

Relazione sull'attività di ricerca

Digitalizzazione e transizione energetica nel progetto dei Positive Energy Districts (PEDs)

Data di aggiornamento: 8 Dicembre 2025

Autore: **Valerio Palma**

(assegno di ricerca, Contratto di collaborazione ad attività di ricerca, ex art. 22, L. 240/2010)

Dipartimento di Architettura, Università degli Studi Roma Tre

Principal Investigator: Paola Marrone

Abstract

La relazione presenta le attività di ricerca svolte nell'ambito del progetto Digitalizzazione e transizione energetica nel progetto dei Positive Energy Districts (PEDs), incentrate sullo sviluppo di un Urban Digital Twin per supportare la transizione energetica e l'implementazione di positive energy districts in contesti urbani italiani, con particolare attenzione all'area di Valco San Paolo e ad altri casi studio strategici. L'impostazione si basa su un modello urbano standardizzato (CityGML) che integra dati geospaziali, amministrativi ed energetici in un unico quadro coerente, utilizzabile sia per analisi descrittive sia come base per simulazioni. Nel quadro di Rome Technopole, l'area di Valco San Paolo è assunta come caso pilota per la definizione di flussi e strumenti replicabili in ulteriori ambiti strategici dell'area romana.

Sono stati messi a punto flussi di lavoro che permettono di passare da dati istituzionali e comunali a un modello tridimensionale interrogabile, e di collegare a questo modello i metadati collegati agli edifici, le informazioni di consumo e gli indicatori energetici disponibili. L'infrastruttura include un visualizzatore web pensato anche per il personale amministrativo, che consente di esplorare i dati tramite viste tematiche aggiornabili. È stata inoltre testata l'integrazione con un motore di simulazione energetica. Il lavoro dimostra la fattibilità di un gemello digitale urbano basato su standard aperti, evidenziando al tempo stesso alcune criticità ancora aperte nella qualità dei dati e nell'automazione dei flussi di simulazione.

1. Introduzione e obiettivi

Contesto

Il progetto si colloca all'intersezione di due iniziative di ricerca: Rome Technopole (ECS 0000024, CUP F83B22000040006) e MakingPEDs — *Decision-Making Digital Twins for Climate Neutral PEDs*. Entrambi i programmi promuovono l'uso di tecnologie digitali e di metodologie per la rigenerazione urbana e la transizione energetica, con attenzione alla scalabilità e replicabilità di soluzioni sperimentali. In questo quadro, il lavoro sviluppa un urban digital twin orientato all'energia come infrastruttura per la rappresentazione geometrico-semantic del contesto urbano, l'integrazione di dati multisorgente e il supporto a processi decisionali relativi alla progettazione e gestione di Positive Energy Districts (PED) (Civiero et al., 2021).

Obiettivo generale

L'obiettivo generale del progetto è realizzare un database geospaziale conforme a CityGML [1] finalizzato ad analisi energetiche di scala distrettuale, capace di aggregare e collegare informazioni geometriche, energetiche e socio-demografiche, per supportare valutazioni, simulazioni e scenari decisionali per i PED. L'obiettivo comprende: (i) la definizione di un metodo generalizzato per convertire input tabellari eterogenei (basati su fonti locali e nazionali e organizzati in un formato semplice e di comune utilizzo come CSV o Spatialite) in modelli CityGML; (ii) la normalizzazione di semantiche locali verso *code list* standard; (iii) l'esposizione di viste tematiche aggiornabili da personale non tecnico tramite

fogli condivisi collegati direttamente al visualizzatore 3D. La metodologia è stata applicata e verificata su casi alla scala di distretto e comunale (Valco S. Paolo, Civitavecchia, Cesena), mostrando la trasferibilità del metodo in contesti differenti.

Obiettivi specifici

Nel corso del progetto sono stati specificati i seguenti obiettivi operativi principali:

- Definire i livelli di dettaglio (LoD) e la selezione delle classi CityGML necessari per l'analisi energetica di distretto, privilegiando LoD1-LoD2 con esplorazioni mirate su LoD3 per aspetti puntuali.
- Sviluppare pipeline di importazione scalabili e riproducibili da sorgenti geospaziali eterogenee (DBGT Regione Lazio, database regionali, OpenStreetMap, mesh 3D) comprensive di procedure di validazione geometrica e gestione dei sistemi di riferimento.
- Progettare e implementare un viewer 3D interoperabile (basato su CesiumJS) con collegamento a tabelle esterne per interrogazioni in tempo reale e visualizzazione di metriche energetiche.
- Integrare nel modello attributi energetici tramite l'Energy ADE [2] e altre procedure per associare dati di consumo/produzione alle geometrie edilizie.
- Sperimentare metodi di mappatura semantica, inclusi moduli LLM, per la normalizzazione delle tassonomie tra sorgenti diverse.

Cornice operativa

Le attività sono pianificate e svolte nell'ambito dei vincoli e delle finalità di Rome Technopole e MakingPEDs, con contributi metodologici mirati a favorire l'interoperabilità fra standard OGC, strumenti FOSS e applicazioni di simulazione energetica. La cornice operativa prevede la coproduzione di conoscenza e lo sviluppo di un decision support system (DSS) basato su repertori di soluzioni (EBE) e indicatori di prestazione (KPI), finalizzato a generare scenari di retrofit e di progettazione per PED in contesti urbani pilota (fig. 1). Il workflow integra un'infrastruttura basata sul pacchetto di software 3DCityDB [3], QGIS [4], Blender [5] e Cesium [6], combinata con script Python e moduli LLM, utilizzando come livello geometrico primario il LoD2 (Biljecki, 2017), che rappresenta un compromesso fra fedeltà volumetrica e requisiti di input dei motori di simulazione energetica.

