

Franco Guzzetti, <https://orcid.org/0000-0001-6835-3337>

Francesca Biolo, <https://orcid.org/0000-0003-4327-8435>

Dipartimento di Architettura, Ingegneria della Costruzioni e Ambiente Costruito, Politecnico di Milano, Italia

[franco.guzzetti@polimi.it](mailto:franco.guzzetti@polimi.it)

[francesca.biolo@polimi.it](mailto:francesca.biolo@polimi.it)

**Abstract.** La ricerca tratta di un sistema di monitoraggio delle dinamiche di consumo residenziali dei centri urbani sulla base dei dati già a disposizione degli enti locali (piattaforma Siatel – Sistema d'interscambio anagrafe tributarie enti locali). La creazione del Building Information System (BIS) mette a disposizione dell'ente locale uno strumento che informa in modo consapevole e critico sull'andamento energetico della città nel suo insieme. Monitorando negli anni il consumo cittadino di gas metano ed energia elettrica il BIS quantifica gli effetti di tutti gli interventi edilizi sugli involucri degli edifici, tenendo conto sia dell'influenza delle condizioni ambientali (gradi giorno) sia del reale comportamento energetico dei residenti.

**Parole chiave:** Consumi energetici; Gradi giorno; Monitoraggio; Building Information System; Riqualificazione edilizia.

## Introduzione

Il lavoro proposto propone uno strumento di supporto per il monitoraggio delle dinamiche energetiche dei nuclei urbani residenziali. Prende origine dalla ricerca svolta per Cogeser s.p.a. nell'ambito di un Contratto di Ricerca del Dipartimento ABC del Politecnico di Milano. Obiettivo di tale ricerca era quello di predisporre un cruscotto di lavoro per l'analisi energetica urbana di una città, che potesse arrivare ad una stima delle potenzialità di riqualificazione energetica dei singoli edifici in modo da approfondire poi, tramite una più accurata modellazione BIM (Building Information Modelling) degli stessi, gli interventi possibili e predisporre piani edilizi sostenibili di intervento.

In tale ricerca si è analizzato il comportamento energetico degli edifici della città scelta come caso studio in termini di consumi energetici (Nouvel *et al.*, 2014, Caputo and Pasetti, 2015), geolocalizzando i consumi energetici e mettendoli in rapporto con altri indicatori del comportamento degli edifici e dei loro abi-

tanti. Il risultato permette di attivare un puntuale monitoraggio dell'andamento energetico cittadino rispetto ai parametri ambientali stagionali.

Lo strumento è destinato in primo luogo agli enti locali. Lavorando su dati esistenti e disponibili per le città non richiede investimenti per recuperare ulteriori informazioni e supporta i decisori nella transizione energetica (Dall'O' *et al.*, 2013), in particolare nella riqualificazione degli edifici (Caputo, Costa and Ferrari, 2013) e nella lotta agli effetti del cambiamento climatico (isole di calore). Per le ESCo (Energy Service Company), il BIS permette di individuare gli ambiti ove gli interventi di riqualificazione possono massimizzare gli effetti sulla riduzione dei consumi energetici e della produzione di CO<sub>2</sub>.

Il BIS si pone come importante elemento sintetico di monitoraggio del comportamento energetico della città nel suo insieme (Agugiario *et al.*, 2018), con la possibilità di approfondire particolari ambiti urbani.

## La geolocalizzazione dei consumi energetici degli edifici

L'elemento chiave che permette il funzionamento del BIS sta nella geolocalizzazione dei consumi energetici, cioè nell'associare ad ogni edificio una serie di informazioni, in particolare il consumo annuo di gas metano e di energia elettrica.

La geolocalizzazione dei consumi energetici si è basata sulle seguenti banche dati esistenti e disponibili (Pasquinelli *et al.*, 2019), relativi a un comune lombardo di poco più di 18000 abitanti:

- il database topografico comunale (DBT) quale riferimento geografico (CISIS, 2015);

## Introduction

This paper proposes a support tool to monitor the energy dynamics of residential urban nuclei. It originates from the research carried out for Cogeser s.p.a. under a Research Contract of the ABC Department of the Politecnico di Milano. The research aimed to prepare a working dashboard for the urban energy analysis of a city, which could estimate the energy redevelopment potential of individual buildings. All this had to lead to deepening, through more accurate BIM (Building Information Modelling) modelling, the possible interventions and to preparing sustainable building plans.

This research analysed the energy behaviour of buildings in the city chosen as a case study in terms of energy consumption (Nouvel *et al.*, 2014, Caputo and Pasetti, 2015), geo-localising energy consumption related to other indi-

cators of the performance of buildings and their inhabitants' habits. The result makes it possible to activate timely monitoring of the city's energy trend with respect to seasonal environmental parameters.

The tool is primarily intended for local authorities. By working on existing and available data for cities, it does not require investments to retrieve additional information and supports decision-makers in the energy transition (Dall'O' *et al.*, 2013), particularly in upgrading buildings (Caputo, Costa and Ferrari, 2013) and combatting the effects of climate change (heat islands). For ESCo (Energy Service Company), BIS allows them to identify the areas where redevelopment interventions can maximise the effects of reducing energy consumption and CO<sub>2</sub> production. BIS is an important synthetic element for monitoring the energy behaviour

BIS to optimise consumption monitoring and redevelopment interventions

**Abstract.** The research deals with a monitoring system for the residential consumption dynamics of urban centres, based on data already available to local authorities (Siatel platform – Sistema d'interscambio anagrafe tributarie enti locali). The creation of the Building Information System (BIS) provides the local body with a tool that provides informed and critical particulars about the energy trend of the city as a whole. By monitoring the city's consumption of methane gas and electricity over the years, BIS quantifies the effects of all interventions on building envelopes, taking into account both the influence of environmental conditions (degree days) and the actual energy behaviour of residents.

**Keywords:** Energy consumption; Degree days; Monitoring; Building Information System; Building redevelopment.

- le mappe catastali aggiornate scaricabili dall'apposito servizio dell'Agenzia delle Entrate;
- i civici georiferiti del comune;
- il dato anagrafico per conoscere la posizione geografica di tutti i residenti (ISTAT, 2014).

