

A model for the co-production of knowledge in energy-related decision-making processes.

Paola Marrone¹, Paolo Civiero¹, Roberto D'Autilia², Valerio Palma¹

¹ Department of Architecture, Università degli Studi Roma Tre, Italy

² Shazarch s.r.l., Italy

Primary Contact: Paola Marrone, paola.marrone@uniroma3.it

This article has been accepted for publication and undergone full peer review but has not been through the copyediting, typesetting, pagination and proofreading process, which may lead to differences between this version and the Version of Record.

Published: May 26, 2025
DOI: 10.36253/techne-17394

Abstract

The article presents a study developed within the innovation ecosystem of Rome Technopole, focusing on technology transfer in the field of Key Enabling Technologies. The research addresses energy and digital transition in urban regeneration, aiming to create a tool for the co-production of knowledge to support planning for climate-neutral urban districts. The results validate the collected knowledge framework and the developed digital model through a case study applied to Rome's Ostiense district, highlighting the methodology's replicability, the scalability of the proposed tools, and their potential for future industrial applications and sustainable urban policymaking.

Keywords: urban digital twin; decision support system; positive energy district; climate-neutral cities; joint lab.

Please cite this article as: Marrone P., Civiero P., D'Autilia R., Palma V. (2025) A model for the co-production of knowledge in energy-related decision-making processes / Un modello per la coproduzione di conoscenze nei processi decisionali in ambito energetico *Techne. Journal of Technology for Architecture and Environment*, Just Accepted.

Introduction

Rome Technopole is one of the research and development projects known as an "Innovation Ecosystem," funded by Italy's PNRR (*Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza*, National Recovery and Resilience Plan). It brings together all universities and the productive system of the Lazio region

to establish a transdisciplinary innovation hub designed to integrate and transfer academic and scientific knowledge to address the needs of the regional industrial sector.

The research presented here is part of "Flagship Project 2," which focuses on the construction and management of building stock, emphasizing the need for new technologies to facilitate energy and digital transitions in sustainable urban regeneration and construction. Specifically, under Theme 1 "Energy Transition in Multi-scale Design" and Subtheme 1 "Production, Distribution, and Storage of Electricity from Renewable Sources," the research investigates and tests a tool optimized at the urban and building scales to support decision-making and assessment processes aimed at energy transition in urban regeneration scenarios through digital information management and urban digital modeling.

Aligned with the ethos of the innovation ecosystem, the research objectives and results are developed within a collaborative group comprising universities, research institutions – ENEA, CNR, INFN, ISS – and non-academic stakeholders such as local and national institutions, large corporations and multinationals, business associations affiliated with Confindustria, and innovative SMEs. The project aims to:

1. develop urban regeneration and mobility plans for Rome's Pietralata neighborhood, the site of the future Rome Technopole Foundation headquarters;
2. manage the existing building stock and its potential transformation according to the criteria of PEDs (Positive Energy Districts) and climate-neutrality was explored through a case study focusing on the urban area along Via Ostiense, between Valco San Paolo and the Testaccio district – referred to as the "Ostiense district" – with particular emphasis on the buildings of Roma Tre University;
3. drive technological innovation in the design of new buildings.

This research integrates foundational knowledge obtained from previous national and international projects¹, supporting the transition to applied research and a pre-competitive development phase, targeting an optimal TRL (Technology Readiness Level) of 5. Starting from a repertoire of EBE (Energy in Built Environment) solutions, defined as individual or combined interventions aimed at improving energy efficiency at the building scale, a selection of KPIs (Key Performance Indicators) was developed. These KPIs were integrated into CM (Calculation Models), forming a DSS (Decision Support System) capable of assisting various stakeholders, including public administrations and territorial entities, in defining and assessing energy refurbishment scenarios for buildings and urban spaces².

The paper describes the creation of a knowledge framework – a geospatial database and input framework – at the neighborhood scale and the development of a DT (Digital Twin) conceived as an urban model for collecting and processing data related to energy consumption, energy production from RES (Renewable Energy Sources) and electricity storage. The DT is the technological solution developed to translate acquired knowledge into an interoperable tool applicable across various national urban and building contexts. In this initial experimental phase, Rome's Ostiense district and Roma Tre University's buildings were selected as a case study to:

1. validate the applicability and replicability of the model within a mixed-use urban system analogous to Pietralata, where sufficient real data for simulations is not yet available;
2. develop the model as a management tool for property-owning entities, *e.g.* universities, to create scenarios for energy transition or refurbishment.

Background

Urban digital representation platforms, which are flexible and integrated with various data sources, are increasingly referred to as UDT (Urban Digital Twins), emphasizing their ability to mirror physical systems and support real-time, data-driven decision-making. The DT paradigm originated in production engineering, where it was developed to incorporate lifecycle assessment information into three-dimensional graphic representations (Grieves and Vickers, 2017). Today, this concept is being adopted by a growing number of urban administrations and corporate services for city management

(Kritzinger *et al.*, 2018). An UDT is a virtual replica of the city, featuring a bidirectional connection to real-world space. This connection requires a continuous data flow to document physical states and phenomena, as well as interfaces to guide decision-making processes and implement transformative actions. UDTs promise to assist with monitoring, simulation, and optimization of urban operations, supporting more informed decision-making through predictive analytics, scenario planning, and efficient resource management (Bolton *et al.*, 2018; Civiero *et al.*, 2021). Recent advancements in cloud computing and AI (Artificial Intelligence) significantly enhance these capabilities, especially in aggregating and correlating diverse data sources, identifying patterns, and developing predictive models, thereby improving urban management that integrates various data types (Bibri *et al.*, 2024; Wan *et al.*, 2019).

Objectives

The urban modeling tool was developed with the aim to:

1. collect and consolidate open territorial data from diverse sources;
2. process this information through customized algorithms and prepare it for sharing with other analytical environments, using interoperable formats.

The definition of the geospatial knowledge framework includes elements of geometric, thermal, energy-related, socioeconomic characterization, and building consistency.

The database underpinning the DT and its management environment have the following main features and functionalities:

1. schemas based on CityGML³ standards for geographic information exchange, including components designed to host data related to energy production and consumption;
2. interfaces and services for data integration, retrieval, and processing;
3. three-dimensional visualization tools, compatible both with collected data and the outcomes of transformation scenarios.