Nota sulle azioni svolte nello specifico durante il secondo anno del progetto

Nel secondo anno le attività si sono concentrate sulla messa a regime e sulla generalizzazione del metodo: estensione e revisione delle pipeline di importazione e conversione (SpatiaLite/CSV → CityGML → 3DCityDB) con test di scalabilità su casi comunali (Valco S. Paolo, Cesena, Civitavecchia); acquisizione, pulizia, disaggregazione e integrazione dei dati energetici di Roma Tre (dati generali sugli asset, bollette 2022–2024) anche tramite procedure per estrazione da PDF assistite da LLM; integrazione negli strumenti di conversione verso CityGML di tecniche sperimentali di normalizzazione semantica tramite LLM; configurazione e aggiornamento continuo dei database operativi allineati alle esigenze amministrative dell'Ateneo e allo stato di fatto delle volumetrie; evoluzione del visualizzatore web basato su CesiumJS, con redesign dell'interfaccia, gestione di layer multipli e aggiornamento dinamico via Google Sheets; sperimentazione di workflow per l'integrazione di un motore di simulazione energetica esterno in collaborazione con l'Università di Palermo, utilizzando il modello CityGML come interfaccia di scambio dati; interventi di divulgazione e disseminazione.

2. Stato dell'arte

Temi generali

La letteratura e le pratiche recenti sui *digital twin* (DT) definiscono il paradigma come una replica digitale di un oggetto o ambiente reale connessa bidirezionalmente all'originale, finalizzata al monitoraggio, alla simulazione e, in alcuni casi, all'attivazione di attuatori (Grievess e Vickers, 2017; Kritzing et al., 2018). Nel contesto della città, l'*urban digital twin* (UDT), è un'infrastruttura per integrare modelli 3D, dati amministrativi e sensoriali, strumenti di analisi e interfacce orientate al supporto delle decisioni in ambito di smart city (Bolton et al., 2018; Civiero et al., 2021; Ferré-Bigorra et al., 2022; Lehtola et al., 2022; Weil et al., 2023). In questo quadro, l'UDT non è solo un ambiente di visualizzazione, ma una piattaforma che abilita scenari di simulazione, confronti fra alternative progettuali e accesso controllato a informazioni tecniche per attori con competenze eterogenee. I recenti sviluppi nel cloud computing e nelle tecniche di intelligenza artificiale hanno ulteriormente

rafforzato queste capacità, in particolare nell'aggregazione e correlazione di sorgenti dati diverse, nell'identificazione di pattern e nella costruzione di modelli predittivi (Bibri et al., 2024; Wan et al., 2019).

Un filone specifico di lavori indaga l'uso degli UDT per la transizione energetica e la neutralità climatica, evidenziando sia le opportunità sia le criticità legate a qualità dei dati, governance e interoperabilità quando si integrano modelli energetici, informazioni socio-demografiche e strumenti decisionali su larga scala (Jeddoub et al., 2023; Guo et al., 2025; Vitanova et al., 2025). L'approccio sviluppato in questo progetto si colloca su questo asse: l'UDT è concepito come infrastruttura standard-based, costruita su un modello urbano in CityGML e su pipeline riproducibili di integrazione dati da sorgenti regionali e comunali verso viste tematiche orientate alle analisi energetiche di distretto. L'integrazione di un simile strumento in un DSS sottolinea e sfrutta la funzione trasformativa dell'UDT e il flusso bidirezionale di informazioni tra lo spazio rappresentato e il suo modello.

Aspetti affrontati

Nel lavoro si sono considerati i seguenti aspetti critici ai fini dell'applicazione del paradigma UDT alle analisi energetiche di distretto: integrazione di sorgenti eterogenee (come dati topografici certificati, dati energetici di dettaglio, prodotti OpenStreetMap, mesh 3D), sviluppo di pipeline riproducibili per la conversione e l'importazione nel formato CityGML, attraverso l'uso prevalente di software open source per garantire scalabilità e interoperabilità. CityGML fornisce uno schema concettuale che consente di rappresentare edifici, parti di edificio e altre entità urbane a diversi livelli di dettaglio, mantenendo relazioni coerenti fra geometria e attributi tematici (Gröger et al., 2012; Biljecki, 2017; Biljecki et al., 2018). In questo panorama, piattaforme open source come 3DCityDB (Yao et al., 2018) insieme a tool FOSS per la visualizzazione e l'analisi (e.g. QGIS, Cesium, Blender), sono utilizzate per importare, gestire, interrogare e distribuire modelli CityGML su scala urbana, favorendo interoperabilità, trasparenza e riuso dei workflow.

Particolare attenzione è stata posta alla compatibilità semantica dei dati — mediante code list standard e mapping delle classi CityGML — e alla riproducibilità del flusso da CityGML all'analisi energetica. Inoltre, per le applicazioni energetiche urbane, la definizione del LoD è stato un aspetto nodale per garantire interoperabilità e trasferibilità dei risultati (Biljecki, 2017).

3. Dati e risorse

Fonti geospaziali

Le principali sorgenti geospaziali utilizzate comprendono database topografici regionali certificati [9] e prodotti open-source. In particolare sono stati impiegati i dati del DBGT Regione Lazio [8] e del Database Topografico della Regione Emilia-Romagna [17] per la definizione di footprint e informazioni di altezza; OpenStreetMap (OSM) [12] è stato consultato per integrazioni tipologiche e attributive; infine sono state esplorate le mesh e i 3D Tiles forniti da Google [11] per incrementare il livello di dettaglio geometrico e per sperimentazioni orientate a LoD3. Queste fonti sono state valutate in termini di coerenza, accuratezza geometrica e copertura territoriale per guidare le scelte di modellazione e le procedure di validazione. La pipeline è stata progettata per assumere il DBGT come sorgente principale di geometrie planimetriche e altimetriche, integrandolo con dati comunali e con OSM dove disponibili, in modo da ottenere modelli LoD2 coerenti e riutilizzabili in più contesti regionali; in casi selezionati, i dati 3D Tiles e workflow Blender sono stati impiegati per verificare l'arricchimento geometrico verso rappresentazioni a maggiore dettaglio.