Occorre approfondire alcune caratteristiche di tali banche dati. Il DBT negli ambiti urbani è alla scala 1:2000, adeguato a un collegamento corretto con il dato catastale. Attualmente tutti gli ambiti urbanizzati d'Italia sono dotati di un DBT adeguato agli scopi del presente lavoro; normalmente il DBT ha aggiornamenti correlati alle varianti generali alla pianificazione urbana. La struttura dati DBT risponde a pieno agli standard INSPIRE relativi all'informazione geografica.

Le mappe catastali sono una delle informazioni geografiche che a livello nazionale possiedono strutturalmente le regole per essere aggiornate nel giro di poche settimane dall'avvenuta trasformazione edilizia. Il dato catastale permette il collegamento al possessore del bene, fondamentale per ogni avvio di procedimento edilizio, compresa l'eventuale riqualificazione energetica.

I civici georiferiti sono l'elemento chiave per il collegamento con i residenti che con il loro modo di vita determinano in parte il consumo energetico all'interno di ogni edificio. Si ritiene fondamentale un attento lavoro preliminare per georiferire i civici in stretto rapporto con i dati dei residenti (anagrafe comunale) e delle attività commerciali, andando a risolvere le classiche incongruenze fra tali banche dati. I potenti strumenti di Geocoding non forniscono risultati sufficientemente robusti per un completo collegamento con le banche dati anagrafiche (Guzzetti *et al.*, 2014).

of the city as a whole (Agugiaro *et al.*, 2018), with the possibility of delving into particular urban areas.

#### Geolocalisation of a building's energy consumption

The key element that allows operation of the BIS lies in the geolocalisation of energy consumption. It consists in associating each building with a series of information, particularly the annual consumption of methane gas and electricity.

Geolocalisation of energy consumption was based on the following existing and available databases (Pasquinelletti *et al.*, 2019) relating to a Lombard municipality of just over 18,000 inhabitants:

- the municipal topographic database (DBT) as a geographical reference (CISIS, 2015);
- updated cadastral maps download-

able from the specific service of the Italian Revenue Agency;

- the georeferenced civic numbers of the municipality;
- the registry data, to know the geographical position of all residents (ISTAT, 2014).

It is necessary to study their characteristics.

The DBT, in urban areas, has a scale of 1:2000, which is adequate for proper connection with cadastral data. Currently, all Italian urbanised areas have a DBT, which is adequate for this work's purpose. The DBT usually has updates related to general variants of urban planning. The DBT data structure fully meets INSPIRE standards relating to geographic information.

Cadastral maps are geographic information that, on a national level, structurally possess the rules to be updated within a few weeks of a build-

Utilizzando l'applicativo UrbanSpaces di R3-Gis (Guzzetti *et al.*, 2011) sono state create le pertinenze urbanistiche secondo la loro definizione: è lo spazio all'interno del quale un privato possessore può esercitare tutti i diritti di possesso sui suoi beni immobili. Si tratta di un processo semiautomatico, quindi dispendioso in termini di tempo lavoro, che però risulta estremamente utile per molte attività proprie delle amministrazioni comunali, prima fra tutte la redazione di varianti ai PRG coerenti con un po' tutti gli aspetti coinvolti in tali processi. Una pertinenza risulta alla fine essere l'insieme di una o più particelle catastali con all'interno uno o più edifici del DBT (fabbricati per il catasto) collegati a uno o più accessi esterni (con o senza numero civico), posizionati su una o più vie. Grandi città (ad esempio Milano) utilizzano le pertinenze per numerosi servizi, avendole integrate al proprio GIS (Geographic Information System). Anche per città molto più grandi di quella utilizzata come test, la creazione delle pertinenze è da considerare uno degli strati informativi più importanti; le pertinenze sono previste a livello nazionale anche fra gli strati del DBT.

I consumi energetici disponibili nelle banche dati Siatel sono stati collegati in ambiente ArcGIS alle pertinenze. Disponibili per ogni comune italiano e per ogni anno di fornitura, essi sono relativi ai consumi di gas metano e di energia elettrica (di recente anche di acqua potabile) di ciascun utente. Sono riferiti al POD (Point of Delivery) e al PdR (Punto di Riconsegna), veri e propri indirizzi corrispondenti all'attacco della rete di distribuzione con la singola utenza. POD e PdR non cambiano nel tempo, mentre può cambiare il tipo di contatore, l'utente che utilizza l'appartamento, il fornitore di energia. Una volta quindi

ing's transformation. Cadastral data allow to connect with the asset's owner, which is essential to initiate any building process, including any energy upgrading.

Georeferenced house numbers are the key element for linking with residents, whose way of life partly determines the energy consumption within each building. Careful preliminary work is essential to georeference the house numbers and relate them to the data of residents (municipal registry) and businesses. It makes it possible to fix classic inconsistencies between these databases. Powerful Geocoding tools do not provide sufficiently robust results for complete linkage with master databases (Guzzetti *et al.*, 2014).

Using the UrbanSpaces application of R3-Gis (Guzzetti *et al.*, 2011), the urban appurtenances were created according to their definition. An ap-

purtenance is the space within which a private owner can exercise all tenure rights on his real estate. It is a semi-automatic process; therefore, it is time-consuming in terms of labour. Elsewhere it is extremely useful for many activities typical of municipal administrations, the first being the possibility of drafting variants to PRGs, consistent with almost all aspects involved in such processes. An appurtenance is the set of one or more cadastral parcels with one or more DBT buildings (buildings for the cadastre) connected to one or more external accesses (with or without house number), positioned on one or more streets. Large cities (e.g. Milan) use appurtenances for several services, having them integrated into their GIS (Geographic Information System). Even for cities much larger than the one used as a test, the creation of appurtenances must be

collegati tutti i POD e i PdR corrispondenti alle connessioni di tutti gli appartamenti che fanno parte degli edifici di una pertinenza, è possibile conoscere il consumo di energia elettrica e di gas metano per ciascuna pertinenza in ognuno degli anni di fornitura. Nell'esempio descritto si è lavorato con i dati di consumo reale dal 2012 al 2018.

