



POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Caratterizzazione dei consumi energetici per la climatizzazione invernale di un'area urbana -
CHARACTERIZATION OF BUILDING THERMAL ENERGY CONSUMPTION AT THE URBAN

Original

Caratterizzazione dei consumi energetici per la climatizzazione invernale di un'area urbana - CHARACTERIZATION OF BUILDING THERMAL ENERGY CONSUMPTION AT THE URBAN SCALE / Mutani, Guglielmina; Delmastro, Chiara; Corgnati, STEFANO PAOLO. - In: LA TERMOTECNICA. - ISSN 0040-3725. - 71:2(2017), pp. 52-58.

Availability:

This version is available at: 11583/2674020 since: 2017-06-05T17:11:20Z

Publisher:

Editrice Bias

Published

DOI:

Terms of use:

openAccess

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

Caratterizzazione dei consumi energetici per la climatizzazione invernale di un'area urbana

In questi anni, la transizione verso nuovi modelli urbani "low carbon" ha incrementato lo sviluppo di nuovi processi di pianificazione energetica. Uno dei punti essenziali per sostenere lo sviluppo di piani energetici consiste in una corretta elaborazione di dati di natura eterogenea. Questo articolo introduce una metodologia per caratterizzare il parco edilizio residenziale di un'area urbana in termini di distribuzione degli edifici per tipologia edilizia, destinazione d'uso e fabbisogni termici per il riscaldamento invernale.

CHARACTERIZATION OF BUILDING THERMAL ENERGY CONSUMPTION AT THE URBAN SCALE

The ongoing transition toward decarbonized urban energy systems has raised the attention on energy planning practices. Besides the multiple actors involved in the planning process, the complexity of the urban energy systems requires the elaboration of heterogeneous data. This paper introduces a GIS-based methodology for supporting the spatial characterization of the urban building stock in terms of building distribution, destination use and space heating energy consumption.

INTRODUZIONE

La riduzione dei consumi energetici degli edifici rappresenta una delle priorità della Commissione Europea per il raggiungimento dei target ambientali al 2050. Molti studi in letteratura presentano procedure per modellizzare i consumi energetici degli edifici a diverse scale, dal singolo edificio al parco edilizio nazionale.

Le metodologie a scala di singolo edificio sono ormai robuste e largamente utilizzate da architetti ed ingegneri di tutto il mondo [1]; nuove principali sfide di ricerca consistono nell'integrare a questi studi le analisi di comportamento dell'occupante [2, 3].

La definizione di una metodologia standardizzata per modellizzare gruppi di edifici o intere aree urbane è invece tutt'ora in fase di sviluppo [4]. Infatti, l'applicazione dei modelli molto dettagliati applicati al singolo edificio non sono idonei per le scale più ampie a causa dell'immensa quantità di dati richiesta e dei conseguenti elevati costi computazionali.

La normativa EPBD [5] richiede a tutti gli stati membri di identificare gli edifici tipo, "Reference Building", per creare una base comune per stimare il potenziale di riqualificazione e risparmio energetico a scala nazionale e regionale. Identificare i "Reference Buildings" permette di definire edifici rappresentativi per modellizzare, in modo semplificato ma sufficientemente accurato, le performance attuali e future di un gruppo di edifici attraverso la simulazione energetica [6; 7]. Il progetto Europeo TABULA [8] è nato con l'obiettivo di creare una base comune per l'identificazione e la caratterizzazione dei "Reference Buildings" a partire dai dati statistici nazionali e/o regionali. Attraverso il progetto TABULA, è stato possibile ottenere una valutazione preliminare dei consumi energetici associati al parco edilizio nazionale. Altri tentativi hanno sfruttato dati top-down di tipo statistico, gli standard e la normativa corrente per definire le tipologie edilizie ed i relativi consumi di energia primaria [9; 10]. Panayiotou et al. [11] hanno proposto una metodologia che si

basa sia sull'audit energetico che sulla simulazione energetica per classificare gli edifici residenziali in base alle zone climatiche, il periodo di costruzione e le dimensioni.

La diffusione di strumenti GIS, accompagnata da uno sviluppo delle capacità computazionali degli strumenti di calcolo, ha permesso una ulteriore spinta nell'analisi, rendendo possibile dettagliare e approfondire le analisi energetiche del parco edilizio, in particolare a scala locale. Una procedura che si basa su strumenti GIS è stata proposta e applicata alla città di Milano [4]: l'approccio utilizza dati statistici per stimare le performance energetiche degli edifici urbani e per definire svariati scenari di risparmio energetico. Nella Regione Lombardia, attraverso supporto GIS, i dati energetici statistici sono stati integrati con i risultati di audit energetici [12]. Nella città di Benevento, semplificando la metodologia proposta dalla normativa europea EN ISO 13790, sono state create delle mappe energetiche relative al centro storico [13]. A Ferrara, Fabbri et al. [14] hanno creato un database geo-referenziato contenente i dati ottenuti dalle certificazioni energetiche; essi hanno evidenziato come tale pratica può contribuire all'identificazione di indicatori energetici. Mattinen et al. [15] hanno presentato una metodologia di calcolo per stimare e visualizzare le emissioni ed i consumi energetici a livello di distretto urbano. Nella città di New York, Howard et al. [16] hanno valutato le intensità energetiche dei principali servizi energetici di uso finale (climatizzazione invernale ed estiva, acqua calda sanitaria e consumi elettrici). Essi hanno considerato gli usi finali come dipendenti dalle destinazioni d'uso degli edifici (uffici, residenziali etc.). Dagli studi precedentemente citati è emerso come una caratterizzazione spaziale del parco edilizio sia fondamentale per le analisi energetiche territoriali. La scelta della metodologia chiaramente dipende dalla disponibilità di dati e dal livello di dettaglio richiesto dall'analisi.