Dati energetici e socio-demografici

I dataset energetici e socio-demografici includono sorgenti ufficiali (ISTAT [15], ENEA, ATER) e archivi interni (dati di consumo Roma Tre, bollette 2022–2024). È stata condotta una verifica preliminare sulla qualità e sulla completezza dei dati energetici disponibili per i siti dell'Ateneo, che ha evidenziato criticità procedurali e di codifica degli identificativi edilizi, successivamente corrette tramite cicli di revisione e confronto con le fonti geo-spaziali. I dati delle bollette sono stati trascritti e riorganizzati in fogli di calcolo con collegamento dinamico al visualizzatore, previo processo di disaggregazione dei consumi su edifici in funzione dei volumi e degli identificativi aggiornati; tali tavole costituiscono ora la sorgente per analisi di dettaglio e per l'alimentazione di dati compatibili con l'Energy ADE di CityGML 2.0 (Agugiaro et al., 2018). Per la conversione delle bollette e di altri documenti in formato PDF in tabelle strutturate sono stati testati processi basati su LLM [10] combinati con regole di post-processing e controlli di confidenza, che hanno mostrato elevata precisione nell'estrazione dei campi rilevanti e hanno reso operativa l'integrazione di nuove serie energetiche nel database.

Risorse computazionali

L'infrastruttura di sviluppo è basata su macchine virtuali dedicate e su containerizzazione tramite Docker [7] per garantire la portabilità degli ambienti. L'architettura software include 3DCityDB con Importer/Exporter e componenti per la visualizzazione (3DCityDB Web Map Client, basato su CesiumJS), oltre a strumenti di supporto quali QGIS e Blender per validazione geometrica e preparazione di mesh. Le risorse computazionali previste per il deploy includono specifiche per memoria, CPU e storage volte a soddisfare i requisiti operativi per la gestione di grandi dataset geospaziali e per l'esecuzione di esportazioni e interrogazioni complesse.

4. Metodologia

Principi generali

L'impostazione metodologica assume il database CityGML (istanza 3DCityDB, con un sottoinsieme selezionato dello schema CityGML 2.0 e dell'Energy ADE) come anello di congiunzione fra le sorgenti dati e gli strumenti di simulazione (fig. 2). In particolare, la struttura del modello e il *minimal attribute schema* adottato sono stati definiti a partire da uno studio dei requisiti degli strumenti di simulazione e delle analisi energetiche di distretto, e solo successivamente tradotti in pipeline di trasformazione dai dataset disponibili verso il database urbano. Le scelte che riguardano classi, livelli di dettaglio e attributi energetici riflettono quindi un doppio vincolo: da un lato la necessità di restare aderenti agli standard, dall'altro l'esigenza di garantire che oggetti e attributi possano essere utilizzati in maniera efficiente sia nelle procedure di visualizzazione sia nei flussi di esportazione e processing verso i motori di simulazione integrati o esterni al progetto.

Le scelte metodologiche privilegiano l'adozione di software e formati open source e di standard OGC, con l'obiettivo di assicurare interoperabilità, riproducibilità e trasferibilità dei risultati. Le pipeline sono progettate per essere scalabili e replicabili, con attenzione alla tracciabilità delle sorgenti e dei protocolli di acquisizione, alla documentazione dei passaggi di trasformazione e alla possibilità di riapplicare i workflow su dataset regionali diversi.

Modellazione

La modellazione si concentra su livelli di dettaglio coerenti con analisi energetiche di scala distrettuale, adottando il LoD2 come configurazione target e prevedendo indagini a un livello di dettaglio più elevato per alcune specifiche caratteristiche dell'edificato (ad esempio, valutando proxy per il contributo delle aperture ai fini dei calcoli energetici). Sono state selezionate classi CityGML pertinenti (fig. 3) e definite le regole per la gestione dei sistemi di riferimento. In questa cornice, il LoD2 è risultato un valido livello operativo di riferimento: i volumi prismatici con superfici di parete e copertura esplicite soddisfano i requisiti di rappresentazione per urban building energy modelling (UBEM), mentre attributi sintetici (ad esempio rapporto di apertura) consentono di mantenere la compatibilità con strumenti come IES iCD [16] senza richiedere una modellazione esplicita ad un livello di dettaglio ulteriore. È stata valutata e adottata l'Energy ADE per l'attribuzione di proprietà energetiche agli oggetti del modello, definendo un set minimo di attributi energetici e geometrici coerente con le esigenze di simulazione.

Sviluppo di software

Il progetto ha previsto lo sviluppo di codici originali per l'automatizzazione della generazione dei modelli di edifici e di altri elementi in LoD2 a partire da set minimi di attributi, e includendo sistemi di validazione geometrica e per la gestione dei sistemi di riferimento. Per la generalizzazione del funzionamento, gli strumenti sono stati impostati per accettare i dati in formati tabulari liberi rimappabili sugli attributi standardizzati, consentendo la conversione automatica in CityGML di dataset eterogenei e la parametrizzazione delle regole di importazione per applicazioni multi-regione.

Le pipeline sono progettate per essere scalabili e riproducibili, con generalizzazione dei parametri, logging, gestione degli errori di formato o integrità e controllo dei vincoli topologici. Test di scalabilità su dataset regionali e locali (Lazio, Emilia-Romagna) hanno verificato la robustezza e le prestazioni end-to-end (collezione dati, conversione, importazione, visualizzazione) guidando ottimizzazioni successive delle routine.