La geolocalizzazione dei consumi va eseguita in modo manuale per il primo anno, anche per risolvere le incongruenze del dato Siatel usando le informazioni ad esso collegate, sino ad assegnare tutti i POD e i PdR. Per gli altri anni, sfruttando come chiave di collegamento il POD/PdR, il 90% circa dei consumi si collega in modo automatico. Occorre ricordare che in una città di circa 18000 abitanti sono circa 10000 i PdR e 12000 i POD; si parla quindi di grandi numeri di utenze.

L'esito di questa prima parte di lavoro porta a visualizzazioni interessanti: i consumi per ogni pertinenza possono essere rappresentati in valore assoluto ( $m^3$  di gas e kWh di energia elettrica) (Fig. 1), ma anche in consumi pro-capite (Fig. 2) sfruttando il collegamento con i residenti. Si possono estrarre i consumi al  $m^3$  di edificio o al  $m^2$  di superficie lorda di pavimento, utilizzando i dati volumetrici degli edifici ricavati dal catasto e dal DBT.

Questi dati di consumo dipendono dalle caratteristiche energetiche degli edifici, dal comportamento dei residenti (dal numero di ore di utilizzo dell'appartamento e dal comfort climatico mantenuto nel singolo appartamento) e dalle condizioni climatiche. A partire da questa considerazione è stata svolta la specializzazione di seguito descritta per valutare l'interazione fra consumi e condizioni ambientali di tutta la città.

considered one of the most important information layers. Appurtenances are also provided nationally among the DBT layers.

Energy consumption, available in the Siatel databases, has been connected in the ArcGIS environment to the appurtenances. They are for each Italian municipality and each year of supply, and they relate to the consumption of methane gas and electricity (recently also to drinking water) of each user. They refer to the POD (Point of Delivery) and the PdR (Point of Delivery). They are actual addresses corresponding to the specific junction of the distribution system with the single user. POD and PdR do not change over time, while the type of meter, apartment user, and energy supplier may change. Therefore, once all the PODs and RDPs, corresponding to the connections of all the apartments that are

part of the buildings of an appurtenance, are associated, it is possible to know the electricity and methane gas consumption for each appurtenance in each of the years of supply. The example described presents activities concerning consumption data from 2012 to 2018.

Geolocalisation of consumption must be carried out manually for the first year. Moreover, it is used to solve inconsistencies in the Siatel data using the information linked to it until all the POD and PdR are assigned. For the other years, using the POD/PdR as a key, about 90% of the consumption is connected automatically. It must be said that in a city of about 18,000 inhabitants, there are about 10,000 PdR and 12,000 POD. Therefore, we are talking about large numbers of utilities.

The outcome of this first part of the

## Misura dell'effetto climatico sui consumi di gas metano

Nella città analizzata i consumi domestici sono circa il 70% dei consumi cittadini di gas metano. A seguito della geolocalizzazione, sfruttando le pertinenze, si sono presi in considerazione i soli consumi di gas metano degli edifici residenziali.

Il consumo totale di gas metano delle abitazioni all'interno della città deriva dal riscaldamento invernale ma anche dall'utilizzo prettamente domestico (acqua calda e punti cottura). L'interazione fra i consumi di gas e la componente climatica deve tener conto dei soli consumi relativi al riscaldamento. Si è quindi optato per la correzione dei consumi di ciascun edificio sulla base di un fattore standard ad abitante, noto in letteratura e impiegato per tali stime, e del numero di residenti derivante dal collegamento con l'anagrafe. Sono stati tolti 800 kWh anno per ciascuno dei 18300 abitanti, corrispondenti a poco più di  $73 m^3$  di gas/anno per persona. Ciò corrisponde a eliminare dal totale del consumo cittadino  $1338208 m^3$  di gas per anno. Dopo questa correzione all'interno di ciascuna pertinenza del BIS è determinabile il consumo di gas per il solo riscaldamento.

I dati climatici derivano dal progetto ClimaMi. La centralina meteorologica si trova al centro della città analizzata e fa parte della rete di stazioni della FOMM (Fondazione Osservatorio Meteorologico Milano Duomo). I gradi giorno corrispondono alla sommatoria, estesa a tutti i giorni di un anno, della differenza fra i  $20^\circ C$  (temperatura di riferimento invernale) e la temperatura media esterna giornaliera. I dati forniti per ciascun mese sono stati cumulati per ogni anno.

Il legame esistente fra gradi giorno e  $m^3$  di gas consumati è evidente (Fig. 3). Approfondendo il rapporto fra il consumo in  $m^3$

work leads to interesting visualisations: consumption for each appurtenance can be represented in absolute value ( $m^3$  of gas and kWh of electricity) (Fig. 1), but also in per capita consumption (Fig. 2) by exploiting the link with inhabitants. It is possible to extract the consumption per  $m^3$  of building or  $m^2$  of gross floor area by using the volumetric data of the buildings obtained from the cadastre and the DBT.