Methodology

The method adopted for developing urban modeling tools is founded upon the following actions and principles.

Definition of Model Characteristics

The level of detail of the model and a subset of relevant classes within the CityGML standard were defined. This step aligns the model's construction with project objectives and anticipated applications, establishing a shared methodological framework across different case studies. For detailed modeling of energy-related aspects at the urban scale, the modular nature of CityGML, which supports thematic extensions for specific domains, was leveraged (Agugiaro *et al.*, 2018).

Data Collection and Processing Based on Scalability

Data acquisition emphasized scalability, aiming to define techniques and tools replicable across other case studies and larger territorial scales, particularly within Italy. Data originated from various geospatial datasets, including open data and those provided by project partners.

Adoption of FOSS Software and Standards

Preference was given to FOSS (Free and Open-Source Software). Tools employed include the 3DCityDB software suite (Yao *et al.*, 2018) for CityGML-compliant storage, QGIS Geographic Information System software for geographic data analysis and preliminary processing, and Blender computer graphics software for detailed geometry refinement. Utilizing FOSS promotes robust, scalable, and interoperable solutions, ensuring long-term accessibility to a broad spectrum of stakeholders.

Development

For setting up the city model, we installed and tested a local instance of 3DCityDB, a software system comprising a database, a data exchange tool called Importer/Exporter, and an interactive visualization tool named 3D Web Map Client, based on the Cesium JS software. This system enables management and querying of CityGML-based models.

Data collection primarily focused on a set of information calibrated to perform energy assessments and simulations at the urban scale. The acquired data includes:

1. information on building envelopes: base elevation and geometric definition as sets of uniformly high volumes;
2. additional building information: number of floors, functional and typological classification;
3. information on open spaces: geometric definition of green areas, driveways, and other paved areas;
4. energy data: electricity and gas consumption, energy performance characteristics.

Geometric Modeling

Alongside the data collection phase, we carefully selected object classes and properties outlined by the CityGML standard, ensuring alignment with the standard (Fig. 1). For building modeling, the DBGT (*Database Geo-Topografico*, Geo-Topographic Database) from Regione Lazio (2014) served as the primary source, providing certified and consistent information on building footprints and heights. Information regarding building functions and typologies was extracted from the same source and automatically converted into a standardized taxonomy. During the mapping process, a LLM⁴ (Large Language Model) was employed to convert attributes such as "building typology" and "usage category" from the regional database into the "class" and "usage" values prescribed by the standard (Tab. 1).

The workflow (Fig. 2) included extracting the number of building floors from OSM (OpenStreetMap contributors, 2025) where available, and manually extracting detailed features processed in Blender based on the Google 3D Tiles web service. This allowed updates to certain buildings beyond what is recorded in the primary sources. This approach enables the definition of detailed elements such as windows, doors, and roofing specifics, further enhancing the precision required for energy modeling⁵, thereby supporting the effective application of existing EBE solutions in creating optimized energy scenarios.

Energy Modeling

Data from additional sources, such as local authorities and research partners, were utilized to obtain energy-related information, including consumption levels, building construction years, and approximate occupant numbers. The integration of this data into the model was facilitated by dedicated extensions designed for CityGML and 3DCityDB. Specifically, the Energy ADE (Application Domain Extension) for CityGML enables the inclusion of attributes such as energy consumption, types of energy used, installed systems, and thermal properties of buildings.

In an initial test, energy consumption data for a subset of buildings at Roma Tre University were processed using aggregated data by site or address. The visualization of this consumption data was then made accessible through interactive visualization tools.

Interoperability and visualization

To convert building footprint and height data into CityGML format, Python script prototypes were developed to enable automatic generation of 3D data compatible with 3DCityDB⁶. In addition to building data, information about green areas – currently not distinguished between public and private –, roadways, and other paved areas was processed using dedicated scripts (Fig. 3).

Interactive visualization of the urban model was achieved using the 3D Web Map Client software, allowing exploration of the database's geometric components overlaid with terrain models and

satellite imagery. The viewer prototype, customized specifically for this project, facilitates visualization of selected datasets extracted from the comprehensive CityGML model (Fig. 4). Furthermore, it allows the integration of 3D data with related tabular data that can be updated in real-time – in our case, via the Google Sheets web service. This setup enables dynamic calculation and immediate visualization of results, such as those from energy simulations, directly within the web map interface. The prototype also incorporates conditional coloring tools, enabling buildings to be visually differentiated based on selected data values (Fig. 5).

Results Achieved

The research project developed a geospatial database and data management tools to easily visualize different scenarios for energy refurbishment and the integration of systems for the production, distribution, and storage of electricity from RES. By leveraging the set of EBE solutions, it becomes possible to co-produce and co-design policy guidelines and potential strategies, assessing their impact on various KPIs.

In detail, the results related to the database and data management tools include:

- development of a database for creating models compatible with urban energy analysis;
- integration of data into a web-based viewer;
- development of a replicable and scalable workflow.

Although several UBE (Urban Building Energy Modeling) platforms already exist (Ferrando et al., 2024), the proposed UDT specifically focuses on PEDs. It integrates the CityGML standard to represent existing conditions, facilitate energy simulations, and provide decision support tools. The approach, built upon the group's previous experiences, aims to contribute practically to energy design targeting climate neutrality and to support territorial energy planning⁷.

Limitations and Future Developments

During the research, issues arose regarding data availability and quality, such as incomplete or outdated geometries, necessitating manual refinement interventions. Further improvements will depend on the capability to manage a greater quantity and variety of energy data, optimizing interoperability with simulation algorithms and software, as well as standardizing the representation of energy consumption, production, and other energy-related indicators.

In the future, efforts will focus on enhancing system interoperability with energy simulation software, simplifying and generalizing data import and export processes to improve the method's replicability in other case studies. Additionally, interactive features of the viewer will be strengthened by expanding metadata access, integrating real-time simulations, and providing users with more analysis and customization options.

Conclusions and Impacts

The results achieved thus far by the project provide a solid foundation for future industrial development of the tested methodologies and tools, extending beyond the Lazio region.

Aligned with project goals, the proposed tool can significantly streamline decision-making processes for public administrations and private stakeholders, fostering increased environmental and social sustainability awareness. This approach can further enhance the quality of life for citizens-beneficiaries by offering effective tools for assessing project impacts, including initial costs and investment payback periods, guided by principles of economic, environmental, and social sustainability.