In parallelo è stato integrato un modulo basato su LLM per la normalizzazione semantica di attributi descritti in dizionari eterogenei (ad esempio le categorie che indicano il tipo o la funzione di un edificio). La funzione, basata sui modelli del

provider OpenAI [10], produce mapping verificabili e dizionari di corrispondenza riutilizzabili in esecuzioni successive, con procedure di controllo qualitativo per la validazione delle assegnazioni prima della scrittura definitiva nel database.

5. Risultati

È stata realizzata un'istanza operativa di 3DCityDB integrata nel contesto di lavoro dell'Ateneo e configurata per la gestione di modelli CityGML, principalmente in LoD2. Le pipeline e gli strumenti sviluppati hanno consentito l'importazione di dataset regionali e sperimentali, l'integrazione di dati energetici aggregati con le geometrie edilizie e la prototipazione di strumenti di visualizzazione interoperabili. La metodologia è stata eseguita end-to-end in diversi casi di studio e a diverse scale (Valco S. Paolo a Roma, San Liborio a Civitavecchia, Comune di Cesena) dimostrando la scalabilità e la replicabilità del flusso (Spatialite → CityGML LoD2 → 3DCityDB → viewer Cesium collegato a Google Sheets).

Questi risultati costituiscono la base per successive fasi di integrazione automatizzata con motori di simulazione energetica e altri strumenti di analisi, e per l'estensione delle procedure a casi d'uso più ampi e a contesti regionali ulteriori. In collaborazione con il gruppo di ricerca dell'Università di Palermo è stato inoltre testato un flusso di integrazione con un primo motore di simulazione energetica, utilizzando il modello CityGML e le viste tabellari derivate come interfaccia di scambio dati. Il test conferma la capacità dell'UDT sviluppato di ospitare strumenti simulativi terzi, mantenendo coerenza semantica e tracciabilità degli identificatori lungo il ciclo di elaborazione.

Database CityGML

È stata predisposta e validata un'istanza locale di 3DCityDB comprensiva dello strumento chiamato Importer/Exporter e dei componenti necessari per la visualizzazione 3D (Web Map Client). Il setup ha previsto test funzionali per l'importazione dei modelli in LoD2 relativi ai casi studio selezionati e la gestione coerente dei sistemi di riferimento. Le pipeline di importazione sono state sviluppate in Python con procedure di validazione geometrica e con routine per la gestione di errori di formato e discrepanze topologiche. Le verifiche di interoperabilità hanno incluso l'esportazione tabellare mediante query SQL e test di integrazione con strumenti di visualizzazione e analisi (QGIS tramite plugin [18, 19], Cesium ion [20], Google Earth [21]).

Il database fornisce una base dati urbana semantica utilizzabile per analisi energetiche e per l'interscambio con strumenti di simulazione. Gli output prodotti comprendono tabelle aggregate generate tramite query SQL specializzate, esportabili per l'elaborazione esterna o per la sincronizzazione del visualizzatore con fogli di calcolo collegati (Google Sheets).

L'infrastruttura consente inoltre l'estrazione di viste tematiche e l'esportazione di layer per la successiva integrazione con motori di simulazione o strumenti di analisi, testata con l'associazione agli edifici delle prime metriche energetiche elaborate. I test di scalabilità applicati alle città di Cesena e Civitavecchia hanno confermato la replicabilità e la robustezza delle pipeline di conversione. A supporto delle attività di ricerca, è stato predisposto un server dedicato presso il Dipartimento di Architettura per ospitare l'istanza CityGML e il visualizzatore personalizzato, con configurazione mirata al successivo uso in test avanzati e in produzione.

Codici di import e modellazione

Lo script Python per la generazione automatica degli edifici in LoD2 usano footprint e altezze per creare Building/BuildingPart semanticamente coerenti con CityGML (comprensivi di volumi, superfici orizzontali e verticali, aspetti gerarchici) e gestire discrepanze geometriche [fig. 4]. Lo script accetta un set minimo di attributi (ID elemento, geometria, quota di base, altezze, ID edificio, funzione, tipo, numero livelli, colonna di filtro) e permette di mappare diverse nomenclature e specifiche caratteristiche degli input verso gli attributi CityGML di destinazione. Le routine sono state testate su dataset regionali (Lazio, Emilia-Romagna) per verificarne la replicabilità e la robustezza. Altri script specifici sono stati sviluppati per produrre dataset CityGML relativi a oggetti rappresentanti aree di *land use* e raggruppamenti di edifici. Le routine includono meccanismi di logging, retry e controllo dei vincoli topologici per migliorare la resa su dataset eterogenei.

Lo script per la generazione degli edifici è stato integrato con una funzione prototipale di mappatura semantica che utilizza modelli LLM per normalizzare classi e usi/funzioni edilizi provenienti da sorgenti eterogenee (es. DBGT, OSM). La procedura produce mapping verificabile che viene scritto nel database e reso interrogabile nel viewer (per esempio tramite colorazioni tematiche); sono riportati limiti e necessità di validazione qualitativa per assicurare la correttezza delle assegnazioni. In particolare, il prototipo è stato usato per convertire campi contrassegnati come "tipo" e "uso" provenienti dai DBGT e da altre fonti verso gli attributi *class* e *usage* dello standard CityGML 2.0. È stata implementata una procedura di controllo qualitativo

per validare le assegnazioni prima della loro scrittura definitiva nel database. I test hanno mostrato elevata precisione e buona generalizzabilità su fonti eterogenee.

Visualizzazione e interoperabilità

È stato sviluppato un visualizzatore Web 3D basato su CesiumJS, progettato per supportare sia le esigenze del team di ricerca sia l'uso da parte del personale amministrativo dell'Università Roma Tre. L'interfaccia è accessibile da una landing page sintetica di presentazione del progetto, che introduce obiettivi, casi di studio e modalità di consultazione. L'interfaccia di default di CesiumJS è stata resa più essenziale, mantenendo solo i controlli rilevanti per le finalità del progetto e organizzando le principali funzioni operative in pannelli dedicati [fig. 5].