In questo articolo vengono riassunte le principali caratteristiche dei

modelli utilizzati per la caratterizzazione energetica degli edifici della città di Torino. Per quanto riguarda gli edifici residenziali, vengono presentati due modelli: il primo è basato sul concetto di "Reference Building" (Sessione 2.1) ed il secondo su metodi di regressione lineare (Sessione 2.2). Entrambe le metodologie sono di tipo bottom-up e si basano sulla geo-referenziazione degli edifici e successivo loro raggruppamento in base alle caratteristiche termofisiche. I due modelli permettono successivamente di associare a ciascun edificio un valore di intensità energetica per il riscaldamento invernale. Un terzo modello viene proposto per caratterizzare il parco edilizio non residenziale in termini di destinazione d'uso e fabbisogni per la climatizzazione invernale (Sessione 2.3). I modelli vengono validati utilizzando dati di tipo top-down (dati di censimento, dati statistici, risultati derivanti dai report connessi al Patto dei Sindaci [17], etc.). Le Sessioni 3 e 4 riassumono rispettivamente i risultati dei modelli e le principali conclusioni.

METODOLOGIA

In questa Sessione si descrivono le basi modellistiche che hanno supportato la caratterizzazione energetica del parco edilizio residenziale della città di Torino. Due modelli relativi agli edifici residenziali

(Model 1 e Model 2 di Fig. 1) sono stati applicati e confrontati. Viene inoltre descritto ed applicato un terzo modello (Model 3) specifico per gli edifici non residenziali. Lo schema concettuale della metodologia è riassunto in Fig. 1. Gli step principali consistono in: i. la creazione di un database geo-referenziato per raccogliere e gestire i dati relativi ai singoli edifici; ii. lo sviluppo di modelli energetici di tipo bottom-up per stimare i fabbisogni termici di riscaldamento degli edifici residenziali; iii. la validazione e correzione dei modelli tramite dati top-down; iv. la creazione di un modello energetico per caratterizzare il parco edilizio non residenziale.

L'analisi condotta in questo studio ha le proprie basi nei progetti di ricerca "Cities on Power" [18- 22], incentrato sui risparmi energetici e la penetrazione di fonti rinnovabili a scala urbana, e TABULA [8]. La base comune dei tre modelli presentati consiste nell'utilizzo di strumenti GIS per identificare la distribuzione delle caratteristiche geometriche degli edifici all'interno del contesto urbano. Gli edifici vengono raggruppati in base alle principali variabili che influenzano i consumi per la climatizzazione invernale. I principali driver di tale uso finale di energia consistono nelle condizioni climatiche, le caratteristiche termo fisiche dell'involucro e la compattezza dell'edificio [18]. In questo studio, come comunemente avviene nel contesto

