale è stato salvato in "dxf" e successivamente aperto con Rhinoceros. Con il comando "split" sono state rimosse le pareti a contatto ed è stato creato il terreno che è stato posizionato su un layer chiamato "GROUND". Una volta terminata la geometria, il file deve essere esportato da Rhinoceros, impostando determinate condizioni, ovvero tutte le superfici devono essere esportate come Mesh e tutte le Mesh devono essere esportate come "Facce 3d".

Una volta esportato il "dxf", tale file deve essere importato su CitySimPro e, tramite l'interfaccia del software, deve essere salvato in formato .xml. Il file generato può essere aperto e modificato tramite il programma Notepad ++. A questo punto occorre attribuire le caratteristiche fisico tecniche agli edifici. Per fare questo si possono seguire due strade:

- utilizzare l'interfaccia di CitySimPro per attribuire le caratteristiche fisiche a ciascun edificio;
- modificare il modello tramite il file di testo di estensione .xml.

Per quanto riguarda la prima metodologia, il modello deve essere importato nel software e selezionando un edificio per volta, possono essere modificate le sue caratteristiche, tramite la finestra sulla sinistra (Fig. 41).

Selezionando una porzione del terreno è possibile anche modificare la stratigrafia e il valore di albedo.

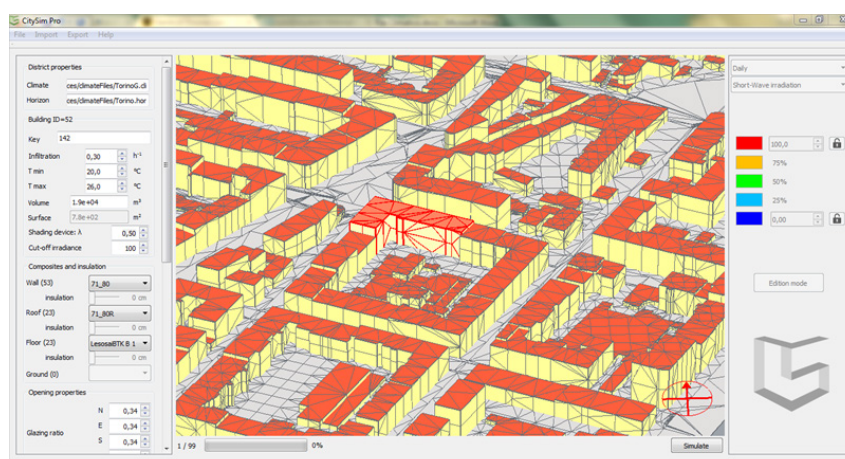


Figura 41 - L'interfaccia di CitySim: selezionando un singolo edificio è possibile attribuire le caratteristiche tramite la finestra sulla sinistra (immagine ottenuta dal software CitySim)

Per quanto riguarda la creazione di un modello complesso, ovvero un modello che prende in considerazione una porzione considerevole di città, caratterizzata dalla presenza di molti edifici, la metodologia descritta può risultare molto lunga e laboriosa. In questo caso, infatti risulta più vantaggioso lavorare con il file di testo di estensione .xml. Tale file contiene le stesse informazioni del modello tridimensionale, ma sotto forma di testo, il che rende le modifiche più veloci da effettuare.

Ogni file XML inizia con un'intestazione che contiene un'etichetta (Tag) CitySim seguita da un Tag Simulation che definisce il periodo della simulazione, e un Tag Climate che contiene un riferimento al file climatico (di cui abbiamo parlato in precedenza) (Fig. 42).

```

1  <?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>
2  <CitySim name="test">
3    <Simulation beginMonth="1" endMonth="12" beginDay="1" endDay="31"/>
4    <Climate location="C:\Simulationcitysim\climateFiles\TorinoG.cli" city="Unknown"/>

```

Figura 42. Intestazione del file xml con i Tag riferiti al periodo della simulazione (l'intero anno) e al file climatico di Torino.

Il file è caratterizzato da una sezione successiva denominata District che contiene tutte le informazioni geometriche e fisiche degli edifici e del terreno che caratterizzano il modello. Questo livello si divide in ulteriore sottolivelli, ovvero:

- Far Field Obruaction profile;
- Wall, Roof e Ground types
- Occupant Profile;
- Building;
- Shading Surface;
- Trees;
- GroundSurface.

Di seguito verrà spiegato nel dettaglio la struttura dei sottolivelli.

Il Tag Far Field Obstruction rappresenta le ostruzioni sull'orizzontale, identificandole tramite coordinate date da punti di Azimuth ed elevazione. Tali punti definiscono le ostruzioni nel campo che dipendono dalle caratteristiche geometriche del modello.

Nel Tag District ci sono tanti tag Composite quanti sono necessari per la simulazione. Ciascun Composite contiene le informazioni fisiche circa i muri, i tetti e i diversi tipi di terreno: i layers sono disposti dall'esterno verso l'interno e ogni layer contiene lo spessore, la conducibilità termica, il calore specifico e la densità. (Fig. 43)

```
<Composite id="4" name="19_45" category="Wall">
  <Layer Thickness="0.02" Conductivity="0.9" Cp="1000" Density="1800" nre="0" gwp="0" ubp="0"/>
  <Layer Thickness="0.36" Conductivity="0.72" Cp="1000" Density="1800" nre="0" gwp="0" ubp="0"/>
  <Layer Thickness="0.025" Conductivity="1.2000" Cp="1000" Density="1" nre="0" gwp="0" ubp="0"/>
  <Layer Thickness="0.0800" Conductivity="0.297" Cp="840" Density="800" nre="0" gwp="0" ubp="0"/>
  <Layer Thickness="0.0200" Conductivity="0.700" Cp="1000" Density="1400" nre="0" gwp="0" ubp="0"/>
</Composite>
```

Figura 43 - Esempio di Composite.
Fonte: Software CitySim

Dopo i vari Composite, nella struttura del file troviamo l'Occupant profile.

Per definire il profilo di occupazione vi è sia un Occupancy Day profile sia un Occupancy Yearly profile. I profili di occupazione possono essere ricavati seguendo varie strade (come ad esempio la normativa di riferimento), l'importante è avere un profilo di occupazione giornaliero e annuale (Fig.44).

```
<OccupancyYearProfile id="0" name="residential" d1="0" d2="0" d3="0" d4="0" d5="0" d6="0" d7="0" d8="0" d9="0" d10="0" d11="0" d12="0" d13="0" d14="0"
  <OccupancyDayProfile id="0" p1="0.9" p2="0.9" p3="0.9" p4="0.9" p5="0.9" p6="0.9" p7="0.7" p8="0.4" p9="0.4" p10="0.2" p11="0.2" p12="0.2" p13="0.2" p14="0.2" p15="0.2"
  <OccupancyYearProfile id="1" name="school" d1="12" d2="11" d3="11" d4="11" d5="11" d6="11" d7="11" d8="11" d9="11" d10="11" d11="11" d12="11" d13="11"
  <OccupancyDayProfile id="11" p1="0" p2="0" p3="0" p4="0" p5="0" p6="0" p7="0" p8="0.1" p9="0.8" p10="0.9" p11="0.9" p12="0.8" p13="0.8" p14="0.8" p15="0.8"
  <OccupancyDayProfile id="12" p1="0" p2="0" p3="0" p4="0" p5="0" p6="0" p7="0" p8="0" p9="0" p10="0" p11="0" p12="0" p13="0" p14="0" p15="0"
  <OccupancyYearProfile id="2" name="restaurant" d1="22" d2="22" d3="22" d4="22" d5="22" d6="22" d7="22" d8="22" d9="22" d10="22" d11="22" d12="22" d13="22"
  <OccupancyDayProfile id="22" p1="0.1" p2="0.1" p3="0" p4="0" p5="0" p6="0" p7="0" p8="0" p9="0.2" p10="0.2" p11="0.2" p12="0.5" p13="0.8" p14="0.5" p15="0.5"
```

Figura 44. Esempio di profilo di occupazione.
Fonte: Software CitySim

Nel caso del profilo annuale le "d" indicano i giorni dell'anno e il numero associato alla lettera indica il tipo di occupazione giornaliera che si ha in quel giorno. Nel caso del profilo giornaliero le "p" indicano l'ora del giorno e i numeri associati alle lettere vanno da 0 a 1: lo zero indica che in quell'ora del giorno non vi sono occupanti, mentre l'uno indica che in quell'ora vi è il massimo degli occupanti. Il numero massimo di occupanti viene associato per ogni edificio ed è un dato che viene preso dalla normativa di riferimento. Nel capitolo successivo verrà spiegato nel dettaglio come prendere tali dati.

Il Tag Building inizia con una stringa di identificazione nella quale viene indicato l'identificativo dell'edificio e il nome del layer a cui quell'edificio appartiene nel modello precedentemente realizzato su AutoCad. Vi sono tanti tag Building quanti sono gli edifici di cui si vuole calcolare il consumo. Per ogni edificio è

possibile assegnare una serie di caratteristiche. Le più significative ai fini della nostra analisi sono, in ordine di come compaiono nel file:

- il volume di infiltrazione d'aria all'ora. Nel nostro caso è stato considerato un'infiltration rate di 0.5 per gli edifici con un'epoca di costruzione fino al 1960 e 0.3 per tutti gli altri. Questa scelta è stata fatta in quanto si suppone che gli edifici più vecchi abbiano un'infiltrazione d'aria superiore agli edifici più recenti;
- le temperature interne minime e massima di setpoint. Tali dati sono stati presi dalla UNI 11300-1 che indica che la temperatura di set point minima deve essere di 20 °C mentre la massima di 26°C;
- il tipo di impianto di riscaldamento e la sua efficienza (caldaia o pompa di calore). Nel nostro caso è stata considerata una caldaia con una potenza tale per cui per ogni giorno della stagione di riscaldamento è assicurata una temperatura interna di almeno 20°C;
- il numero e il volume delle zone termiche che caratterizzano l'edificio, il numero di occupanti e il tipo di occupant profile. Gli edifici del modello sono caratterizzati da un'unica zona termica in quanto tutti i piani hanno le stesse temperature di set point;
- i tipi di muro, pavimento, tetto e i dati relativi all'involucro trasparente, ovvero il rapporto di superficie vetrata per ogni muro o tetto, la trasmittanza delle finestre e il TSET.

Nel seguente paragrafo verranno descritti come sono stati presi i dati che riguardano le caratteristiche fisico-tecniche degli edifici e come è stato determinato il profilo di occupazione.

4.2.3 La definizione delle caratteristiche fisico-tecniche degli edifici e del profilo di occupazione.

Nel paragrafo precedente si è visto quanto sia complessa l'elaborazione del modello e quanti parametri bisogna definire per cercare di avere una situazione verosimile. La scelta dei parametri da immettere è una fase estremamente importante, poiché sono le caratteristiche fisiche dell'involucro ad influire maggiormente sul consumo degli edifici. Bisogna, quindi, giustificare in maniera scrupolosa tutti i dati che vengono presi in considerazione per la realizzazione del modello. Per fare questo, sono state prese in considerazione alcune normative di riferimento che hanno permesso di definire al meglio le stratigrafie degli involucri degli edifici e i profili di occupazione.

La stratigrafia dell'involucro opaco e le caratteristiche dell'involucro trasparente sono state assegnate in base alla normativa tecnica UNI TR 11552 del 2014 che associa ad ogni periodo di costruzione, per ogni Regione d'Italia, la stratigrafia più comune per quanto riguarda i muri, i tetti e i pavimenti.

La zona di Torino presa in considerazione è quella di Crocetta, caratterizzata da edifici costruiti tra il 1800 e il 1980, quindi sono stati prese in considerazione le epoche riportate nella normativa che ricadono in questa fascia di tempo.

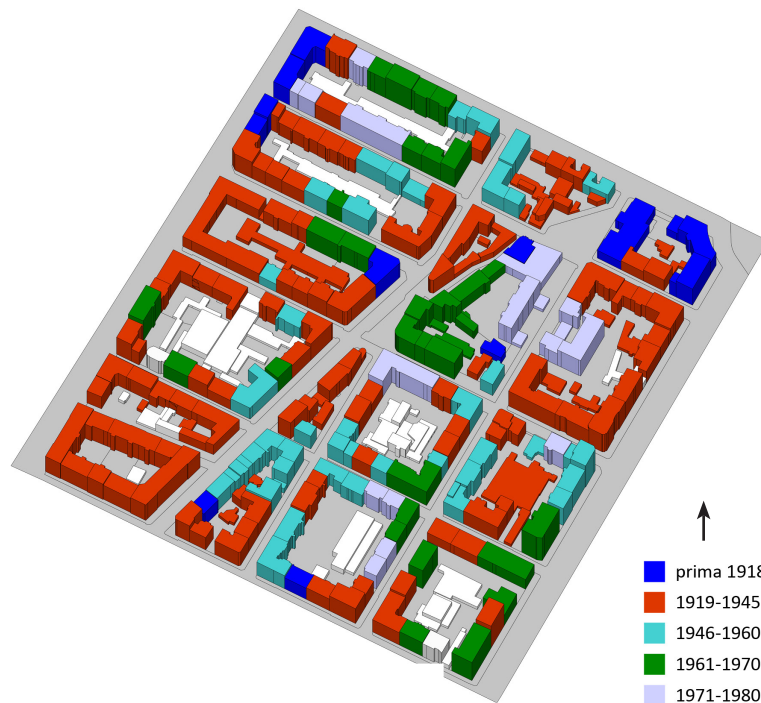


Figura 45 - Planivolumetrico della zona di Crocetta con indicate le epoche di costruzione dei vari edifici.

Per individuare le epoche di costruzione degli edifici appartenenti alla nostra zona di studio, sono stati consultati gli shapefile scaricabili dal Geoportale della Città di Torino. Nei suddetti file, gli edifici di tutta la città sono raggruppati in otto categorie:

- edifici costruiti fino al 1918;
- edifici costruiti tra il 1919 e il 1945;
- edifici costruiti tra il 1946 e il 1960;
- edifici costruiti tra il 1961 e il 1970;
- edifici costruiti tra il 1971 e il 1980;
- edifici costruiti tra il 1981 e il 1990;
- edifici costruiti tra il 1991 e il 2000;
- edifici costruiti tra il 2001 e il 2006;
- edifici costruiti dopo il 2006.

La classificazione fatta dal Geoportale non corrisponde esattamente con quella della normativa UNI TR 11552 del 2014, di conseguenza sono state fatte delle semplificazioni per assegnare ad ogni edificio, appartenente ad una determinata epoca, la stratigrafia più idonea, rispetto alla normativa.

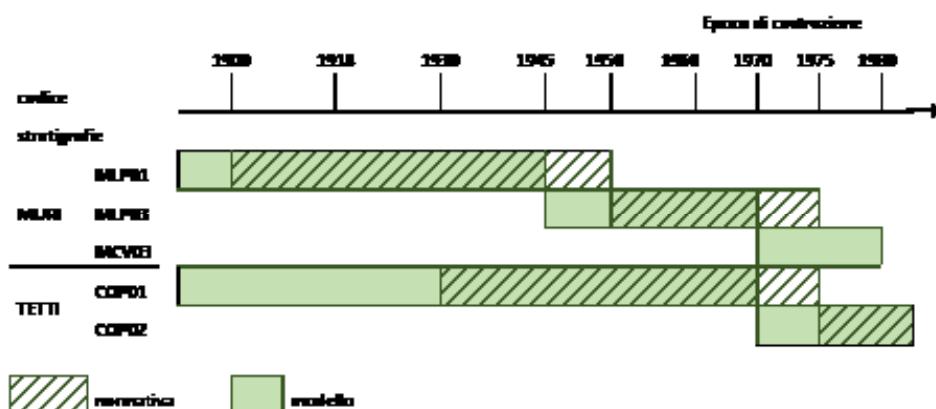


Tabella 36 - confronto tra la stratigrafia associata dalla Normativa ad un determinato periodo di costruzione degli edifici e la stratigrafia adottata nel modello.

Per quanto riguarda le caratteristiche dell'involucro trasparente, la normativa fornisce dei valori di trasmittanza dei vetri e le caratteristiche delle finestre a seconda dell'epoca di costruzione degli edifici, mentre per il rapporto di superficie vetrata, è stato calcolato tramite AutoCad. Nella tabella successiva sono sintetizzati i parametri presi in considerazione per ogni epoca di costruzione.

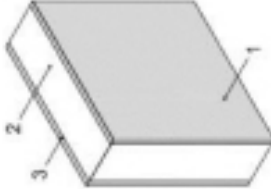
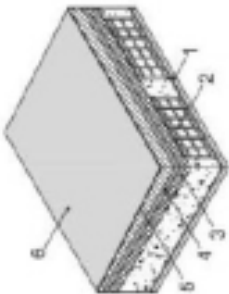

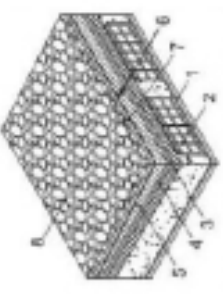

| Epoca di costruzione | Glazing ratio | $U_{finestra}$ (W/m ² K) | G_{valve} | U_{aerco} (W/m ² K) | Spessore del muro (m) | U_{parete} (W/m ² K) | Stratigrafia del muro | Stratigrafia del tetto |
|---------------------------------|---------------|-------------------------------------|-------------|----------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|---|--|
| Fino al 1918 e dal 1919 al 1945 | 0.18 | 4.7 | 0.85 | 1.8 | 0.4 | 1.5 | <p>MLP01</p>  <p>1. intonaco 25mm; 2. mattoni pieni 350mm; 3. intonaco 25mm.</p> | <p>COP01</p>  <p>1. intonaco 20mm; 2. soletta 160mm; 3. c.a. 40mm; 4. malta cementizia 20mm; 5. massetto in c.l.s. 100mm; 6. bitume 10mm</p> |
| Dal 1946 al 1970 | 0.19 | 4.20 | 0.75 | 1.4 | 0.3 | 1.15 | <p>MLP03</p>  <p>1. intonaco 20mm 2. laterizio 80mm 3. aria 100mm 4. laterizio 150 mm 5. intonaco 30mm</p> | <p>COP02</p>  <p>1. intonaco 20mm; 2. soletta 160mm; 3. c.a. 40mm; 4. malta cementizia 20mm; 5. massetto in c.l.s. 100mm; 6. bitume 10mm; 7. isolante 50mm; 8. rivestimento 5mm</p> |
| Dal 1971 al 1980 | 0.34 | 4.9 | 0.75 | 1.11 | 0.35 | 0.81 | <p>MCV03</p>  <p>1. intonaco 10mm; 2. mattoni forati 100mm; 3. aria 20mm; 4. isolante 30mm 5. mattoni forati 200mm; 6. intonaco esterno 10mm</p> | |

Tabella 37 - Caratteristiche fisico-tecniche utilizzate per la realizzazione del modello termico

Definire gli occupanti all'interno di un edificio è un passaggio molto importante in quanto la loro presenza può influire in maniera significativa per la stima del consumo energetico.

Per la realizzazione del modello su CitySimPro è importante stabilire:

- il numero massimo di occupanti;
- il profilo di occupazione giornaliero e annuale.

Per occupanti, si intende anche la parte di apporti interni gratuiti dovuta alla presenza di macchine ed elettrodomestici.

Per determinare il profilo di occupazione più idoneo per la realizzazione del modello sono state prese in considerazione tre normative di riferimento.

- La normativa svizzera SIA 2024.
- Gli standard dell' American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineer (ASHRAE).
- La normativa italiana UNI-TS 11300 parte 1.

Dato che CitySim è un software sviluppato in Svizzera, il profilo di occupazione di default è quello riportato nella SIA 2024 (Fig. 46). Questa normativa associa per ogni destinazione d'uso di un edificio un profilo di occupazione e la densità degli occupanti. Ad esempio, per una camera da letto la normativa svizzera assegna 50 persone/m² e un carico dovuto agli elettrodomestici di 2 W/m².

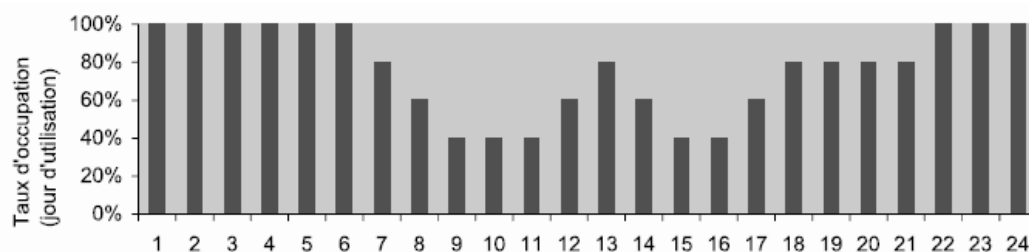


Figura 46. Il profilo di occupazione per una camera da letto o un soggiorno.
Fonte: Normativa Svizzera SIA 2024.

Per le prime simulazioni è stata presa in considerazione la normativa Svizzera ma, nel momento di fare la validazione del modello è stato riscontrato che i consumi calcolati erano sovrastimati rispetto ai consumi reali, quindi si è deciso di usare un altro profilo di occupazione, che potesse essere più congruo rispetto alla situazione reale della zona di studio.

I profili di occupazione basati sugli standard ASHRAE (Fig. 47) associano ad ogni edificio, in base alla sua destinazione d'uso, un tasso di occupazione orario. Secondo queste schede, per un edificio multifamigliare, ad esempio, bisogna considerare come numero massimo di occupanti 2,5 persone/100m² e come carico termico dovuto alle apparecchiature 10 W/m².

Occupancy-Residential

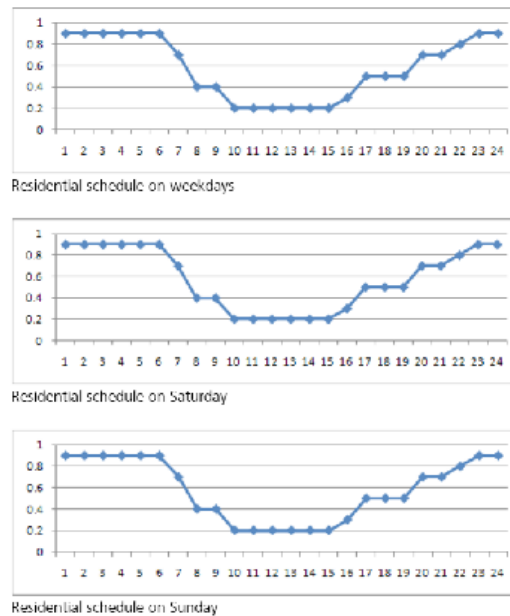


Figura 47- Profili di occupazione per edificio residenziale.
Fonte: ASHRAE, occupancy schedules.

I profili di occupazione secondo il modello ASHRAE si adattano particolarmente alla costruzione del modello su CitySim in quanto questi associano un profilo di occupazione per ogni destinazione d'uso dell'edificio, mentre la normativa svizzera associa un tasso di occupazione per ogni tipo di stanza rendendo il calcolo più difficoltoso e meno preciso.

Infine, è stata presa in considerazione anche la normativa italiana per verificare che il tasso di occupazione fosse simile a quello precedentemente illustrato. Il prospetto 14 della UNI-TS 11300-1 (Fig. 48) indica i profili temporali degli apporti termici dagli occupanti e dalle apparecchiature per edifici residenziali secondo gli standard italiani. La normativa italiana non riporta i profili di occupazione in una forma simile a quelle precedentemente illustrate, dunque questi dati non potrebbero essere utilizzati in maniera diretta per la costruzione di CitySim. Per questo motivo si è scelto di utilizzare i dati ASHRAE per una maggiore praticità e per avere una maggiore esattezza. Ad ogni modo, è stato verificato che la media giornaliera degli apporti termici dagli occupanti è molto simile sia per la normativa italiana sia per gli standard americani.

prospetto 14

Profili temporali degli apporti termici dagli occupanti e dalle apparecchiature (edifici residenziali)

| Giorni | Ore | Soggiorno e cucina $(\phi_{\text{int,Oc}} + \phi_{\text{int,A}}) / A_f$ [W/m ²] | Altre aree climatizzate (per esempio stanza da letto) $(\phi_{\text{int,Oc}} + \phi_{\text{int,A}}) / A_f$ [W/m ²] |
|--|--------------------------------|---|---|
| Lunedì – Venerdì | Dalle ore 07:00 alle ore 17:00 | 8,0 | 1,0 |
| | Dalle ore 17:00 alle ore 23:00 | 20,0 | 1,0 |
| | Dalle ore 23:00 alle ore 07:00 | 2,0 | 6,0 |
| | Media | 9,0 | 2,67 |
| Sabato – Domenica | Dalle ore 07:00 alle ore 17:00 | 8,0 | 2,0 |
| | Dalle ore 17:00 alle ore 23:00 | 20,0 | 4,0 |
| | Dalle ore 23:00 alle ore 07:00 | 2,0 | 6,0 |
| | Media | 9,0 | 3,83 |
| Media | | 9,0 | 3,0 |
| $(\phi_{\text{int,Oc}} + \phi_{\text{int,A}})$ è il flusso termico dalle persone e dalle apparecchiature, in W; A_f è la superficie utile di pavimento. | | | |

Tabella 38 - Profilo di occupazione di un edificio residenziale. Fonte: UNI-TS 11300-1 del 2014

4.3 La validazione del modello

Dopo una prima fase di analisi e la costruzione del modello, si sono ottenuti i primi risultati inerenti al consumo degli edifici e, successivamente, tali risultati sono stati confrontati con i consumi reali forniti da IREN in modo tale da verificare l'affidabilità del programma e l'esattezza del modello.

I dati forniti da IREN sono relativi solo ad alcuni edifici della zona presa in considerazione e si riferiscono a due stagioni di riscaldamento, ovvero quella ottobre 2013 - Aprile 2014 e quella Ottobre 2014 - Aprile 2015. Le simulazioni con CitySim Pro sono state fatte sia con un file climatico tarato sulla prima stagione di riscaldamento sia con un file climatico modificato rispetto alla seconda stagione. Una volta ottenuti i risultati per entrambe le stagioni di riscaldamento, si è proceduto con la validazione del modello andando a confrontare i dati di consumo reale con i dati di consumo calcolati con il software.