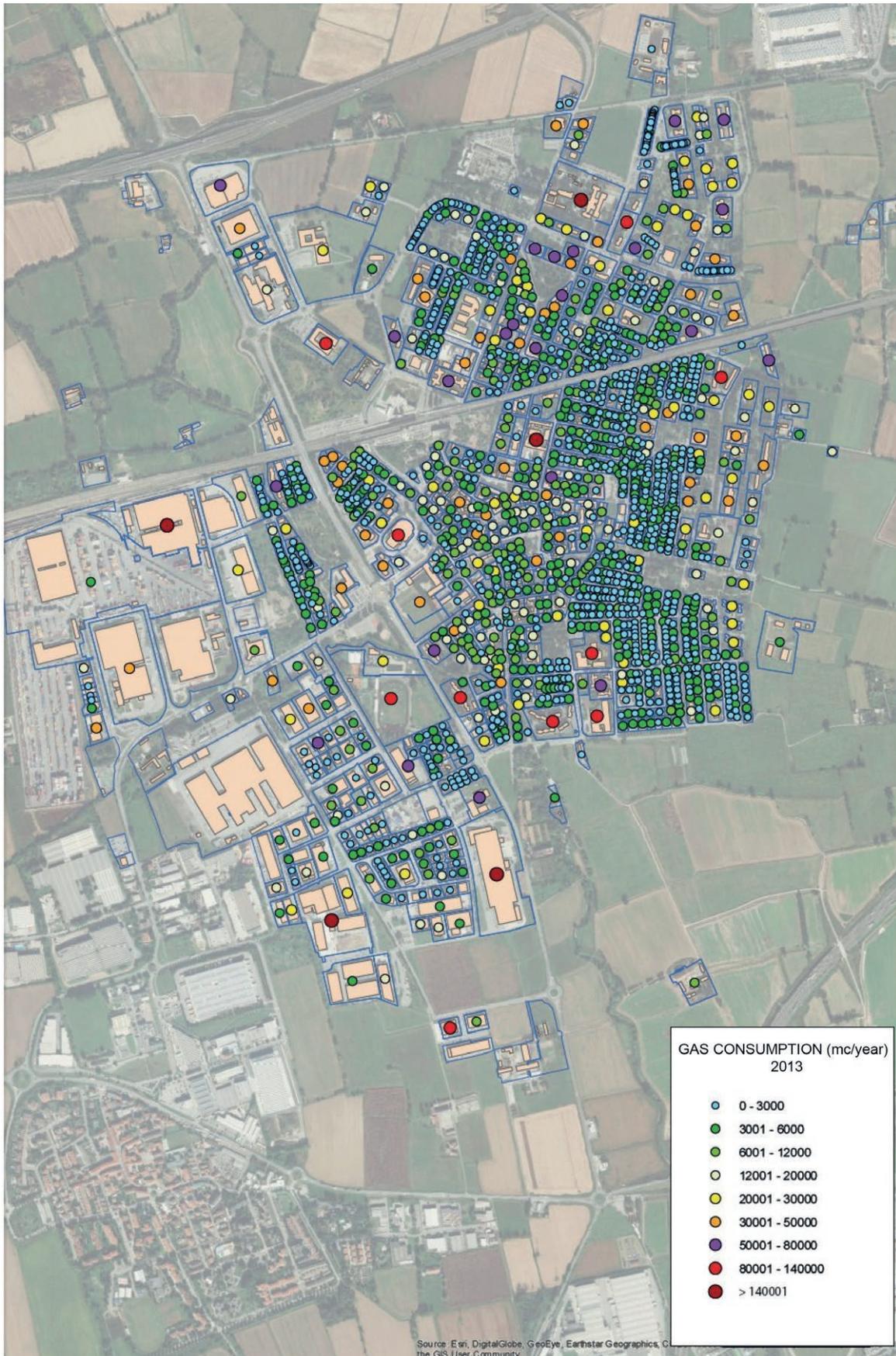
These consumption data depend on the energy features of buildings, the occupants' behaviour (the number of hours of apartment use and the climatic comfort maintained in the individual unit), and the climate conditions. Starting from this consideration, the in-depth study described below was carried out to assess the interaction between consumption and environmental conditions throughout the city.

## Measurement of climatic effect on methane gas consumption

In the analysed city, household consumption is about 70% of the city's methane gas consumption. As a result of geolocalisation, taking advantage of appurtenances, only the methane gas consumption of residential buildings was considered.

The total methane gas consumption of dwellings within the city derives from winter heating and purely domestic use (hot water and stoves). The interaction between gas consumption and the climatic component must examine only heating-related usage. Therefore, it was deemed necessary to correct the value of each building based on a precise standard factor per inhabitant, known in the literature and used for these estimates, and the number of residents deriving from the connection with the civil registry. 800 kWh

01 |





Tab. 01 | Indicazione annuale dei consumi di gas metano (totali e per il solo riscaldamento) e le correlazioni con i gradi giorno  
Annual indication of methane gas consumption (total and for heating only) and correlations with degree days

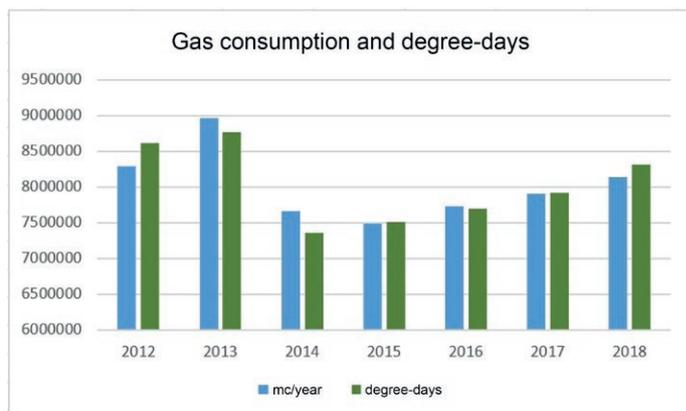
Tab. 02 | Confronto dei dati annui di consumo e gradi giorno (e relativi rapporti) di sei pertinenze tra il 2013 e 2019  
Comparison of annual consumption and degree days data (and related reports) of six apparturances between 2013 and 2019

per il solo riscaldamento e i gradi giorno, per ogni anno di studio (Tab. 1) si ottiene il valore medio di quanti m<sup>3</sup> corrispondono a ogni grado giorno. Stimando media e varianza dei valori di m<sup>3</sup>/grado (ultima colonna) si ottiene un valore molto stabile: (3702 ± 97) m<sup>3</sup>/°C. Nonostante il livello basilare della correlazione ricercata, il basso valore di sqm indica una popolazione molto concentrata sul valore medio che risulta quindi estremamente attendibile.

Il dato è significativo: con lo stato attuale degli edifici (al 2018, prima degli importanti e massivi interventi per il contenimento energetico avviati a seguito dei contributi statali) e con i comportamenti in atto nella città (sia il confort che ognuno vuol tenere all'interno del suo appartamento, sia le ore di uso e di riscaldamento di ogni utente in funzione del tipo di vita) (Strzalka, Bogdahn and Eicker, 2010), la città consuma 3702 m<sup>3</sup> di gas metano per ogni grado giorno.

Dopo una estesa e profonda riqualificazione energetica degli edifici il valore di consumo per grado giorno dovrebbe risultare più basso. Lo stesso risultato si dovrebbe ottenere migliorando la sensibilità sull'uso accorto del riscaldamento domestico. È quindi un indice di performance oggettivo sull'effetto degli interventi edilizi per migliorarne il rendimento energetico (Dall'O' et al., 2012). Proporzionale è la riduzione di produzione di CO<sub>2</sub> in ambito urbano dove maggiori sono gli effetti negativi della combustione.