FIGURA 1 - Schema concettuale della metodologia

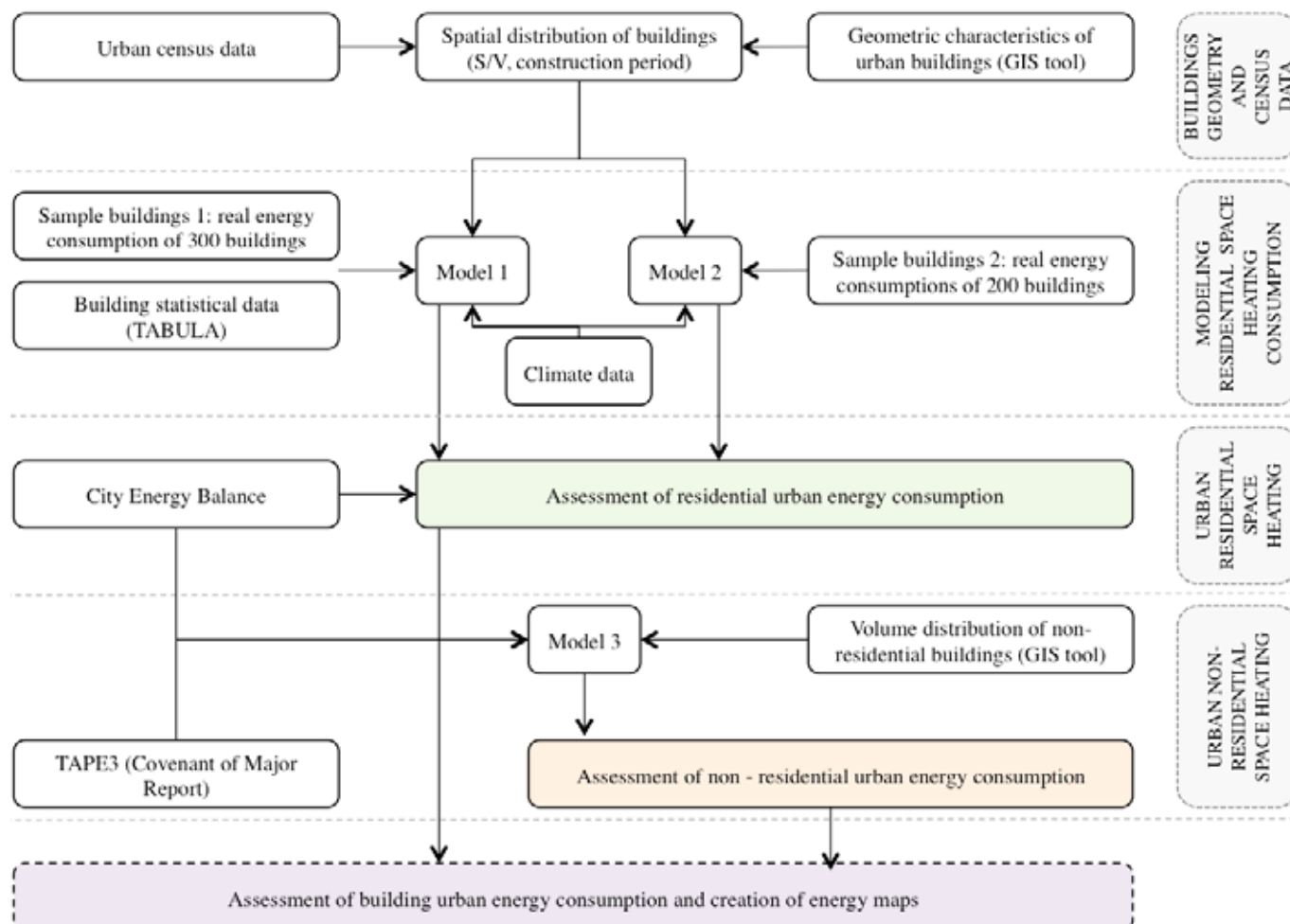


TABELLA 1 - Volumetrie degli edifici in Torino

Edifici Residenziali		Edifici Non residenziali	
Volume riscaldato – Mm ³	138.9	Scuole Mm ³	5.9
Superficie media degli appartamenti – m ²	75.3	Palestre, piscine etc Mm ³	0.617
Altezza media di un piano – m	3.5	Uffici Mm ³	4.2
		Attività commerciali Mm ³	0.22
		Attività Industriali Mm ³	24.67
		Chiese Mm ³	0.517

italiano [12, 18- 22], gli edifici residenziali sono stati classificati in base al fattore di forma (compattezza) e l'epoca di costruzione (materiali, caratteristiche strutturali degli edifici, standard edilizi). Gli edifici non residenziali vengono invece categorizzati in base alla loro destinazione di uso finale (uffici, scuole etc.) e al volume. Dalla municipalità di Torino [23, 24] e dai dati di censimento ISTAT 2011 [25] è possibile ottenere informazioni relative al numero di piani e all'epoca di costruzione di ciascun edificio e al tasso di occupazione medio per sezione di censimento. Questi dati possono essere associati alla carta tecnica comunale geo-referenziata al fine di calcolare le variabili geometriche degli edifici: perimetri, superfici riscaldate, volumi etc [21, 22]. La Tabella 1 riassume i principali dati riferiti alle volumetrie della città di Torino.

Nel momento in cui le caratteristiche dimensionali sono state associate agli edifici, il secondo step consiste nell'associazione dei consumi energetici agli stessi. I Modelli proposti si basano su una rappresentazione spaziale dettagliata degli edifici e sono validati con i dati del "Turin Energy Action Plan" [17] che si riferiscono all'anno 2005. Tutti i consumi fanno dunque riferimento alle condizioni climatiche di tale anno (Gradi Giorno GG 2703). Gli edifici costruiti dopo il 2006 sono stati conseguentemente inseriti nelle valutazioni in seguito alla validazione dei Modelli.

Modello 1: caratterizzazione dei consumi residenziali per la climatizzazione invernale tramite l'utilizzo di "Reference Buildings"

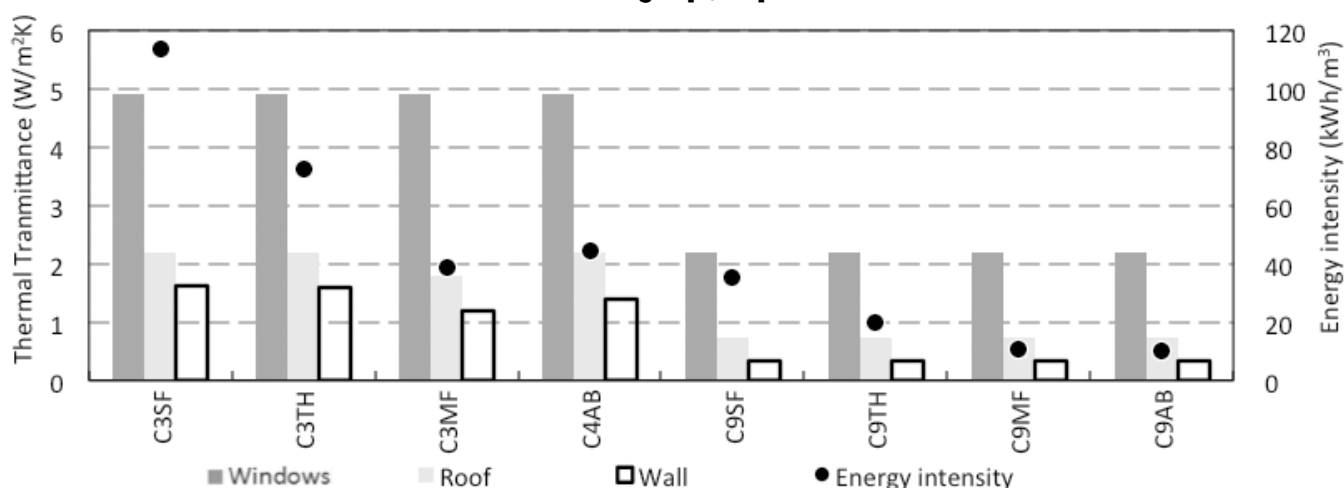
Il primo modello proposto si basa sul concetto di "Reference Buildings"