Il visualizzatore consente la selezione diretta dei livelli di visualizzazione principali, fra cui: il modello di base con superfici verticali e coperture come oggetti separati; i risultati delle simulazioni energetiche realizzate dal team dell'Università di Palermo per l'intera area di Valco San Paolo; i dati generali per gli asset di Roma Tre; i dati di consumo elettrico; i dati di consumo di gas. La struttura a livelli permette di passare rapidamente da viste puramente geometriche a viste tematizzate sulla base di indicatori energetici o amministrativi, mantenendo la coerenza degli identificativi edilizi con il database CityGML sottostante. L'interfaccia permette, per ciascun livello, di selezionare un edificio ed ottenerne i metadati e le altre informazioni associate [fig. 6].

Sono state implementate funzioni di colorazione condizionale avanzata, con possibilità di selezionare per ogni layer l'attributo da rappresentare (ad esempio consumi normalizzati, indicatori simulati, parametri volumetrici), la tipologia di scala (lineare o logaritmica), il gradiente cromatico e il range di valori [fig. 7]. La legenda è generata dinamicamente in funzione dell'attributo e della scala selezionata, facilitando la lettura dei risultati anche da parte di utenti non tecnici. Le tabelle collegate in Google Sheets garantiscono l'aggiornamento dinamico dei dati: modifiche e integrazioni operate su questi fogli (ad esempio aggiornamenti di consumi o correzioni di metadati sugli edifici) vengono riflesse in tempo quasi reale nella vista 3D senza richiedere diritti di scrittura sul database.

Accanto all'interfaccia semplificata, l'accesso al menu di default di CesiumJS è stato mantenuto per consentire ulteriori personalizzazioni e la gestione di viste dedicate ai casi di studio aggiuntivi (in particolare Cesena e Civitavecchia), sfruttando la stessa infrastruttura di base. Durante l'intero arco del progetto, i database locali sono stati aggiornati per allineare le informazioni alle esigenze amministrative di Roma Tre (ad esempio revisioni degli identificativi e dell'anagrafe degli asset) e per recepire aggiornamenti delle volumetrie allo stato di fatto, garantendo coerenza fra modello geometrico, dati energetici e informazioni amministrative.

Integrazione di simulazioni energetiche

L'infrastruttura sviluppata nel progetto è stata concepita fin dall'inizio per supportare un flusso bidirezionale fra modello urbano CityGML, motori di simulazione energetica e strumenti di visualizzazione. L'istanza 3DCityDB, integrata con l'Energy ADE, fornisce la rappresentazione geometrico-semantiche degli edifici (LoD2 con identificatori stabili e attributi energetici di base); viste tabellari "flattened" sono estratte tramite query SQL e collegate a fogli Google Sheets, che fungono da interfaccia di scambio per risultati di simulazione e indicatori di performance. Il viewer Web 3D basato su Cesium legge tali tabelle per costruire layer tematici (colorazioni condizionali, pop-up di metadati, metriche energetiche sintetiche), consentendo a utenti non tecnici di esplorare gli esiti delle analisi direttamente sulla scena 3D urbana.

Su questa base è stata avviata una collaborazione con il gruppo di ricerca dell'Università di Palermo per testare l'integrazione di un motore di simulazione energetica sviluppato parallelamente al progetto. Lo strumento, implementato in ambiente Python e basato su un modello termico RC, è stato collegato all'UDT tramite il database CityGML: da un lato, le proprietà geometriche e semantiche degli edifici sono estratte da 3DCityDB e utilizzate per parametrizzare i modelli di simulazione; dall'altro, i risultati simulati (ad esempio fabbisogni energetici annui ideali per riscaldamento/raffrescamento) vengono reintegrati nel sistema attraverso tabelle collegate a Google Sheets, che il viewer legge per aggiornare le rappresentazioni tematiche. Nell'ambito del progetto, il contributo principale riguarda la definizione del rapporto tra la rappresentazione urbana adottata e gli input del simulatore, e la configurazione del flusso dati dalle simulazioni al viewer.

I test condotti su un sottoinsieme di edifici nel quartiere di Valco San Paolo a Roma hanno dimostrato la praticabilità del flusso definito. Le simulazioni sono state utilizzate per popolare layer tematici nel viewer e per verificare la coerenza fra i risultati del modello e le informazioni archiviate nel database energetico. L'integrazione completa e automatizzata del motore

di simulazione su scala di distretto rimane un obiettivo di sviluppo futuro, ma il test dimostra che l'architettura adottata è in grado di ospitare strumenti di simulazione esterni mantenendo coerenza semantica e tracciabilità degli scambi.

6. Software, tool e risorse rilasciate

Istanze/servizi

- *Istanza 3DCityDB locale.* Implementata e configurata con lo schema di base CityGML e l'integrazione dell'Energy ADE; include il plugin Importer/Exporter per operazioni di scambio di dati CityGML.
- *Web viewer Rome Technopole.* Prototipo web basato su CesiumJS, con landing page dedicata (<https://technopole.shazarch.com/>) e interfaccia ottimizzata per l'uso da parte del personale amministrativo e del team di progetto. L'applicazione include controlli per la selezione dei principali livelli informativi (modello CityGML di base, risultati di simulazioni del team di Palermo per Valco San Paolo, asset e consumi elettrici e di gas di Roma Tre), funzioni di colorazione condizionale con scala lineare/logaritmica e legenda dinamica, aggiornamento dati via Google Sheets per aggiornamenti in tempo reale e flussi di lettura/scrittura per risultati di analisi e simulazioni, e accesso al menu di default di Cesium per viste personalizzate (usato anche per viste dedicate ai casi studio di Cesena, Civitavecchia).
- *Ambiente containerizzato e server dedicato.* Immagini Docker e configurazioni per l'esecuzione replicabile dei servizi (3DCityDB, Importer/Exporter, Web Client), predisposte per il deploy. Configurazione PC/server presso il Dipartimento per ospitare i servizi, predisposto per test avanzati e deploy interno.