I risultati ottenuti durante questa fase di validazione del modello risultano, tuttavia discordanti. Nella maggior parte dei casi, lo scarto relativo tra il consumo calcolato e quello reale è accettabile, ovvero è compreso nel $\pm 20\%$, ma in alcuni casi si ha una situazione meno realistica con errori superiori al 20%. Queste differenze nel calcolo sono dovute a molte variabili molto difficili analizzare poiché variano caso per caso. Nel caso in cui il software sovrastimi i consumi è possibile che l'edificio abbia subito dei lavori di ristrutturazione (sostituzione degli infissi, installazione delle termo valvole, interventi sulla copertura,...) mentre se si hanno dei valori misurati minori di quelli reali è probabile che alcuni appartamenti dell'edificio non abbiano avuto abitanti al loro interno durante la stagione di riscaldamento, causando una diminuzione degli apporti interni gratuiti. Il numero di occupanti, infatti, è una variabile fondamentale in quanto, attraverso varie prove, si è notato come il consumo possa variare anche del 20 % in presenza o in assenza degli occupanti. Alla fine di questa analisi è stato possibile rappresentare una mappa degli edifici il cui consumo energetico per riscaldamento invernale misurato si avvicina molto a quello reale fornito da IREN.

| Indirizzo | Consumi IREN (kWh/anno) | Consumi CITYSIM (kWh/anno) | Diff. % |
|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|---------|
| SEZCENS 1150 | | | |
| C.so DUCA DEGLI ABRUZZI 35 | 139.952 | 146.163 | 4 |
| C.so DE GASPERI 4 | 223.652 | 231.614 | 3 |
| C.so DUCA DEGLI ABRUZZI 37 | 141.510 | 127.435 | -11 |
| SEZCENS 1151 | | | |
| C.so FERRARIS 94 | 113.913 | 96.625 | -18 |
| SEZCENS 1152 | | | |
| C.so FERRARIS 80 | 147.405 | 127.702 | -15 |
| SEZCENS 1156 | | | |
| C.so DUCA DEGLI ABRUZZI 39 | 114.521 | 92.286 | -24 |
| Via MARCO POLO 25 | 66.624 | 79.154 | 16 |
| Via MARCO POLO 21 | 59.979 | 55.273 | -9 |
| Via MARCO POLO 19 BIS | 112.224 | 90.653 | -24 |
| Via BOVE 10 | 64.237 | 76.595 | 16 |
| Via BOVE 14 | 64.082 | 63.476 | -1 |
| Via BOVE 16 | 45.139 | 46.764 | 3 |
| SEZCENS 1157 | | | |
| Via BOVE 11 | 76.217 | 90.939 | 16 |
| C.so DE GASPERI 14 | 109.748 | 114.871 | 4 |
| C.so DE GASPERI 16 | 123.802 | 130.929 | 5 |
| SEZCENS 1159 | | | |
| C.so FERRARIS 84 | 59.568 | 53.521 | -11 |
| C.so FERRARIS 90 | 302.627 | 255.857 | -18 |
| SEZCENS 1163 | | | |
| C.so DUCA DEGLI ABRUZZI 49 | 106.390 | 112.786 | 6 |
| Via COLOMBO 45 | 95.258 | 92.790 | -3 |
| Via COLOMBO 41 | 61.712 | 80.394 | 23 |
| Via COLOMBO 39 | 56.890 | 51.616 | -10 |
| SEZCENS 1165 | | | |
| Via CASSINI 32 | 63.812 | 82.425 | 23 |
| Via VESPUCCI 34 | 203.886 | 262.088 | 22 |
| Via VESPUCCI 38 | 51.872 | 61.074 | 15 |
| SEZCENS 1166 | | | |
| C.so FERRARIS 94 | 125.776 | 121.938 | -3 |
| C.so FERRARIS 96 | 100.433 | 84.138 | -19 |
| SEZCENS 1170 | | | |
| Via VESPUCCI 57 | 63.491 | 67.550 | 6 |
| C.so DUCA DEGLI ABRUZZI 63 | 162.140 | 162.685 | 0 |
| C.so DE GASPERI 32 | 211.096 | 230.542 | 8 |
| SEZCENS 1171 | | | |
| Via VESPUCCI 47 | 65.540 | 73.892 | 11 |
| Via PIAZZI 14 | 81.788 | 108.488 | 25 |
| SEZCENS 1172 | | | |
| Via VESPUCCI 45 | 75.883 | 99.586 | 24 |
| Via CASSINI 44 | 83.342 | 74.244 | -12 |

| SEZCENS 1173 | | | |
|-------------------|---------|---------|----|
| C.so FERRARIS 106 | 120.001 | 132.686 | 10 |
| Via CASSINI 41 | 89.115 | 94.983 | 6 |

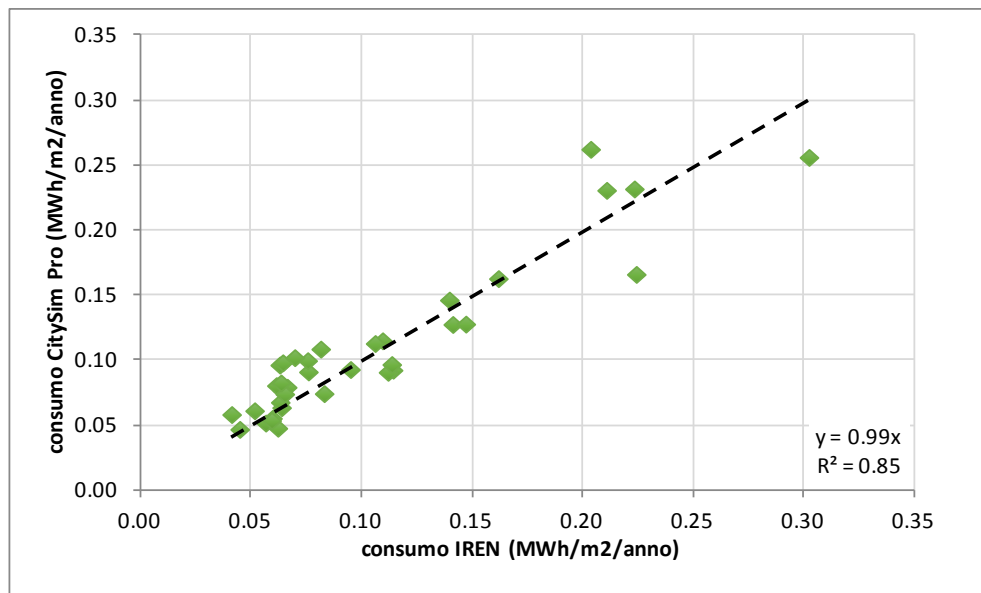


Grafico 20 - Corrispondenza tra i consumo reali e i consumi calcolati.



Figura 48 - Planimetria della zona di crocetta con evidenziati in rosso gli edifici validati. Per l'analisi della forma urabana sono state scelte le sezioni di censimento 1156 e 1163

Come si è potuto verificare attraverso varie prove effettuate, oltre al numero degli occupanti, City Sim Pro ha un ottima risposta al variare della radiazione incidente sulle superfici, al coefficiente di albedo e all'effetto Canyon. Per verificare tale affermazioni, è stato fatto uno studio sulle temperature superficiali nelle zone di Crocetta e Spina 3, caratterizzate da un tessuto urbano diverso . Crocetta è caratterizzata da un tessuto urbano molto compatto e da una pavimentazione cementizia. Spina 3 invece è una zona di più recente costruzione, caratterizzata dalla presenza di grandi spazi verdi e da un tessuto urbano meno denso. Facendo un confronto tra i parametri urbani che caratterizzano le due zone abbiamo la situazione riassunta nella tabella:

| | CROCETTA | SPINA 3 | TORINO |
|-----|----------|---------|--------|
| BCR | 0.41 | 0.21 | 0.34 |
| BD | 6.7 | 3.1 | 5 |
| H/W | 0.9 | 0.7 | 0.7 |
| BO | 1.3 | 1.3 | 1.3 |
| A | 0.17 | - | 0.18 |

Tabella 39 - Indicatori della forma urbana per il quartiere di Crocetta e per il quartiere di Spina 3

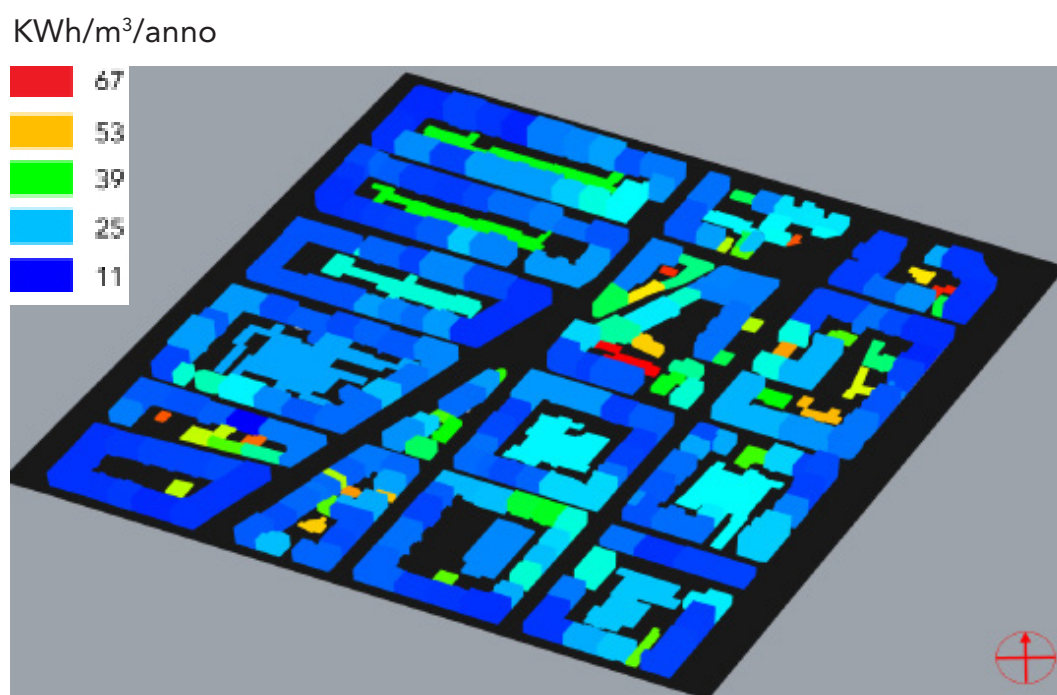


Figura 49 - Consumo medio annuale per riscaldamento per gli edifici in Crocetta. Immagine generata da CitySim Pro.

Come si può notare dalla figura 50 in un tessuto urbano più denso e compatto, come quello di Crocetta, l'ombra generata dagli edifici fa sì che la temperatura superficiale media annuale sia di circa 2 gradi centigradi inferiore a quella di Spina 3, mentre possiamo notare come le superfici verdi, caratterizzate dall'e-vapotraspirazione, risultino molto più fredde di tutte le altre superfici. Questi ragionamenti sono alla base delle modifiche e delle analisi sviluppate nei capitoli successivi.

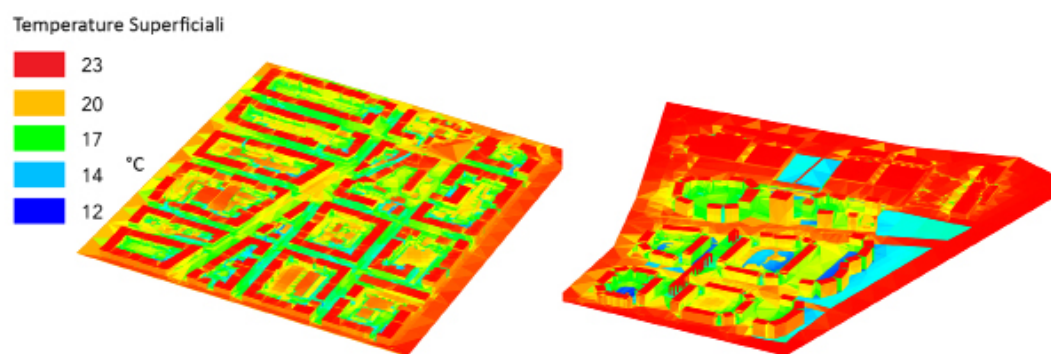


Fig. 50 - Temperature superficiali medie annuali per le zone di Crocetta (a sinistra) e la zona di Spina 3 (a destra).

5. FORMA URBANA E VARIAZIONE DEL CONSUMO ENERGETICO

5.1 La modifica dei parametri urbani

Nel capitolo precedente abbiamo visto come è stato realizzato e validato il modello termico per il calcolo dei consumi per riscaldamento tramite CitySim Pro. In questo capitolo entriamo nel merito della questione andando a valutare come la forma urbana influisce sul consumo degli edifici.

Per fare questo si è scelto di concentrare l'analisi su due sezioni di censimento. La scelta è ricaduta sulle sezioni di censimento 1156 e 1163 poiché hanno il maggior numero di edifici validati appartenenti alla stessa epoca di costruzione, in maniera da poter valutare al meglio l'impatto della forma urbana sui consumi a parità di caratteristiche dell'involucro. A seguito di un attento studio della letteratura e dalle conclusioni tratte nel precedente capitolo, si è scelto di prendere in considerazione quattro parametri urbani, ovvero il BCR, H/Hav, L'H/W e l'Albedo, come più significativi per la definizione della forma urbana. Partendo dalle configurazioni originali, sono state create altre configurazioni fittizie, andando a cambiare i parametri sopra citati uno per volta in modo tale da analizzarne singolarmente l'impatto.

In particolare, all'interno delle due sezioni di censimento scelte sono stati scelti un totale di 9 edifici per i quali si è andata a valutare la variazione del consumo energetico per riscaldamento al variare della forma urbana del contesto.

Sono state effettuate un totale di 11 simulazioni energetiche per ciascuna sezione di censimento scelta. Per ogni simulazione è stato realizzato un modello diverso: per i primi 4 modelli è stato modificato, in maniera progressiva, il valore di BCR mantenendo invariati i valori di H/W, MOS e Albedo, nei successivi due modelli è stato modificato il valore di H/W, mantenendo invariati gli altri parametri, tre modelli sono stati realizzati per la variazione del MOS e due per la variazione dell'Albedo.

Tramite CitySim Pro è stato calcolato il consumo di energia per riscaldamento dei 9 edifici per ogni simulazione fatta, per un totale di 99 dati di consumo. I risultati ottenuti sono stati inseriti in una tabella excel nella quale ad ogni dato di consumo corrispondono i rispettivi parametri urbani. A questo punto, si è potuto calcolare l'andamento dei consumi al variare di ogni singolo parametro e di trovare una formula che permette di calcolare il consumo energetico per il riscaldamento partendo dal valore dei parametri urbani.

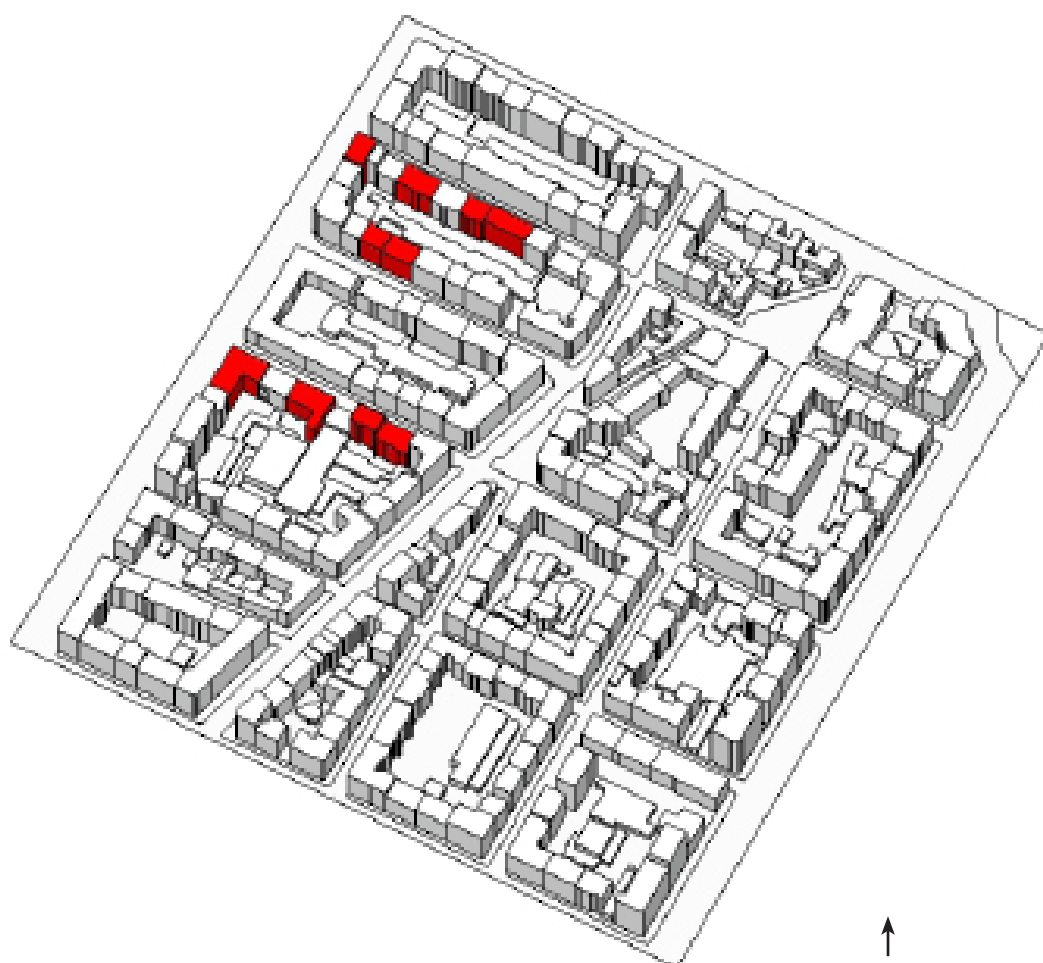
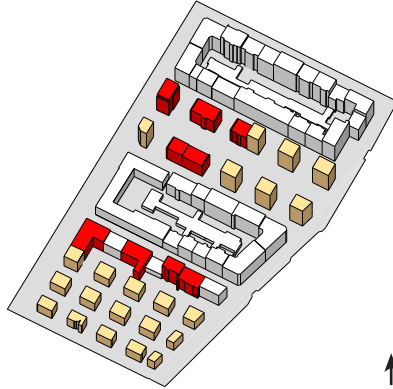
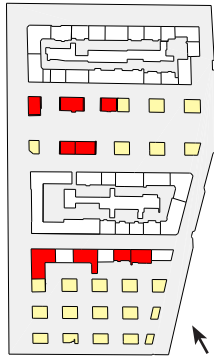


Figura 51 -Planivolumetrico dell' area con evidenziati in rosso gli edifici presi in considerazione per l'analisi della forma urbana

| Edificio | S/V | BCR [m2/m2] | BD [m3/m2] | BHm [m] | H/Hm | BO | MOS | A | H/W | S | UM | GUMS |
|--------------|------|----------------|---------------|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| sezcens 1156 | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0,21 | 0,43 | 7,30 | 21 | 0,80 | 1,30 | 1,30 | 0,17 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 |
| 2 | 0,23 | 0,43 | 7,30 | 21 | 0,80 | 1,30 | 1,30 | 0,17 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 |
| 3 | 0,23 | 0,43 | 7,30 | 21 | 0,80 | 1,30 | 1,30 | 0,17 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 |
| 4 | 0,23 | 0,43 | 7,30 | 21 | 0,80 | 1,30 | 1,30 | 0,17 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 |
| 5 | 0,23 | 0,43 | 7,30 | 21 | 0,80 | 1,30 | 1,30 | 0,17 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 |
| sezcens 1163 | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 0,17 | 0,47 | 6,73 | 20 | 1,54 | 1,30 | 1,30 | 0,17 | 0,82 | 2,00 | 0,39 | 0,77 |
| 7 | 0,18 | 0,47 | 6,73 | 20 | 1,54 | 1,30 | 1,30 | 0,17 | 0,82 | 2,00 | 0,39 | 0,77 |
| 8 | 0,25 | 0,47 | 6,73 | 20 | 1,54 | 1,30 | 1,30 | 0,17 | 0,82 | 2,00 | 0,39 | 0,77 |
| 9 | 0,20 | 0,47 | 6,73 | 20 | 1,54 | 1,30 | 1,30 | 0,17 | 0,82 | 2,00 | 0,39 | 0,77 |

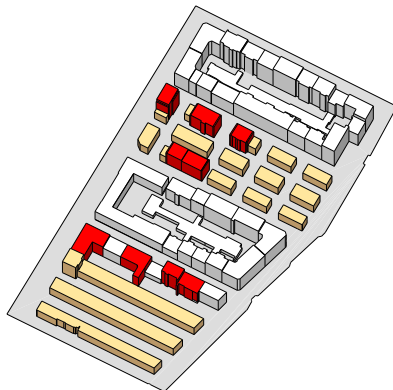
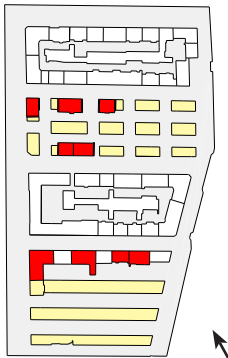
Tabella 40 - Valori dei parametri urbani relativi agli edifici presi in considerazione per l'analisi della forma urbana.

5.1.1 Modifica BCR



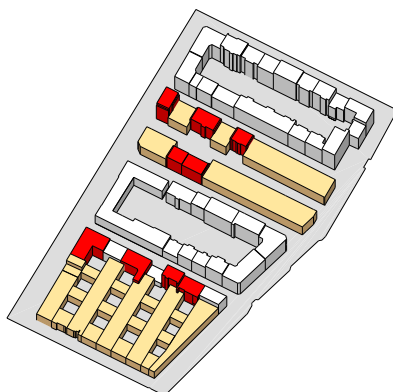
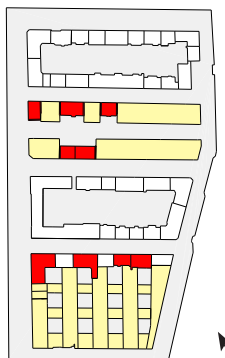
sezcens 1156
BCR (m/m) = 0.25
H/W (m/m) = 0.97
MOS = 1.3
 H/H_{av} (m/m) = 0.8
A = 0.17

sezcens 1163
BCR (m/m) = 0.22
H/W (m/m) = 0.82
MOS = 1.3
 H/H_{av} (m/m) = 1.54
A = 0.17



sezcens 1156
BCR (m/m) = 0.37
H/W (m/m) = 0.97
MOS = 1.3
 H/H_{av} (m/m) = 0.82
A = 0.17

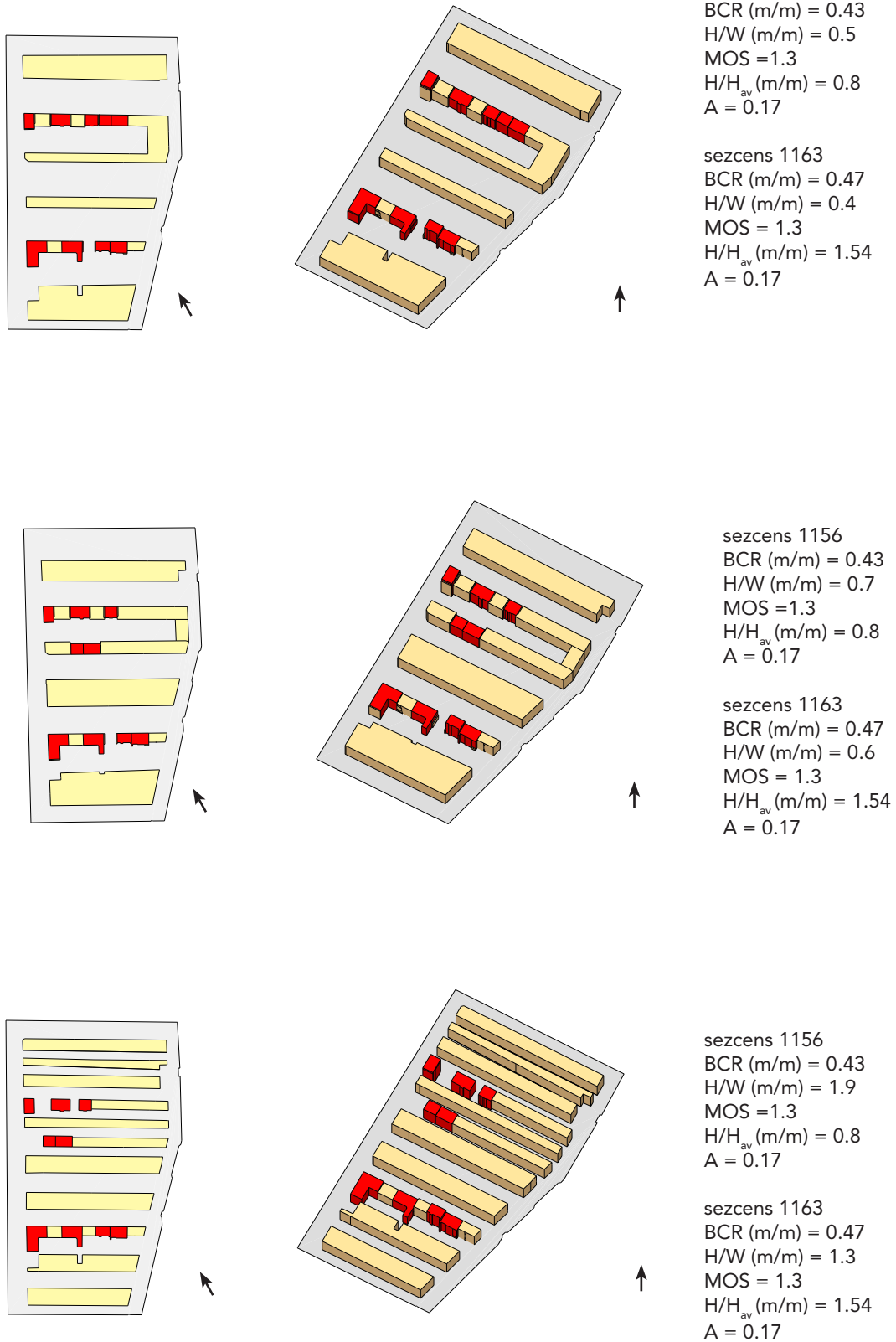
sezcens 1163
BCR (m/m) = 0.35
H/W (m/m) = 0.8
MOS = 1.3
 H/H_{av} (m/m) = 1.54
A = 0.17