[6, 8], a ciascuno dei quali viene associate una valore di intensità energetica di riferimento. I "Reference Buildings" sono stati identificati considerando sia le informazioni provenienti da strumenti GIS che quelle derivanti dalla statistica nazionale [8, 18, 25]. Gli edifici vengono quindi suddivisi in 36 "Reference Buildings" dipendenti da: i. 4 classi di fattore di forma: monofamiliare (SF, $S/V > 0.8 \text{ m}^{-1}$), villette a schiera (TH, $0.6 < S/V \leq 0.8 \text{ m}^{-1}$), multi-familiari (MF, $0.4 < S/V \leq 0.6 \text{ m}^{-1}$) e blocchi di appartamenti (AB, $S/V \leq 0.4 \text{ m}^{-1}$); ii. nove epoche di costruzione: C1=1900-1918; C2= 1919-1945; C3= 1946-1960; C4 = 1961-1970; C5= 1971-1980; C6= 1981 -1990; C7= 1981-2000; C8= 2001-2005; C9= 2006-anno corrente.

Ciascuna classe è caratterizzata dai materiali tipici del rispettivo periodo di costruzione e da caratteristiche geometriche medie ottenute con strumenti GIS. Le performance energetiche associate a ciascun "Reference Building" devono essere rappresentative del comportamento energetico degli archetipi. Tali valori, possono essere preliminarmente stimati tramite software di simulazione energetica (e.s. TRNSYS) e poi arricchiti con dati reali derivanti da audit energetici o monitoraggi.

In questo modello i dati utilizzati fanno riferimento al lavoro di Delmastro et al. [26] che si basa sia su dati reali, sia su lavori precedenti [8, 18]. Quando il campione è statisticamente rappresentativo, i dati reali possono migliorare l'accuratezza dei risultati riducendo il gap tra risultati simulati e reali. In questo studio, sono stati utilizzati i dati reali riferiti a 300 edifici per tre diverse stagioni consecutive di riscaldamento (2011/2012, 2012/2013 e 2013/2014). Tali dati

FIGURA 2 - Caratteristiche di alcuni "Reference Buildings" [8, 26]



Epoca di costruzione	< 1919	1919-1945	1946-1960	1961-1970	1971-1980	1981-1990	1991-2005	>2005
Pendenza	143.42	132.99	100.40	97.98	98.95	86.91	76.69	141.11
Intercetta	110.39	107.29	104.61	103.85	103.85	77.28	77.73	1.22

TABELLA 2 - Modello lineare per stimare i consumi specifici di riscaldamento (kWh/m²/a) al variare del rapporto di forma S/V (2703 GG). Volume riscaldato: 71.3%, Fattore correttivo 1.24

sono stati normalizzati con i dati climatici al 2005 e analizzati statisticamente. Sono stati dunque eliminati gli edifici con comportamenti atipici e sono stati associati i valori di consumo per riscaldamento. I dati TABULA [8] e le normative energetiche [27] sono stati utilizzati per tutti gli edifici costruiti dopo al 2006. In Fig. 2 sono esposte alcune caratteristiche relative ai "Reference Buildings" della città di Torino.

Modello 2: caratterizzazione dei consumi residenziali per la climatizzazione invernale al livello di singolo edificio

Considerando il database geo-referenziato, come è stato fatto anche con il Modello 1, le principali variabili che influenzano i consumi per il riscaldamento sono state selezionate: il volume riscaldato, il periodo di costruzione e il rapporto di forma [20]. I dati di volume riscaldato ed efficienza media dei sistemi energetici, derivanti dal censimento ISTAT 2011, sono stati utilizzati per migliorare il Modello. Per ciascuna epoca di costruzione, viene dunque sviluppato un modello di regressione lineare per stimare il valore di intensità energetica per riscaldamento (kWh/m²/a) al variare del fattore di forma [18, 22].

Il modello semplificato che ne risulta non considera alcuni fattori di grande importanza quali: apporti solari, temperature dell'aria indoor/outdoor e la possibile riqualificazione degli edifici che può aver variato i consumi negli anni. Per tale motivo, un fattore correttivo [22], dipendente dalla tipologia di ambiente costruito e dai dati di bilancio energetico [17], dovrà essere apportato al Modello per adattarlo a rappresentare il reale comportamento del parco edilizio. Nella Tabella 2 sono riassunte le principali caratteristiche dei modelli di regressione lineare.

Modello 3: Caratterizzazione energetica del parco edilizio non residenziale

Dal bilancio energetico cittadino [17] si possono ottenere i consumi totali per il riscaldamento invernale associati agli edifici non residenziali. Inoltre, il database GIS contiene la distribuzione in volume per tipologia di destinazione d'uso degli edifici. Combinando dunque

tali informazioni con analisi statistiche e letteratura precedente, è conseguentemente possibile calcolare dei consumi specifici per il riscaldamento medi per ciascuna destinazione d'uso (Tabella 3).