Anticipated economic benefits primarily stem from improved management of large-scale refurbishment initiatives, effective participatory processes, and heightened environmental awareness among participating citizens.

As demonstrated by the PED approach, supported by numerous funding initiatives and experiences at the European level, the study proposed within the Rome Technopole framework also aims to generate significant impacts by:

- supporting the development of business models linked to urban regeneration processes;
- evaluating the impacts and replicability of retrofit solutions tested in case studies;
- establishing an integrated supply chain among diverse economic and institutional actors – public administrations, universities, research bodies, companies, and third parties;
- promoting the establishment of new enterprises specializing in digitalization and modeling.
- developing new professional roles – capacity building – such as community managers or energy managers, aimed at enhancing the effectiveness of implemented measures and mitigating long-term community conflicts.
- acquiring distinctive regional competencies beneficial for stimulating sustainable innovation processes;
- increasing the ability to attract further public and private investments and funding.

Notes

¹ "TECHSTART-key enabling TECHNOlogies and Smart environment in the Age of gReen economy. Convergent innovations in the open space/building system for climaTe mitigation" PRIN 2017; "MakingPEDs - Decision-Making Digital Twins for Climate Neutral PEDs"; "POSIEDON - Project POSitive Energy Initiatives in Districts fOr Neutral Mediterranean cities", DUT 2022; "WE Generate-Co-creating people-centric sustainable neighbourhoods through urban regeneration", HEU-CL5-22-D4-0-02.

² Derivables 2.2 "Solutions Toolkit for Climate Neutral PEDs" and 2.1 "Full harmonized inputs assessment framework" from the MakingPEDs project.

³ Specifically, we employed version 2.0 of the CityGML standard (Gröger et al., 2012).

⁴ Specifically, we used the "gpt-4" model by OpenAI (2023).

⁵ The Level of Detail (LoD) developed within the project is comparable to LoD 2 as specified in the CityGML standard – excluding details of inclined roofs – while the details achievable through Blender modeling correspond to LoD 3 (Biljecki, 2017).

⁶ Besides importing data from the Lazio DBGIT, to validate the robustness and replicability of the method, successful tests were conducted with regional and local datasets for the city of Cesena.

⁷ For instance, in developing tools such as SECAP (Sustainable Energy and Climate Action Plans) and Italian-specific PFTE (*Progettazione di Fattibilità Tecnico-Economica*, Technical and Economical Feasibility Project).

References

- Agugiaro, G., Benner, J., Cipriano, P. and Nouvel, R. (2018), "The Energy Application Domain Extension for CityGML: Enhancing Interoperability for Urban Energy Simulations", *Open geospatial data, softw. stand.*, Vol. 3, n. 1. Available at: <https://doi.org/10.1186/s40965-018-0042-y> (Accessed on 28/02/2025).
- Bibri, S.E., Huang, J., Jagatheesaperumal, S.K. and Krogstie, J. (2024), "The Synergistic Interplay of Artificial Intelligence and Digital Twin in Environmentally Planning Sustainable Smart Cities: A Comprehensive Systematic Review", *Environmental Science and Ecotechnology*, Vol. 20, p. 100433. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.es.2024.100433> (Accessed on 28/02/2025).
- Biljecki, F. (2017), *Level of detail in 3D city models*, TU Delft. Available at: <https://doi.org/10.4233/uuid:f12931b7-5113-47ef-bfd4-688aae3be248> (Accessed on 28/02/2025).
- Bolton, A., Butler, L., Dabson, I., Enzer, M., Evans, M., Fenemore, T., Harradence, F., Keaney, E., Kemp, A., Luck, A. et al. (2018), *Gemini Principles*, CDBB. Available at: <https://doi.org/10.17863/CAM.32260> (Accessed on 28/02/2025).

- Civiero, P., Pascual, J., Arcas Abella, J., Bilbao Figuero, A. and Salom, J. (2021), "PEDRERA. Positive Energy District Renovation Model for Large Scale Actions", *Energies*, Vol. 14, n. 10, p. 2833. Available at: <https://doi.org/10.3390/en14102833> (Accessed on 28/02/2025).
- Ferrando, M., Causone, F., Hong, T. and Chen, Y. (2024), "Urban Building Energy Modeling (UBEM) tools: A state-of-the-art review of bottom-up physics-based approaches". *Sustainable Cities and Society*, Vol. 62, p. 102408. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102408> (Accessed on 28/02/2025).
- Grieves, M. and Vickers, J. (2017), "Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems", in Kahlen, F.-J., Flumerfelt, S. and Alves A. (Eds.), *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, Springer, Cham, pp. 85-113. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4 (Accessed on 28/02/2025).
- Gröger, G., Kolbe, T.H., Nagel, C. and Häfele, K.H. (2012), *OGC city geography markup language (CityGML) encoding standard*. Available at: <https://www.ogc.org/publications/standard/citygml/> (Accessed on 28/02/2025).
- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J. and Sihn, W. (2018), "Digital Twin in Manufacturing: A Categorical Literature Review and Classification", *IFAC-PapersOnLine*, Vol 51, n. 11, pp. 1016-22. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474> (Accessed on 28/02/2025).
- OpenAI (2023), "Gpt-4 technical report", *arXiv preprint arXiv:2303.08774*. Available at: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.08774> (Accessed on 28/02/2025).
- OpenStreetMap contributors (2025), *Planet dump retrieved from https://planet.osm.org*. Available at: <https://www.openstreetmap.org> (Accessed on 28/02/2025).
- Regione Lazio (2014). *Database GeoTopografico (DBGT) - Scala 1:5.000 - v. 2014 - Formato SpatiaLite* [Online]. Geoportale Regione Lazio. Available at: <https://geoportale.regione.lazio.it/documents/261> (Accessed on 28/02/2025).
- Yao, Z., Nagel, C., Kunde, F., Hudra, G., Willkomm, P., Donaubauer, A., Adolphi, T. and Kolbe, T.H. (2018), "3DCityDB - a 3D Geodatabase Solution for the Management, Analysis, and Visualization of Semantic 3D City Models Based on CityGML", *Open Geospatial Data, Software and Standards*, Vol. 3, n. 5. Available at: <https://doi.org/10.1186/s40965-018-0046-7> (Accessed on 28/02/2025).
- Wan, L., Nocht, T. and Schooling, J.M. (2019), "Developing a City-Level Digital Twin – Propositions and a Case Study", in *International Conference on Smart Infrastructure and Construction 2019 (ICSIC)*, ICE Publishing, Cambridge, UK, pp. 187-94. Available at: <https://doi.org/10.1680/icsic.64669.187> (Accessed on 28/02/2025).