Il dato è teoricamente confrontabile fra differenti città, nel caso adottino la stessa procedura di monitoraggio; quelle con edifi-



Year	mc gas total	mc gas heating	Degree - days	mc/degree
2012	9628523	8290315	2330	3558
2013	10298345	8960137	2371	3778
2014	9003722	7665514	1989	3855
2015	8831874	7493666	2032	3688
2016	9068617	7730409	2079	3718
2017	9241311	7903103	2140	3694
2018	9478570	8140362	2246	3624

ci di qualità energetica superiore dovrebbero risultare con una dipendenza dai gradi giorno inferiore rispetto a città con edifici meno performanti.

L'analisi sopra descritta è stata poi dettagliata a un limitato campione di pertinenze, sempre sfruttando la geolocalizzazione dei consumi (Tab. 2). Nel dettaglio del singolo edificio (o di più edifici della stessa pertinenza) entrano in gioco tutti i fattori che differenziano un edificio dall'altro. La tabella mostra come esempio sei differenti pertinenze urbane; per ognuna di esse è riportato il numero di residenti, il consumo annuo e il consumo

Tab. 02 |

Year	Degree days	Pert 928 Inhabitants 30			Pert 263 Inhabit. 50			Pert 388 Inhabit. 180		
		mc	mc heating	mc/°	mc	mc heat.	mc/°	mc	mc heat.	mc/°
2013	2371	13210	11016	4,65	24621	20965	8,84	80533	67370	28,41
2014	1989	11541	9347	4,70	22228	18572	9,34	71902	58739	29,53
2015	2032	11866	9672	4,76	24665	21009	10,34	76507	63344	31,17
2016	2079	12120	9926	4,77	27079	23423	11,27	79049	65886	31,69
2017	2140	11046	8852	4,14	27621	23965	11,20	78373	65210	30,47
2018	2246	11375	9181	4,09	28127	24471	10,90	84282	71119	31,66
			mean	4,52		mean	10,31		mean	30,49
			stan. dev.	0,29		sd	0,93		sd	1,19

Year	Degree days	Pert 397 Inhabit. 38			Pert 463 Inhabit. 43			Pert 967 Inhabit. 119		
		mc	mc heat.	mc/°	mc	mc heat.	mc/°	mc	mc heat.	mc/°
2013	2371	21636	18857	7,95	16935	13791	5,82	77712	69010	29,11
2014	1989	19655	16876	8,48	15115	11971	6,02	68354	65210	32,79
2015	2032	19824	17045	8,39	15920	12776	6,29	65189	62045	30,53
2016	2079	23536	20757	9,98	16752	13608	6,55	58056	54912	26,41
2017	2140	22799	20020	9,36	16820	13676	6,39	57240	54096	25,28
2018	2246	24256	21477	9,56	17244	14100	6,28	56224	53080	23,63
			mean	8,95		mean	6,22		mean	27,96
			sd	0,72		sd	0,24		sd	3,15

depurato al solo riscaldamento. Per ogni pertinenza urbana è calcolato il valore di consumo per grado giorno. Per i sei anni considerati viene determinato il valore medio e il relativo sqm. Come si può notare le prime cinque pertinenze urbane denotano consumi diversi (perché diversi sono la forma, il volume, il materiale, l'impianto, ecc.), ma lo sqm è relativamente piccolo rispetto al valore medio dei m<sup>3</sup> di gas per grado giorno. L'ultima pertinenza, dove nel 2016 è stata sostituita la vecchia caldaia, denota da quell'anno una dipendenza con i gradi giorno inferiore di circa il 20%, solo per effetto di tale intervento.

Il monitoraggio dei consumi reali permette di quantificare oggettivamente il risparmio in termini di m<sup>3</sup> di gas consumato all'anno e di CO<sub>2</sub> prodotta in loco. Il processo rende possibile la valutazione oggettiva dell'effetto degli interventi sugli edifici. Si potrebbe anche monitorare in modo oggettivo l'analogo effetto di un miglioramento comportamentale degli utilizzatori a seguito di una precisa azione educativa in tal senso. L'ultima tabella descritta mostra come la geolocalizzazione dei consumi consente di stimare altri parametri (consumo per m<sup>3</sup> di costruzione, per abitante, ecc.) che a loro volta permettono una profonda e dettagliata analisi del patrimonio edificato, sempre dal punto di vista energetico. Ciò può guidare azioni mirate per i processi di miglioramento delle caratteristiche energetiche degli edifici.

### La misura dell'effetto climatico sui consumi di energia elettrica

fraseare gli ambienti.

Si è considerato che il consumo elettrico annuale (tali sono i

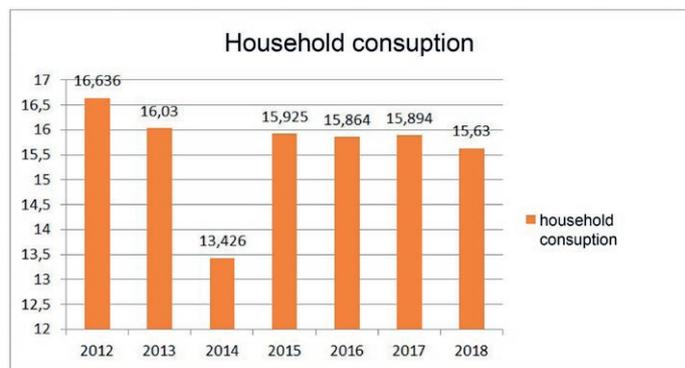
Procedimento equivalente è stato seguito per la valutazione di quanta energia elettrica venga consumata in estate per raf-

per year have been removed for each of the 18,300 dwellers, corresponding to slightly more than 73 m<sup>3</sup> of gas/year per person. It is equivalent to removing 1,338,208 m<sup>3</sup> of gas per year from the total city consumption. Gas consumption for heating purposes can be derived after this correction within each BIS appurtenance.