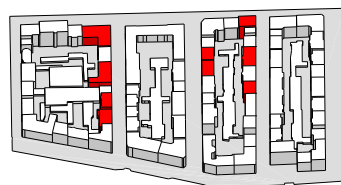
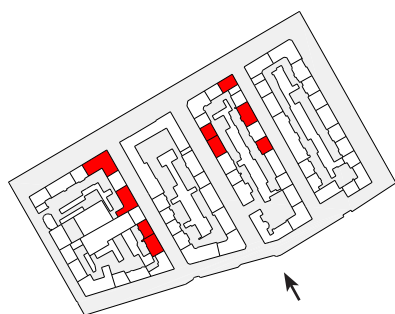
sezcens 1156
BCR (m/m) = 0.5
H/W (m/m) = 0.97
MOS = 1.3
 H/H_{av} (m/m) = 0.8
A = 0.17

sezcens 1163
BCR (m/m) = 0.55
H/W (m/m) = 0.82
MOS = 1.3
 H/H_{av} (m/m) = 1.54
A = 0.17

5.1.2 Modifica Aspect Ratio

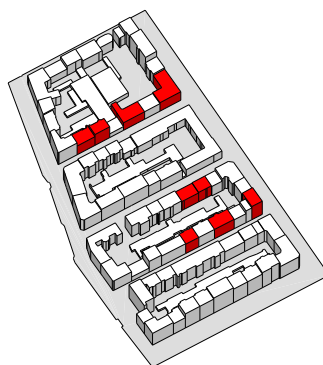
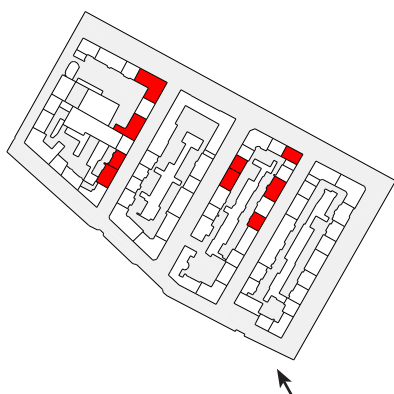


5.1.3 Modifica MOS



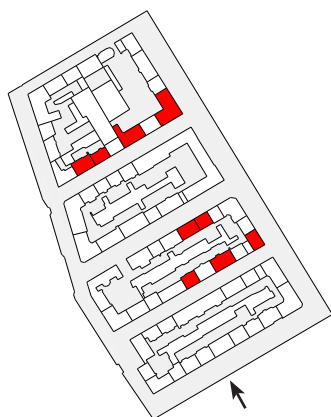
sezcens 1156
BCR (m/m) = 0.43
H/W (m/m) = 0.97
MOS = 0.9
 H/H_{av} (m/m) = 0.8
A = 0.17

sezcens 1163
BCR (m/m) = 0.47
H/W (m/m) = 0.82
MOS = 0.9
 H/H_{av} (m/m) = 1.54
A = 0.17



sezcens 1156
BCR (m/m) = 0.43
H/W (m/m) = 0.97
MOS = 1
 H/H_{av} (m/m) = 0.8
A = 0.17

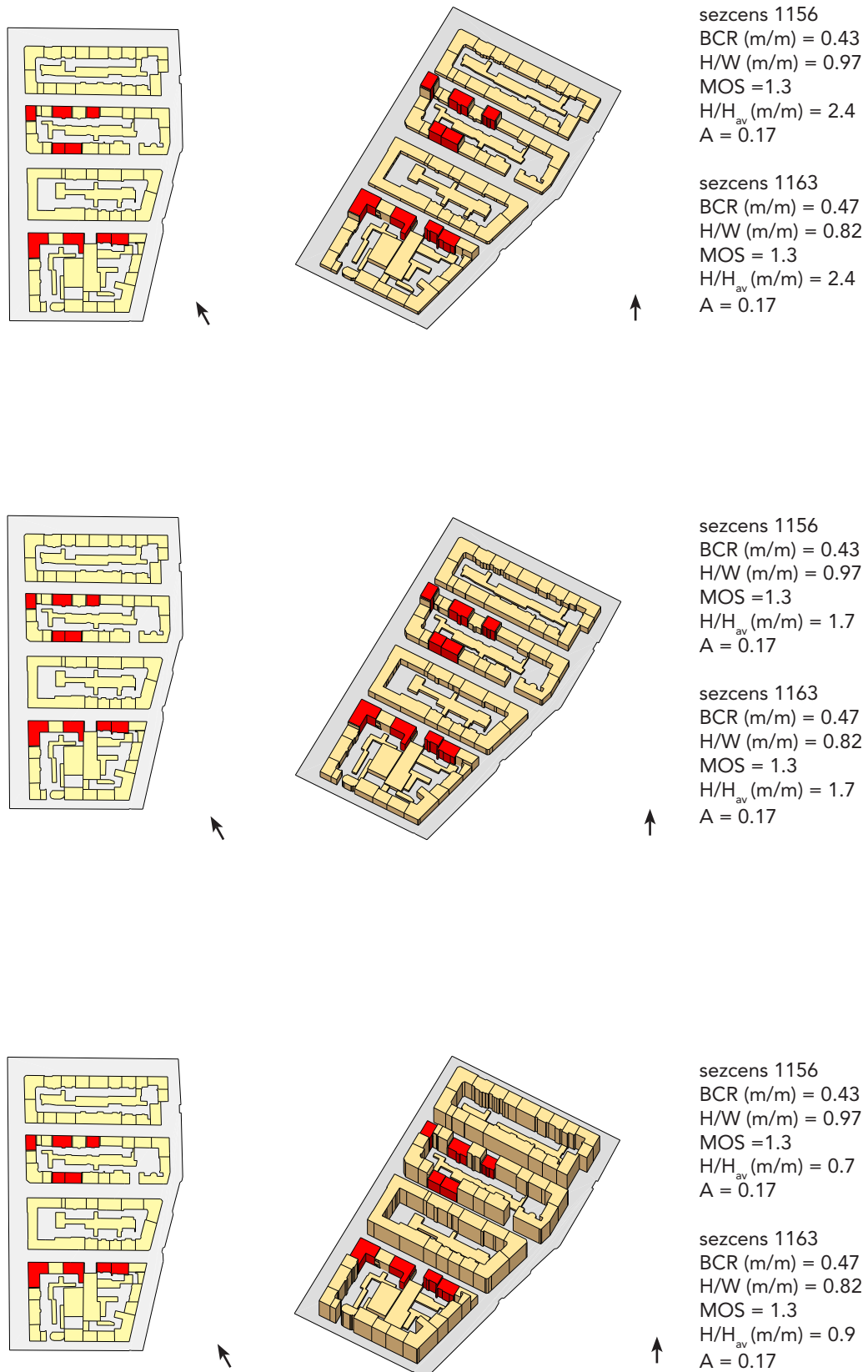
sezcens 1163
BCR (m/m) = 0.47
H/W (m/m) = 0.82
MOS = 1
 H/H_{av} (m/m) = 1.54
A = 0.17



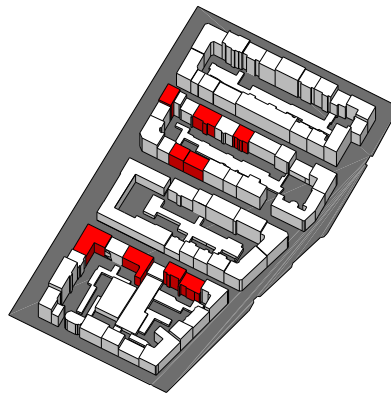
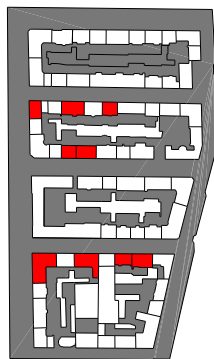
sezcens 1156
BCR (m/m) = 0.43
H/W (m/m) = 0.97
MOS = 1.2
 H/H_{av} (m/m) = 0.8
A = 0.17

sezcens 1163
BCR (m/m) = 0.47
H/W (m/m) = 0.82
MOS = 1.2
 H/H_{av} (m/m) = 1.54
A = 0.17

5.1.4 Modifica H/Havg

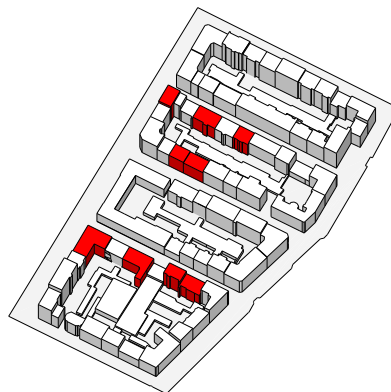
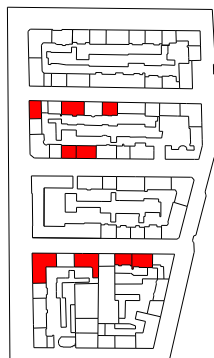


5.1.5 Modifica ALBEDO



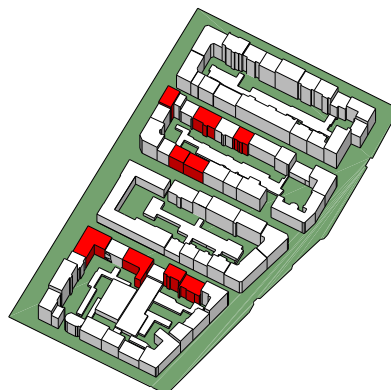
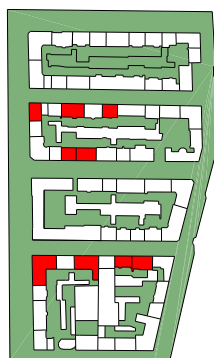
sezcons 1156
BCR (m/m) = 0.43
H/W (m/m) = 0.97
MOS = 1.3
 H/H_{av} (m/m) = 0.8
A = 0.07 (asfalto)

sezcons 1163
BCR (m/m) = 0.47
H/W (m/m) = 0.82
MOS = 1.3
 H/H_{av} (m/m) = 1.54
A = 0.07 (asfalto)



sezcons 1156
BCR (m/m) = 0.43
H/W (m/m) = 0.97
MOS = 1.3
 H/H_{av} (m/m) = 0.8
A = 0.5 (pavimentazione chiara)

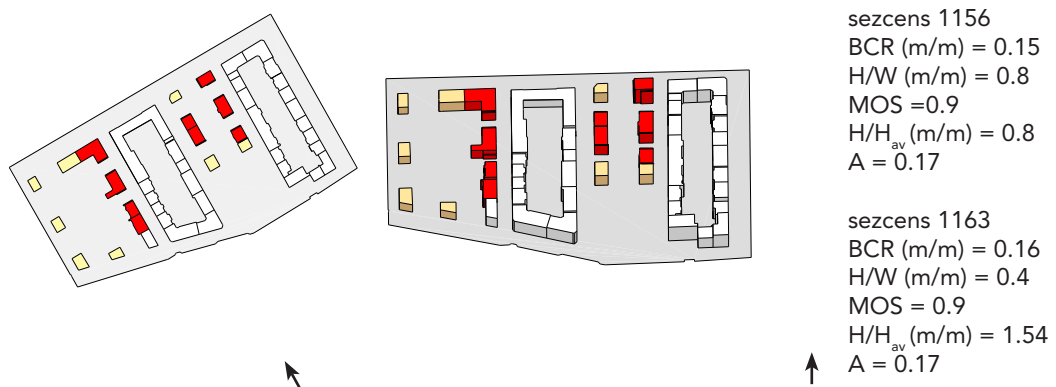
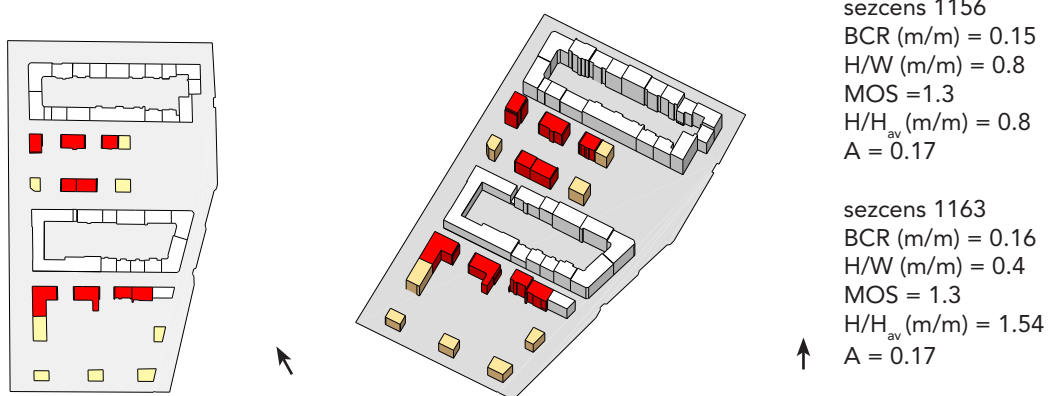
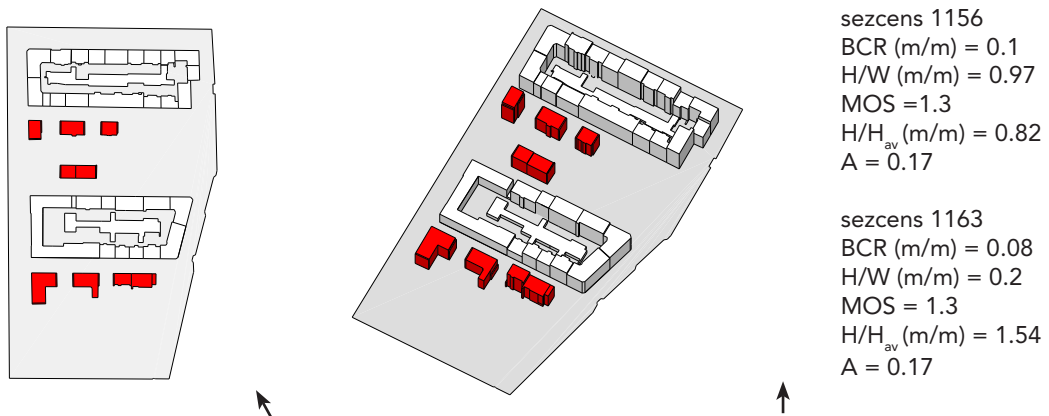
sezcons 1163
BCR (m/m) = 0.47
H/W (m/m) = 0.82
MOS = 1.3
 H/H_{av} (m/m) = 1.54
A = 0.5 (pavimentazione chiara)



sezcons 1156
BCR (m/m) = 0.43
H/W (m/m) = 0.97
MOS = 1.3
 H/H_{av} (m/m) = 0.97
A = 0.3 (verde)

sezcons 1163
BCR (m/m) = 0.47
H/W (m/m) = 0.82
MOS = 1.3
 H/H_{av} (m/m) = 0.82
A = 0.3 (verde)

5.1.6 Modifiche miste



5.2 Analisi dei risultati

Dopo aver creato un numero sufficiente di configurazioni fittizie, nelle quali è stata fatta variare la forma urbana, sono state effettuate le simulazioni energetiche con CitySim Pro per ottenere i nuovi risultati di consumo per riscaldamento degli edifici presi in analisi. Successivamente, tali risultati sono stati analizzati per capire quanto ogni singolo parametro influisce sul consumo energetico per il riscaldamento.

Sono stati presi in considerazione 5 parametri: il BCR, l'H/W, l'H/Hm, L'Albedo e MOS. In funzione di ognuno di questi indicatori è stato analizzato l'andamento dei consumi degli edifici. Per fare questo, per ogni simulazione è stata creata una tabella excel nella quale ad ogni edificio corrispondono i nuovi parametri urbani e il consumo per riscaldamento come si può vedere dalla tabella 41. Sono stati quindi calcolati i valori medi per ogni nuova sezione di censimento fittizia facendo una media pesata sul volume degli edifici.

Successivamente, i dati sono stati accorpati in base a varie classi del parametro preso in considerazione. Per fare questo, sono state fatte delle medie pesate sul volume degli edifici. Per ogni classe del parametro sono stati calcolati i consumi ed è stata fatta una media pesata sul volume anche degli altri parametri presi in considerazione e così è stato possibile trovare l'andamento dei consumi in base alla variazione del parametro.

A questo punto, è stato possibile stabilire, a seconda del parametro in funzione del quali sono stati fatti gli accorpamenti, un'equazione che permette di calcolare il consumo per riscaldamento dell'edificio in funzione dei parametri urbani. L'ultimo passaggio è stato quello di considerare l'andamento dei consumi in funzione del BCR prendendo in considerazione tutti i dati di tutte le simulazioni e accorpando i valori di consumo in funzione di alcune classi progressive di BCR. In questa fase, sono stati trovati due andamenti differenti per Solar Factor alti e per Solar Factor bassi. È stata quindi trovata l'equazione generale che permette di calcolare il consumo energetico per riscaldamento in funzione dei parametri urbani.

Infine, è stato calcolato il peso di ogni parametro preso in considerazione sul consumo per riscaldamento degli edifici.

| BUILDING KEY | sezcens | volume (m3) | S/V | BCR [m²/ m²] | H/Hm | MOS | A | H/W | S | UM | GUMS | consumo simulazione (kWh/m³/anno) | consumo medio per sezcens (kWh/m³/anno) |
|--------------|-----------|-------------|------|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|--------------------------------------|--|
| 5 | 1156 | 3.780 | 0,23 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,17 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 | 12,70 | |
| 3 | 1156 | 4.000 | 0,23 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,17 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 | 14,18 | |
| 4 | 1156 | 4.826 | 0,23 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,17 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 | 13,50 | |
| 2 | 1156 | 6.200 | 0,23 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,17 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 | 13,10 | |
| 1 | 1156 | 6.264 | 0,21 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,17 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 | 15,13 | 13,80 |
| 1 | 1156_10 | 6.264 | 0,21 | 0,15 | 1,00 | 1,30 | 0,17 | 0,70 | 1,30 | 0,11 | 0,14 | 14,91 | |
| 2 | 1156_10 | 6.200 | 0,23 | 0,15 | 1,00 | 1,30 | 0,17 | 0,70 | 1,30 | 0,11 | 0,14 | 12,60 | |
| 3 | 1156_10 | 4.000 | 0,23 | 0,15 | 1,00 | 1,30 | 0,17 | 0,70 | 1,30 | 0,11 | 0,14 | 13,37 | |
| 4 | 1156_10 | 4.826 | 0,23 | 0,15 | 1,00 | 1,30 | 0,17 | 0,70 | 1,30 | 0,11 | 0,14 | 13,27 | |
| 5 | 1156_10 | 3.780 | 0,23 | 0,15 | 1,00 | 1,30 | 0,17 | 0,70 | 1,30 | 0,11 | 0,14 | 12,54 | 13,42 |
| 5 | 1156_11 | 3.780 | 0,23 | 0,15 | 0,78 | 0,90 | 0,17 | 0,70 | 0,70 | 0,11 | 0,09 | 13,19 | |
| 3 | 1156_11 | 4.000 | 0,23 | 0,15 | 0,78 | 0,90 | 0,17 | 0,70 | 0,70 | 0,11 | 0,09 | 13,25 | |
| 4 | 1156_11 | 4.826 | 0,23 | 0,15 | 0,78 | 0,90 | 0,17 | 0,70 | 0,70 | 0,11 | 0,09 | 14,15 | |
| 2 | 1156_11 | 6.200 | 0,23 | 0,15 | 0,78 | 0,90 | 0,17 | 0,70 | 0,70 | 0,11 | 0,09 | 14,94 | |
| 1 | 1156_11 | 6.264 | 0,21 | 0,15 | 1,00 | 0,90 | 0,17 | 0,70 | 0,90 | 0,11 | 0,09 | 12,65 | 13,68 |
| 5 | 1156_12 | 3.780 | 0,23 | 0,10 | 0,78 | 1,30 | 0,17 | 0,82 | 1,01 | 0,08 | 0,08 | 12,46 | |
| 3 | 1156_12 | 4.000 | 0,23 | 0,10 | 0,78 | 1,30 | 0,17 | 0,82 | 1,01 | 0,08 | 0,08 | 13,02 | |
| 4 | 1156_12 | 4.826 | 0,23 | 0,10 | 0,78 | 1,30 | 0,17 | 0,82 | 1,01 | 0,08 | 0,08 | 13,18 | |
| 2 | 1156_12 | 6.200 | 0,23 | 0,10 | 0,78 | 1,30 | 0,17 | 0,82 | 1,01 | 0,08 | 0,08 | 12,51 | |
| 1 | 1156_12 | 6.264 | 0,21 | 0,10 | 0,78 | 1,30 | 0,17 | 0,82 | 1,01 | 0,08 | 0,08 | 14,89 | 13,31 |
| 5 | 1156_13 | 3.780 | 0,23 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,55 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 | 12,72 | |
| 3 | 1156_13 | 4.000 | 0,23 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,55 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 | 14,06 | |
| 4 | 1156_13 | 4.826 | 0,23 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,55 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 | 13,49 | |
| 2 | 1156_13 | 6.200 | 0,23 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,55 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 | 13,06 | |
| 1 | 1156_13 | 6.264 | 0,21 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,55 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 | 15,09 | 13,76 |
| 5 | 1156_14 | 3.780 | 0,23 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,40 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 | 12,68 | |
| 3 | 1156_14 | 4.000 | 0,23 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,40 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 | 13,99 | |
| 4 | 1156_14 | 4.826 | 0,23 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,40 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 | 13,44 | |
| 2 | 1156_14 | 6.200 | 0,23 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,40 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 | 13,00 | |
| 1 | 1156_14 | 6.264 | 0,21 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,40 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 | 15,05 | 13,71 |
| 5 | 1156_15 | 3.780 | 0,23 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,35 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 | 12,66 | |
| 3 | 1156_15 | 4.000 | 0,23 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,35 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 | 13,96 | |
| 4 | 1156_15 | 4.826 | 0,23 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,35 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 | 13,42 | |
| 2 | 1156_15 | 6.200 | 0,23 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,35 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 | 12,97 | |
| 1 | 1156_15 | 6.264 | 0,21 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,35 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 | 15,02 | 13,68 |
| 5 | 1156_16 | 3.780 | 0,23 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,07 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 | 12,62 | |
| 3 | 1156_16 | 4.000 | 0,23 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,07 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 | 13,91 | |
| 4 | 1156_16 | 4.826 | 0,23 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,07 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 | 13,39 | |
| 2 | 1156_16 | 6.200 | 0,23 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,07 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 | 12,93 | |
| 1 | 1156_16 | 6.264 | 0,21 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,07 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 | 14,99 | 13,64 |
| 5 | 1156_17_v | 3.780 | 0,23 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,35 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 | 12,77 | |
| 3 | 1156_17_v | 4.000 | 0,23 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,35 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 | 14,09 | |
| 4 | 1156_17_v | 4.826 | 0,23 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,35 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 | 13,53 | |
| 2 | 1156_17_v | 6.200 | 0,23 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,35 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 | 13,09 | |
| 1 | 1156_17_v | 6.264 | 0,21 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,35 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 | 15,17 | 13,80 |
| 5 | 1156_18_v | 3.780 | 0,23 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,25 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 | 12,74 | |
| 3 | 1156_18_v | 4.000 | 0,23 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,25 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 | 14,05 | |
| 4 | 1156_18_v | 4.826 | 0,23 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,25 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 | 13,51 | |
| 2 | 1156_18_v | 6.200 | 0,23 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,25 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 | 13,05 | |
| 1 | 1156_18_v | 6.264 | 0,21 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,25 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 | 15,13 | 13,77 |
| 5 | 1156_19 | 3.780 | 0,23 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,17 | 1,90 | 1,04 | 0,82 | 0,85 | 13,56 | |
| 3 | 1156_19 | 4.000 | 0,23 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,17 | 1,90 | 1,04 | 0,82 | 0,85 | 15,12 | |
| 4 | 1156_19 | 4.826 | 0,23 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,17 | 1,90 | 1,04 | 0,82 | 0,85 | 14,33 | |
| 2 | 1156_19 | 6.200 | 0,23 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,17 | 1,90 | 1,04 | 0,82 | 0,85 | 14,19 | |
| 1 | 1156_19 | 6.264 | 0,21 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,17 | 1,90 | 1,04 | 0,82 | 0,85 | 15,37 | 14,56 |
| 5 | 1156_20 | 3.780 | 0,23 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,17 | 0,49 | 1,04 | 0,21 | 0,22 | 12,05 | |
| 3 | 1156_20 | 4.000 | 0,23 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,17 | 0,49 | 1,04 | 0,21 | 0,22 | 14,05 | |
| 4 | 1156_20 | 4.826 | 0,23 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,17 | 0,49 | 1,04 | 0,21 | 0,22 | 12,52 | |
| 2 | 1156_20 | 6.200 | 0,23 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,17 | 0,49 | 1,04 | 0,21 | 0,22 | 12,75 | |
| 1 | 1156_20 | 6.264 | 0,21 | 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,17 | 0,70 | 1,04 | 0,30 | 0,31 | 14,91 | 13,35 |

Tabella 41 - Variabili morfologiche, valori di consumo simulati per ogni edificio e valoridi consumo medi per sezione di censimento .

5.2.1 Andamento dei consumi al variare del BCR

Analizzando l'andamento dei consumi per riscaldamento degli edifici si può notare un andamento parabolico:

- Per valori alti di BCR si hanno dei kWh/m³ anno alti;
- Per valori medi di BCR si hanno dei consumi più contenuti;
- Al di sotto di un certo valore di BCR i consumi tendono a salire.

In particolare, i valori di consumo più alti si hanno per valori di BCR pari a 0.55, mentre per un indice di copertura pari al 31% si hanno dei consumi più contenuti e, al di sotto di questo valore, i kWh/m³ anno aumentano, come si può osservare dal grafico 1.

| BCR [m ² /m ²] | H/Hm (m/m) | MOS | A | H/W (m/m) | S | UM | GUMS | consumo reale (kWh/m ³ anno) | consumo calcolato (kWh/m ³ anno) |
|--|---------------|------|------|--------------|------|------|------|--|--|
| 0,14 | 0,88 | 1,27 | 0,17 | 0,63 | 1,12 | 0,09 | 0,10 | 12,19 | 12.19 |
| 0,31 | 1,32 | 1,30 | 0,17 | 0,86 | 1,72 | 0,27 | 0,45 | 12,18 | 12.18 |
| 0,45 | 1,20 | 1,30 | 0,17 | 0,89 | 1,56 | 0,40 | 0,62 | 12,59 | 12.45 |
| 0,55 | 1,20 | 1,30 | 0,17 | 0,89 | 1,56 | 0,49 | 0,74 | 12,72 | 12.72 |

Tabella 42 - Consumi energetici per riscaldamento accorpati rispetto ai valori del parametro BCR.