Images

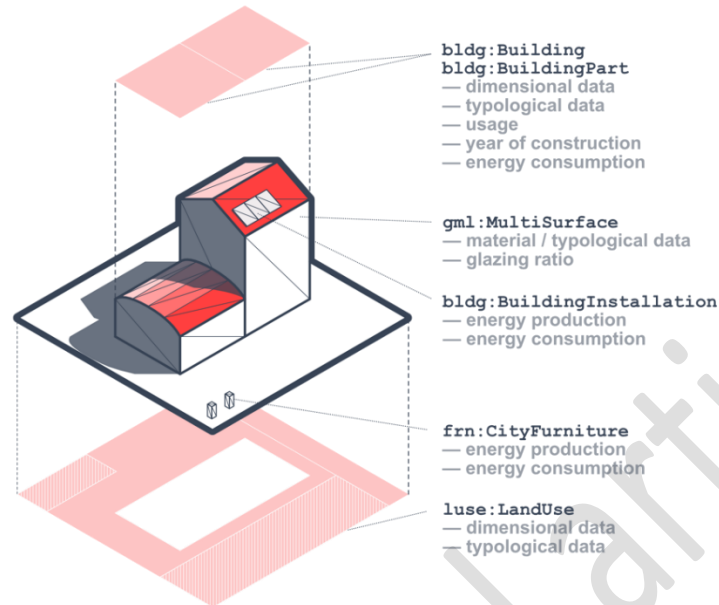


Fig. 1 – Schematic representation of information assignment to model components in CityGML.

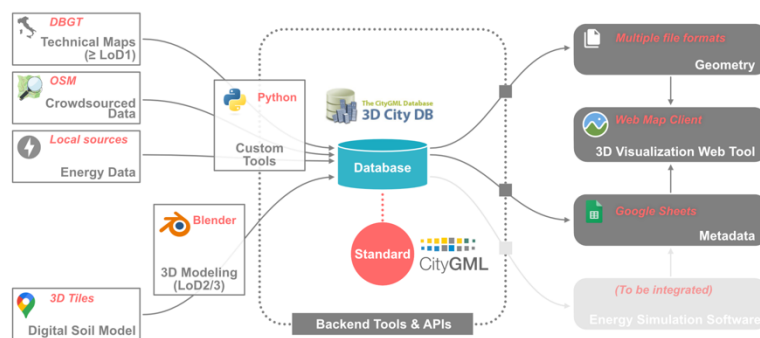


Fig. 2 – Workflow diagram adopted in the project, from data collection to interactive visualization.

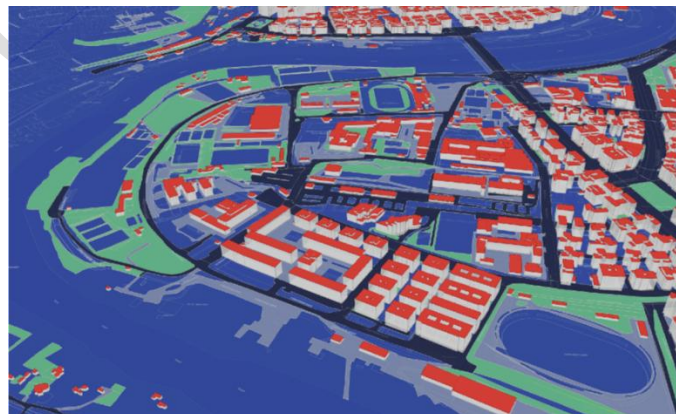


Fig. 3 – Bird's-eye view in the 3DCityDB Web Map Client of objects registered in the CityGML database (buildings with distinct vertical walls and roofs, and land-use areas).

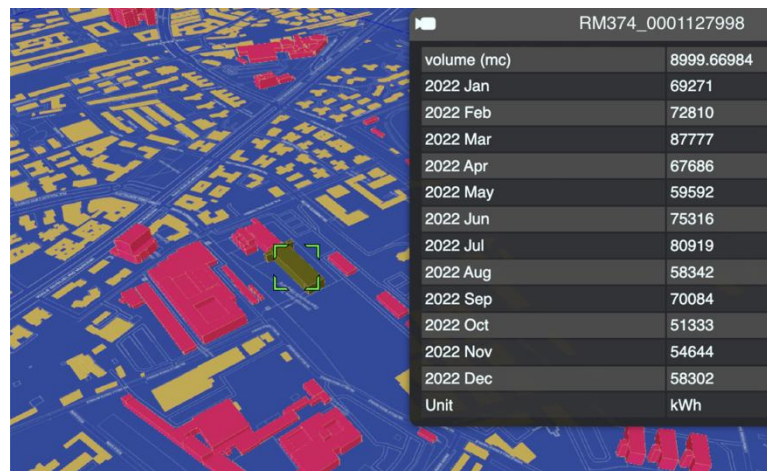


Fig. 4 – Detail of a query on the layer exported from the CityGML database representing buildings of Roma Tre University and their associated energy information.



Fig. 5 – Execution in the 3D Web Map Client of a script for conditional coloring of a selection of Roma Tre University buildings, based on summer air conditioning power consumption (colors ranging from blue to red).

	Input	Output	
Categories	"tipologia edilizia", "categoria uso"	"class", "usage"	
Reference	DBGT, Regione Lazio	CityGML 2.0 attribute codes	CityGML 2.0 attribute values
Conversion samples	"GENERICA", "Luogo di culto"	1080, 2210	"church institution", "religious building"
	"EDIFICIO RURALE", ""	1090, 1870	"agriculture, forestry", "building for agrarian and forestry"
	"EDIFICIO INDUSTRIALE-ARTIGIANALE",	1160,	"industry",

	"impianto tecnologico"	2700	"others"
	"EDIFICIO INDUSTRIALE-ARTIGIANALE", "depuratore"	1160, 1810	"industry", "building for effluent disposal"

Tab. 1 – Examples of LLM-based conversion of building attributes, from input data categories to outputs compliant with the CityGML standard.