Climate data originate from the Climamì project. The meteorological station is located in the centre of the analysed city and is part of the FOMM (Fondazione Osservatorio Meteorologico Milano Duomo) network of stations. Degree days correspond to the total, extended to all days of a year, to the difference between 20°C (winter reference temperature) and the average daily outdoor temperature. The data provided for each month have been cumulated for all the years studied. The correlation between degree days

and m<sup>3</sup> of gas consumed is evident (Fig. 3). Deepening the relationship between m<sup>3</sup> consumption for heating only and degree days, the average value of how much m<sup>3</sup> corresponds to each degree day is obtained for each year (Tab. 1). Estimating the mean and variance of the m<sup>3</sup>/degree values (last column) yields a very stable number: (3702 ± 97) m<sup>3</sup>/°C. Despite the basic level of correlation sought, the low standard deviation score indicates a population highly concentrated on the average value, which is, therefore, extremely reliable.

The datum is significant: with the current state of the buildings (as of 2018, before the substantial and massive energy containment interventions initiated as a result of government grants) and with the present behaviours in the city (both the comfort that everyone wants to keep inside the apartments,



dati Siatel e quindi non è possibile estrapolare il dato dei soli mesi caldi) fosse di fatto suddiviso in una parte domestica (illuminazione, elettrodomestici vari, ecc.) che non dipende dalla temperatura estiva esterna e in una parte utilizzata per il raffrescamento degli ambienti. Si ipotizza di scarso rilievo il contributo delle pompe di calore azionate in inverno; in effetti al 2018 risultavano pochi casi di installazione, mentre ora si sono diffuse in maniera significativa.

Va anche premesso che nella città test i consumi domestici di energia elettrica (figura 4 con valori in GWh) sono mediamente pari a un quarto di quelli non domestici. Tali consumi sono confrontati con l'andamento dei gradi giorno estivi per ogni anno (Fig. 5), sempre forniti dalla FOMM e relativi alla centralina presente nella città, che tengono conto della differenza fra i 25° di riferimento e la temperatura esterna percepita, a sua volta funzione dell'umidità relativa e della temperatura dell'aria. Come si può notare la relazione fra consumi di energia elettrica e gradi giorno non è istintivamente evidente come appariva per il consumo di gas metano per il riscaldamento invernale perché nei consumi rimangono presenti i fattori domestici prima ricordati.

Il lavoro ha quindi richiesto un'analisi più raffinata ai minimi quadrati per scindere la stima del consumo domestico da quella per il raffrescamento correlata con i gradi giorno. Ipotizzan-

and the hours of use and heating of each user according to the type of lifestyle) (Strzalka, Bogdahn and Eicker, 2010), the city consumes 3702 m<sup>3</sup> of methane gas per degree day.

After extensive and deep energy requalification of buildings, the consumption value per degree day should be lower. The same result should appear by improving the sensitivity to the judicious use of home heating. It is thus an objective performance index on the effect of building interventions to improve energy performance (Dall'O' *et al.*, 2012). The reduction in CO<sub>2</sub> production in urban areas where the negative effects of combustion are greater is proportional.

The information is theoretically comparable between various cities, if they adopt the same monitoring procedure. Those with higher energy quality buildings should result in a lower de-

gree days dependency than cities with less-performing buildings.

The above analysis was then detailed to a limited sample of appurtenances, continuing to exploit the geolocalisation of consumption (Table 2). All factors that differentiate one building from another come into play in the single-building detail (or of several buildings of the same appurtenance). The table presents an example of six different urban appurtenances. The number of residents, the annual consumption and the consumption purified to heating only are shown for each of them. The consumption value per day degree is calculated for each urban appurtenance. For the six years considered, the work made it possible to extract the average value and the relative standard deviation. As you can see, the first five urban appurtenances denote differences in consumption (because

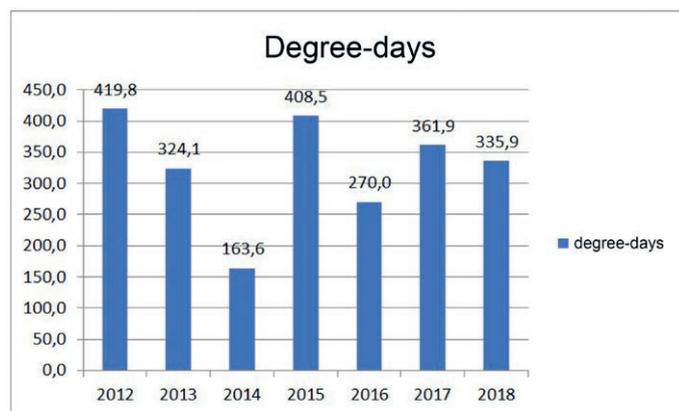
do che i consumi urbani di energia elettrica siano composti da una parte maggioritaria  $E_k$  che non dipende dalla temperatura estiva e da una parte  $E_p$ , invece in qualche modo proporzionale ai gradi giorno estivi, si può arrivare a scrivere una equazione del tipo:

$$E_k + GG * E_p = E_{Tot}$$

GG indica i gradi giorno estivi mentre  $E_{Tot}$  è l'energia elettrica totale consumata nell'anno, sono entrambi i dati del problema. Sui sette anni per i quali si hanno i dati, emerge un consumo fisso annuale, indipendente dalle temperature, pari a 11813,26 MWh. Una seconda parte è invece proporzionale ai gradi giorno pari a 11,06 MWh per ciascun grado giorno, che per l'intero anno vale 4040,26 MWh. La stima di tali risultati presenta un livello di attendibilità più basso rispetto a quello definito per il riscaldamento invernale. Il dato che emerge è in ogni caso interessante perché la quantità di energia elettrica consumata per il raffrescamento è pari al 25,5% del consumo totale annuo. Nei sette anni considerati si sono registrate giornate molto afose con sino a 11 gradi giorno: in tali giornate il consumo medio di energia elettrica che non dipende dai gradi giorno è pari a circa 32,36 MWh mentre la parte che serve a combattere il calore risulta pari a circa 121,76 MWh, cioè approssimativamente quattro volte tanto. Nelle giornate di caldo afoso i consumi di energia elettrica per il raffrescamento dei soli ambienti domestici è pari a circa quattro volte il normale consumo di energia elettrica. Questo dato fa capire come sia fondamentale anche nel periodo estivo avere edifici performanti rispetto al caldo e poter diminuire fenomeni locali di surriscaldamento urbano.