Codici/prototipi

- *Script Python per importazione e modellazione.* Tool per la conversione di footprint e dati di altezza in modelli LoD2 (Building/BuildingPart), incluse routine per validazione geometrica, gestione dei sistemi di riferimento e generalizzazione dei parametri per uso multi-regione.
- *Script e query SQL specializzate.* Raccolta di query per l'estrazione di tabelle aggregate da 3DCityDB, destinate all'analisi energetica e all'esportazione verso strumenti esterni o fogli di calcolo collegati.
- *Prototipo di mappatura semantica con LLM.* Prompt e integrazione degli script in Python per supportare la normalizzazione di tipologie/usi edilizi provenienti da sorgenti eterogenee.

Note sull'uso e distribuzione

Le risorse rilasciate sono strutturate per favorire riproducibilità e trasferibilità: l'uso di Docker e la documentazione prodotta rendono le istanze replicabili su infrastrutture locali. I codici includono meccanismi di logging e controllo degli errori per supportare l'applicazione su dataset regionali diversi. Le componenti rilasciate sono state pensate come elementi modulari per essere integrate in workflow di ricerca e in futuri sviluppi operativi.

7. Limiti e mitigazioni

Limiti e mitigazioni applicate

Sono stati identificati i seguenti limiti operativi e metodologici nella fase corrente del progetto:

- *Qualità e completezza delle geometrie.* Alcune geometrie derivate dalle fonti hanno presentato discontinuità, errori topologici e mancante rappresentazioni di open-space, limitando l'uso diretto per simulazioni dettagliate. Abbiamo applicato interventi di affinamento selettivo su aree critiche, usando Blender e QGIS per la preparazione e il post-processing di mesh verificate. Queste azioni hanno ridotto gli errori maggiori e reso disponibili geometrie corrette per le aree prioritarie.
- *Granularità e copertura dei dati energetici.* Abbiamo rilevato dati energetici spesso aggregati o frammentari nel tempo, non sempre adeguati per analisi al livello dei singoli edifici amministrati dall'Università di Roma Tre. Per la raccolta e trascrizione controllata delle bollette 2022–2024 e degli altri dati energetici relativi ai siti Roma Tre, abbiamo adottato, dove necessario, procedure di disaggregazione dei consumi verso singoli edifici basate su volumi e identificativi aggiornati. Tali operazioni hanno aumentato la granularità utilizzabile per le analisi preliminari.

- *Criticità della rappresentazione di elementi necessari alle simulazioni.* Le aperture, il dettaglio delle coperture e le geometrie delle partizioni interne degli edifici costituiscono i limiti maggiori rilevati nelle fonti regionali. Le mitigazioni applicate hanno incluso esperimenti con mesh 3D (Google 3D Tiles) e con add-on Blender (Blosm [13], Up3date [14]) per verificare un workflow di arricchimento orientato al LoD3, e le procedure di selezione del subset di classi ed attributi CityGML ottimizzato per le simulazioni previste.
- *Variabilità dei dati semi-strutturati (PDF, APE).* I formati eterogenei e la qualità variabile delle bollette/APE (PDF, copie raster) hanno richiesto lo sviluppo e la validazione di pipeline basate su LLM per l'estrazione strutturata dei dati, con step di post-processing e controlli di confidenza. L'esperimento ha mostrato elevata precisione e ha reso operativa l'estrazione su larga scala con supervisione limitata dei dati delle bollette.
- *Sostenibilità computazionale su larga scala.* Sono stati identificati potenziali limiti di memoria/CPU su estensioni territoriali maggiori. Il progetto ha previsto: test di scalabilità su dataset comunali (Cesena, Civitavecchia) che hanno guidato l'ottimizzazione delle routine; containerizzazione (Docker) dell'ambiente e predisposizione di VM/PC server (Tecnopolo) per esecuzioni controllate; introduzione di logging e controlli delle risorse nelle pipeline. Queste misure hanno migliorato la prevedibilità delle risorse necessarie e abilitato i test alla scala più ampia.

Mitigazioni future

Le mitigazioni già applicate hanno ridotto le principali criticità operative e reso possibile l'esecuzione di analisi e demo su casi comunali e sui siti dell'Ateneo. Rimangono tuttavia necessari ulteriori interventi per raggiungere piena operatività e un livello più elevato di automazione. In primo luogo occorre completare il consolidamento di procedure LoD3 pragmatiche (documentazione delle policy, standard di semplificazione, flussi computer-aided di conversione mesh → CityGML) per rendere sostenibile l'adozione selettiva dei dettagli geometrici richiesti dalle simulazioni.

In secondo luogo è necessario avanzare l'automazione dell'integrazione simulativa: standardizzare i mapping fra attributi CityGML / Energy ADE e formati di input dei motori di simulazione, sviluppare pre-processor robusti per la generazione automatica dei file di input e definire casi pilota per la validazione di un flusso dinamico end-to-end (input dal viewer → CityGML → simulazione → re-import dei risultati nel viewer). Parallelamente, la pipeline LLM per l'estrazione da documenti può essere estesa con protocolli di aggiornamento continuo e procedure di controllo qualità più strutturate, così da ridurre ulteriormente l'intervento umano nelle revisioni e integrarla meglio con gli strumenti software allo stato più avanzato.