Acknowledgements

The research was funded by "Project ECS 0000024 Rome Technopole - CUP F83B22000040006, NRP Mission 4 Component 2 Investment 1.5, Funded by the European Union - NextGenerationEU".

Un modello per la coproduzione di conoscenze nei processi decisionali in ambito energetico

Paola Marrone¹, Paolo Civiero¹, Roberto D'Autilia², Valerio Palma¹

¹ Department of Architecture, Università degli Studi Roma Tre, Italy

² Shazarch s.r.l., Italy

Primary Contact: Paola Marrone, paola.marrone@uniroma3.it

Abstract

L'articolo presenta uno studio sviluppato nell'ecosistema dell'innovazione Rome Technopole per il trasferimento tecnologico nel campo delle Key Enabling Technologies. La ricerca si occupa di transizione energetica e digitale nella rigenerazione urbana con l'obiettivo di realizzare uno strumento per la coproduzione di conoscenza a supporto della programmazione di distretti urbani climaticamente neutri. I risultati dimostrano la validità del quadro conoscitivo raccolto e del modello digitale sviluppato, in un'applicazione al settore Ostiense di Roma, evidenziando la replicabilità della metodologia, la scalabilità degli strumenti proposti e il potenziale per future applicazioni industriali e politiche di sostenibilità urbana.

Parole chiave: urban digital twin; sistema di supporto alle decisioni; distretto a energia positiva; città climaticamente neutre; joint lab

Introduzione

Rome Technopole è uno dei progetti di ricerca e sviluppo denominati "Ecosistema dell'innovazione", finanziati dal PNRR (Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza) che riunisce tutti gli atenei e il sistema della produzione del Lazio con l'obiettivo di creare un centro, o *hub*, transdisciplinare per l'innovazione tecnologica, in cui integrare e trasferire conoscenze e competenze delle università e della comunità scientifica per rispondere alle esigenze del settore industriale regionale.

La ricerca presentata in questo contributo è parte del "Flagship Project 2" relativo al settore della costruzione e della gestione del patrimonio edilizio, in cui sono richieste nuove tecnologie per attuare la transizione energetica e digitale nella rigenerazione sostenibile urbana e nell'edilizia.

In particolare, nell'ambito della Tematica 1 "Transizione energetica nel progetto multiscalare" e della Sottotematica 1 "Produzione, distribuzione e stoccaggio di energia elettrica da fonti rinnovabili", la ricerca affronta lo studio e la sperimentazione di uno strumento ottimizzato alla scala urbana ed edilizia per sostenere processi decisionali e valutativi mirati alla transizione energetica in scenari di rigenerazione urbana, attraverso la digitalizzazione delle informazioni e la costruzione di modelli digitali urbani.

Nello spirito dell'ecosistema dell'innovazione, obiettivi e risultati della ricerca nascono, infatti, all'interno di un gruppo composto da università, enti di ricerca – ENEA, CNR, INFN, ISS – e soggetti non accademici, come istituzioni locali e nazionali, grandi aziende e multinazionali, associazioni di imprese aderenti a Confindustria, PMI innovative. Il progetto è finalizzato a:

1. la redazione di piani di rigenerazione urbana e della mobilità, per il caso del quartiere Pietralata a Roma, dove sorgerà la sede della Fondazione Rome Technopole;
2. la gestione del patrimonio edilizio e delle sue potenzialità in termini di trasformazione secondo i criteri dei distretti a energia positiva – o PEDs (*Positive Energy Districts*) – e climaticamente neutri, studiata attraverso il caso applicativo del settore urbano intorno alla via Ostiense, compreso tra l'area di Valco San Paolo e il rione Testaccio – "settore Ostiense" – con particolare attenzione agli edifici dell'Università di Roma Tre;
3. l'innovazione tecnologica nella progettazione di nuovi edifici.

Nella ricerca proposta confluiscono conoscenze di base acquisite in precedenti progetti nazionali e internazionali¹, per supportare il passaggio alla ricerca applicata e a una fase di sviluppo precompetitivo con un livello auspicabile di TRL 5 (*Technology Readiness Level 5*). In particolare, a partire da un repertorio di soluzioni EBE (*Energy in Built Environment*), intese come interventi singoli o combinati volti all'efficientamento energetico su scala edilizia, sono stati selezionati alcuni KPI (*Key Performance Indicators*). Questi indicatori sono stati poi integrati all'interno di modelli di calcolo, o CM (*Calculation Models*), andando così a comporre un DSS (*Decision Support System*) in grado di assistere diversi utenti, tra cui amministrazioni pubbliche ed enti territoriali, nella definizione e nella valutazione di scenari per la riqualificazione energetica degli edifici e degli spazi urbani².

Il contributo descrive la costruzione del quadro conoscitivo – database geospaziale e framework di input – a scala di quartiere e del DT (*Digital Twin*) concepito come modello urbano per la raccolta ed elaborazione di dati su consumi, produzione da RES (*Renewable Energy Sources*) e stoccaggio di energia elettrica. Il DT è la soluzione tecnologica sviluppata per trasferire le conoscenze acquisite in uno strumento interoperabile, applicabile a diversi contesti edilizi e urbani nazionali. In questa prima sperimentazione il settore Ostiense e gli edifici di Roma Tre sono stati scelti come caso di studio con lo scopo di:

1. validare l'applicabilità e replicabilità del modello a un sistema urbano con destinazione mista, analogo a quello di Pietralata e per il quale non sono ancora disponibili dati reali sufficienti per effettuare simulazioni;
2. pensare il modello come uno strumento per la gestione degli edifici di un ente proprietario – *i.e.* istituzione universitaria – e la creazione di scenari di trasformazione energetica o riqualificazione.