RISULTATI

La procedura è stata applicata alla città di Torino ed è stata validata utilizzando i dati di bilancio energetico al 2005 (2703 GG at 20°C). La caratterizzazione spaziale degli edifici permette di effettuare analisi multi-scala (Fig.3): i. a livello di singolo edificio: destinazione d'uso, posizione, periodo di costruzione, caratteristiche geometriche; ii. a livello di sezione di censimento, distretto o scala urbana: il numero di edifici residenziali e non, il volume totale e il volume effettivamente occupato, le tipologie edilizie e le destinazioni d'uso. Dalla Fig. 3 si osserva come il volume costruito prima del 2006 ed attualmente occupato sia pari a 139 Mm³ (177 Mm³ totali) di cui più del 75% è caratterizzato da elevata compattezza (AB) e più del 90% è stato costruito prima degli anni '80. Il volume costruito dopo il 2006 ammonta a 0.3 Mm³ (dati di censimento 2011). Gli edifici non-residenziali occupano un volume totale pari a 36.23 Mm³ dei quali il 68.1% utilizzato per attività industriali, il 16.4% per attività educative, il 11.8% con destinazione uffici, il 1.7% sono destinati ad attività sportive, il 1.4% sono chiese e lo 0.6% sono attività commerciali.

I Modelli 1 e 2 sono stati dunque applicati alle volumetrie residenziali per stimare i consumi relativi alla climatizzazione invernale. Il bilancio energetico [17] stima i consumi di riscaldamento, acqua calda sanitaria ed usi di cucina pari a 6.84 TWh/a. La letteratura corrente [28] e i dati statistici valutano i consumi relativi alla produzione di acqua calda sanitaria e usi di cucina pari al 14% dei consumi termici domestici, mentre i consumi per il riscaldamento invernale pari allo 86%. In base a tali stime, il consumo per riscaldamento associato al volume costruito prima del 2006 risulta 5.88 TWh/a. Applicando il Modello 1 i consumi per riscaldamento risultano pari a 6.39 TWh/a, sovrastimando i dati di bilancio energetico di circa 8% mentre il Modello 2 richiede un fattore correttivo pari a 1.24. Entrambi i Modelli permettono dunque di stimare con una buona

TABELLA 3 - Consumi specifici per il riscaldamento (kWh/m³/a) in funzione del volume riscaldato (2703 HDD)

Edifici non residenziali	Scuole	Palestre, piscine etc.	Uffici	Attività commerciali	Attività industriali	Chiese
Volume riscaldato m ³	5,926,337	616,896	4,267,591	222,578	24,677,166	517,667
kWh/m ³	31	42.81	25.71	10.41	129.98	3.37