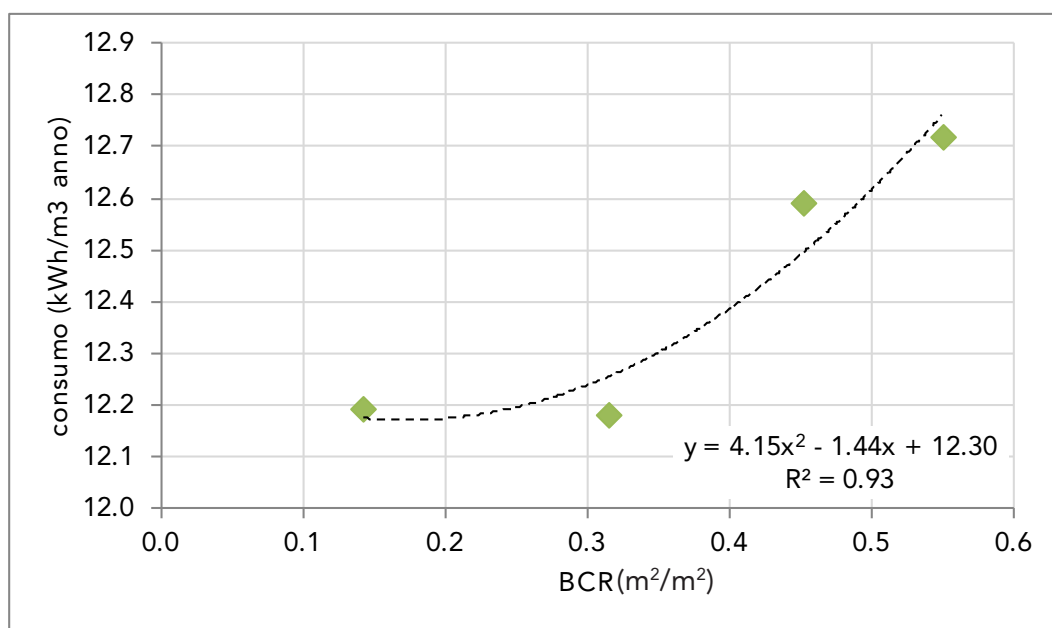


Grafico 21 - andamento dei consumi rispetto al parametro BCR

A questo punto è possibile definire un'equazione che permette di calcolare il consumo dell'edificio in base ai parametri urbani al variare del parametro BCR. Tale equazione è tarata in base all'andamento dei parametri presi in considerazione.

$$\text{CONSUMO ENERGETICO PER RISCALDAMENTO [KWh/m}^3\text{]} = 1.9 \cdot (\text{BCR})^2 + 0.9 \cdot \text{BCR} + 0.2 \cdot \text{H/W} - 1 \cdot \text{H/W} + 12.3$$

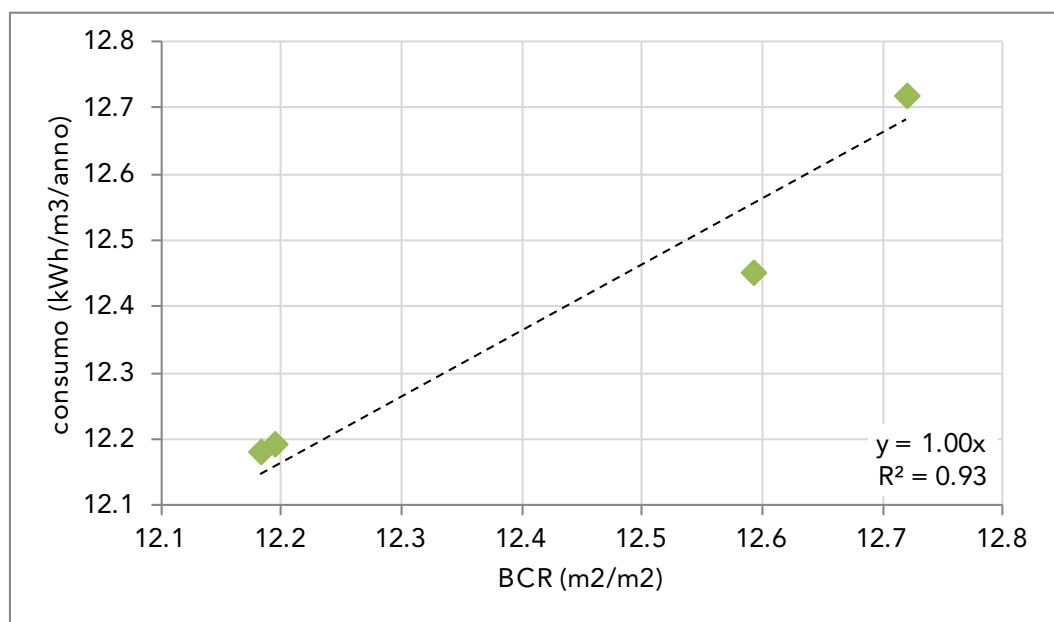


Grafico 22 - correlazione lineare tra il consumo reale e il consumo calcolato

5.2.2 Andamento dei consumi al variare del H/W

Analizzando l'andamento dei consumi per riscaldamento degli edifici al variare del parametro H/W, si può notare un andamento parabolico:

- Per valori alti e bassi di H/W si hanno dei kWh/m³ anno alti;
- Per valori medi di H/W si hanno dei consumi più bassi;

In particolare, i valori di consumo più alti si hanno per valori di H/W pari a 1.9, mentre per un Aspect Ratio pari a 0.9 si hanno dei consumi più bassi e, al di sotto di questo valore, i kWh/m³ anno aumentano, come si può osservare dal grafico 3.

| BCR [m ² /m ²] | H/Hm | MOS | A | H/W | S | UM | GUMS | consumo reale (kWh/m ³ anno) | consumo calcolato (kWh/m ³ anno) |
|--|------|------|------|------|------|------|------|--|--|
| 0,44 | 0,80 | 1,30 | 0,17 | 0,49 | 1,04 | 0,21 | 0,22 | 13,35 | 13.35 |
| 0,45 | 1,20 | 1,30 | 0,17 | 0,65 | 1,56 | 0,29 | 0,45 | 12,40 | 12.46 |
| 0,47 | 1,20 | 1,30 | 0,17 | 0,89 | 1,56 | 0,40 | 0,62 | 12,59 | 12.60 |
| 0,45 | 1,20 | 1,30 | 0,17 | 1,15 | 1,56 | 0,52 | 0,86 | 12,91 | 12.76 |
| 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,17 | 1,90 | 1,04 | 0,82 | 0,85 | 14,56 | 14.76 |

Tabella 43 - Consumi energetici per riscaldamento accorpati rispetto ai valori del parametro H/W.

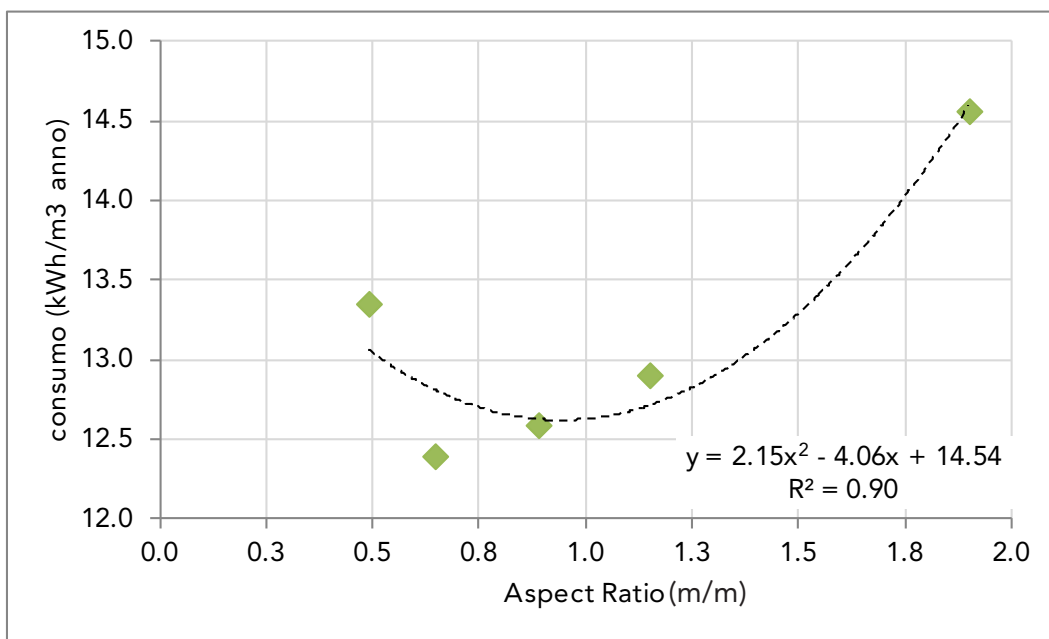


Grafico 23 - Andamento dei consumi rispetto alla variazione di H/W

A questo punto è possibile definire un'equazione che permette di calcolare il consumo dell'edificio in base ai parametri urbani al variare del parametro H/W. Tale equazione è tarata in base all'andamento dei parametri presi in considerazione.

$$\text{CONSUMO ENERGETICO PER RISCALDAMENTO [KWh/m}^3\text{]} = 0.7 \cdot (\text{BCR})^2 + 0.6 \cdot \text{BCR} - 2.4 \cdot \text{H}/\text{H}_{\text{average}} + 1.6 \cdot \text{A} - 0.2 \cdot \text{H}/\text{W} + 14.6$$

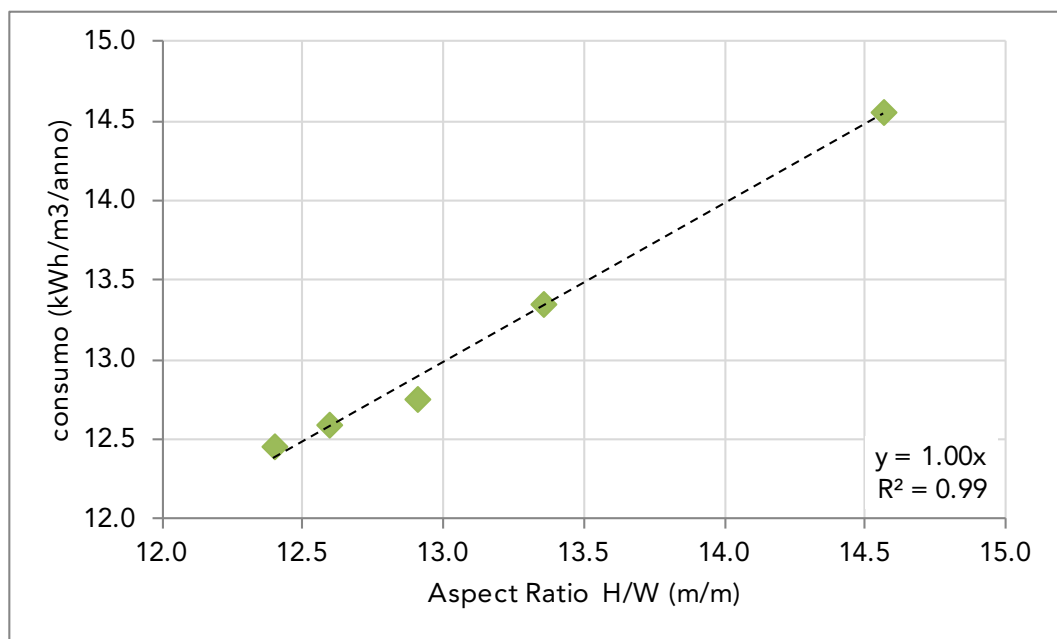


Grafico 24 - correlazione lineare tra il consumo reale e il consumo calcolato

5.2.3 Andamento dei consumi al variare del H/H_{av}

Analizzando l'andamento dei consumi per riscaldamento degli edifici al variare del parametro $H/H_{average}$, si può notare un andamento parabolico:

- Al crescere del parametro i consumi diminuiscono;
- Al di sotto di un certo valore del parametro i consumi si stabilizzano.

In particolare, i valori di consumo più alti si hanno per valori di $H/H_{average}$ pari a 0.7, mentre per un Solar Exposure pari a 1.5 si hanno i consumi più bassi e, al di sotto di questo valore, i kWh/m³ anno si stabilizzano, come si può osservare dal grafico 5.

| BCR [m ² /m ²] | H/H _m | MOS | A | H/W | S | UM | GUMS | consumo reale (kWh/m ³ /anno) |
|--|------------------|------|------|------|------|------|------|---|
| 0,43 | 0,70 | 1,30 | 0,17 | 0,97 | 0,91 | 0,42 | 0,38 | 14,79 |
| 0,43 | 0,80 | 1,30 | 0,17 | 0,97 | 1,04 | 0,42 | 0,43 | 13,80 |
| 0,45 | 1,07 | 1,30 | 0,17 | 0,89 | 1,39 | 0,40 | 0,56 | 12,51 |
| 0,46 | 1,54 | 1,30 | 0,17 | 0,82 | 2,00 | 0,39 | 0,77 | 11,58 |
| 0,46 | 2,15 | 1,30 | 0,17 | 0,86 | 2,80 | 0,39 | 1,11 | 11,66 |

Tabella 44 - Consumi energetici per riscaldamento accorpati rispetto ai valori del parametro H/H_{av} .

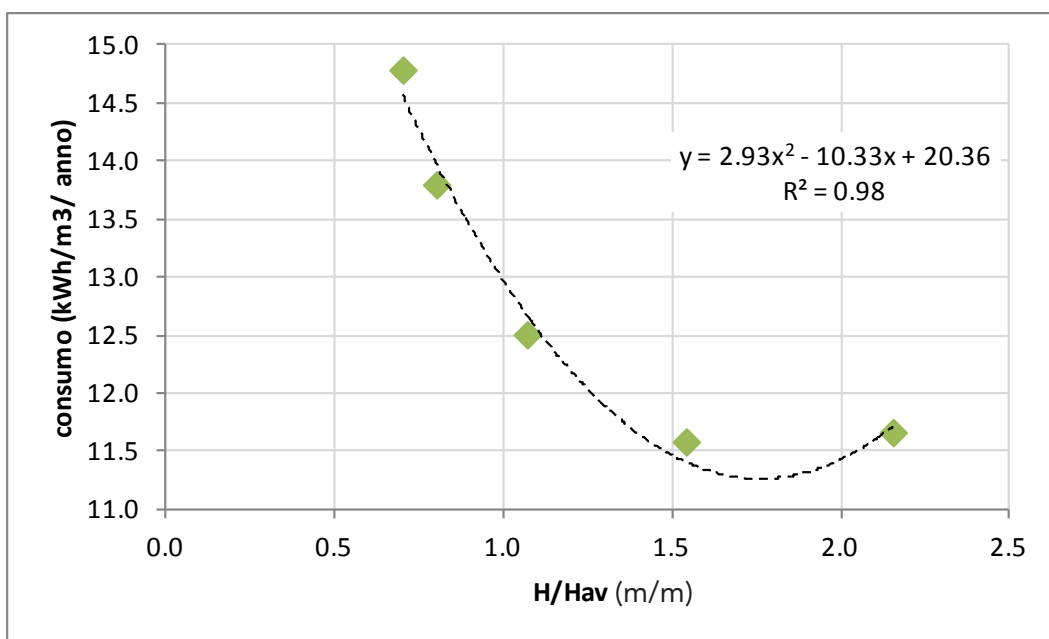


Grafico 25 - Andamento dei consumi rispetto alla variazione di $H/H_{average}$

5.2.4 Andamento dei consumi al variare del MOS

Analizzando l'andamento dei consumi per riscaldamento degli edifici al variare del parametro MOS, si può notare un andamento lineare decrescente:

- i consumi sono inversamente proporzionali ai valori di MOS;

In particolare, i valori di consumo più alti si hanno per valori di MOS pari a 0.9, mentre per un'orientazione prevalente delle strade pari a 1.3 si hanno i consumi più bassi grafico 7.

| BCR [m ² /m ²] | H/Hm | MOS | A | H/W | S | UM | GUMS | consumo reale (kWh/m ³ /anno) | consumo calcolato (kWh/m ³ /anno) |
|--|------|------|------|------|------|------|------|---|---|
| 0,45 | 1,20 | 0,80 | 0,17 | 0,89 | 1,56 | 0,40 | 0,62 | 12,90 | 12.98 |
| 0,45 | 1,20 | 0,90 | 0,17 | 0,89 | 1,08 | 0,40 | 0,42 | 12,97 | 12.91 |
| 0,45 | 1,20 | 1,00 | 0,17 | 0,89 | 1,56 | 0,40 | 0,62 | 12,85 | 12.85 |
| 0,45 | 1,20 | 1,20 | 0,17 | 0,89 | 1,56 | 0,40 | 0,62 | 12,76 | 12.71 |
| 0,45 | 1,20 | 1,30 | 0,17 | 0,89 | 1,56 | 0,40 | 0,62 | 12,59 | 12.64 |

Tabella 45 - Consumi energetici per riscaldamento accorpati rispetto ai valori del parametro MOS

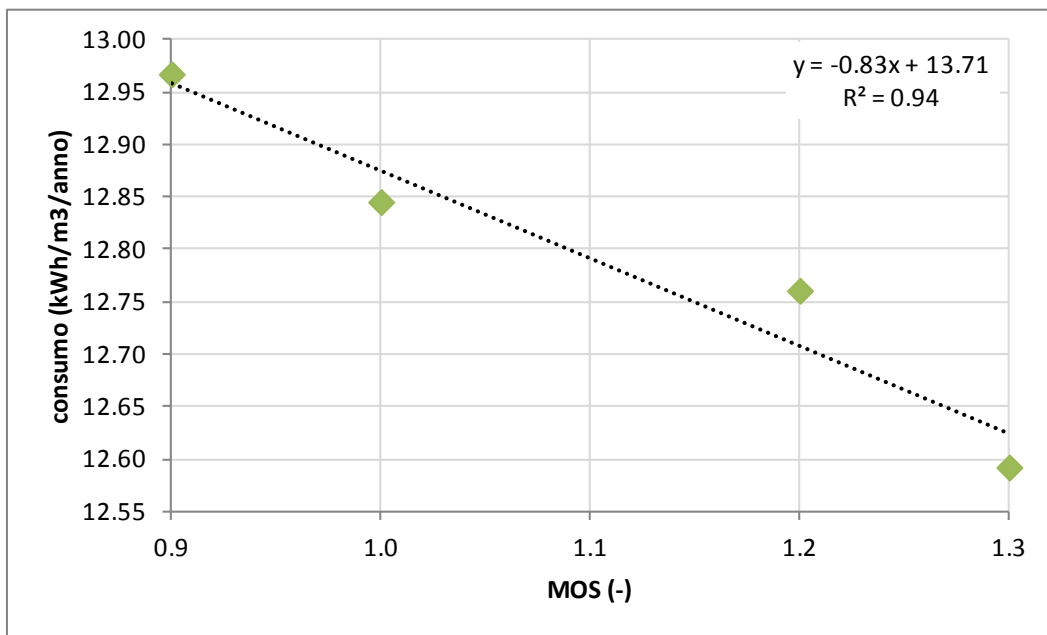


Grafico 26 - Andamento dei consumi rispetto alla variazione di MOS

A questo punto è possibile definire un'equazione che permette di calcolare il consumo dell'edificio in base ai parametri urbani al variare del parametro MOS. Tale equazione è tarata in base all'andamento dei parametri presi in considerazione.

$$\text{CONSUMO ENERGETICO PER RISCALDAMENTO [KWh/m}^3\text{]} = 1.7 \cdot (\text{BCR})^2 + 1 \cdot \text{BCR} - 0.7 \cdot \text{MOS} + 2.3 \cdot A + 1.2 \cdot (\text{H/W})^2 + 1.1 \cdot \text{H/W} + 10.4$$

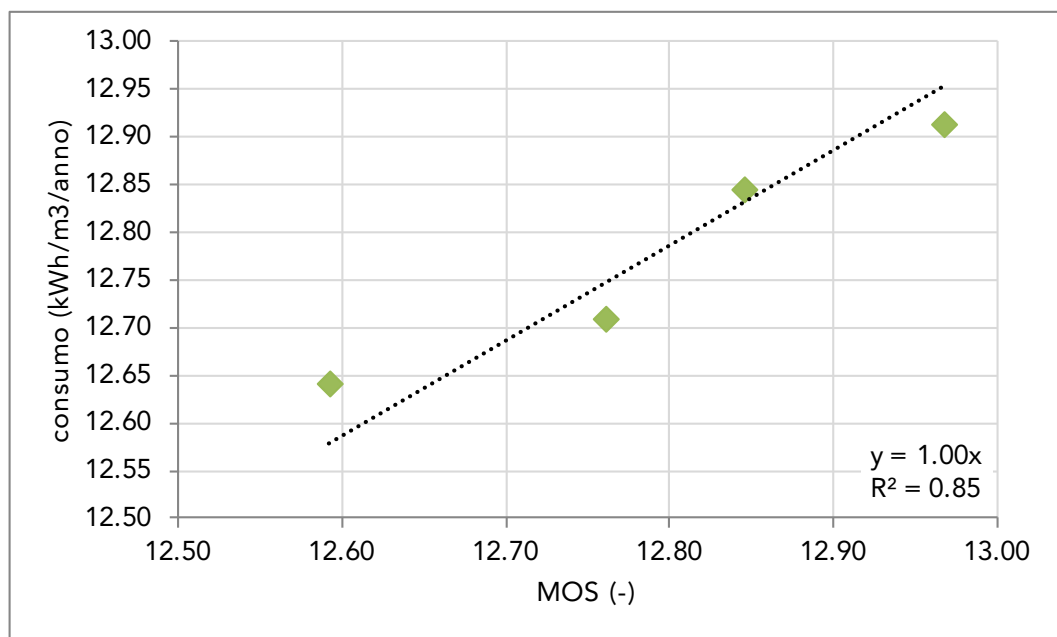


Grafico 27 - correlazione lineare tra il consumo reale e il consumo calcolato

5.2.5 Andamento dei consumi al variare di ALBEDO

Analizzando l'andamento dei consumi per riscaldamento degli edifici al variare del parametro Albedo, si osserva un andamento lineare crescente:

- i consumi sono direttamente proporzionali ai valori di Albedo;

In particolare, i valori di consumo più alti si hanno per valori di Albedo pari a 0.07 ovvero asfalto scuro, mentre per una pavimentazione chiara caratterizzata da un albedo pari a 0.55 si hanno i consumi più bassi, come si può osservare dal grafico 8. I due valori in verde scuro si riferiscono a superfici verdi caratterizzate dal tag dell'evapotraspirazione. Per il verde si osserva che, a parità di albedo, i consumi aumentano. Questo in base al fatto che una superficie caratterizzata da evapotraspirazione si comporta in maniera differente.

| BCR [m ² /m ²] | H/Hm | MOS | A | H/W | S | UM | GUMS | consumo reale (kWh/m ³ /anno) | consumo calcolato (kWh/m ³ /anno) |
|--|------|------|------|------|------|------|------|---|---|
| 0,45 | 1,20 | 1,30 | 0,07 | 0,89 | 1,56 | 0,40 | 0,62 | 12,44 | 12.44 |
| 0,45 | 1,20 | 1,30 | 0,25 | 0,89 | 1,56 | 0,40 | 0,61 | 12,47 | 12.49 |
| 0,45 | 1,20 | 1,30 | 0,35 | 0,89 | 1,56 | 0,40 | 0,62 | 12,48 | 12.51 |
| 0,45 | 1,20 | 1,30 | 0,40 | 0,89 | 1,56 | 0,40 | 0,62 | 12,50 | 12.52 |
| 0,45 | 1,20 | 1,30 | 0,55 | 0,89 | 1,56 | 0,40 | 0,62 | 12,55 | 12.55 |
| superfici verdi (tag evapotraspirazione) | | | | | | | | | |
| 0,45 | 1,20 | 1,30 | 0,35 | 0,89 | 1,56 | 0,40 | 0,62 | 12,59 | 12.51 |
| 0,45 | 1,20 | 1,30 | 0,25 | 0,89 | 1,56 | 0,40 | 0,62 | 12,56 | 12.48 |

Tabella 46 - Consumi energetici per riscaldamento accorpato rispetto ai valori del parametro A

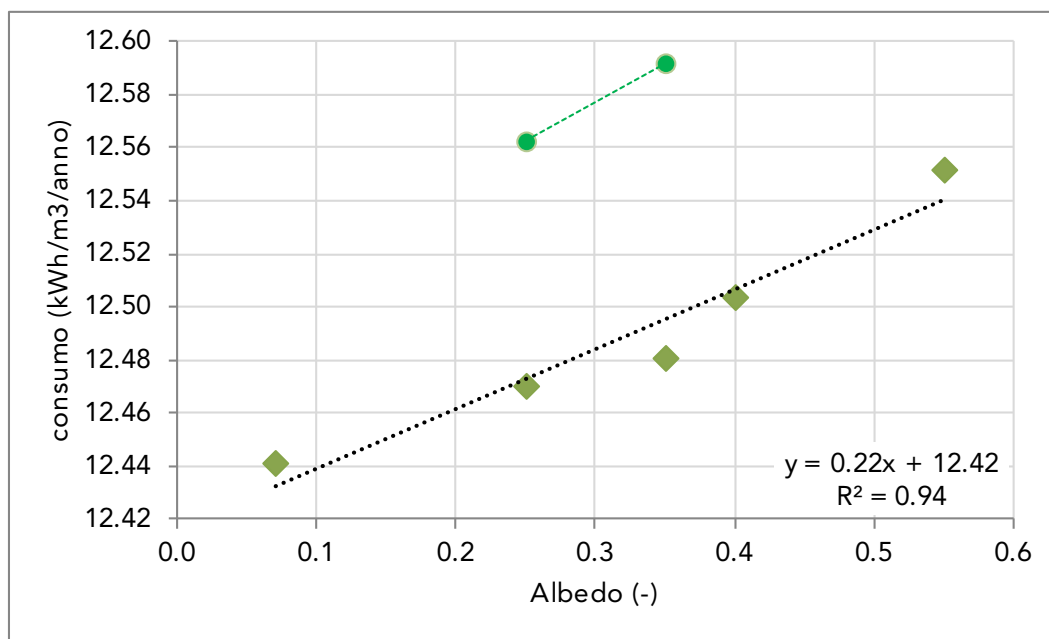


Grafico 27 - Andamento dei consumi rispetto alla variazione di A

A questo punto è possibile definire un'equazione che permette di calcolare il consumo dell'edificio in base ai parametri urbani al variare del parametro Albedo. Tale equazione è tarata in base all'andamento dei parametri presi in considerazione.