Stato dell'arte

Le piattaforme di rappresentazione digitali della città, flessibili e integrate con molte fonti di dati, sono sempre più comunemente denominate UDT (*Urban Digital Twin*), sottolineando la capacità di rispecchiare i sistemi fisici e di supportare decisioni in tempo reale basate su dati concreti. Il paradigma del DT ha origine nell'ingegneria della produzione, dove è stato sviluppato per integrare informazioni di valutazione del ciclo di vita all'interno di rappresentazioni grafiche tridimensionali (Grieves and Vickers, 2017). Il concetto è oggi adottato da un numero crescente di amministrazioni urbane e servizi aziendali per la gestione della città (Kritzing et al., 2018). Un UDT è una replica virtuale della città, con una connessione bidirezionale allo spazio reale. Questa connessione richiede un flusso continuo di dati per documentare stati e fenomeni fisici, oltre a interfacce utili a guidare i processi decisionali e attuare interventi di trasformazione. Gli UDT promettono di coadiuvare il monitoraggio, la simulazione e l'ottimizzazione delle operazioni urbane, supportando decisioni più consapevoli attraverso analisi predittive, pianificazione di scenari e una gestione efficiente delle risorse (Bolton et al., 2018; Civiero et al., 2021). I recenti progressi nel *cloud computing* e nell'AI (*Artificial Intelligence*) amplificano in modo significativo queste potenzialità, specialmente nell'aggregare e correlare diverse fonti di dati, nell'individuare pattern e nello sviluppare modelli

predittivi, favorendo così gli aspetti della gestione urbana che integrano dati di origine diversa (Bibri *et al.*, 2024; Wan *et al.*, 2019).

Obiettivi

Lo strumento di modellazione urbana è stato sviluppato con l'obiettivo di:

1. raccogliere e consolidare dati territoriali "aperti", o *open data*, provenienti da fonti diverse;
2. elaborare le informazioni tramite algoritmi personalizzati e predisporle per la condivisione con altri ambienti di analisi, utilizzando formati interoperabili.

La definizione del framework di conoscenza geospaziale include elementi di caratterizzazione geometrica, termica, energetica, socioeconomica e di consistenza edilizia.

Il database sotteso dal DT e il relativo ambiente di gestione presentano le seguenti caratteristiche e funzioni principali:

1. schemi basati su standard CityGML³ per lo scambio di informazioni geografiche, incluse le componenti per ospitare dati relativi alla produzione e al consumo energetico;
2. interfacce e servizi per l'integrazione, il recupero e l'elaborazione dei dati;
3. strumenti di visualizzazione tridimensionale, compatibili sia con i dati raccolti sia con i risultati di scenari di trasformazione.

Metodologia

Il metodo adottato per lo sviluppo degli strumenti di modellazione urbana si fonda sulle azioni e sui principi elencati di seguito.

Definizione delle caratteristiche del modello

È stato definito il livello di dettaglio del modello e un sottoinsieme di classi rilevanti nello standard CityGML. Questo passaggio permette di allineare la costruzione del modello agli obiettivi del progetto e all'applicazione prevista, stabilendo una cornice metodologica condivisa tra i diversi casi di studio. Per la modellazione dettagliata degli aspetti energetici alla scala urbana, si sfrutta inoltre la natura modulare di CityGML, che supporta estensioni dedicate a specifici ambiti tematici (Agugiaro *et al.*, 2018).

Raccolta ed elaborazione dei dati basata sulla scalabilità

L'acquisizione è stata imperniata sulla scalabilità, puntando a definire tecniche e strumenti replicabili in altri casi di studio e a scale territoriali più ampie, in particolare in Italia. I dati provengono da diversi dataset geospaziali, sia aperti, sia messi a disposizione dai partner del progetto.

Adozione di software e standard FOSS

È stata privilegiata l'adozione di FOSS (*Free and Open Source Software*). Gli strumenti impiegati comprendono la suite di software 3DCityDB (Yao *et al.*, 2018) per l'archiviazione conforme a CityGML, il software di GIS (*Geographic Information System*) QGIS per l'analisi e l'elaborazione preliminare di dati geografici, e il software di computer grafica Blender per rendere più dettagliate le geometrie. La scelta di FOSS favorisce soluzioni robuste, scalabili e interoperabili, garantendo l'accessibilità nel tempo a un ampio spettro di stakeholder.

Sviluppo

Per l'allestimento del modello di città, abbiamo installato e testato un'istanza locale di 3DCityDB, un sistema di software che comprende un database, uno strumento per lo scambio di dati chiamato Importer/Exporter e uno per la visualizzazione interattiva chiamato 3D Web Map Client, basato sul software Cesium JS. Il sistema consente di gestire e consultare i modelli basati su CityGML.

La raccolta dei dati si è basata principalmente su un set di informazioni calibrato per condurre valutazioni e simulazioni energetiche alla scala urbana. I dati acquisiti comprendono:

1. informazioni sull'involucro degli edifici: quota di base e definizione geometrica come insieme di volumi di altezza uniforme;
2. altre informazioni sugli edifici: numero di piani, classificazione funzionale e tipologica;
3. informazioni sugli spazi aperti: definizione geometria di aree verdi, di aree carrabili e di altre aree pavimentate;
4. dati energetici: consumi di elettricità e gas, caratteristiche di prestazione energetica;

Modellazione geometrica

Parallelamente al processo di raccolta dei dati, abbiamo curato la selezione delle classi di oggetto e delle proprietà previste da CityGML, predisponendo l'allineamento con lo standard (Fig. 1). Per la modellazione degli edifici, il DBGT (Database Geo-Topografico) della Regione Lazio (2014) è stato la principale fonte, fornendo informazioni certificate e coerenti sulla sagoma a terra e l'altezza degli edifici. Le informazioni sulle funzioni e sulla tipologia edilizia sono state estratte dalla stessa fonte e convertite in maniera automatica nella tassonomia standardizzata. Nel processo di mappatura è stato usato un LLM⁴ (*Large Language Model*) per trasformare gli attributi "tipologia edilizia" e "categoria uso", contenuti nel database regionale, nei valori "class" e "usage" previsti nello standard (Tab. 1).

Il workflow (Fig. 2) ha incluso l'estrazione da OSM (OpenStreetMap contributors, 2025) del numero di piani degli edifici, dove disponibile, e l'estrazione manuale di dettagli elaborati in Blender sulla base del servizio web Google 3D Tiles, permettendo di aggiornare alcuni edifici rispetto allo stato descritto nelle fonti principali. Questo approccio potrebbe consentire di definire elementi quali finestre, porte e particolari delle coperture, apportando ulteriori miglioramenti di dettaglio per la modellazione energetica⁵, anche in funzione dell'uso del repertorio già definito di soluzioni EBE per la realizzazione di scenari di ottimizzazione energetica.