the shape, volume, materials, systems, etc. are different). Otherwise, the standard deviation is relatively small compared to the average value of  $m^3$  of gas per degree day. The last case, where in 2016 an old boiler was replaced, denotes a lower dependence with degree days by about 20% since that year, only due to that intervention. Monitoring consumption makes it possible to objectively quantify savings in terms of  $m^3$  of gas consumed per year and  $CO_2$  produced on site. The process makes it possible to objectively assess the buildings' redevelopment effects. It would also be possible to objectively monitor the similar outcome of improved user behaviour as a result of precise education on the issue. The last table shows how the geolocalisation of consumption allows to estimate other parameters (consumption per  $m^3$  of building, per inhabitant, etc.)

which, in turn, enables a deep and detailed analysis of the built heritage, always from the energy point of view. It can guide targeted actions for processes to improve the energy characteristics of buildings. Measurement of climatic effect on electricity consumption. The process operated an equivalent procedure for evaluating the amount of electricity consumed in summer to cool buildings. It was considered that the annual electricity consumption (such as the Siatel data and, therefore, it is not possible to extrapolate the information for the warm months only) was divided into a domestic part (lighting, various household appliances, etc.), which does not depend on the outdoor summer temperature, and a second one for indoor cooling. The contribution of heat pumps in winter is assumed to be of



Anche per i consumi di energia elettrica l'interazione dell'edificio con il clima è significativa; un miglioramento delle caratteristiche energetiche degli edifici può essere quantificato e monitorato nel tempo.

### Conclusioni

La realizzazione di un BIS con i dati Siatel (disponibili a tutti i Comuni d'Italia) se supportati dall'anagrafe georiferita, permette di costruire un vero e proprio sistema di monitoraggio dei consumi di energia elettrica, gas metano e acqua potabile. A livello cittadino, sfruttando anche la stabilità del dato negli anni, il BIS permette di valutare una serie di interessanti indicatori. Fra di essi vi è la stima dell'interazione esistente fra i consumi energetici (di gas metano e di energia elettrica) e i gradi giorno (invernali ed estivi). Tale relazione dipende strettamente dalle caratteristiche energetiche degli edifici e dal comportamento degli utilizzatori dell'immobile. La variazione di tali indicatori può misurare negli anni gli effetti degli interventi sulle caratteristiche energetiche degli edifici e delle azioni per aumentare la consapevolezza ambientale degli utilizzatori. L'effetto delle azioni possibili per ridurre le isole di calore (tetti verdi, ombreggiamenti e ventilazioni sulle parti esposte al sole, colori e materiali delle superfici pavimentate di

minor importance. In 2018 there were few cases of their installation, but now they have spread significantly. It is fundamental to the premise that household electricity consumption in this city (Figure 4 with values in GWh) averages one-fourth of the non-household one. These consumptions are compared with the trend of the summer degree days for each year (Fig. 5), again provided by FOMM and related to the station in the city. They consider the difference between the reference 25°C and the perceived outside temperature, which depends on the relative humidity and air temperature. As can be seen, the relationship between electricity consumption and degree days is not instinctively evident as it appeared for methane gas consumption for winter heating. It is because the household factors mentioned earlier remain present in consumption.

Therefore, the work required a more refined least-squares analysis to disentangle the estimate of domestic consumption from that for cooling correlated with degree days. Evaluations assumed urban electricity consumption composed of a majority  $E_k$  part that does not depend on summer temperature, and an  $E_p$  part that is, instead, somehow proportionate to summer degree days. With these components, it is possible to write an equation of this type:

$$E_k + GG * E_p = E_{Tot}$$

GG indicates the summer degree days while  $E_{Tot}$  is the total electricity consumed during the year. They are both problem data. Over the seven years for which data are available, a fixed annual consumption, independent of temperatures, of 11813.26 MWh emerges.

spazi pubblici e privati, forestazione urbana, ecc.) può essere misurato in modo puntuale sfruttando la geolocalizzazione dei consumi energetici implementata in un BIS.

Le analisi nel tempo sulle singole utenze all'interno del BIS permette di ovviare al rumore intrinseco ai dati Siatel dovuto al non rispetto da parte dei fornitori di energia delle indicazioni normative sulla compilazione dei dati da trasmettere alle amministrazioni locali. Più la banca dati dei consumi per singola pertinenza si arricchisce nel tempo, più è possibile individuare errori nei dati e compensarne l'effetto. Aspetti negativi: il dato è annuale e quindi non permette di approfondire le analisi al consumo mensile; i dati vengono resi disponibili solo alla fine dell'anno successivo a quello del consumo.

L'ormai completato passaggio ai contatori elettronici con la lettura da remoto potrebbe rendere possibile il trasferimento a sistemi simili al BIS di dati relativi unicamente alle giornate con gradi giorno estivi.

Il progressivo diffondersi delle pompe di calore sta progressivamente spostando il consumo energetico, anche per il riscaldamento, dal gas metano all'energia elettrica. Ciò ha un immediato risvolto ambientale positivo perché riduce gli effetti della combustione in ambito urbano. Questo fatto e l'imminente nascita delle comunità energetiche, con produzione, accumulo e consumo sul posto, rende ancora più interessante poter controllare la dinamica energetica a livello locale con un cruscotto di controllo dei consumi georiferiti nel tempo.

Analisi geolocalizzate sui consumi energetici possono anche avviare interessanti confronti fra differenti ambiti cittadini o di differenti città. Permettono di monitorare quelle città dove più velocemente gli interventi edilizi sugli edifici vanno a miglio-

The second part is proportionate to the degree days equal to 11.06 MWh for each degree day, which for the whole year is worth 4040.26 MWh. The estimation of these results has a lower level of reliability than the one defined for winter heating. The data that emerged is also interesting because the amount of electricity consumed for cooling is 25.5% of the total annual consumption. In the seven years considered, there were very muggy days with up to 11 degree days. On these days, the average consumption of electricity that does not depend on the degree days is equal to about 32.36 MWh. The amount used to combat the heat, on the other hand, is about 121.76 MWh, which is approximately four times as much. On hot muggy days, the electricity consumption for cooling of domestic spaces alone is about four times the typical electricity use.