Nell'equazione di multidigressione lineare la variabile G è una variabile discreta che vale 1 se vi è presenza di verde e 0 se il verde è assente.

$$\begin{aligned} \text{CONSUMO ENERGETICO PER RISCALDAMENTO [KWh/m}^3\text{]} = \\ 2.5*(BCR)^2 + 6*BCR - 0.6*MOS + 0.3*A + 5.1*(H/W)^2 + 6.4*H/W + 0.2 + \\ + 0.1 * G \end{aligned}$$

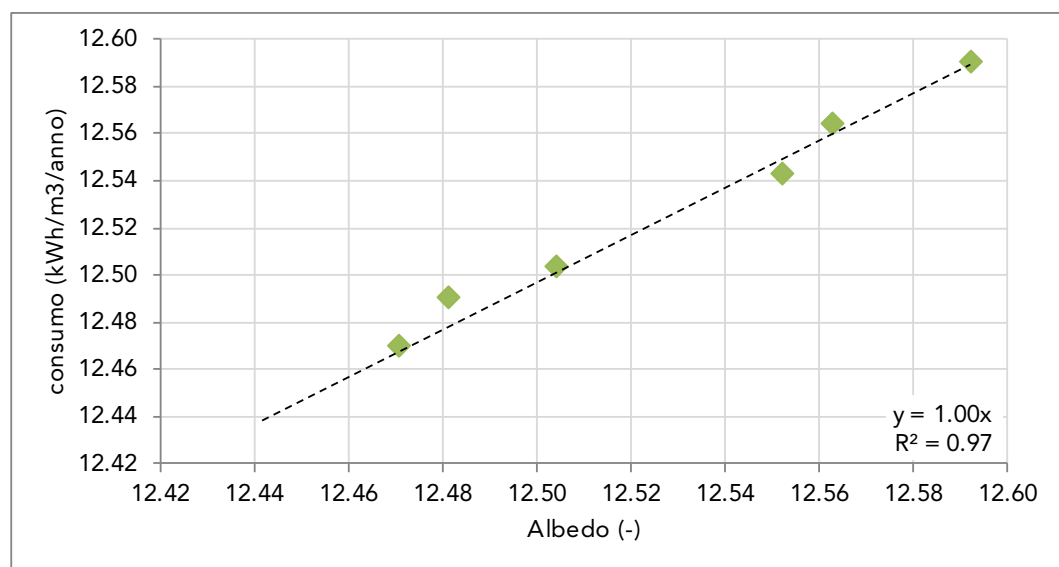


Grafico 28 - correlazione lineare tra il consumo reale e il consumo calcolato

5.2.6 Il calcolo dei consumi energetici in funzione degli indicatori della forma urbana

Nella parte finale dell'analisi dei risultati è stato analizzato l'andamento del consumo urbano in funzione della variazione di BCR prendendo in considerazione tutte le simulazioni svolte. In questo caso è stato necessario accorpare i dati rispetto al Solar factor, poiché non è stato possibile trovare un andamento unico. In particolare, per valori di solar factor inferiori o uguali 1.04 si hanno consumi più alti e un andamento lineare decrescente in funzione del BCR, mentre per valori di Solar Factor alti si hanno dei consumi ridotti e un andamento parabolico, come si può notare dal grafico 11.

| BCR [m ² /m ²] | H/Hm | MOS | A | H/W | S | UM | GUMS | GUMSA | consumo reale (kWh/m ³ /anno) | consumo calcolato (kWh/m ³ /anno) |
|--|------|------|------|------|------|------|------|-------|---|---|
| Solar Factor <= 1.04 | | | | | | | | | | |
| 0,13 | 0,80 | 1,10 | 0,17 | 0,76 | 0,88 | 0,09 | 0,09 | 0,02 | 13,50 | 13.50 |
| 0,22 | 0,80 | 1,30 | 0,17 | 1,00 | 1,04 | 0,22 | 0,23 | 0,04 | 13,61 | 13.621 |
| 0,35 | 0,80 | 1,30 | 0,17 | 1,00 | 1,04 | 0,35 | 0,36 | 0,06 | 13,73 | 13.65 |
| 0,44 | 0,79 | 1,25 | 0,24 | 1,01 | 0,99 | 0,44 | 0,45 | 0,11 | 13,86 | 14.04 |
| 0.43 | 0.80 | 1.30 | 0.30 | 1.02 | 0.97 | 1.04 | 0.43 | 0.13 | 13.79 | 13.79 |
| Solar Factor > 1.04 | | | | | | | | | | |
| 0,13 | 1,00 | 1,30 | 0,17 | 0,49 | 1,30 | 0,06 | 0,08 | 0,01 | 11,76 | 11.76 |
| 0,25 | 1,54 | 1,30 | 0,17 | 0,80 | 2,00 | 0,20 | 0,40 | 0,07 | 11,48 | 11.48 |
| 0,35 | 1,54 | 1,30 | 0,17 | 0,80 | 2,00 | 0,28 | 0,56 | 0,10 | 11,60 | 11.51 |
| 0,47 | 1,57 | 1,26 | 0,22 | 0,85 | 1,98 | 0,40 | 0,80 | 0,18 | 11,83 | 11.86 |
| 0.47 | 1.54 | 1.3 | 0.30 | 0.82 | 2.00 | 0.39 | 0.77 | 0.23 | 11.56 | 11.85 |

Tabella 47 - Consumi energetici per riscaldamento accorpati rispetto ai valori del parametro BCR

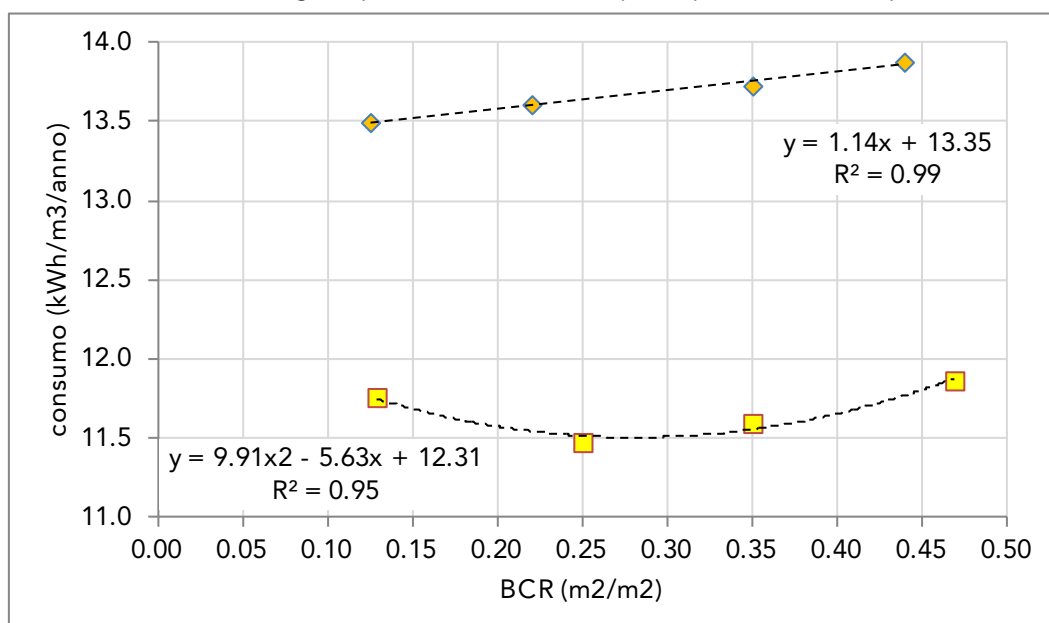


Grafico 29 - Andamento dei consumi rispetto al BCR

A questo punto è possibile definire un'equazione che permette di calcolare il consumo dell'edificio in funzione di tutti i parametri della forma urbana considerati al variare del parametro BCR. Tale equazione è tarata in base all'andamento dei parametri presi in considerazione. In questo caso, è stato necessario trovare due equazioni a seconda se si considera o meno la presenza di superfici verdi nel contesto urbano. Nella tabella 6 le due righe in verde rappresentano delle situazioni in cui viene considerata la presenza del verde.

(presenza del verde)

$$\begin{aligned} \text{CONSUMO ENERGETICO PER RISCALDAMENTO [KWh/m}^3\text{]} = \\ -0.4*(\text{BCR})^2 + 1.23*\text{BCR} - 1.96*H/H_{av} - 3.52*MOS + 0.63*A + \\ - 0.05*(H/W)^2 + 1.95*H/W + 17.78 + 0.12 * G \end{aligned}$$

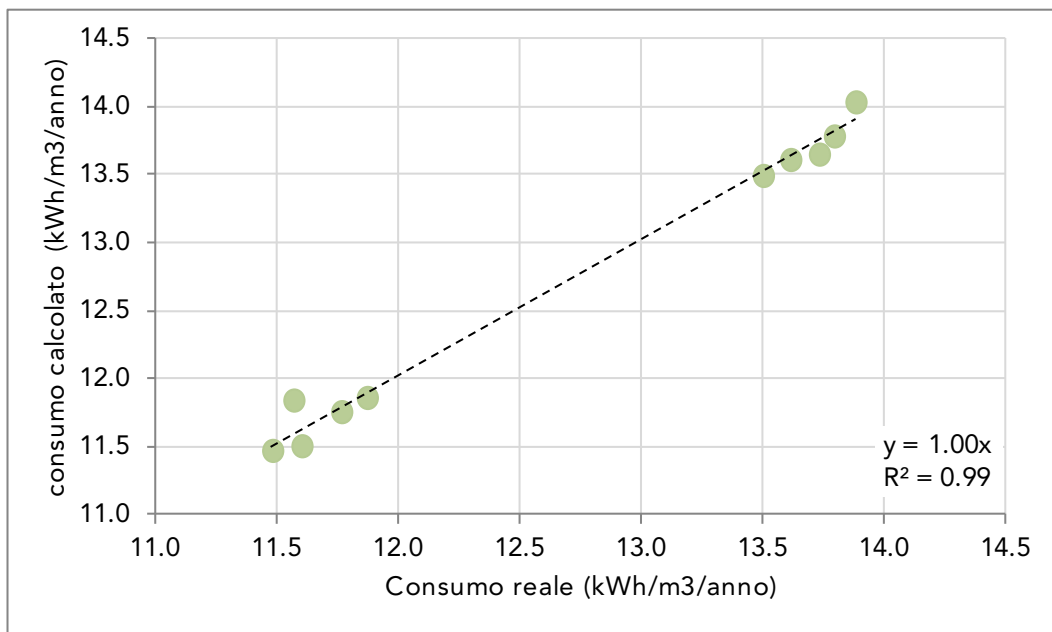


Grafico 30 - correlazione lineare tra il consumo reale e il consumo calcolato

Dopo aver ottenuto l'equazione che permette di calcolare il consumo energetico per riscaldamento degli edifici a partire dalle variabili urbane, è stato possibile calcolare il peso di ciascuna variabile sul consumo degli edifici. Da questa analisi è emerso che i parametri che influiscono maggiormente sono l' H/H_{avg} , ovvero l'esposizione solare degli edifici, il MOS, ovvero l'orientazione prevalente delle strade, l'Aspect ratio, ovvero il rapporto tra l'altezza degli edifici e la larghezza delle strade e la costante. Il BCR e l'Albedo, invece, influiscono in minima misura.

| | BCR | H/H_{avg} | MOS | Albedo | Verde | H/W | costante |
|---------|-------|-------------|-------|--------|-------|------|----------|
| minimo | -0.03 | -1.55 | -3.87 | 0.11 | 0.00 | 0.44 | 17.78 |
| massimo | 0.08 | -3.10 | -4.57 | 0.19 | 0.12 | 1.96 | 17.78 |

Tabella 48 - Peso dei valori minimi e massimi dei parametri urbani sul consumo per riscaldamento



Grafico 31 - Peso dei valori minimi e massimi sul consumo energetico per riscaldamento.

Infine, è stato possibile determinare l'andamento dei consumi per riscaldamento degli edifici in funzione della variazione del GUMS e del GUMSA. In entrambi i casi si osserva un andamento parabolico per valori di Solar Factor superiori di 1.04 e un andamento rettilineo per valori di Solar Factor alti.

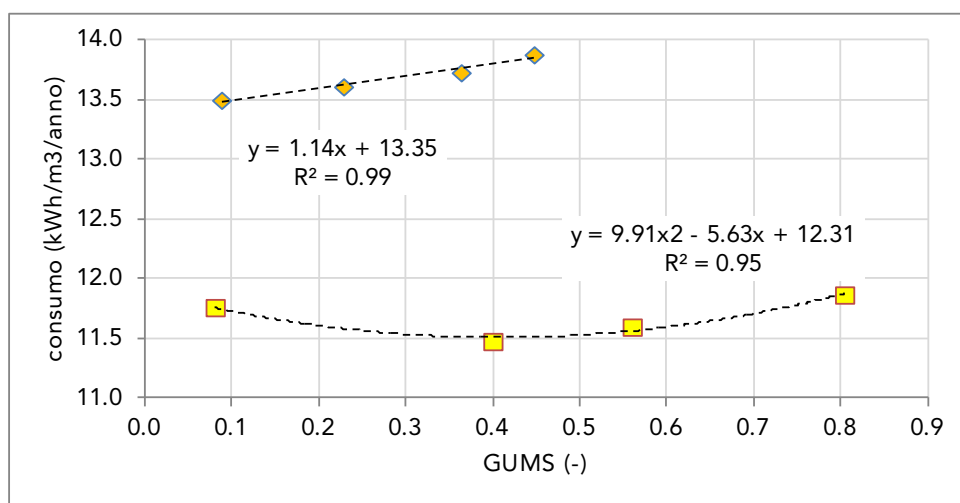


Grafico 32 - Andamento dei consumi in funzione del GUMS

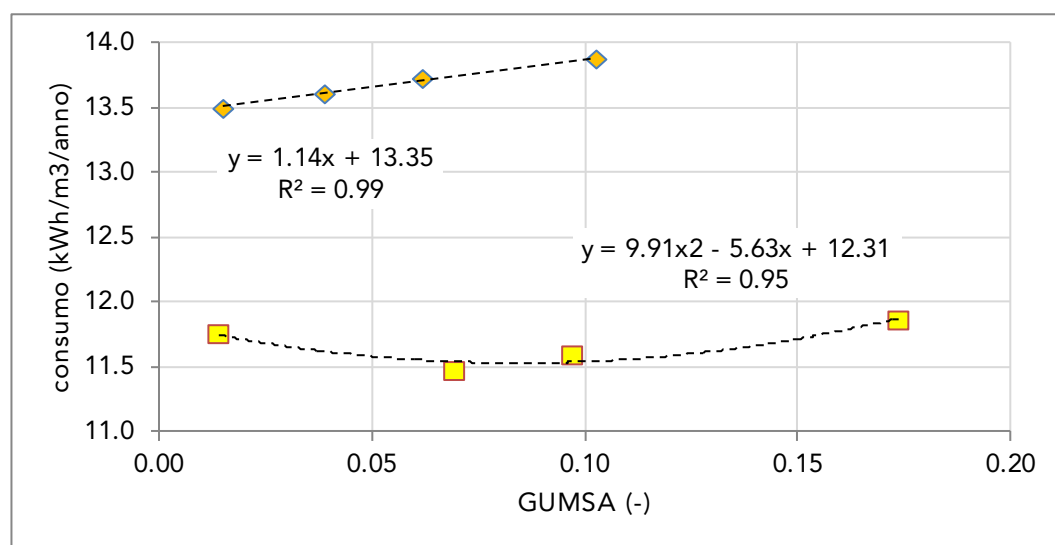


Grafico 33 - Andamento dei consumi in funzione del GUMSA

6. LA FORMA URBANA E LE URBAN COOL ISLAND. I POSSIBILI SVILUPPI DELLA RICERCA.

Nel capitolo precedente abbiamo visto in che modo i parametri urbani influiscono sul consumo energetico per riscaldamento degli edifici. L'analisi però si è concentrata solo in una zona di Torino, caratterizzata da un tessuto urbano molto compatto e da edifici risalenti al secondo dopo guerra.

Dall'analisi degli andamenti dei consumi al variare dei parametri che definiscono la forma urbana, si è visto come il consumo degli edifici per riscaldamento diminuisce se il contesto urbano tende ad essere meno denso e caratterizzato da larghe strade. In questo modo infatti, gli edifici sono esposti maggiormente alla radiazione solare e necessitano di minore energia per il riscaldamento.

In un clima temperato, come quello della città di Torino, quindi, secondo il lavoro appena svolto, per favorire la diminuzione della domanda di energia per riscaldamento degli edifici, bisognerebbe prediligere la progettazione di quartieri caratterizzati da un rapporto di copertura di circa il 30%, ovvero di quartieri caratterizzati da valori di BCR inferiori a quelli che caratterizzano la città antica. Oltre che sul consumo energetico degli edifici, la forma urbana influisce anche sulla temperatura superficiale delle superfici esterne degli edifici andando ad accentuare o diminuire l'effetto isola di calore e modificando il comfort urbano. Un altro limite di questa ricerca è stato quello di aver preso in considerazione solo un tipo di clima, ovvero il clima temperato, e di aver posto l'accento solo sul problema della climatizzazione invernale.

Gli sviluppi futuri della ricerca svolta potrebbero proseguire proprio in questo senso, ovvero:

- Si potrebbe applicare la metodologia utilizzata in questo lavoro per capire in che modo la forma urbana influisce sulle temperature superficiali esterne degli edifici e quindi sul fenomeno isola di calore.
- La metodologia illustrata potrebbe essere applicata per analizzare in che modo la forma influisce sul consumo per il raffrescamento degli edifici in clima arido.

In questo capitolo entreremo nel merito della questione, andando ad analizzare, in maniera preliminare, il fenomeno delle *cool island* in due diverse zone della città di Dubai: la zona di AlBatakyia, caratterizzata da un'architettura araba

tradizionale, e la zona dei grattacieli di Dubai Marina.

In questo capitolo verrà descritta l'analisi delle temperature superficiali nei due quartieri sopra citati, svolta con il software CitySim Pro. Questo software, infatti, permette di calcolare per ogni superficie del modello, sia la relativa radiazione solare incidente sia la temperatura superficiale. I risultati vengono restituiti in forma di un file di testo, che può essere aperto su Excel, nel quale ad ogni superficie del modello è associato il relativo valore di surface temperature per ogni ora dell'anno. In questo modo è possibile analizzare le temperature superficiali delle pareti verticali degli edifici, delle pareti orizzontali e del terreno separatamente.

In questa parte del lavoro, lo scopo è quello di analizzare, in maniera preliminare, il fenomeno delle cool island in una città caratterizzata da un clima arido come quella di Dubai e di capire quale delle due zone ha una risposta più efficiente in termini di comfort esterno. Per fare questo, sono state messe a confronto le temperature superficiali del terreno del quartiere vernacolare di Al Bastakiya e del quartiere più moderno di Dubai Marina.

Questa parte del lavoro è stata svolta nell'ambito di un tirocinio presso il dipartimento LESO dell'École Polytechnique Fédérale de Lausanne sotto la supervisione del Prof. Jérôme Henri Kämpf e della dottoranda Silvia Coccolo, sviluppatori del software CitySim Pro.

6.1 Il caso studio di Dubai: i quartieri di AlBastakya e Dubai Marina

6.1.1 La tipologia della casa a corte: una forma bioclimatica?

Nel lavoro di C. Ratti e al.(2006), gli autori si pongono una serie di questioni circa la forma dei cosiddetti "edifici a corte" (courtyard housing). Queste tipologie di edifici sono presenti nelle regioni del mondo più disparate dal punto di vista geografico, climatico e culturale e hanno dato vita ad un'abbondante letteratura nei campi dell'architettura e della pianificazione urbana. Nel suo lavoro, l'autore si pone alcune questioni:

- gli edifici a corte sono dei collettori o degli schermatori solari?
- quanto sono efficienti gli edifici a corte, in termini di risposta climatica, rispetto a forme urbane alternative, come gli edifici a blocchi isolati (pavilions), che stanno colonizzando le nostre città contemporanee?

L'articolo cerca di rispondere a queste domande attraverso il calcolo di alcune variabili ambientali ben stabilite su edifici a corte vernacolari semplificati e altre due forme architettoniche. L'analisi mette a confronto un contesto caratterizzato da un clima arido e uno caratterizzato dal clima freddo Scandinavo.

La ricerca prende spunto dal lavoro di Martin e March (Martin e March 1967,1972) nel quale i due autori si chiedevano quale fosse la forma di un edificio per la quale si ha un uso ottimo del suolo (What building form make the best use of land?). Nonostante la validità e l'eredità dell'approccio dei due autori, la risposta a tale quesito non è assoluta in quanto bisogna sempre prendere in considerazione le variabili climatiche. Persino la capacità di un edificio di ricevere la luce naturale, un parametro che Martin e March prendono in considerazione, può essere una condizione sfavorevole nelle zone climatiche dove è richiesta la presenza di oscuranti.

Nel suo lavoro Ratti cerca di estendere l'approccio di Martin e March attraverso una metodologia divisa in tre passaggi:

- Esaminare diverse forme urbane nel contesto di un clima caldo-arido, che hanno permesso di identificare le variabili ambientali di interesse. Queste variabili includono: il rapporto superficie volume, la densità delle ombre (shadow densities), l'accesso alla luce naturale (daylight accessibility) e lo Sky View Factor;
- Rivalutare i risultati di Martin e March ripetendo le loro simulazioni sulla luce naturale attraverso tecniche di image processing di nuovo sviluppo;

- Considerare tipologie urbane più realistiche che non hanno le generalità di quelle di Martin e March. Si comincia da un tipo di edificio a corte semplificato, basato su esempi vernacolari largamente documentati che si possono trovare nelle regioni aride, e successivamente, imitando trasformazioni che potrebbero avere luogo - o che hanno già avuto luogo - nelle città reali. Le forme urbane prese in considerazione consistono in edifici a corte e due forma di padiglione, come rappresentato nella figura 52.

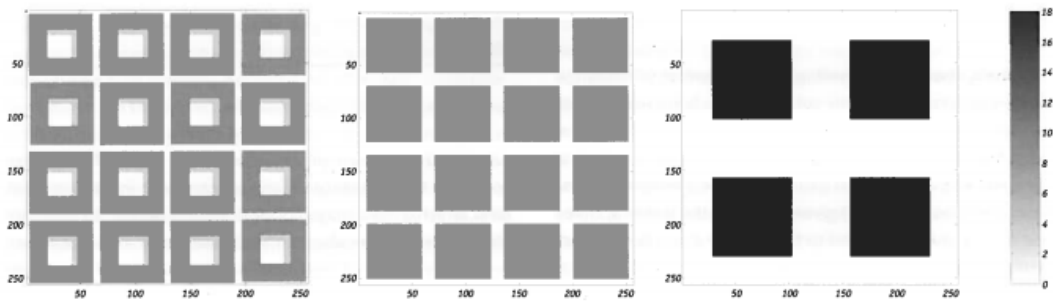


Figura 52 - Configurazione degli edifici a corte, il padiglione 1 e il padiglione 2 rappresentati tramite un immagine DEM (il livello di grigio è proporzionale all'altezza dell'edificio).

Per ognuna di queste configurazioni della forma urbana vengono calcolati i quattro parametri prima citati (surface to volume ratio, shadow density, daylight distribution e sky view factor) a varie latitudini per poi essere confrontati tra di loro.

Nell'conclusione dell'articolo, l'autore afferma che la tipologia a corte è effettivamente quella che ha una migliore risposta bioclimatica rispetto alle altre due tipologie, ma che questo risultato può variare a seconda del clima che si prende in considerazione.

Prendendo spunto dalla ricerca di Ratti, in questo lavoro verranno messi a confronto due quartieri di Dubai: il quartiere vernacolare di Al Bastakya e quello più contemporaneo di Dubai Marina.

6.1.2 Il quartiere vernacolare di AlBastakya

Il villaggio di Al Bastakiya è situato lungo il fiume di Dubai e il forte di Al Fahidi è uno dei più antichi edifici residenziali di Dubai.

Al Bastakiya fu costruita negli anni '90 del 1600 e consisteva in 60 edifici residenziali, molti dei quali appartenevano a ricchi mercanti persiani. Strette corsie e tradizionali torri del vento venivano usate per dividere le case. In ogni caso, tutto questo cambiò con la scoperta del petrolio nella regione e molte famiglie si spostarono nella più moderna città di Dubai.

Le tradizionali torri del vento venivano usate in Al Bastakiya per mantenere le case fresche e per creare una ventilazione naturale, catturando il vento e indirizzandolo negli spazi interni.

Al Bastakya è caratterizzata da edifici a corte alti due piani con tetto piano. Il sistema costruttivo è caratterizzato da pareti portanti spesse circa 120 cm (Hadid 2002) intonacate con argilla locale dal colore chiaro. Le pareti sono costituite da tre strati: due esterni costituiti da pietra calcarea e uno interno composto da malta e calcinacci in pietra (B.Edwards, M. Sibley, M. Hakmi, P. Land 2016)

Gli edifici attuali sono ristrutturati nel 2005: i lavori hanno riguardato il miglioramento degli infissi e la rifunzionalizzazione degli edifici.

Del quartiere sono state calcolate le variabili urbane riassunte nella tabella 1:



Figura 53 - Il villaggio di AlBastakya. Fonte www.flashydubai.com



Figura 54 - Ortofoto del quartiere di AlBastakya. Fonte: Google maps (2016)

| Al Bastakiya | |
|--------------|------|
| BCR (m/m) | 0.61 |
| Hm (m) | 10 |
| SVF | 0.4 |
| BO | 1 |
| A | 0.4 |

Tabella 49 - Principali parametri urbani calcolati per il quartiere di AlBastakya

6.1.3 Il quartiere moderno di Dubai Marina

Dubai Marina è un distretto nel cuore di quella che viene chiamata Nuova Dubai. Come altri distretti recentemente edificati in Dubai, è stata letteralmente creata dal nulla della mano dell'uomo ed è stata realizzata dalla Emaar Properties, una real estate degli Emirati Arabi.

È composta da una serie di edifici residenziali, tra i quali anche grattacieli come l'Al Seef Tower o il Tamani Hotel Marina, che sono stati ultimati nel 2006, che formano un nuovo quartiere capace di ospitare più di 120.000 abitanti.

Per questo lavoro è stato preso solo una fascia centrale del quartiere, in modo da poter trascurare l'effetto dell'acqua sulle temperature superficiali esterne degli edifici.

La zona presa in considerazione è caratterizzata da un "basamento" fatto di edifici alti due piani sui quali si ergono circa 30 grattacieli. I grattacieli presenti nella zona di studio sono molto simili tra di loro e, in particolare sono caratterizzati da una struttura portante in calcestruzzo armato e da una facciata che consiste in un basamento in granito, pannelli di alluminio lungo tutta l'altezza e doppi vetri per ridurre gli apporti solari.

I parametri urbani che caratterizzano la zona presa in considerazione sono riassunti nella tabella 50.