Modellazione energetica

I dati provenienti da altre fonti, come enti locali e partner di ricerca, sono stati impiegati per reperire informazioni energetiche quali consumi, anno di costruzione degli edifici e numero approssimativo di occupanti. È stata predisposta l'integrazione di queste informazioni all'interno del modello mediante apposite estensioni per CityGML e 3DCityDB. L'estensione Energy ADE (*Application Domain Extension*) di CityGML consente di aggiungere attributi come consumo energetico, tipologie di energia utilizzate, impianti installati e proprietà termiche degli edifici.

In un primo test, sono stati elaborati consumi energetici di un sottoinsieme di edifici dell'Università Roma Tre, a partire da dati aggregati per sito o indirizzo, e rendendo la rappresentazione dei consumi accessibile attraverso gli strumenti di visualizzazione interattiva.

Interoperabilità e visualizzazione

Per trasformare i dati relativi a sagoma e altezza degli edifici in formato CityGML, sono stati sviluppati prototipi di script in linguaggio Python che consentono la generazione automatica di dati 3D compatibili con 3DCityDB⁶. In aggiunta ai dati sugli edifici, anche le informazioni relative ad aree verdi – non ancora distinte tra pubbliche e private –, aree stradali e altre aree pavimentate sono state processate con script appositi (Fig. 3).

La visualizzazione interattiva del modello urbano è stata prodotta usando il software 3D Web Map Client, che permette di esplorare la componente geometrica del database, anche sovrapposta a modelli del terreno e immagini satellitari. Il prototipo di viewer, sviluppato personalizzando il software, consente di visualizzare set di dati specifici estratti dal modello CityGML completo (Fig. 4). È inoltre possibile combinare i dati 3D con dati tabellari collegati, aggiornabili in tempo reale – nel nostro caso, sfruttando il servizio web Google Sheets. In questo modo, si possono produrre dati calcolati

dinamicamente, come i risultati di simulazioni energetiche, rendendoli immediatamente disponibili nella mappa web. Il prototipo prevede inoltre strumenti di colorazione condizionale, che permettono di colorare gli edifici in base ai valori consultati (Fig. 5).

Risultati raggiunti

Il progetto di ricerca ha sviluppato un database geospaziale e strumenti di gestione dei dati per visualizzare agilmente differenti scenari per la riqualificazione energetica e l'introduzione di sistemi di produzione, distribuzione e stoccaggio di energia elettrica da RES. Attraverso il repertorio di soluzioni EBE è così possibile la coproduzione e coprogettazione di indirizzi programmatici e di possibili strategie, valutando l'impatto sui diversi KPI.

In dettaglio, i risultati relativi al database e allo strumento di gestione dei dati riguardano:

- lo sviluppo di un database per la costruzione di modelli compatibili con l'analisi energetica urbana;
- l'integrazione dei dati in un visualizzatore web;
- lo sviluppo di un workflow replicabile e scalabile.

Pur esistendo già diverse piattaforme UBEM (*Urban Building Energy Modeling*) (Ferrando et al., 2024), l'UDT proposto si focalizza sui PED, integrando lo standard CityGML per rappresentare lo stato di fatto, predisporre simulazioni energetiche e offrire strumenti di supporto alle decisioni. L'approccio, sviluppato a partire da precedenti esperienze del gruppo, mira a fornire un contributo applicativo alla progettazione energetica finalizzata alla neutralità climatica e al supporto alla pianificazione energetica territoriale⁷.

Limiti e avanzamenti futuri

Durante la ricerca sono emerse criticità relative alla disponibilità e qualità dei dati, come geometrie incomplete o non aggiornate, che hanno richiesto interventi manuali di affinamento. Ulteriori miglioramenti dipenderanno dalla capacità di gestire una maggiore quantità e varietà di dati energetici, ottimizzando l'interoperabilità con algoritmi e software di simulazione, nonché dalla standardizzazione nella rappresentazione dei consumi, della produzione e di altri indicatori energetici.

In futuro si intende migliorare l'interoperabilità del sistema con i software di simulazione energetica, semplificando e generalizzando i processi di importazione ed esportazione dei dati per facilitare la replicabilità del metodo in altri casi studio. Verranno infine potenziate le funzionalità interattive del visualizzatore, ampliando l'accesso ai metadati, integrando simulazioni in tempo reale e offrendo maggiori opzioni di analisi e personalizzazione per l'utente.

Conclusioni e impatti

I risultati finora ottenuti dal progetto rappresentano una solida base per futuri sviluppi industriali delle metodologie e degli strumenti testati, non solo nella regione Lazio.

In linea con gli obiettivi progettuali, lo strumento proposto può facilitare i processi decisionali della PA (Pubblica Amministrazione) e degli stakeholder privati, introducendo una maggiore attenzione e consapevolezza nei confronti della sostenibilità ambientale e sociale. Questo approccio può inoltre contribuire a migliorare la qualità della vita dei cittadini-beneficiari, fornendo strumenti per valutare efficacemente le ricadute dei progetti, inclusi i costi iniziali e i tempi di ritorno degli investimenti (*payback*), secondo criteri di sostenibilità economica, ambientale e sociale.

I benefici economici attesi derivano principalmente dal miglioramento della gestione degli interventi di riqualificazione su larga scala, dall'efficacia dei processi partecipativi e da una maggiore consapevolezza ambientale tra i cittadini coinvolti.

Come dimostra l'approccio PED, sostenuto da numerosi finanziamenti ed esperienze a livello europeo, anche lo studio proposto nell'ambito Rome Technopole si sta sviluppando per contribuire a impatti significativi, favorendo:

- lo sviluppo di modelli di business legati ai processi di rigenerazione urbana;

- la valutazione degli impatti e della replicabilità delle soluzioni di retrofit testate nei casi studio;
- la creazione di una filiera integrata tra diversi soggetti economici e istituzionali – PA, Università, enti e aziende di ricerca, terze parti;
- la nascita di nuove imprese operanti nel settore della digitalizzazione e della modellazione;
- lo sviluppo di nuove figure professionali – *capacity building* – quali *community manager* o *energy manager*, capaci di migliorare l'efficacia delle misure implementate e mitigare conflitti interni alle comunità nel lungo periodo;
- l'acquisizione di competenze distintive sul territorio, utili per stimolare processi di innovazione sostenibile;
- un aumento della capacità di attrarre ulteriori investimenti e finanziamenti pubblici e privati.