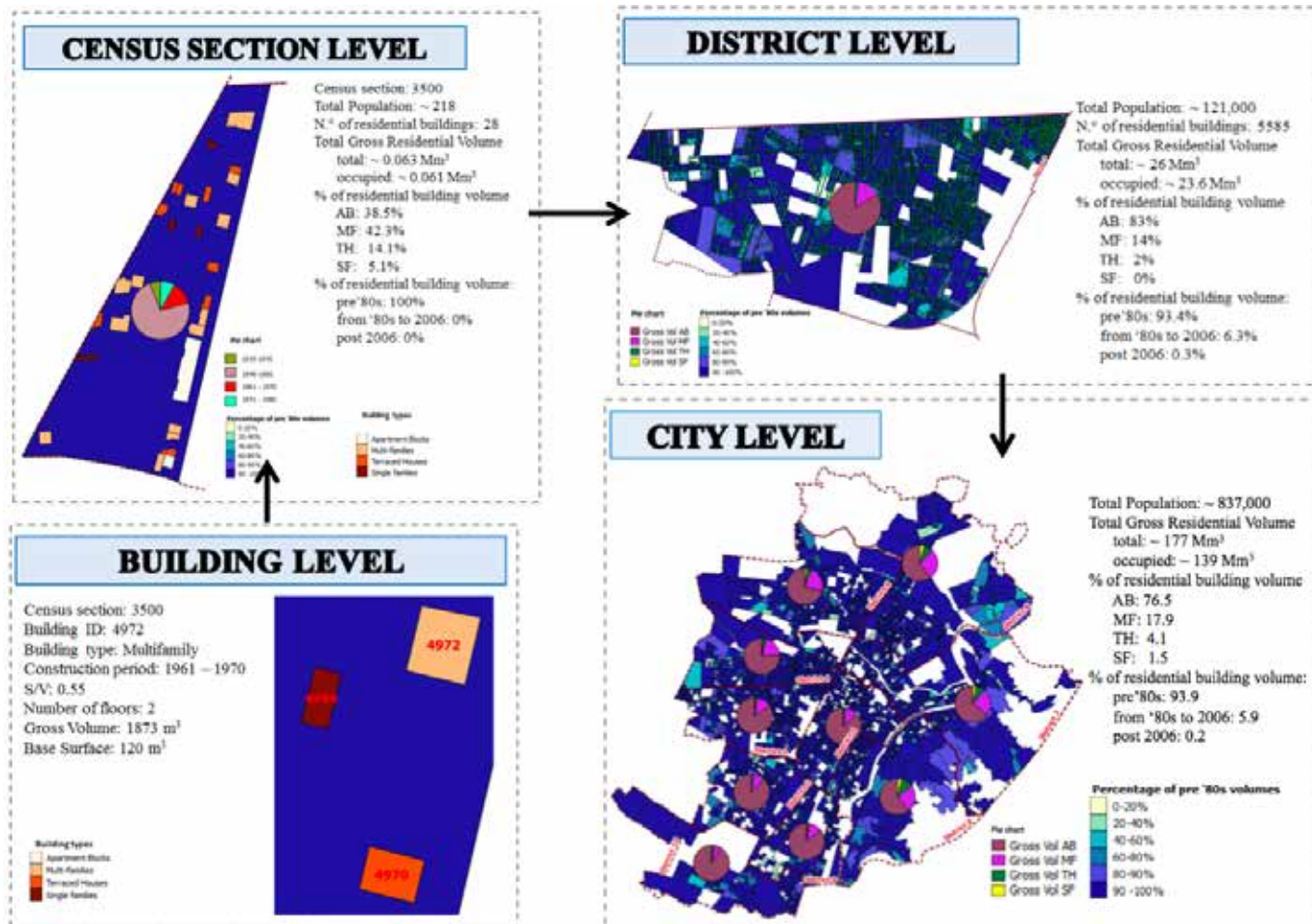
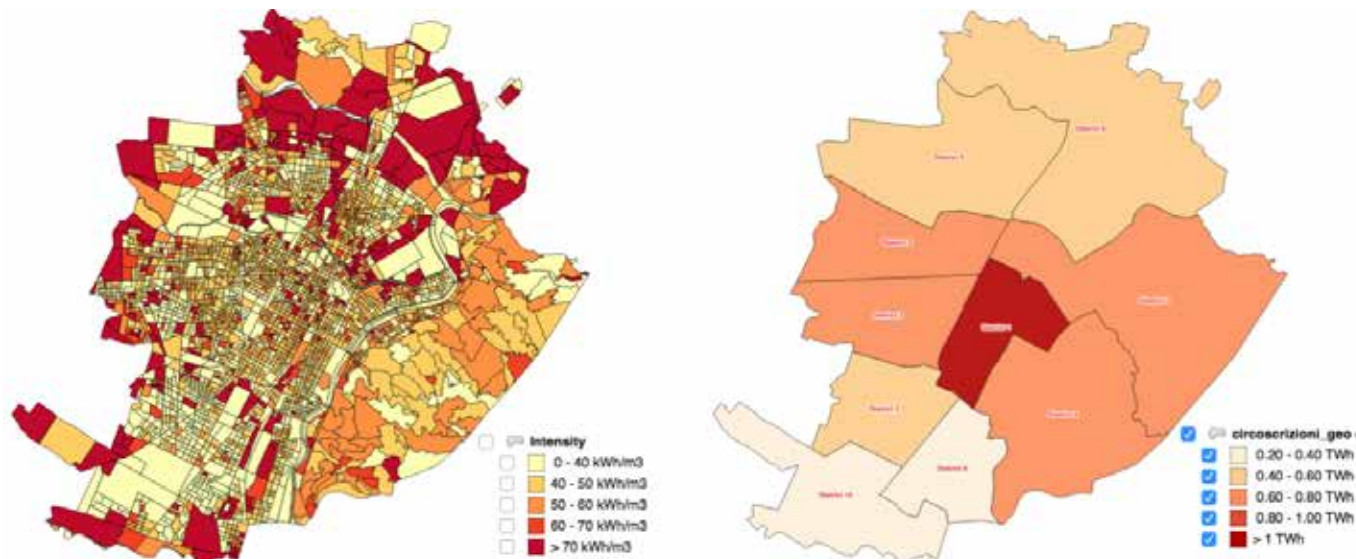


FIGURA 3 - Distribuzione degli edifici residenziali a scala urbana

FIGURA 4 - (a) Distribuzione dei consumi specifici per il riscaldamento a livello di sezione di censimento kWh/m³ (b) Distribuzione dei consumi termici a scala di distretto TWh