Figura 55 - Vista del quartiere di Dubai Marina. Fonte: www.youtube.com (2016)



Figura 2 - Ortofoto del quartiere di AlBastakya. Fonte: Google maps (2016)

| Dubai Marina | |
|--------------|-----|
| BCR (m/m) | 0.7 |
| Hm (m) | 100 |
| SVF | 0.4 |
| BO | 1 |
| A | 0.2 |

Tabella 50 - Principali parametri urbani calcolati per il quartiere di Dubai Marina

6.2 La creazione dei modelli termici

Per la creazione del modello termico sono state prese informazioni da articoli scientifici e alcuni siti internet. La metodologia con la quale è stato creato il modello per CitySim Pro è identica a quella descritta in precedenza per la zona di Crocetta. Possiamo riassumere gli aspetti principali della creazione del modello in 10 punti:

- Il file climatico utilizzato è quello generato direttamente da METEONORM con le modalità descritte nel capitolo 4 relativamente alla città di Dubai. In mancanza di dati misurati, non è stato possibile tarare il file climatico in funzione delle temperature misurate. Le temperature sono riferite al 2010.
- La geometria del modello è stata creata partendo dalle planimetrie che si possono ricavare dal sito internet <https://2gis.ae>. In particolare, una volta fatto uno zoom sull'area di interesse, è stato fatto uno screenshot, che è stato a sua volta importato su AutoCad, e applicato il giusto fattore di scala, è stata disegnata la planimetria dell'intera zona di studio. Consultando questo sito internet, è possibile sapere anche l'altezza e la destinazione d'uso di ogni edificio di cui si vogliono avere le informazioni, come si può vedere dalla figura 56.

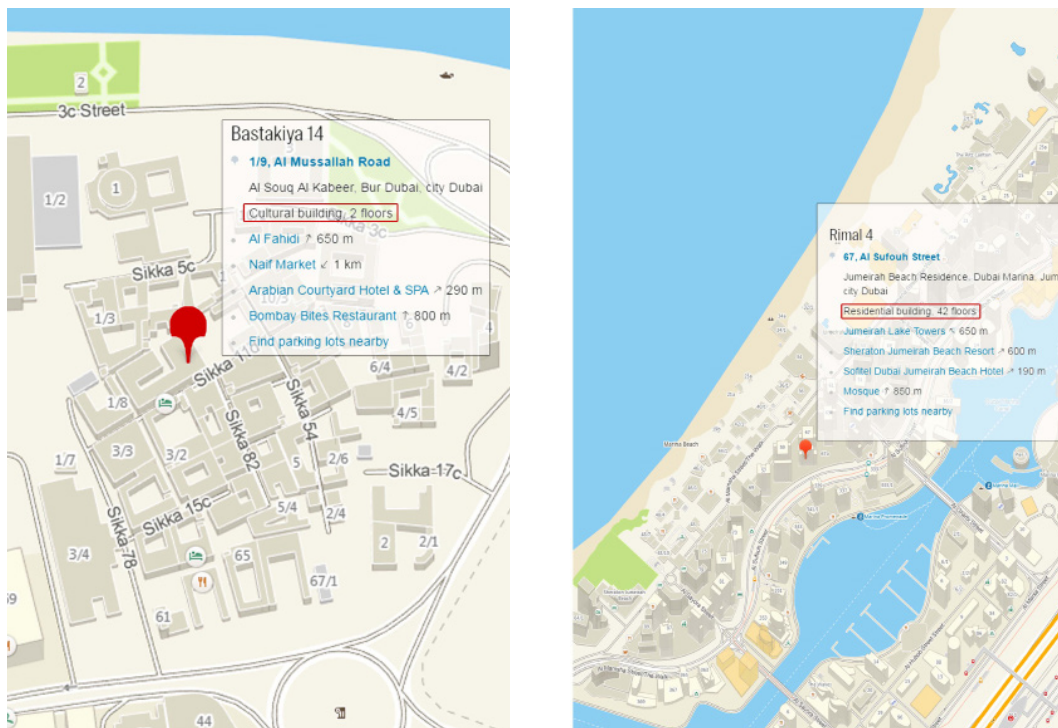


Figura 56 - Informazioni relative all'altezza e alla destinazione d'uso degli edifici in Al Bastakiya (a sinistra) e Dubai marina (a destra). Fonte <https://2gis.ae>

- Le informazioni relative all'altezza degli edifici, il numero di piani e la destinazione d'uso sono stati ricavate dal sito <https://2gis.ae> (Figura 56) e assumendo come altezza di interpiano 3.5 m (Friess 2012).

- Dato che questa analisi è incentrata sulla determinazione delle temperature superficiali esterne, è stato fondamentale modellare al meglio il terreno e assegnare i corretti valori di albedo ai materiali.

Sono stati considerati tre tipi di terreno: l'asfalto di cui sono composte le strade caratterizzato da un colore scuro e da un albedo pari a 0.2, una pavimentazione esterna composta di piastrelle in cemento chiare con un albedo di 0.4 e le aree verdi caratterizzate dall'evapotraspirazione e da un albedo pari a 0.25. Tali dati sono stati presi dalla normativa utilizzata anche precedentemente per il calcolo dell'albedo. In Al Bastakya inoltre è stato necessario considerare anche l'effetto degli alberi vista la cospicua presenza nel quartiere.

Con il Tool CitySim Pro infatti, è possibile modellare qualsiasi tipo di albero partendo da un modello geometrico fatto su Rhinoceros e aggiungendo, tramite il file xml del modello, le caratteristiche di evapotraspirazione dell'albero preso in analisi. Nel nostro caso è stato considerato un albero tipico del quartiere di Al Bastakiya: l'albero di Ghaf.

Nonostante i due quartieri presi in analisi sia caratterizzati dalla vicinanza del fiume e del mare, non è stato possibile creare un modello con l'acqua. Questo è sicuramente un limite di questo studio in quanto la presenza di questo elemento influisce in maniera consistente sul microclima e quindi sulle temperature superficiali esterne e sul consumo degli edifici.

- Per quanto riguarda il profilo di occupazione sono stati considerati i modelli americani ASHRAE, liberamente consultabili sul sito <https://knowledge.autodesk.com>. In assenza di una normativa locale di riferimento per il reperimento di tali dati, si è assunto che il profilo di occupazione dei nuovi edifici in Dubai fosse simile agli standard americani.

In particolare, la destinazione d'uso degli edifici nel quartiere vernacolare di Al Bastakya è quella culturale: infatti dopo il 2005 gli edifici di Al Bastakiya sono stati rifunzionalizzati a edifici pubblici (musei e centri culturali). Di conseguenza il profilo di occupazione scelto è stato quello relativo ai musei (Figura 2).

Per quanto riguarda gli edifici in Dubai Marina, essi sono principalmente Hotel, spazi commerciali e alcuni edifici residenziali. In quest'ultimo caso quindi sono stati presi in considerazione i profili di occupazione per gli hotel, per le residenze e per edifici commerciali a seconda dei casi.

- Le informazioni relative alla stratigrafia dell'involucro degli edifici sono

state presi da alcuni articoli scientifici e siti internet.

In particolare nel lavoro di Coccolo (Coccolo 2016), che interessa la città di Nablus in Palestina, sono riportati i valori dei parametri termofisici dell'involucro degli edifici tradizionali. La stratigrafia di tali edifici è stata determinata tramite un rilievo effettuato sul posto e i valori dei parametri termofisici sono stati determinati in maniera diretta, come indicato nell'articolo (Coccolo 2016). In assenza di informazioni precise per la zona di Al Bastakiya si è ritenuto che le caratteristiche degli edifici utilizzate nel caso della città palestinese potessero essere utilizzate anche per la nostra analisi in quanto le tipologie di edifici sono molto simili (B.Edwards, M. Sibley, M. Hakmi, P. Land 2016).

Per quanto riguarda la stratigrafia dei grattacieli le informazioni sono state prese dal lavoro di AboulNaga (AboulNaga 2001) nel quale l'autore fa una rassegna circa la sostenibilità ambientale degli edifici negli Emirati Arabi Uniti, e dal sito internet www.Marina101.com nel quale vengono le caratteristiche fisico-tecniche del grattacielo Marina 101, che può essere considerato come la tipologia di edificio tipica della zona.

Le caratteristiche fisico-tecniche degli involucri sono riassunte nella Tabella 51.

- Infine, per quanto riguarda il glazing ratio e l'infiltration rate si è fatto riferimento al lavoro di Friess (Friess 2012) il quale riporta i valori tipici di questi parametri negli edifici tradizionali di Dubai.

Per quanto riguarda il calcolo del glazing ratio nel quartiere di Dubai marina, è stato considerato il grattacielo Marina 101 come edificio tipico del quartiere. Tramite le foto scaricabili dal sito <http://skyscrapercenter.com> è possibile ricavare il glazing ratio semplicemente disegnando un prospetto su autocad e calcolando il rapporto superficie opaca-superficie vetrata.

| zona | Glazing ratio | Infiltration rate | $U_{finestra}$ (W/m ² K) | G_{value} | U_{tetto} (W/m ² K) | Spessore muro (mm) | U_{parete} (W/m ² K) | Stratigrafia parete (interno verso l'esterno) | Stratigrafia copertura (interno verso l'esterno) |
|-------------|---------------|-------------------|--|-------------|-------------------------------------|--------------------|--------------------------------------|---|---|
| Al Bastakya | 0.2 | 0.5 | 4.9 | 0.75 | 1.8 | 0.85 | 1.3 | 1. limestone 300mm 2. Mortar e stone rubble 150mm 3. limestone 400mm | 1. Plaster 20mm 2. Bricks 200mm c. Concrete Slab 100mm d. Plaster 20mm |
| Marina | 0.5 | 0.2 | 4.9 | 0.25 | 1.8 | 0.25 | 1.3 | 1. Plaster 20mm 2. Prefabricated concrete 200mm 3. Insulation 30mm 4. Aluminium 10mm | |

Tabella 51 - Principali caratteristiche fisico-tecniche utilizzate per la creazione del modello per il calcolo dei consumi per raffrescamento e la determinazione delle surface temperature con CitySim Pro.



Figura 57 - Layer utilizzati per la realizzazione del modello di AlBastakya

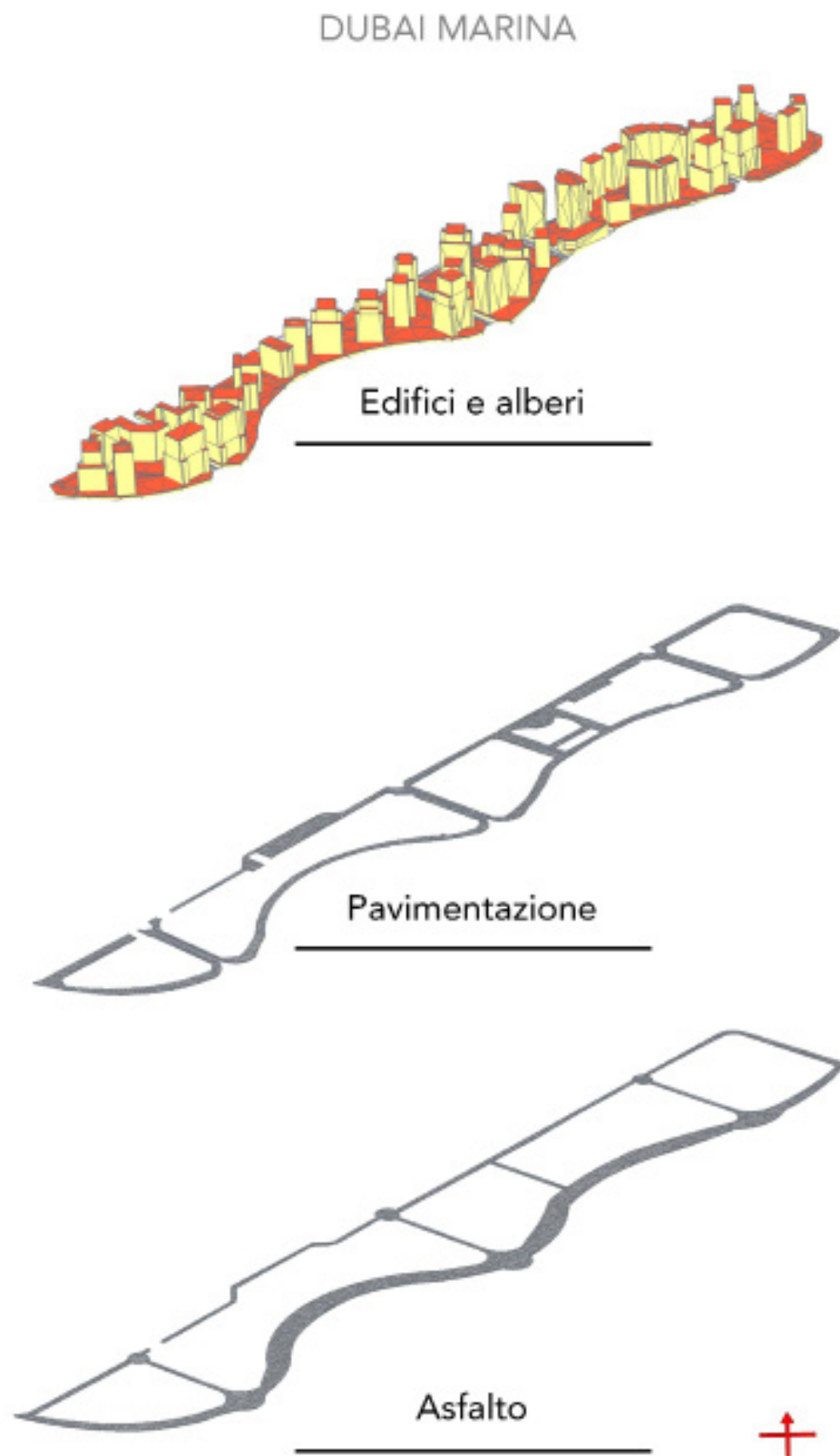


Figura 58 - Layer utilizzati per la realizzazione del modello di Dubai Marina

6.3 I Risultati

6.3.1 La determinazione dei consumi per raffrescamento.

Dopo aver creato i modelli sono state fatte le simulazione con il software CitySim Pro per il calcolo dei consumi per il raffrescamento e la determinazione delle temperature superficiali.

Sono stati analizzati i consumi per raffrescamento valutando anche l'impatto degli occupanti in quanto, data la destinazione d'uso che caratterizza gli edifici, si è ritenuto interessante valutarne l'impatto sui consumi. La media dei consumi per l'intero quartiere è pari a 238 kWh/m² anno, senza considerare gli occupanti invece, tale consumo è pari a 180 kWh/m² anno, ovvero gli apporti interni dovuti alla presenza degli occupanti causano un aumento del 25% sui consumi

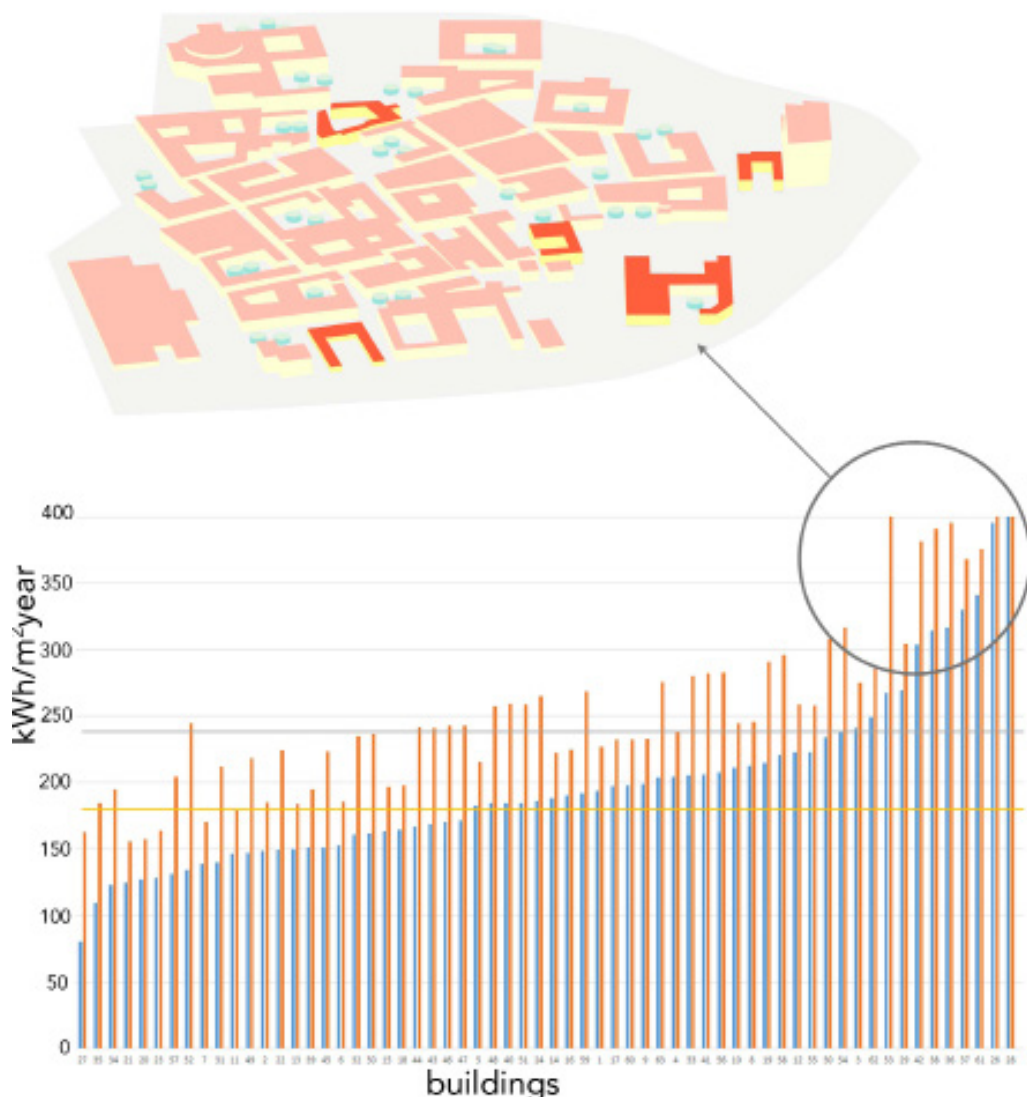


Grafico 34 - consumi per raffrescamento nel quartiere di Al Bastakiya

Per quanto riguarda il quartiere di Dubai Marina, la media dei consumi per raffrescamento è pari a 160 kWh/m² anno, mentre se non si considerano gli apporti interni degli occupanti il consumo scende del 32% raggiungendo i 121 kWh/m² anno.

Per quanto riguarda il distretto di Al Bastakiya, i consumi più ingenti si hanno per quelli edifici che hanno un rapporto superficie-volume alto, ovvero la maggior parte dell'involucro esposto alla radiazione solare.

Il quartiere di Dubai Marina, invece, è caratterizzato da edifici più compatti che hanno un rapporto superficie-volume molto basso, e in questo caso è l'orientamento degli edifici a influire maggiormente sul consumo per raffrescamento degli edifici, in particolari gli edifici che hanno un orientamento est-ovest ricevono molta radiazione solare, il che aumenta il fabbisogno per raffrescamento.

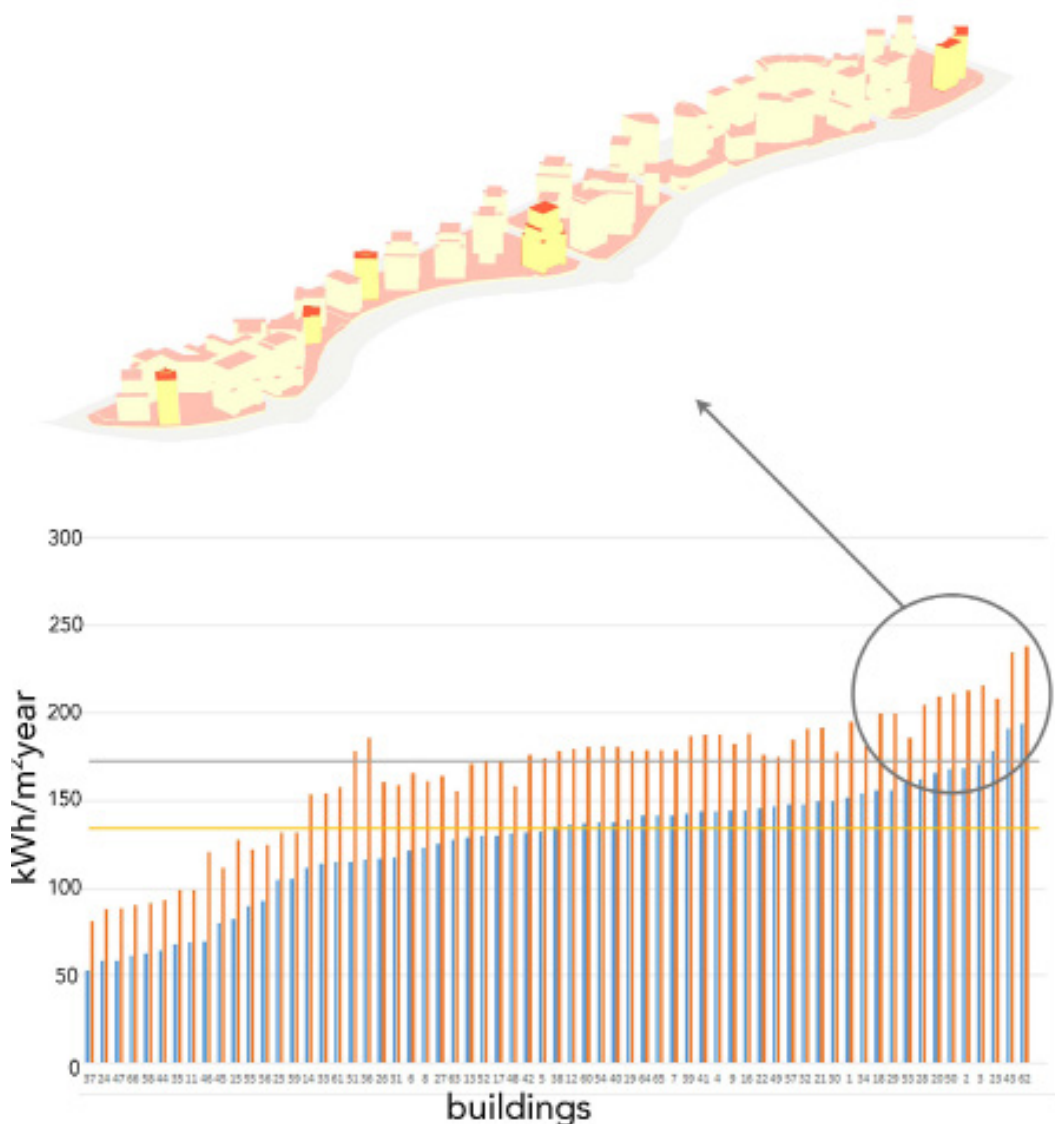


Grafico 35 - consumi per raffrescamento ne quartiere di Dubai Marina

Dall'analisi dei risultati per il consumo per raffrescamento è emerso che:

- gli edifici a corte, caratteristici della città antica, hanno un rapporto S/V molto alto che causa un innalzamento del fabbisogno per la climatizzazione estiva;

- nel caso di edifici compatti, come quelli del quartiere della città nuova, il consumo per raffrescamento dipende molto dall'orientazione degli edifici, in particolare l'orientazione est-ovest, corrispondente ad un $BO = 1.2$, sembra essere la più sfavorevole.

- gli occupanti giocano un ruolo molto importante nel determinare i consumi per il raffrescamento, provocando un innalzamento del 25% dei consumi nel caso di Al Bastakiya (caratterizzata da edifici commerciali e musei), e del 32% in Dubai Marina, composta da hotel, edifici commerciali e residenziali. In generale, è interessante notare che i consumi sono molto elevati. Questo è dovuto dal fatto che gli edifici non hanno alcun tipo di isolamento, indice del fatto che non si è ancora affermata la progettazione di edifici passivi, bensì si è preferito puntare sull'efficienza degli impianti di raffrescamento.

Tornando al quesito iniziale, ovvero se la casa a corte sia una forma di edificio bioclimatica, la risposta a seguito di questa prima analisi sembrerebbe negativa, in quanto la sua forma determina un aumento del fabbisogno energetico per raffrescaento.

6.3.2 La determinazione delle temperature superficiali

Dopo aver determinato i consumi energetici per raffrescamento, sono state calcolate le temperature superficiali in entrambi i quartieri.

Per fare questo, in un primo momento sono state calcolate le temperature superficiali medie annuali per l'intero quartiere di Al Bastakiya e di Dubai Marina, facendo una media pesata sull'area delle superfici di tutte le surface temperature. Da questa analisi è emerso che la temperatura superficiale media annuale, considerando sia le superfici degli edifici sia quelle del terreno, è pari a 29°C in Al Bastakiya e 28°C in Dubai Marina, mentre la temperatura media annuale dell'aria è di 24 °C.