Infine, per garantire sostenibilità operativa su estensioni territoriali maggiori, è necessario completare le politiche di scala: partizionamento dei dataset, gestione di risultati intermedi, integrazioni localizzate anche manuali, ottimizzazione dei processi computazionali e dei requisiti hardware. Il completamento di questi elementi è condizione per la replicabilità e la continuità operativa dei workflow su casi regionali o nazionali.

8. Impatto atteso e prospettive future

Impatto atteso

Il progetto mira a produrre strumenti e procedure in grado di favorire la scalabilità e la replicabilità di soluzioni per la progettazione e la gestione dei Positive Energy Districts (PED). L'istanza 3DCityDB/CityGML, le pipeline riproducibili di ingestione e i prototipi di visualizzazione interoperabile costituiscono una piattaforma tecnica per collegare rappresentazioni geometriche e dati energetici, rendendo disponibili repertori informativi e KPI utilizzabili nei processi decisionali.

Ci si attende che tali componenti supportino la definizione di scenari di retrofit e di pianificazione energetica, facilitino la trasferibilità delle metodologie a partner istituzionali (in particolare nell'ambito di Rome Technopole e MakingPEDs) e contribuiscano alla formazione e alla disseminazione in network regionali e nazionali sul tema dei PED e degli UDT energetici.

Prospettive future

Per le attività future che potranno basarsi sulla ricerca condotta si individuano due direttrici principali: (i) miglioramento della qualità e della granularità dei dati per rendere operativa l'integrazione con motori per simulazioni tematiche; (ii) consolidamento dell'automazione e della generalizzazione delle pipeline in favore di interoperabilità e scalabilità. In particolare è possibile estendere il dettaglio dei dataset energetici (ad esempio, con tabelle temporali che includano anche l'uso degli spazi), consolidare procedure di validazione geometrica e semantica (incluse ulteriori tecniche di mappatura

assistita da LLM) e sviluppare interfacce stabili per il collegamento tra database, visualizzatore, e motori di simulazione. Dal punto di vista tecnico, gli sviluppi includono la trasformazione dei prototipi attuali in componenti stabili, documentati e riusabili in applicazioni operative per la transizione energetica urbana.

9. Conclusioni

Le attività del periodo di ricerca hanno definito e implementato le componenti fondamentali di un'infrastruttura geospaziale basata sullo standard CityGML orientata all'analisi energetica a scala di distretto. Abbiamo realizzato un'istanza operativa di 3DCityDB con integrazione dell'Energy ADE, sviluppato pipeline automatizzate per la generazione di modelli LoD2 e prototipato strumenti di visualizzazione interoperabili con collegamento a tabelle di dati esterne che semplificano l'aggiornamento e la verifica dei dati anche per utenze non esperte. In parallelo sono stati messi a punto metodi per l'integrazione di dati energetici aggregati e per la normalizzazione semantica delle tassonomie tramite procedure assistite da LLM. Questi risultati forniscono una base tecnica riproducibile e modulare per agevolare la valutazione e la progettazione dei PED.

Le prospettive operative prevedono la transizione da prototipi a componenti integrate e documentate, con attenzione alla replicabilità e alla definizione di KPI utili per valutare efficacia e trasferibilità delle soluzioni in contesti pilota. L'obiettivo a medio termine è rendere disponibili flussi di lavoro robusti per l'integrazione dinamica dei prodotti di simulazione nel visualizzatore, e per il supporto a decisioni di retrofit e pianificazione energetica su scala distrettuale. Il lavoro svolto delinea una piattaforma metodologica e tecnica solida su cui concentrare gli sviluppi necessari a estendere copertura, qualità e automazione dei processi per la realizzazione operativa di PED.

Prodotti scientifici e disseminazione

Article in Journal. Marrone P., Civiero P., D'Autilia R., **Palma, V.** (2025). "A model for the co-production of knowledge in energy-related decision-making processes". *TECHNE-Journal of Technology for Architecture and Environment*, (30), 260-268.

Article in Journal. Cellura M., Civiero P., Guarino F., Ilardi L., Longo S., Marrone P., Palma V. (in press). "Towards a Digital Twin of Building Districts: An Energy Simulation Instrument for the Integration of the CITYGML Protocol". *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*.

Chapter in Volume. **Palma V.**, Civiero P., Marrone P., Panella G., Eusebio A. (in press), "Innovative CityGML-Based Urban Digital Twins Supporting Energy Transition: an interoperable, replicable and scalable methodology for PEDs implementation in Italy", Urban Europe Research Alliance (UERA) 2025 Conference on Sustainable and Climate-Neutral Cities for Inclusive and Equitable Urban Future, 26–28 February 2025, Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) in Rome, Italy.

Lecture in Seminar. Marrone P., **Palma V.** (2025). "La sostenibilità nel progetto a scala di distretto. Digitalizzazione e transizione energetica nel progetto di rigenerazione per il Rome Technopole". Seminar: *Seminario disciplinare CEAR 08/C e CEAR 03/C. Esperienze di ricerca: metodi, strumenti e applicazioni*. Università degli Studi Tre, Dipartimento di Architettura, Dottorato di ricerca in Architettura Città Paesaggio, 23 September 2025.

Lecture in Seminar. **Palma V.** (2024). "Metodologie per la digitalizzazione della città. Le esperienze di Roma, Civitavecchia e Cesena". Seminar: *I Distretti ad Energia Positiva - dalla pianificazione all'implementazione*. Comune di Cesena, Ex Macello Cesena, via Mulini 25, 5 February 2025.

Lecture in Seminar. **Palma V.** (2024). "Il 'gemello digitale'. Un database geospaziale e un sistema di gestione per i Positive Energy Districts". Seminar: *C.Lever - Cesena leveraging cross synergies towards PED*. C.Lever, Comune di Cesena (online), 17 December 2024.

Lecture in Seminar. Palma V. (2024). "Digitalization. City twins, city models, and the rise of AI". Seminar: *Shaping Sustainable Cities: Policies and Planning for the Future*. Green University / Università degli Studi Roma Tre (online), 13 December 2024.