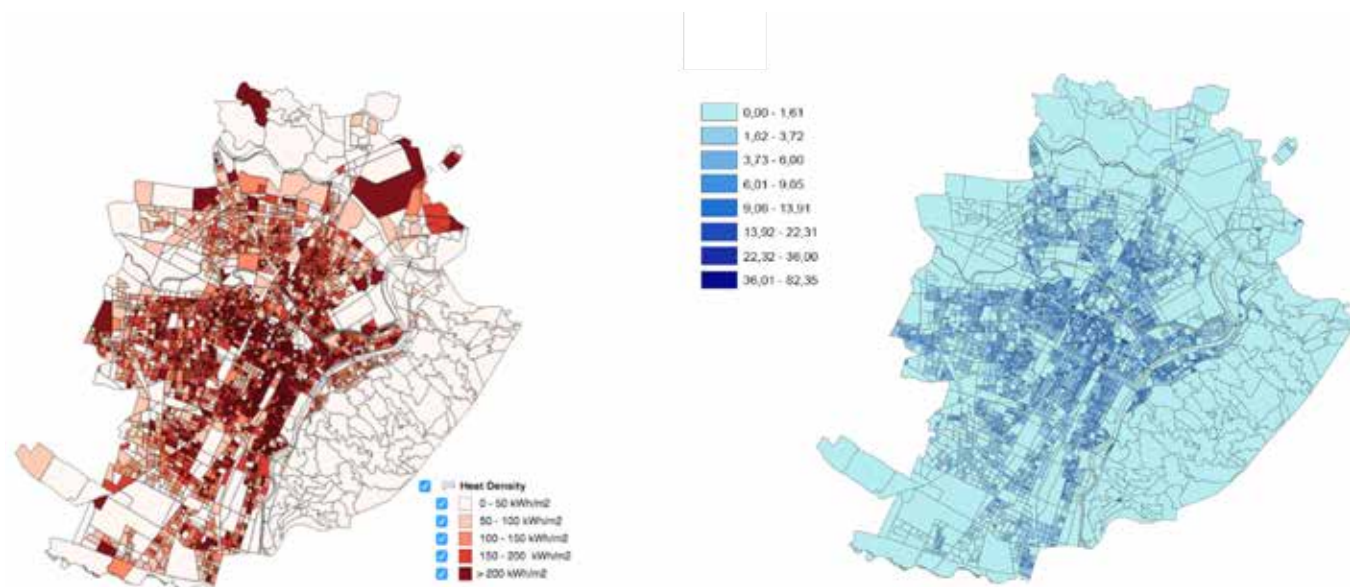


FIGURA 5 - (a) Densità energetica per unità di superficie della sezione di censimento kWh/m² (b) Densità energetiche per unità di superficie della sezione di censimento e per unità di volume riscaldato kWh/m²/m³

accuratezza i consumi energetici a scala territoriale. Valutazioni separate sono state riservate agli edifici costruiti dopo il 2006 che risultano occupare un volume di 0.3 Mm³ e consumano 4.2 GWh/a. Applicando il Modello 3 agli edifici non-residenziali si evince che il consumo per il riscaldamento ammonta a 3.6 TWh/a.

Complessivamente, l'ambiente costruito urbano di Torino consuma 9.49 TWh/a considerando 2703 GG. Se si assumono i GG della normativa corrente (2617 GG), il consumo urbano risulta 9.19 TWh/a di cui il 62% legato ad edifici residenziali e il 38% ai non-residenziali (Fig. 4a e 4b).

In Fig. 5a e Fig. 5b si può osservare la variazione di densità energetica nel contesto urbano. Come ci si aspetta, le densità energetiche più alte, come anche i consumi più elevati (Fig. 4b), si trovano nelle aree in prossimità del centro urbano, mentre i consumi specifici più elevati si osservano nelle aree in cui le compattezza degli edifici sono minori (Fig. 5a).

CONCLUSIONI

In questo articolo è stata descritta la metodologia applicata alla città di Torino per supportare la caratterizzazione spaziale ed energetica dell'ambiente costruito. Sono stati proposti due modelli per gli edifici residenziali e un modello per il parco edilizio non residenziale. Essi sono modelli di tipo bottom-up supportati da strumenti GIS e validati con dati top-down di bilancio energetico. Tali modelli verranno perfezionati analizzando come il contesto urbano può influenzare i consumi di energia degli edifici soprattutto per la climatizzazione invernale ed estiva [29, 30].

I risultati delle metodologie presentate in questo articolo possono essere utili a diversi attori urbani: i) ai decisori politici per comprendere la situazione energetica di un territorio ed identificare le aree con maggiori criticità; ii) ai cittadini per visualizzare i propri consumi energetici; iii) ai ricercatori per creare una base per ricerche

successive a scala urbana.

Queste metodologie, oltre a consentire una piena caratterizzazione del parco edilizio, rappresentano la base di partenza per analisi di scenario di lungo periodo connesse al processo di pianificazione energetica strategico. In particolare, sono la base per analisi integrate di sistema per analizzare la competizione tra i diversi possibili investimenti riguardanti le misure di risparmio energetico e di decarbonizzazione (es. riqualificazione edilizia, diffusione di pompe di calore, sviluppo di reti di teleriscaldamento etc.). Infatti, le analisi spaziali possono contribuire a descrivere l'intero sistema energetico e allo sviluppo di modelli energetici integrati in grado di descrivere contemporaneamente domanda e offerta energetica.

Il concetto di "Smart City" come anche quello di "Low Carbon City" richiedono l'analisi di scenario di corto e lungo periodo tramite metodologie integrate. La metodologia proposta si integra bene nel contesto di ricerca europeo, focalizzata sui concetti di città intelligenti, resilienti e sostenibili, come è dimostrato dal recente progetto EU FP7 InSmart (<http://www.insmartenergy.com>). Essa può infatti essere integrata con numerosi strumenti e metodologie (es. metodi multicriteria, modelli di sistema energetico etc.) al fine di supportare la stesura di Piani Energetici Strategici Sostenibili che considerano criteri economici, ambientali e sociali.

BIBLIOGRAFIA

1. Harish VSKV, Kumar A. A review on modeling and simulation of building energy systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2016;56: 1272-1292.
2. Hong T, Taylor-Lange SC; D'Oca S; Yan D; Corgnati SP. Advances in research and applications of energy-related occupant behavior in buildings. *Energy and Buildings* 2016; 116: 694-702.
3. Kazmi H, D'Oca S, Delmastro C, Lodeweyckx S, Corgnati SP.