This figure makes it clear that it is crucial even in the summer period for buildings to perform well in the heat, thus decreasing local overheating phenomena.

For electricity consumption, the interaction of the building with the climate is also significant. An improvement in the energy characteristics of buildings can be quantified and monitored over time.

#### Conclusions

The BIS implementation with Siatel data (available to all municipalities in Italy), if sustained by the georeferenced registry information, makes it possible to create an effective monitoring system for electricity, methane gas and drinking water consumption.

At city level, BIS allows the evaluation of a series of fascinating indicators, also taking advantage of the stabil-

ity of the data over the years. Among them, there is the estimation of the interaction between energy consumption (methane gas and electricity) and degree days (winter and summer). This relationship strictly depends on the energy characteristics of the buildings and on the behaviour of the users.

Analyses over time on individual utilities within the BIS enable to overcome the intrinsic noise in Siatel data. The latter is due to energy suppliers' non-compliance with regulatory guidance on compiling data to be transmitted to local administrations. The more the consumption database for each appurtenance grows over time, the more it is possible to detect errors in the data and compensate for their effect. Negative aspects: the information is annual and does not allow for in-depth analysis of monthly consumption. Data are made available only at the end of the year of consumption. The now completed transition to electronic meters with remote reading could make it possible to switch to BIS-like system data related only to days with summer degree days. The progressive spread of heat pumps is gradually shifting energy consumption, including for heating, from meth-

#### REFERENCES

- Agugiario, G., Benner, J., Cipriano, P. and Nouvel, R. (2018), "The Energy Application Domain Extension for CityGML: enhancing interoperability for urban energy simulation", *Open geospatial data, software and standard*, Vol 3:2. Available at: <https://doi.org/10.1186/s40965-018-0042-y> (Accessed on 30/01/2023).
- Caputo, P., Costa, G. and Ferrari, S. (2013), "A supporting method for defining energy strategies in the building sector at urban scale", *Energy Policy*, 55, pp.261–270. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.12.006> (Accessed on 25/01/2023).
- Caputo, P. and Pasetti, G. (2015), "Overcoming the inertia of building energy retrofit at municipal level: The Italian challenge", *Sustainable Cities and Society*, Vol.15, pp.120–134. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.01.001> (Accessed on 25/01/2023).
- Centro Interregionale per i Sistemi Informativi (CISIS) (2015), *Specifiche di contenuto per i DataBase Geotopografici*, versione 2.0 del 15/12/2015. Available at: [https://geodati.gov.it/geoportale/images/Specifica\\_GdL2\\_09-05-2016.pdf](https://geodati.gov.it/geoportale/images/Specifica_GdL2_09-05-2016.pdf) (Accessed on 20/12/2022).
- Dall'O, G., Norese, M.F., Galante, A. and Novello, C. (2013), "A multi-criteria methodology to support public administration decision making concerning sustainable energy action plans", *Energies*, Vol. 6, pp. 4308–4330. Available at: <https://doi.org/10.3390/en6084308> (Accessed on 07/02/2023).

Dall'O, G., Sarto, L., Galante, A. and Pasetti, G., (2012), "Comparison between predicted and actual energy performance for winter heating in high-performance residential buildings in the Lombardy region (Italy)", *Energy and Buildings*, Vol. 47, pp. 247-253. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.046> (Accessed on 07/02/2023).

Guzzetti, F., Pasquinelli, A., Privitera, A. and Ronconi, M. (2014), "Test metrico sulla ricerca automatica delle posizioni degli indirizzi", *Proceeding of the 18° Asita National Conference, Firenze, Italy, October 14-16, 2014*, pp. 667-674. Available at: <http://atti.asita.it/ASITA2014/Pdf/104.pdf> (Accessed 08/03/2023).

Guzzetti, F., Viskanic, P., Di Maria, F. and D'alesio, F. (2011), "Strumenti per l'integrazione fra database topografico e informazioni catastali", *Proceeding of the 15° ASITA National Conference, Parma, Italy, November 15-18, 2011*, pp. 821-829. Available at: <http://atti.asita.it/ASITA2011/Pdf/078.pdf> (Accessed on 30/01/2023).

ISTAT (2014), *Note di carattere generale relative alla compilazione dell'indirizzario*, 27 November 2014.

Nouvel, R., Zirak, M., Dastageeri, H., Coors, V. and Eicker, U. (2014), "Urban energy analysis based on 3D city model for national scale applications", *Proceeding of the 5th German-Austrian IBPSA Conference, Aachen, Germany, September 22-24, 2014*, pp.83-90. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/273651424\\_Urban\\_Energy\\_Analysis\\_based\\_on\\_3D\\_City\\_Model\\_for\\_National\\_Scale\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/273651424_Urban_Energy_Analysis_based_on_3D_City_Model_for_National_Scale_Applications) (Accessed on 14/02/2023).

Pasquinelli, A., Agugiaro, G., Tagliabue, L.C., Scaioni, M. and Guzzetti, F. (2019), "Exploiting the Potential of Integrated Public Building Data: Energy Performance Assessment of the Building Stock in a Case Study in Northern Italy", *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, Vol. 8(1):27. Available at: <https://doi.org/10.3390/ijgi8010027> (Accessed on 18/12/2022).

Strzalka, A., Bogdahn, J. and Eicker, U. (2010), "3D city modelling for urban scale heating energy demand forecasting", *Ashrea HVAC&R*, Vol. 17(4), pp. 526-539.

ane gas to electricity. It has an immediate positive environmental implication because it reduces the effects of combustion in urban areas. This fact and the imminent birth of energy communities, with on-site production, storage and consumption, makes it the achievable management of energy dynamics at the local level with a georeferenced consumption control dashboard over time even more attractive.

Geolocalised analysis of energy consumption can also initiate meaningful comparisons between different areas of the city or various cities. They make it possible to monitor those cities where building interventions most quickly improve the energy footprint on the surrounding environment.

Hence, it is expected that, thanks to the strong interaction that BIM and GIS environments are developing, the 3D city models supporting the Smart

City may soon enable them to support energy information, as experimentally implemented in the BIS described. Numerous databases (geographical and otherwise) should interact, and need to be reclaimed and properly powered.