Note

¹ "TECHSTART-key enabling TECHNOlogies and Smart environmenT in the Age of gReen economy. Convergent innovations in the open space/building system for climaTe mitigation" PRIN 2017; "MakingPEDs - Decision-Making Digital Twins for Climate Neutral PEDs"; "POSIEDON - Project POSitive Energy Initiatives in Districts fOr Neutral Mediterranean cities", DUT 2022; "WE Generate-Co-creating people-centric sustainable neighbourhoods through urban regeneration", HEU-CL5-22-D4-0-02.

² Derivable 2.2 "Solutions Toolkit for Climate Neutral PEDs" e 2.1 "Full harmonized inputs assessment framework", progetto MakingPEDs.

³ Nello specifico, abbiamo usato la versione dello standard CityGML 2.0 (Gröger *et al.*, 2012).

⁴ Nello specifico, abbiamo adottato il modello "gpt-4" di OpenAI (2023).

⁵ Il LoD (*Level of Detail*) elaborato nel progetto è confrontabile con quello indicato come LoD 2 nello standard CityGML – ma privo dei dettagli sulle coperture inclinate – mentre i dettagli integrabili tramite modellazione in Blender sono previsti nel LoD 3 (Biljecki, 2017).

⁶ Oltre all'importazione dei dati provenienti dal DBGT del Lazio, al fine di validare robustezza e replicabilità del metodo, sono stati condotti test positivi con i dataset regionali e locali sulla città di Cesena.

⁷ Ad esempio, nell'elaborazione di strumenti quali i PAESC (Piani d'Azione per l'Energia Sostenibile e il Clima) e la PFTE (Progettazione di Fattibilità Tecnico-Economica).

References

- Agugiaro, G., Benner, J., Cipriano, P. and Nouvel, R. (2018), "The Energy Application Domain Extension for CityGML: Enhancing Interoperability for Urban Energy Simulations", *Open geospatial data, softw. stand.*, Vol. 3, n. 1. Available at: <https://doi.org/10.1186/s40965-018-0042-y> (Accessed on 28/02/2025).
- Bibri, S.E., Huang, J., Jagatheesaperumal, S.K. and Krogstie, J. (2024), "The Synergistic Interplay of Artificial Intelligence and Digital Twin in Environmentally Planning Sustainable Smart Cities: A Comprehensive Systematic Review", *Environmental Science and Ecotechnology*, Vol. 20, p. 100433. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ese.2024.100433> (Accessed on 28/02/2025).
- Biljecki, F. (2017), *Level of detail in 3D city models*, TU Delft. Available at: <https://doi.org/10.4233/uuid:f12931b7-5113-47ef-bfd4-688aae3be248> (Accessed on 28/02/2025).
- Bolton, A., Butler, L., Dabson, I., Enzer, M., Evans, M., Fenemore, T., Harradence, F., Keaney, E., Kemp, A., Luck, A. *et al.* (2018), *Gemini Principles*, CDBB. Available at: <https://doi.org/10.17863/CAM.32260> (Accessed on 28/02/2025).
- Civiero, P., Pascual, J., Arcas Abella, J., Bilbao Figuero, A. and Salom, J. (2021), "PEDRERA. Positive Energy District Renovation Model for Large Scale Actions", *Energies*, Vol. 14, n. 10, p. 2833. Available at: <https://doi.org/10.3390/en14102833> (Accessed on 28/02/2025).
- Ferrando, M., Causone, F., Hong, T. and Chen, Y. (2024), "Urban Building Energy Modeling (UBEM) tools: A state-of-the-art review of bottom-up physics-based approaches". *Sustainable Cities and*

Society, Vol. 62, p. 102408. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102408> (Accessed on 28/02/2025).

Grieves, M. and Vickers, J. (2017), "Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems", in Kahlen, F.-J., Flumerfelt, S. and Alves A. (Eds.), *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, Springer, Cham, pp. 85-113. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4 (Accessed on 28/02/2025).

Gröger, G., Kolbe, T.H., Nagel, C. and Häfele, K.H. (2012), *OGC city geography markup language (CityGML) encoding standard*. Available at: <https://www.ogc.org/publications/standard/citygml/> (Accessed on 28/02/2025).

Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J. and Sihn, W. (2018), "Digital Twin in Manufacturing: A Categorical Literature Review and Classification", *IFAC-PapersOnLine*, Vol 51, n. 11, pp. 1016-22. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474> (Accessed on 28/02/2025).

OpenAI (2023), "Gpt-4 technical report", *arXiv preprint arXiv:2303.08774*. Available at: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.08774> (Accessed on 28/02/2025).

OpenStreetMap contributors (2025), *Planet dump retrieved from https://planet.osm.org*. Available at: <https://www.openstreetmap.org> (Accessed on 28/02/2025).

Regione Lazio (2014). *Database GeoTopografico (DBGT) - Scala 1:5.000 - v. 2014 - Formato SpatiaLite* [Online]. Geoportale Regione Lazio. Available at: <https://geoportale.regione.lazio.it/documents/261> (Accessed on 28/02/2025).

Yao, Z., Nagel, C., Kunde, F., Hudra, G., Willkomm, P., Donaubauer, A., Adolphi, T. and Kolbe, T.H. (2018), "3DCityDB - a 3D Geodatabase Solution for the Management, Analysis, and Visualization of Semantic 3D City Models Based on CityGML", *Open Geospatial Data, Software and Standards*, Vol. 3, n. 5. Available at: <https://doi.org/10.1186/s40965-018-0046-7> (Accessed on 28/02/2025).

Wan, L., Nocht, T. and Schooling, J.M. (2019), "Developing a City-Level Digital Twin – Propositions and a Case Study", in *International Conference on Smart Infrastructure and Construction 2019 (ICSIC)*, ICE Publishing, Cambridge, UK, pp. 187-94. Available at: <https://doi.org/10.1680/icsic.64669.187> (Accessed on 28/02/2025).