Nel quartiere di Al Bastakiya possiamo notare come la zona verde, caratterizzata dall'evapotraspirazione, è quella che si mantiene più fresca durante tutto l'anno, così come le corti interne degli edifici. In Dubai Marina, invece, le surface temperature sono mediamente più basse grazie all'ombra generata dagli alti edifici

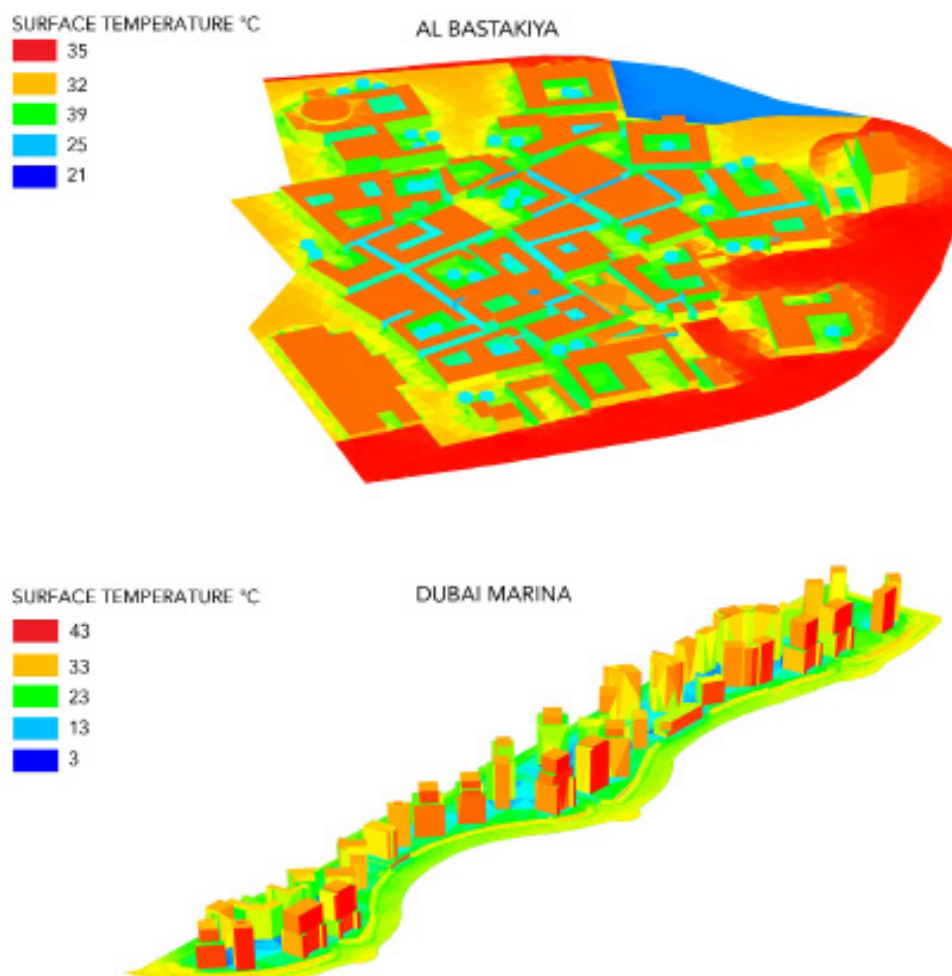


Figura 59 - planivolumetrici di Al Bastakiya e Dubai Marina con indicate le temperature superficiali medie annuali dell'anno 2010.

Dato che lo scopo di questa parte del lavoro è anche quello di analizzare il comfort esterno nei due quartieri, si è deciso di analizzare le temperature superficiali del terreno nei due quartieri. A questo scopo sono stati analizzati gli andamenti delle surface temperature prendendo in considerazione 3 giorni significativi dell'anno: l'equinozio di primavera, il solstizio d'estate e l'equinozio d'autunno.

La linea in giallo del grafico rappresenta le temperature superficiale del deserto. Per ricavare queste temperature, è stata modellata superficie priva di edifici di 1 km² composta da sabbia, successivamente importata su CitySim Pro per procedere con la simulazione.

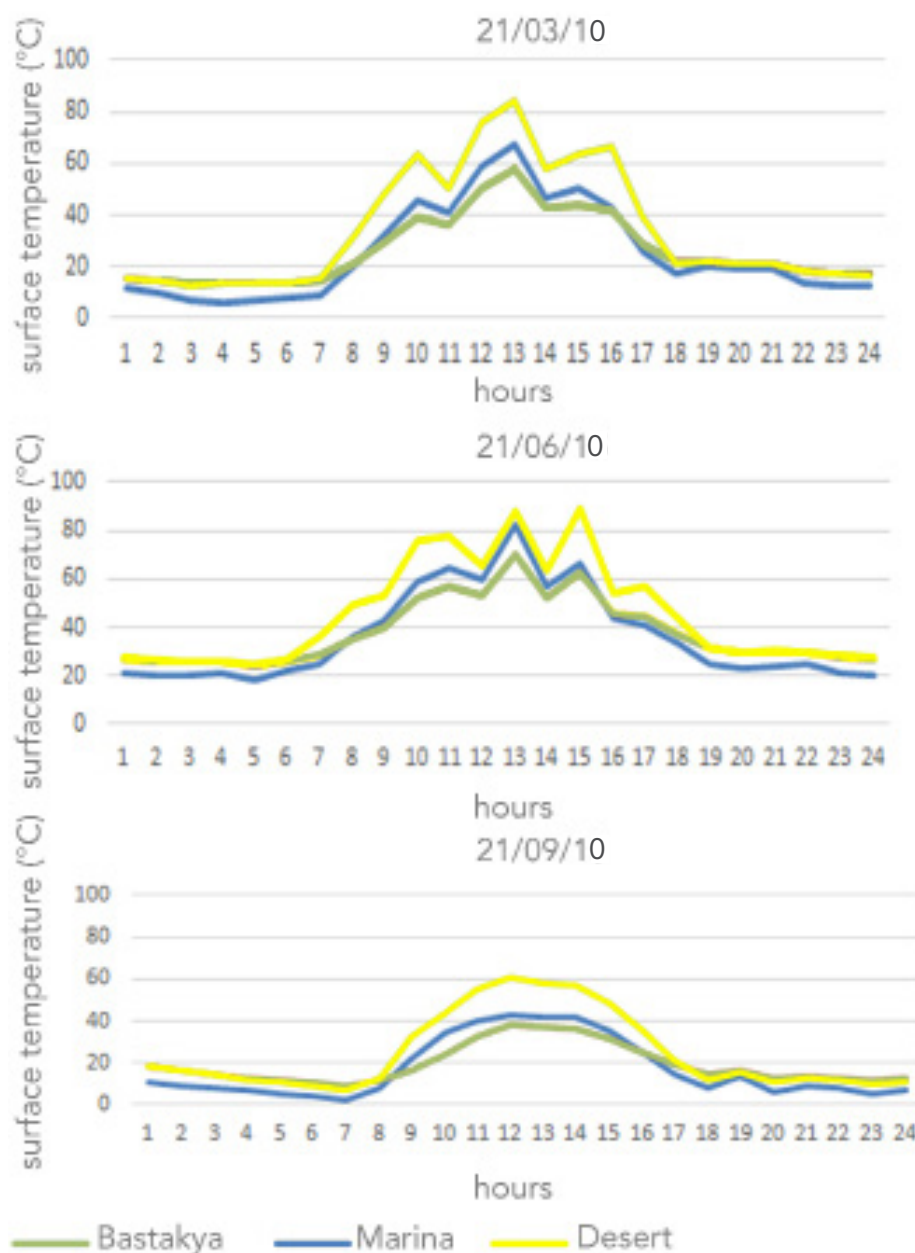


Grafico 35 - andamenti delle temperature superficiali orarie del terreno

Dal momento che Albastakiya è caratterizzata dalla presenza di molti alberi, si è deciso di analizzare l'impatto che questi ultimi hanno sulle temperature superficiali della pavimentazione nelle corte interne degli edifici. Dall'analisi dei risultati è emerso che la presenza degli alberi produce un abbassamento della temperatura superficiale media annuale di 1°C. Ciò che è interessante notare però è l'effetto benefico prodotto dagli alberi nelle ore più calde del giorno. Ad esempio, alle ore 15 dell'equinozio di primavera, gli alberi producono un abbassamento delle temperature superficiali di 5 gradi, così come alle ore 11 del solstizio d'estate.

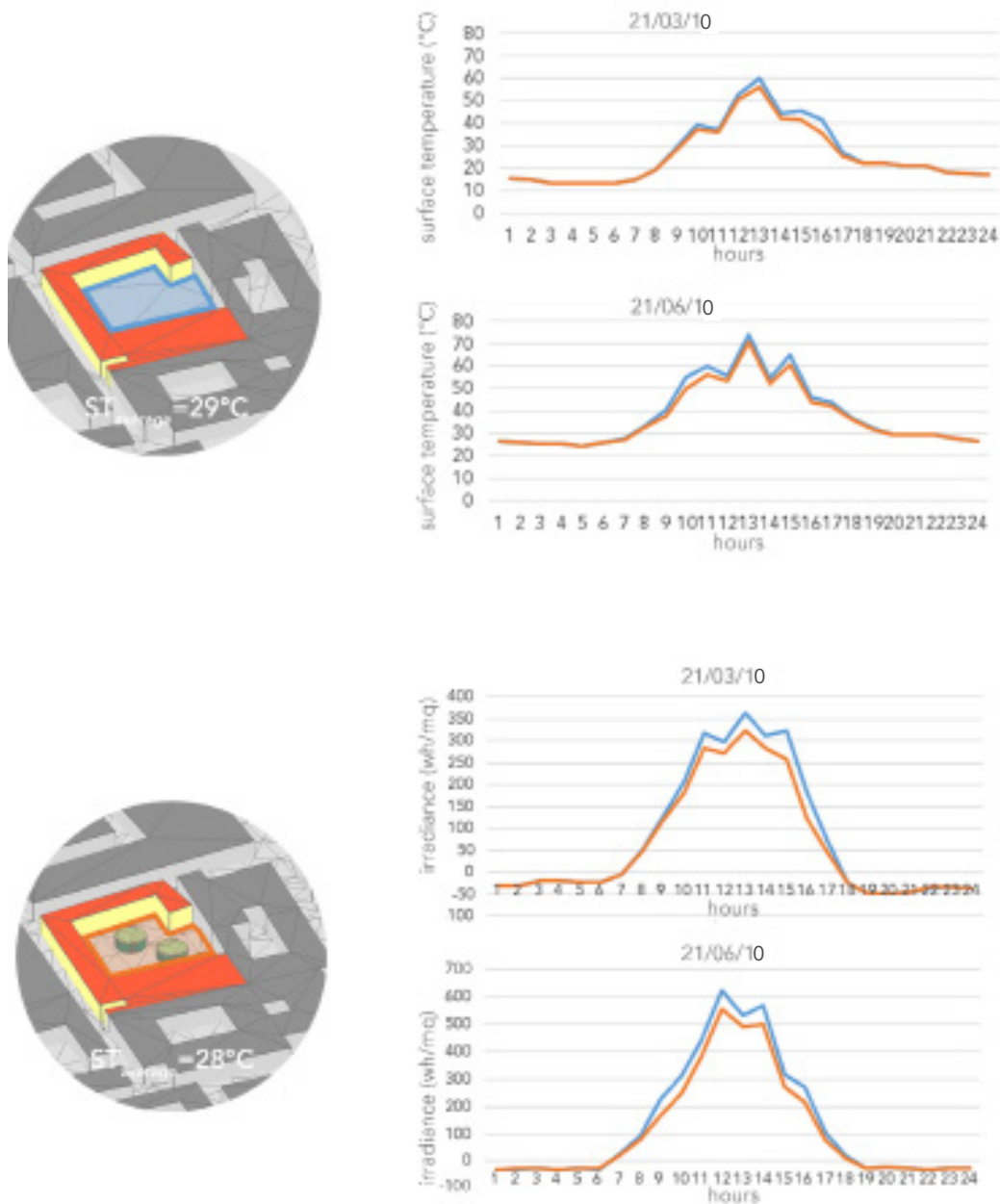


Grafico 36 - andamenti orari delle temperature superficiali e della irradianza solare con e senza alberi sulla pavimentazione esterna.

6.4 Conclusioni

Rispondere al quesito iniziale, ovvero se la tipologia a corte sia o meno una forma bioclimatica, non è semplice, in quanto bisogna tener conto non solo del fattore climatico, ma anche dei parametri che definiscono la forma urbana.

In questo lavoro è stato fatto uno studio preliminare per cercare di raggiungere questo scopo. Possiamo quindi trarre delle conclusioni:

- per quanto riguarda il consumo per raffrescamento, gli edifici a corte non sembrano avere una forma ideale in quanto sono caratterizzati da un rapporto S/V alto e quindi gran parte della superficie del loro involucro è esposto alle radiazioni solari;

- non si può affermare a priori che una forma compatta abbia una risposta migliore in termini bioclimatici rispetto ad una tipologia a corte. In un clima arido, infatti, bisogna tenere particolarmente conto dell'esposizione degli edifici poiché questa potrebbe influire maggiormente rispetto al rapporto S/V sul consumo per raffrescamento;

- la temperatura superficiale di un quartiere non dipende esclusivamente dalla forma degli edifici, bensì dalla forma urbana nel suo insieme. Al Bastakiya, ad esempio, è caratterizzata da edifici a corte che producono ombra sui cortili interni, dalla presenza di alberi e da una pavimentazione chiara. Nonostante questo, le temperature superficiali medie annuali sono uguali a quelle del quartiere di Dubai Marina. Il quartiere nuovo infatti è caratterizzato da un Building Coverage Ratio molto alto (pari a 0.7) e da uno Sky View Factor basso, ovvero un'alta densità edilizia fa sì che le ombre che vengono a crearsi producono un abbassamento consistente delle temperature superficiali. In generale si può osservare che per entrambi i quartieri si verifica il fenomeno della cool island in quanto le temperature superficiali, durante il giorno, sono sempre minori rispetto a quelle del deserto;

- analizzando le temperature superficiali del solo terreno emerge che in Al Bastakiya vi è un abbassamento delle temperature di circa 7°C durante il giorno rispetto a Dubai Marina, il che indica che nel quartiere vernacolare si ha un comfort maggiore durante il giorno. Questo è dovuto in parte alla forma degli edifici a corte che generano ombra sulla corte interna, in parte alla presenza degli alberi che contribuiscono ad un abbassamento delle temperature durante le ore più calde dell'anno.

6.5 Bibliografia

- AboulNaga M. M. (2001), "Environmental sustainability assessment of buildings in hot climates: the case study of UAE", *Renewable Energy*, vol. 24, pp. 553-563.
- Hadid M. (2002), "Architectural style survey in Palestinian territories, Establishing", *Adoption and Implementation of Energy Codes for Building*.
- Edwards B., Sibley M., Hakmi M., Land P. (2006), *Courtyard Housing: Past, Present and Future*, Taylor & Francis, New York (USA).
- Raydan D., Ratti C., Steemers K. (2006), "12 Courtyard: a bioclimatic form?", in Edwards B., Sibley M., Hakmi M., Land P. (a cura di), *Courtyard Housing: Past, Present and Future*, Taylor & Francis, New York (USA), pp. 135-145.
- Frey C. M., Rigo G., Parlow E. (2007), "Urban radiation balance of two coastal cities in a hot arid dry environment", *International Journal of Remote Sensing*.
- Friess W. A. (2012), "Wall insulation measures for residential villas in Dubai: a case study in energy efficiency", *Energy and Buildings*, vol. 44, pp. 26-32.
- Coccolo S., Kaempf J., Scartezzini J. L. (2013), "Design in the desert. A bioclimatic project with urban energy modelling", *13th Conference of International Building Performance Simulation Association*, Chambéry, France.
- Rakhshan K., Friess A. W., Tarjzadeh S. (2013), "Evaluating the sustainability impact of improved building insulation: a case study in the Dubai residential built environment", *Building and Environment*, vol. 67, pp. 105-110.
- Coccolo S. (2016), "Energy demand and urban microclimate of old and new residential districts in a hot arid climate", *Cities, Buildings, People: Toward Regenerative Environment*, PLEA 2016, Los Angeles (USA).

Sitografia (aggiornata al 1 Settembre 2016)

- <https://www.skyscrapercenter.com>

7. CONCLUSIONI

La riduzione dei consumi energetici degli edifici è uno dei problemi cruciali che architetti e urbanisti sono chiamati a risolvere ogni volta che si confrontano con la progettazione ex novo o con il restauro di parti di città già esistenti. Per capire l'importanza di tale questione basti pensare che in Europa un terzo dell'energia totale spesa deriva dal settore edilizio. In questa cornice l'Italia si colloca tra i maggiori Paesi per quanto riguarda il consumo finale di energia nel settore edilizio, e tra i Paesi meno autosufficienti dal punto di vista del fabbisogno di energia, tanto che solo nel 2013 l'Italia ha importato 82% di energia. I dati sono ancora più allarmanti se si pensa che al grande utilizzo di energia non rinnovabile è associata una grande produzione di CO₂ e di gas serra che contribuiscono ulteriormente al riscaldamento globale e ai cambiamenti climatici già in atto. Alla luce di tutto questo, i lavori, le ricerche e le pubblicazioni scientifiche che si muovono verso la determinazione di nuove strategie per la riduzione del consumo energetico acquisiscono sempre più importanza.

All'inizio di questo lavoro era stato posto l'obiettivo di dimostrare l'incidenza della forma urbana sul consumo degli edifici. Come abbiamo visto, la letteratura a riguardo si è evoluta in tempi relativamente recenti grazie allo sviluppo di nuovi software e tecniche digitali in grado di simulare e rappresentare la complessità di un tessuto urbano (Rode 2013). Dallo studio dello stato dell'arte abbiamo visto come l'approccio al problema possa variare da un lavoro ad un altro a seconda se si utilizza un software o un altro, in base ai parametri urbani che si decide di prendere in considerazione o in relazione all'ampiezza della scala della ricerca. Nel lavoro di Robe e al. (Robe 2013) e Ratti (Ratti 2006), ad esempio, gli autori partono dalla forma degli edifici per definire la forma urbana, ovvero propongono un approccio secondo il quale è la tipologia di edificio prevalente di un contesto che ne determina la texture urbana. Questo lavoro invece propone un approccio che non ha come punto di partenza la tipologia dell'edificio: a seconda dei parametri urbani che voglio raggiungere, in base ai quali ho un consumo energetico ridotto degli edifici, determino la forma urbana.

I parametri urbani presi in considerazione al fine di descrivere la forma urbana sono otto:

- Il Building Coverage Ratio (BCR) [m/m] che esprime il rapporto tra la superficie costruita e l'area totale del sito di riferimento (nel nostro caso la sezione di censimento);
- Il Building Height (BH) [m] ovvero l'altezza media degli edifici in una sezione di censimento
- il Building Density (BD) [m³/m²] che esprime il rapporto tra il volume costruito e l'area della sezione di censimento, ovvero l'altezza media che avrebbe il volume costruito se fosse "spalmato" sull'intera sezione di censimento;
- Il Solar Exposure o H/Haverage [m/m] che indica quanto un edificio è più o meno alto rispetto al contesto;
- l'Aspect Ratio o H/W [m/m] ovvero il rapporto tra l'altezza dell'edificio e la larghezza della strada;
- l'Albedo (A) che indica il colore dei materiali;
- il Main Orientation Street (MOS) indica l'orientamento prevalente delle strade in una sezione di censimento mentre il Building Orientation indica l'orientamento degli edifici, anche se questi due parametri molto spesso coincidono.

Il lavoro di ricerca svolto ha tentato di determinare in che modo questi parametri, che definiscono la forma urbana, influiscono sul consumo degli edifici. Per fare questo l'analisi si è concentrata sul quartiere della città di Torino. Tale scelta trova le sue motivazioni nel fatto che, per tale quartiere, si avevano a disposizione i dati di consumo reale forniti da IREN. Tali dati sono stati fondamentali per la validazione del modello, ovvero per confermare l'efficienza del software CitySim Pro e la veridicità dei suoi risultati.

Per valutare l'impatto della forma urbana sul consumo energetico degli edifici per riscaldamento sono stati scelti due sezioni di censimento e nove edifici, dei quali è stata valutata la variazione del consumo energetico al variare della forma urbana del contesto. I risultati di questo lavoro dimostrano che, in effetti, il consumo energetico degli edifici è influenzato sia dalle caratteristiche sue caratteristiche intrinseche sia da fattori esterni come la densità urbana, l'esposizione solare, la larghezza delle strade, l'orientamento delle strade e l'albedo delle superfici esterne.

Entrando nel merito della questioni, possiamo vedere come dall'analisi del Building Coverage Ratio emerge che l'andamento dei consumi al variare di tale parametri sia di tipo parabolico, ovvero per valori alti di BCR si hanno consumi

alti, mentre per valori medi si hanno consumi ridotti. In un tessuto urbano molto denso, infatti, l'ombra generata dagli edifici provoca un innalzamento dei consumi per riscaldamento poiché si riducono gli apporti solari, mentre nel caso di contesti urbani poco densi non si genera l'effetto Canyon che andrebbe ad incrementare la temperatura superficiale media dell'aria esterna. I valori ottimali di BCR si aggirano quindi sullo 0.30, ovvero un contesto nel quale la superficie coperta dovrebbe essere del 30% per avere il minor consumo per riscaldamento.

Un ragionamento analogo può essere fatto per l'Aspect Ratio. Anche in questo caso, infatti, si ha un andamento parabolico dei consumi. Valori molto alti del rapporto H/W (considerando costante l'altezza degli edifici) indicano la presenza di strade molto strette. In tali condizioni non si verifica l'effetto dell'urban canyon in quanto la luce solare non riesce a penetrare. Per valori di Aspect ratio molto bassi, invece, si ha una situazione nella quale le strade sono molto larghe e anche in questo caso viene a mancare l'effetto canyon, in quanto la radiazione solare non viene intrappolata all'interno delle pareti esterne degli edifici. La situazione ottimale per avere una diminuzione del consumo energetico degli edifici si ha per valori di Aspect ratio di circa 0.9, ovvero una situazione nella quale la larghezza della strada è circa uguale all'altezza degli edifici.

Per quanto riguarda il parametro H/Haverage si osserva un andamento lineare decrescente dei consumi per riscaldamento. Questo è un risultato prevedibile in quanto se un edificio è molto più alto rispetto al contesto partecipa maggiormente della radiazione solare e viceversa. Ciò che è interessante osservare dall'andamento dei consumi in relazione alla variazione del parametro è che al di sopra di un certo valore di H/Haverage (nel nostro caso 1,5) la curva si stabilizza. Questo vuol dire che vi è un'altezza al di sotto della quale l'ombra generata dal contesto non influisce più sul consumo degli altri edifici. Ovvero, affinché un edificio abbia un'ottima esposizione solare basta che sia 1,5 volte più alto del contesto che lo circonda, un'altezza maggiore non provocherebbe alcun tipo di beneficio in più.

Dall'analisi del parametro del MOS è emerso che l'andamento dei consumi è di tipo lineare decrescente. Questo vuol dire che se una sezione di censimento (o un quartiere, una parte di città, ecc...) gode di un'esposizione est-ovest l'efficienza energetica degli edifici è ottimale.

L'ultimo parametro analizzato è stato quello dell'Albedo. L'andamento dei consumi energetici per il riscaldamento al variare di questo parametro è di tipo lineare crescente, ovvero all'aumento dell'albedo corrisponde un aumento dei

consumi. Questo trova spiegazione nel fatto che superfici molto scure (caratterizzate da un albedo basso) assorbono maggiormente la radiazione solare e provocano un innalzamento della temperatura dell'aria esterna. Questo provoca la diminuzione del gradiente termico tra la temperatura interna dell'edificio e quella dell'aria esterna, causando meno perdite di calore e un minore fabbisogno di energia per l'edificio. Inoltre, è interessante notare che le superfici verdi causano un aumento del consumo energetico per riscaldamento anche a parità di albedo considerato. Questo fenomeno è causato dall'evapotraspirazione che tende a raffrescare maggiormente l'aria.

Nella fase finale, è stato analizzato l'andamento dei consumi al variare del BCR prendendo in considerazione tutti i dati di tutte le simulazioni. Da questa analisi è emerso che vi sono due andamenti in funzione del Solar Factor, ovvero quel fattore dato dal prodotto del MOS per $H/H_{average}$ che indica quanto un edificio è ben esposto alla radiazione solare. Per situazioni caratterizzate da un Solar Factor inferiore a 1.04, ovvero una situazione nella quale gli edifici non hanno un'esposizione solare ottimale, si hanno, in generale, consumi per riscaldamenti maggiori e un andamento lineare decrescente rispetto al variare del Building Coverage Ratio, mentre per valori superiori a 1.04 i consumi si riducono e si ha un andamento parabolico in funzione del BCR.

Infine, è stato calcolato il peso di ciascuna variabile urbana sul consumo per riscaldamento degli edifici. Da questa analisi è emerso che i parametri che hanno un peso maggiore sono il MOS, $H/H_{average}$ e l'Aspect Ratio, mentre il BCR e l'Albedo hanno un peso minore.

Il lavoro svolto in questa tesi non vuole essere il punto di arrivo nella definizione di nuove strategie per il risparmio energetico degli edifici, anzi vuole essere lo spunto per altre ricerche. Come già accennato in precedenza, gli sviluppi futuri di questo lavoro potrebbero prevedere l'applicazione della metodologia utilizzata in questa ricerca in contesti caratterizzati da climi caldi o aridi come le città del sud America o quelle arabe. In questo caso si potrebbe analizzare come la forma urbana influisce sul consumo per raffrescamento degli edifici. In questo caso si avrebbe una visione completa del problema poiché le regole che abbiamo trovato per un clima temperato (come quello della città di Torino) potrebbero non essere valide per un clima arido.

Un altro sviluppo della ricerca potrebbe essere quello di considerare la componente comportamentale degli occupanti e come questa influisce sul consumo degli edifici al variare dei parametri urbani.

Il progetto architettonico e la pianificazione urbana devono spesso far fronte

alle più disparate istanze e si devono confrontare con problematiche sempre più complesse che riguardano aspetti sociologici, economici, strutturali, estetici, energetici. Lo scopo di questo lavoro è sia quello di fornire alcune linee guide per una progettazione e una pianificazione più sostenibile e sia quello di indicare una metodologia, per la determinazione dell'influenza della forma urbana sul consumo degli edifici, che può essere applicata anche in altri ambiti. In questo senso, la ricerca svolta potrebbe rivelarsi utile per la progettazione di nuovi quartieri di Zero Energy Building in quanto potrebbe fornire un valido strumento per rendere gli edifici ancora più efficienti dal punto di vista energetico, poiché si andrebbe ad ottimizzare non più le prestazioni dell'involucro o dell'impianto dell'edificio, ma la forma urbana in cui esso è inserito.

APPENDICE A: procedura di calcolo per la determinazioni dei parametri urbani

A.1. Dati utilizzati per il calcolo

1. Shape file poligonale (.shp). Regione Piemonte. Sezioni di censimento 2011, scaricabile dal sito ISTAT: <<http://www.istat.it/it/archivio/104317>>

| BASI TERRITORIALI | ED 1950 UTM Zona 32n | | | WGS 84 UTM Zona 32n | | |
|--|----------------------|------|---------|---------------------|------|----------|
| | 1991 | 2001 | 2011 | 1991 | 2001 | 2011 |
| Limiti amministrativi – formato kmz | | | | | | zip |
| Località italiane – formato kmz | | | | | | zip |
| Sezioni di censimento – formato kmz | | | | | | zip (**) |
| Località italiane – formato shp | zip | zip | zip | zip | zip | zip |
| Aree subcomunali (municipi, circoscrizioni ecc.) – formato xls e shp | – | – | zip (*) | – | – | zip (*) |
| Sezioni di censimento – formato xls e shp | | | | | | |
| 01-Piemonte | zip | zip | zip | zip | zip | zip |
| 02-Valle d'Aosta/Vallee d'Aoste | zip | zip | zip | zip | zip | zip |
| 03-Lombardia | zip | zip | zip | zip | zip | zip |

Figura 60 - Schermata dal sito web.
Fonte: <http://www.istat.it/it/archivio/104317>

2. Shape file poligonale (.shp). Carta Tecnica Regionale (CTR) 2007. Fornita dal LARTU (Laboratorio di Analisi e Rappresentazioni Territoriali Urbane) con sede in Politecnico di Torino. Castello del Valentino.