- Generalizable occupant-driven optimization model for domestic hot water production in NZEB. *Applied Energy* 2016; 175: 1-15.
4. Caputo P, Costa G, Ferrari S. A supporting method for defining energy strategies in the building sector at urban scale. *Energy Policy* 2013; 55: 261-270.
 5. European Commission. Guidelines accompanying Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012 of 16 January 2012 supplementing Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council, Off. J. Eur.Union. (2012)
 6. Corgnati SP, Fabrizio E, Filippi M, Monetti V. Reference Building for Cost-optimal analysis: method of definition and application. *Applied energy* 2013; 102: 983-993.
 7. Lombardi P, Trossero E. Beyond energy efficiency in evaluating sustainable development in planning and the built environment. *International journal of sustainable building technology and urban development* 2013; 4: 274-282.
 8. EU TABULA project. Available online: <http://www.building-typology.eu>, last access: October 2015.
 9. Fracastoro GV, Serraino M. A methodology for assessing the energy performance of large scale building stocks and possible applications. *Energy and Buildings* 2011; 43: 844-852.
 10. Brownsword RA, leming PD, Powell JC, Pearsall N. Sustainable cities - Modelling urban energy supply and demand. *Applied Energy* 2005, 82(2), pp.167-180.
 11. Panayiotou GP, Kalogirou SA, Florides GA, Maxoulis CN, Papadopoulos AM, Neophytou M, Fokaides P, Georgiou G, Symeou A, Georgakis G. The characteristics and the energy behaviour of the residential building stock of Cyprus in view of Directive 2002/91/EC. *Energy and Buildings* 2010; 42: 2083-2089.
 12. Dall'O' G, Galante A, Torri M. A methodology for the energy performance classification of residential building stock on an urban scale. *Energy and Buildings* 2012; 48: 211-219.
 13. Ascione F, De Masi RF, de Rossi F, Fistola R, Sasso M, Vanoli GP. Analysis and diagnosis of the energy performance of buildings and districts: Methodology, validation and development of Urban Energy Maps. *Cities* 2013; 35: 270-283.
 14. Fabbri K, Zuppiroli M, Ambrogio K. Heritage buildings and energy performance: Mapping with GIS tools. *Energy and Buildings* 2012; 48: 137-145.
 15. Mattinen MK, Heljo J, Vihola J, Kurvinen A, Lehtoranta S, Nissinen A. Modeling and visualization of residential sector energy consumption and greenhouse gas emissions. *Journal of Cleaner Production* 2014; 81: 70-80.
 16. Howard B, Parshall J, Thompson J. Spatial distribution of urban building energy consumption by end use. *Energy and Buildings* 2012; 45: 141-151.
 17. AA.VV., TAPE Torino Action Plan for Energy. (2012). Website: <http://www.comune.torino.it/ambiente/bm~doc/tape-3.pdf>. Accessed: May 2016.
 18. Mutani G, Pairona M. A model to evaluate the heating energy consumption for residential buildings in Turin. *L'Ufficio Tecnico* 2014. Ed. Maggioli, Italy, 21-36, ISSN 0394-8293 (in Italian).
 19. Gargiulo G. L., Minucci F., Mutani G. Analisi energetica e le ricadute sulla pianificazione urbanistica, *LA TERMOTECNICA*, vol. 2, 2009, pp. 57-61.
 20. Mutani G, Vicentini G. Analisi del fabbisogno di energia termica degli edifici con software geografico libero. Il caso studio di Torino", G. Mutani, G. Vicentini, *LA TERMOTECNICA*, vol. 6, 2013, pp. 63-67.
 21. Mutani G, Vicentini G. Evaluating the potential of roof-integrated photovoltaic technologies using an open geographic information system, 8th Energy Forum on Advanced Building Skins, 2013; 87-92.
 22. Mutani G, Vicentini G. Buildings' energy consumption, energy savings and the availability of renewable energy sources in urban contexts: the potential of GIS tools, *Journal of Civil Engineering and Architecture Research* 2015; Vol 2, N 11; 1102-1115.
 23. Municipality of Torino, Geoportale website: <http://www.comune.torino.it/geoportale/>. Accessed: May 2016.
 24. Piedmont Region, Geoportale website: <http://www.geoportale.piemonte.it/geocatalogorp/?sezione=catalogo>. Accessed: May 2016.
 25. ISTAT. (2015). ISTAT website homepage: <http://www.istat.it>. Accessed: May 2016.
 26. Delmastro C, Mutani G, Corgnati SP, A supporting method for selecting long-term energy retrofit policies for residential buildings at the urban scale, *Energy Policy* 99, 42-56.
 27. UNI TS 11300. Energy performance of buildings. Part 1: Evaluation of energy need for space heating and cooling. Part 2: Evaluation of primary energy need and of system efficiencies for space heating, domestic hot water, ventilation and lighting for non-residential buildings. UNI, Ente Italiano di Normazione, 2014.
 28. Fracastoro GV, Serraino M. Statistical analysis of the energy performances of the building stock in the Turin Province (2009). http://www.provincia.torino.gov.it/ambiente/file-storage/download/energia/pdf/sesto_rapporto/fracastoro.pdf Accessed: May 2016.
 29. Delmastro C., Mutani G., Pastorelli M., Vicentini G. Urban morphology and energy consumption in Italian residential buildings, 4th International Conference on Renewable Energy Research and Applications ICRERA-2015, IEEE Conference Publications, pp: 1603-1608, DOI: 10.1109/ICRERA.2015.7418677.
 30. Mutani G., Gamba A., Maio S. Space heating energy consumption and urban form. The case study of residential buildings in Turin (Italy), 11th Conference on Sustainable of Energy, Water and Environmental Systems, SDEWES2016.0441, 1-17, Lisbon, September 2016, ISSN 1847-7178.