3. Shape file poligonale (.shp). Epoca di costruzione degli edifici. Fornita dal LARTU (Laboratorio di analisi e rappresentazioni territoriali urbane) con sede in Politecnico di Torino.

4. Shape file puntuale (.shp) Rete Geodetica. Fornita dal LARTU (Laboratorio di Analisi e Rappresentazioni Territoriali Urbane) con sede in Politecnico di Torino. Castello del Valentino.

5. File di consultazione (.lyr). Altezza Edifici 2015. Geoportale ARPA Piemonte: <<http://webgis.arpa.piemonte.it/geoportale/index.php/servizi-geoportale/wms-wfs>>

A.2. Software utilizzato

Arcgis 10.2.1 dell'ESRI, licenza studente. <<http://www.esri.com/>>

A.3. Procedura di calcolo degli indicatori della forma urbana

Prima di poter procedere con i calcoli si è andato a definire l'altezza, l'area e il volume di ogni edificio di Torino (circa 115.000, selezionati sul totale in base alla loro funzione).

Per individuare le altezze degli edifici è stato utilizzato lo shape file (.shp) della rete geodetica, in cui vi sono le quote di gronda e le quote del terreno. In seguito è stato fatto un "spatial join" tra la CTR e la rete geodetica. Successivamente si è aggiunto un nuovo campo nella tabella degli attributi della CTR, chiamato "H_ed" (altezza edifici) in cui sono stati sottratti i valori di quota di terreno ai valori di quota di gronda ottenendo così l'altezza dell'edificio. Nelle circoscrizioni 7 e 8 (in collina) si sono verificati molti errori* (vedere fine app. A), che sono stati corretti manualmente nella tabella attributi attraverso il file di consultazione (Edifici 3D 2015, estensione .lyr).

L'area degli edifici è stata calcolata creando un nuovo campo denominato "A_ed" attraverso il tool "calculate geometry". L'unità di misura è il metro.

Moltiplicando l'altezza e l'area dell'edificio è stato possibile calcolarne il volume, creando una nuova colonna chiamata "V_ed".

Infine si è deciso di "pulire" il file eliminando i poligoni, che rappresentano gli edifici, con un'area inferiore a 50 m² e un'altezza inferiore a 3 m.

Dato che gli indicatori della forma urbana sono stati calcolati in base alle sezioni di censimento è stato fatto un "spatial join" fra le sezioni di censimento e la CTR.

A.3.1. Calcolo degli indicatori della forma urbana

- BCR, Building Coverage Ratio [m²/m²]. Definisce il rapporto tra l'area dell'edificio (A_ed) e l'area della sezione di censimento (A_sc):

$$BCR_{\text{Sezione Censimento}} = (\sum A_{\text{ed}}) / (A_{\text{sc}})$$

- BD, Building Density [m³/m²]. Descrive il rapporto tra il volume degli edifici (V_ed) e l'area della sezione di censimento (A_sc):

$$BD_{\text{sc}} = (\sum V_{\text{ed}}) / (A_{\text{sc}})$$

- BH, Building Height [m]. Indica l'altezza media degli edifici nella sezione di censimento.

Per calcolare il BH, l'altezza dell'edificio è stata pesata per il suo volume

$(H_{ed} \times V_{ed})$ [1] in modo che gli edifici con un volume più alto fossero più influenti. È stata fatta la somma del risultato di [1] per ogni edificio all'interno dell'area di studio, in modo da avere risultati univoci. Dopo di che si è diviso per il volume totale costruito per sezione di censimento (V_{sc}):

$$BH_{sc} = (\sum H_{ed} \times V_{ed}) / (V_{sc})$$

- HW, Aspect Ratio [-] o Urban Horizon Angle (UHA). Definisce il rapporto di un edificio con il suo contesto, tenendo in considerazione l'altezza dell'edificio e la distanza con gli edifici intorno.

Avendo l'altezza dell'edificio (H_{ed}) si è svolto il calcolo della distanza di un edificio rispetto a quelli circostanti. Il software Arcgis attraverso il tool "Generate Near Table" permette di misurare la distanza, con un raggio di 100m. (Delmastro et al., 2015) e un numero massimo di edifici pari a 30 (scelto per non avere un numero troppo eccessivo di costruzioni che andrebbero poi a falsare i calcoli). La nuova tabella contiene per ogni edificio la distanza tra esso e quelli circostanti rispettando le restrizioni precedenti (100m. e 30 edifici), si è fatta poi la media di queste distanze per ogni edificio ottenendo così un unico valore. In seguito, è stato calcolato il valore "Aspect Ratio" (HW) per ogni edificio (HW_{ed}), dato che bisogna trovare un valore di "Aspect Ratio" medio per sezione di censimento è stata ripetuta la procedura di pesare per il volume dell'edificio dividendo ulteriormente per il volume costruito totale dell'area di studio (V_{sc}):

$$HW_{sc} = (\sum HW_{ed} \times V_{ed}) / (V_{sc})$$

- HHm, Building Height and the average height of the surrounding [-].

Descrive l'altezza dell'edificio rispetto all'altezza media degli edifici circostanti.

Per calcolare questo indicatore è necessario individuare gli edifici circostanti a quello preso in analisi. Il tool utilizzato precedentemente "Generate Near Table" è in grado di poter svolgere questa operazione, ma in questo caso serve solo sapere l'altezza degli edifici intorno. Attraverso un "join" si sono unite la nuova tabella generata con il dato dell'altezza dell'edificio, in seguito si è potuto calcolare l'altezza media rispetto a un edificio (Hm_{ed}). Quest'ultimo valore è stato utilizzato per dividere l'altezza dell'edificio (H_{ed}) ottenendo il parametro HHm per singolo edificio (HHm_{ed})

Dato che tutti gli indicatori sono stati calcolati per sezione di censimento si è fatta ancora una volta la procedura di pesare gli edifici per il suo volume, dividendo la somma totale degli edifici della sezione di censimento per il volume

costruito totale dell'area di studio (V_{sc}):

$$HHm_{sc} = (\sum HHm_{ed} \times V_{ed}) / (V_{sc})$$

- **BO, Building Orientation [-].** Indica l'orientamento prevalente dell'edificio.

Il software Arcgis, attraverso il tool "Calculcate Polygon Main Angle" permette di calcolare l'angolo (°) prevalente di un poligono qualunque. Ai risultati in gradi sono stati poi attribuiti, tramite Excel, questi valori:

| Orientamento (da Nord) | Parametro |
|------------------------|-----------|
| 0°/30° | 0,8 |
| 30°/60° | 1,0 |
| 60°/90° | 1,2 |
| 0°/-30° | 0,9 |
| -30°/-60° | 1,1 |
| -60°/-90° | 1,3 |

Tabella 52 - Valori di BO per i diversi orientamenti.

Come si può notare, i parametri orientati Nord-Est sono inferiori rispetto a quelli simmetrici Nord-Ovest, la motivazione è quella di favorire gli orientamenti ad Ovest sfavorendo così quelli ad Est; per il fatto che le facciate degli edifici rivolti ad Est ricevono la massima insolazione di mattina quando la temperatura dell'aria è bassa (Ralph L. Knowles, 1974). Un ulteriore passaggio è stato quello di individuare, per sezioni di censimento, il valore prevalente. Questo è stato possibile sommando per ogni orientamento i metri cubi costruiti per ogni sezione di censimento, il valore più grande indica il valore prevalente dell'area di studio.

- **MOS, Main Orientation of Street [-].** Definisce l'orientamento prevalente della strada.

Il software Arcgis, attraverso il tool "Calculcate Polygon Main Angle" permette di calcolare l'angolo (°) prevalente di un poligono qualunque. Ai risultati in gradi sono stati poi attribuiti, tramite Excel, questi valori:

| Orientamento (da Nord) | Parametro |
|------------------------|-----------|
| 0°/30° | 0,8 |
| 30°/60° | 1,0 |
| 60°/90° | 1,2 |
| 0°/-30° | 0,9 |
| -30°/-60° | 1,1 |
| -60°/-90° | 1,3 |

Tabella 53 - Valori di MOS per i diversi orientamenti.

Come si può notare, i parametri orientati Nord-Est sono inferiori rispetto a quelli simmetrici Nord-Ovest, la motivazione è quella di seguire gli stessi valori utilizzati per il BO in modo da facilitare i calcoli.

- UM, Urban Morphology [-]

Sintetizza in un unico valore alcuni parametri urbani connessi fra loro: "Building Coverage Ratio" (BCR), "Aspect Ratio" (H/W), "Building Density" (BD):

$$UM_{sc} = BCR_{sc} \times HW_{sc} = BD_{sc} / W$$

- S, Solar factor [-]

Rappresenta il contributo dell'irradianza solare per ridurre l'uso di energia termica in un edificio. Dipende dall'orientamento della strada e dal rapporto tra le altezze degli edifici (HHm). Tale fattore è più alto nei contesti in cui l'orientamento prevalente è est-ovest e contemporaneamente vi sono edifici con maggior capacità di apporto solare (HHm>1).

$$Sf_{sc} = (MOS \times HHm)_{sc} \times BO_{sc}$$

- GUMS, Global Urban Morphology e Solar factor [-]

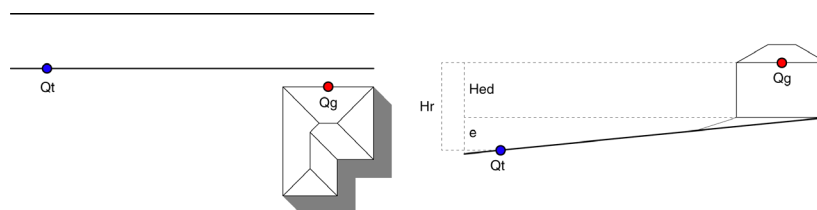
E' definito come il prodotto fra l'"Urban Morphology" e il "Solar factor".

$$GUMS_{sc} = UM_{sc} \times Sf_{sc}$$

- GUMSA, Global Urban Morphology Solar Factors e Albedo [-]

E' definito come il prodotto fra l'"Urban Morphology", il "Solar factor" e l'albedo.

$$GUMSA_{sc} = UM_{sc} \times Sf_{sc} \times A_{sc}$$



(*) L'errore si è verificato per come è stato creato il file della rete geodetica. Dato che non sempre i valori di quota di terreno (Q_t) sono stati misurati nella perpendicolare in cui è stata misurata la quota di gronda (Q_g), ma a livello del terreno; tante volte, principalmente nella zona collinare, la Q_t di riferimento era a una distanza tale che portava con sé un errore. Come si vede nel grafico, l'altezza rilevata (H_r) per il programma era la somma dell'altezza del edificio (H_{ed}) più l'errore (e).

Figura 2. Schema illustrativo del suddetto errore.

APPENDICE B: file .xml per la creazione dei modelli di Torino e Dubai.

B.1. Stralcio del file .xml per il modello di Crocetta.

```
<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>
<CitySim name="test">
  <Simulation beginMonth="1" endMonth="12" beginDay="1" end-
Day="31"/>
  <Climate location="C:\Simulationscitysim\climateFiles\TorinoG.cli" ci-
ty="Unknown"/>
  <District>
    <FarFieldObstructions>
<Composite id="4" name="19_45" category="Wall">
  <Layer Thickness="0.02" Conductivity="0.9" Cp="1000"
Density="1800" nre="0" gwp="0" ubp="0"/>
  <Layer Thickness="0.36" Conductivity="0.72"
Cp="1000" Density="1800" nre="0" gwp="0" ubp="0"/>
  <Layer Thickness="0.025" Conductivity="1.2000"
Cp="1000" Density="1" nre="0" gwp="0" ubp="0"/>
  <Layer Thickness="0.0800" Conductivity="0.297"
Cp="840" Density="800" nre="0" gwp="0" ubp="0"/>
  <Layer Thickness="0.0200" Conductivity="0.700"
Cp="1000" Density="1400" nre="0" gwp="0" ubp="0"/>
</Composite>
<Composite id="59" name="UNTIL18" category="Wall">
  <Layer Thickness="0.35" Conductivity="0.72"
Cp="1000" Density="1800" nre="0" gwp="0" ubp="0"/>
...
<OccupancyYearProfile id="0" name="residential" d1="0" d2="0" d3="0"
d4="0" d5="0" d6="0" ...
<OccupancyDayProfile id="0" p1="0" p2="0" p3="0" p4="0" p5="0"...
<Building Name="" id="0" key="1" Vi="12796.5352" Ninf="0.45" BlindsLam-
bda="0.2" BlindsIrradianceCutOff="100" Simulate="true">
  <HeatTank V="0.01" phi="20" rho="1000" Cp="4180"
```

```

Tmin="20" Tmax="35"/>
      <CoolTank V="0.01" phi="20" rho="1000" Cp="4180"
Tmin="5" Tmax="20"/>
      <Boiler name="" Pmax="10000000" eta_
th="0.9"/>
      </HeatSource>
      <Zone id="0" volume="8315" psi="0" Tmin="20"
Tmax="26" groundFloor="true" >
      <Occupants n="330" d="0" type="0"/>
      <Wall id="4557" type="59" ShortWaveReflectan-
ce="0.25" GlazingRatio="0.18" GlazingGValue="0.85" GlazingUValue="5,17"
OpenableRatio="0.5">
      <V0 x="312.54" y="636.15" z="-0.00"/>
      <V1 x="311.66" y="634.46" z="-0.00"/>
      <V2 x="311.66" y="634.46" z="12.50"/>
      <V3 x="312.54" y="636.15" z="12.50"/>
...

```


B.2. Stralcio del file .xml per il modello di Al Bastakya (Dubai).

```

<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>
<CitySim name="test">
  <Simulation beginMonth="1" endMonth="12" beginDay="1" end-
Day="31"/>
  <Climate location="" city="Unknown"/>
  <District>
    <FarFieldObstructions>
    </FarFieldObstructions>
    <Layer Thickness="0.35" Conductivity="1.4" Cp="1000" Densi-
ty="2000" nre="0" gwp="0" ubp="0"/>
    <Composite id="4" name="Traditional" category="Wall">
      <Layer Thickness="0.3" Conductivity="1.4" Cp="1000" Den-
sity="2000" nre="0" gwp="0" ubp="0"/>
      <Layer Thickness="0.35" Conductivity="1.4" Cp="1000"
Density="2000" nre="0" gwp="0" ubp="0"/>
      <Layer Thickness="0.15" Conductivity="2" Cp="1050"
Density="2000" nre="0" gwp="0" ubp="0"/>
      <Layer Thickness="0.3" Conductivity="1.4" Cp="1000"
Density="2000" nre="0" gwp="0" ubp="0"/>
    </Composite>
    <Composite id="12" name="LesosaiBTK D 1" category="Ro-
of">...
  <OccupancyYearProfile id="2" name="commercial" d1="22" d2="22"
d3="22" d4="22"...
  <OccupancyDayProfile id="22" p1="0.2" p2="0.2" p3="0" p4="0" p5="0"...
  <Building Name="" id="0" key="10" Vi="448.580933" Ninf="0.6" BlindsLam-
bda="0.2" BlindsIrradianceCutOff="1385" Simulate="true">
    <HeatTank V="0.01" phi="20" rho="1000" Cp="4180"
Tmin="20" Tmax="35"/>
    <CoolTank V="0.01" phi="20" rho="1000" Cp="4180"
Tmin="5" Tmax="20"/>
    <Boiler name="" Pmax="10000000" eta_
th="0.9"/>
  </HeatSource>
  <CoolSource beginDay="1" endDay="365">
  <HeatPump id="1" Pmax="900100000.0" eta_tech="0.25" Ttar-

```

```

get="15.0" Tsource="water"/>
  </CoolSource>
    <Zone id="0" volume="448.581" psi="0" Tmin="22"
Tmax="25" groundFloor="true" >
      <Occupants n="26" d="0" type="2"/>
      <Wall id="982" type="4" ShortWaveReflectan-
ce="0.35" GlazingRatio="0.2" GlazingGValue="0.6" GlazingUValue="3" Ope-
nableRatio="0.7">
        <V0 x="184.79" y="131.75" z="6.00"/>
        <V1 x="184.79" y="131.75" z="0.00"/>
        <V2 x="194.67" y="133.54" z="0.00"/>
        <V3 x="194.67" y="133.54" z="6.00"/>
      </Wall>...

```

Bibliografia

- Camillo SITTE; City planning according to artistic principles [1899]; Phaidon; London 1965.
- Leslie MARTIN, Lionel MARCH; Urban Space and Structure [1972]; Cambridge University Press; Cambridge 1972.
- Ralph L. KNOWLES; Energia e Forma [1974]; Franco Muzzio & c. editore, Padova, 1981.
- Philippe PANERAI, Jean CASTEX, Jean Charles DEPAULE; Isolato urbano e città contemporanea [1980]; Clup; Milano 1981.
- J. Douglas BALCOMB; Passive solar design handbook vol. 3; American Solar Energy Society; New York, 1983.
- J. Douglas BALCOMB; A design tool for passive solar strategies; from National Renewable Energy Laboratory; 1990.
- Tim R. OKE; Boundary layer climates [1978]; Taylor & Francis; 2002.
- Dale A. QUATTROCHI, Jeffrey C. LUVALL; Thermal Remote Sensing in Land Surface Processes; CRC Press; 2004.
- Nick BAKER, Koen STEEMERS; Energy and Environment in Architecture [2000]; E&FN Spon; London; 2005.
- Carlo Ratti, "Courtyard: a bioclimatic form?", in B. Edwards, M. Sibley, M. Hakmi, P. Land (a cura di), *Courtyard Housing: Past, Present and Future*; Taylor & Francis, New York (USA) 2006.
- Pietro A. BRIVIO, Giovanni LECHI, Eugenio ZILLIOLI; Principi e metodi di telerilevamento; Città Studi; 2006.
- Bjarke Ingels Group; Yes is more. Un arquicomic sobre la evolucion arquitectonica [2009]; Taschen; China 2009.
- Lewis MUMFORD; La ciudad en la historia [1961]; Pepitas de calabaza ediciones; Logroño 2014.
- Kevin LYNCH; La imagen de la ciudad [1960]; Gustavo Gili; Barcelona 2015.

ARTICOLI (Ordine cronologico)

- Philip STEADMAN; Energy and patterns of land use; in "Energy Conservation Through Building Design; Ed. D. Watson, McGraw-Hill, New York; 1979; pp. 246-260

- Vinod K. GUPTA; Solar radiation and urban design for hot climates; in "Environment and Planning B: Planning and Design", n. 11; 1984; pp. 435-454.
- Haider TAHA, David SAILOR, Hashem AKBARI; High-Albedo Materials for Reducing Building Cooling Energy Use; by Energy and Environment Division, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California; Berkeley; 1992.
- Shunlin LIANG; Narrowband to broadband conversions of land surface albedo. Part I Algorithms; in "Remote Sensing of Environment", n. 76; 2000; pp. 213-238.
- I. Guedi CAPELUTO, Edna SHAVIV; On the use of 'solar volume' for determining the urban fabric; in "Solar Energy", vol. 70, n. 3; 2001; pp. 275-280.
- Sam C. M. HUI; Low energy building design in high density urban cities; in "Renewable Energy", n. 24; 2001; pp. 627-640.
- Shunlin LIANG; Narrowband to broadband conversions of land surface albedo. Part II Validation; in "Remote Sensing of Environment", n. 84; 2002; pp. 25-41.
- Ralph L. KNOWLES; The solar envelope: its meaning for energy and buildings; in "Energy and Buildings", n. 35; 2003; pp. 15-25.
- Koen STEEMERS; Energy and the city: density, buildings and transport; in "Energy and Buildings", n. 35, 2003; pp. 3-14.
- Carlo RATTI, Nick BAKER, Koen STEEMERS; Energy consumption and urban texture; in "Energy and Buildings", n. 37; 2005; pp. 762-776.
- Carlo RATTI, Eugenio MORELLO; SunScapes: extending the 'solar envelopes' concept through 'iso-solar surfaces'; PLEA2005, the 22nd Conference on Passive and Low Energy Architecture; Beirut, Lebanon; 13-16 Nov 2005.
- Vicky CHENG, Koen STEEMERS, Marylene MONTAVON, Raphaël COMPAGNON; Urban Form, Density and Solar Potential; PLEA2006, the 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture; Geneva, Switzerland; 6-8 Sep 2006.
- Jérôme H. KÄMPF, Darren ROBINSON; A simplified thermal model to support analysis of urban resources flows; in "Energy Build", n. 39, 2007; pp. 445-453.
- Mariela ARBOIT, Ángela DIBLASI, J.C. FERNÁNDEZ LLANO, C. DE ROSA; Assessing the solar potential of low-density urban environments in Andean cities with desert climates: The case of the city of Mendoza, in Argentina. in "Renewable Energy", n. 33, 2008; pp. 1733-1748.
- Abduwasit GHULAM; How to calculate reflectance and temperature using ASTER data; in www.pancroma.com, Center for Environmental Sciences

at Sant Louis University; 2009.

· Serge SALAT; Energy loads, CO₂ emissions and building stocks: morphologies, typologies, energy systems and behaviour; in "Building Research & Information" 37: 5-6; 2009; pp. 598-609.

· Darren ROBINSON, Frédéric HALDI, Jérôme H. KÄMPF, Philippe LE-ROUX, Diane PEREZ, Adil RASHEED, Urs WILKE; Citysim: Comprehensive micro-simulation of resource flows for sustainable urban planning; in Eleventh International IBPSA Conference; Glasgow, Scotland, 2009.

· Mariela ARBOIT, Alejandro MESA, Ángela DIBLASI, J.C. FERNÁNDEZ LLANO, C. DE ROSA; Assessing the solar potential of low-density urban environments in Andean cities with desert climates: The case of the city of Mendoza, in Argentina. 2nd part; in "Renewable Energy", n. 35; 2010; pp. 1551-1558.

· Ahmad OKEIL; A holistic approach to energy efficient building forms; in "Energy and Buildings", n. 42; 2010; pp. 1437-1444.

· Julie Ann FUTCHER, Gerald MILLS; The role of urban form as an energy management parameter, in "Energy Policy", Volume 53, 2013, pp. 218-228.

· Steven JIGE QUAN, Athanassios ECONOMOU, Thomas GRASL, Perry PEI-JU YANG; Computing energy performance of building density, shape and typology in urban context; in "Energy Procedia", n. 61; 2014; pp. 1602-1605; the 6th International Conference on Applied Energy – ICAE 2014.

· Philipp RODE, Christian KEIM, Guido ROBAZZA, Pablo VIEJO, James SCHOFIELD; Cities and energy: urban morphology and residential heat-energy demand; in "Environment and Planning B: Planning and Design", volume 41; 2014; pp. 138-162.

· Peter BOEHME, Matthias BERGER; Estimating building based energy consumption as an anthropogenic contribution to urban heat islands, in "Sustainable Cities and Society", Vol. 19, 2015, pp. 373-384.

· Chiara DELMASTRO, Guglielmina MUTANI, Michele PASTORELLI, Giovanni VICENTINI; Urban morphology and energy consumption in Italian residential buildings; International Conference on Renewable Energy Research and Applications ICRERA; Palermo; 2015.

· Chiara DELMASTRO, Guglielmina MUTANI, Laura SCHRANZ, Giovanni VICENTINI; Building energy assessment and urban form; IX Congresso Nazionale AIGE; Catania; 17-18 settembre 2015.

· Chuanglin FANG, Shaojian WANG, Guangdong LI; Changing urban forms and carbon dioxide emissions in China: A case of study of 30 provincial capital cities, in "Applied Energy", Vol. 158, 2015; pp. 519-531.

- Emilie NAULT, Giuseppe PERONATO, Emmanuel REY, Marilyne ANDERSEN; Review and critical analysis of early-design phase evaluation metrics for the solar potential of neighborhood designs; in "Building and Environment", Volume 92; 2015; 679-691.
- Romain NOUVEL, Alessio MASTRUCCI, Ulrich LEOPOLD, Olivier BAUME, Volker Coors, Ursula EICKER; Combining GIS-based statistical and engineering urban heat consumption models: Towards a new framework for multi-scale policy support; in "Energy and Buildings", Volume 107; 2015; pp. 204-212.
- Perry PEI-JU YANG; Energy resilient urban form: a design perspective; in "Energy Procedia"; n. 75; 2015; pp. 2922-2927; the 7th International Conference on Applied Energy – ICAE 2015.
- Ali G. TOUCHAEI, Hashem AKBARI; Evaluation of the seasonal effect of increasing albedo on urban climate and energy consumption of buildings in Montreal; in "Urban Climate", Volume 14 Part 2; 2015; pp. 278-289.
- Hong YE, Xiaoyan HE, Yu SONG, Xinhua LI, Guoqin ZHANG, Tao LIN, Lishan XIAO; A sustainable urban form: The challenges of compactness from the viewpoint of energy consumption and carbon emission; in "Energy and Buildings", n. 93; 2015; pp. 90-98.

SITOGRAFIA (aggiornata al 9 settembre 2016)

<<http://www.citiesonpower.eu/>>
<<http://citysim.epfl.ch/>>
<<http://www.comune.torino.it/geoportale/>>
<<http://densityatlas.org/>>
<<http://urbanmicroclimate.scripts.mit.edu/index.php>>
<www.pancroma.com>
<www.arpa.piemonte.gov.it>
<<http://www.wmo.int/pages/prog/gcos/>>
<<http://www.istat.it/it/archivio/104317>>
<<http://www.istat.it/it/files/2013/11/2015.04.28-Descrizione-dati-Pubblicazione.pdf>>
<<http://webgis.arpa.piemonte.it/geoportale/index.php/servizi-geoportale/wms-wfs>>
<<http://support.esri.com/en/>>
<<http://www.esri.com/>>
<<http://www.chemlabs.bristol.ac.uk/outreach/resources/Box4.html>>
<<http://amslaurea.unibo.it/2007/>>
<<https://asterweb.jpl.nasa.gov/characteristics.asp>>

<<http://www.pancroma.com/ASTER%20Surface%20Temperature%20Analysis.html>>
<<http://www.pancroma.com/downloads/ASTER%20Temperature%20and%20Reflectance.pdf>>
<http://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/view.php?id=82908&eocn=image&eoci=related_image>
<http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=87359&eocn=image&eoci=related_image>
<<http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=87691&src=twitter-iotd>>
<http://ec.europa.eu/clima/change/causes/index_it.htm>
<<http://ec.europa.eu/eurostat/data/database>>
<http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/8108.php>