Lecture in Workshop. Marrone P., Civiero P., Palma V. (2024). "Metodologie e strumenti per l'elaborazione del quadro conoscitivo per la digitalizzazione e transizione energetica." Workshop: *Digital Twin, integrazione di sistemi GIS e BIM per la transizione digitale. Il paradigma informativo nella rappresentazione e gestione dell'architettura e del territorio*, Università degli Studi Roma Tre, Roma, 6 May, 2024.
<http://www.scuolaiaad.it/component/zoo/item/digital-twin-integrazione-di-sistemi-gis-e-bim-per-la-transizione-digitale-2>

Web service. Rome Technopole - CityGML-based Web Visualizer (2024-2025).
<https://technopole.shazarch.com/>

Research deliverable. Bilbao A., Maynou M., Monzó T. [lead authors] et al. (June, 2024). "D5.1 - Definition and design of the web platform". Internal deliverable for MakingPEDs - Decision-Making Digital Twins for Climate Neutral PEDs, WP5.

Research deliverable. Civiero P., Ortiz J., Spohr J. [lead authors] et al. (July, 2024). "D2.1 - Full harmonized inputs assessment framework". Internal deliverable for MakingPEDs - Decision-Making Digital Twins for Climate Neutral PEDs,

Bibliografia

Agugiaro G., Benner J., Cipriano P., Nouvel R. (2018). "The Energy Application Domain Extension for CityGML: Enhancing Interoperability for Urban Energy Simulations". *Open Geospatial Data, Software and Standards* (3) 1.
<https://doi.org/10.1186/s40965-018-0042-y>

Bibri S.E., Huang J., Jagatheesaperumal S.K., 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*, 20, 100433. <https://doi.org/10.1016/j.esse.2024.100433>

Biljecki F. (2017). Level of detail in 3D city models. <https://doi.org/10.4233/uuid:f12931b7-5113-47ef-bfd4-688aae3be248>

Biljecki F., Kumar K., Nagel C. (2018). "CityGML Application Domain Extension (ADE): Overview of Developments". *Open Geospatial Data, Software and Standards* (3) 1. <https://doi.org/10.1186/s40965-018-0055-6>

Bolton A., Butler L., Dabson I., Enzer M., Evans M., Fenemore T., Harradence F., Keaney E., Kemp A., Luck A., Pawsey N., Saville S., Schooling J., Sharp M., Smith T., T ennison J., Whyte J., Wilson A., Makri C. (2018). *Gemini Principles* [Report]. CDBB. <https://www.cdbb.cam.ac.uk/system/files/documents/TheGeminiPrinciples.pdf>

Civiero P., Pascual J., Arcas Abella J., Bilbao Figuero A., Salom J. (2021). "PEDRERA. Positive Energy District Renovation Model for Large Scale Actions". *Energies* 2021, 14, 2833. <https://doi.org/10.3390/en14102833>

Ferré-Bigorra J., Casals M., Gangolells M. (2022). "The adoption of urban digital twins". *Cities*, 131, 103905.
<https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.103905>

Fuller A, Fan Z., Day C., Barlow C. (2002). "Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research". *IEEE Access*, vol. 8, 108952–108971. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>

Grieves M., Vickers J. (2017). "Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems." In Kahlen F.-J., Flumerfelt S., Alves A. (eds), *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, 85–113. Springer, Cham.
<https://doi-org.ezproxy.biblio.polito.it/10.1007/978-3-319-38756-7>

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

- Guo F., Ling M., Wu J., Chen K., Fang W., Broyd T. (2025). "A systematic review of multi-scale digital modelling in sustainable urban design and management". *Sustainable Cities and Society*, 119, 106103. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.106103>
- Jeddoub I., Nys G.A., Hajji R., Billen R. (2023). "Digital Twins for cities: Analyzing the gap between concepts and current implementations with a specific focus on data integration". *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 122, 103440. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103440>
- Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. (2018). "Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification". *IFAC-PapersOnLine* (51) 11, 1016–1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>
- Lehtola V.V., Koeva M., Elberink O.S., Raposo P., Virtanen J.P., Vahdatikhaki F., Borsci S. (2022). "Digital twin of a city: Review of technology serving city needs". *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 114, 102915. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102915>
- Vitanova L., Petrova-Antonova D., Shirinyan E. (2025). "Urban digital twin for assessing and understanding urban Heat Island impacts". *Urban Climate*, 62, 102530. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2025.102530>
- Wan L., Nochta T., Schooling J.M. (2019). "Developing a City-Level Digital Twin Propositions and a Case Study". *International Conference on Smart Infrastructure and Construction 2019 (ICSIC)*, 187–194. <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/icsic.64669.187>
- Weil C., Bibri S.E., Longchamp R., Golay F., Alahi A. (2023). "Urban Digital Twin Challenges: A Systematic Review and Perspectives for Sustainable Smart Cities". *Sustainable Cities and Society*, 99, 104862. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104862>
- Yao Z., Nagel C., Kunde F. et al. (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* (3) 5. <https://opengeospatialdata.springeropen.com/articles/10.1186/s40965-018-0046-7>

Siti web

- [1] <https://www.ogc.org/standard/citygml>
- [2] <https://github.com/3dcitydb/energy-ade-citydb>
- [3] <https://github.com/3dcitydb>
- [4] <https://qgis.org/>
- [5] <https://www.blender.org>
- [6] <https://cesium.com>
- [7] <https://www.docker.com>
- [8] <https://geoportale.regione.lazio.it/documents/261>
- [9] https://geodati.gov.it/geoportale/images/Specifica_GdL2_09-05-2016.pdf
- [10] <https://platform.openai.com/>
- [11] <https://developers.google.com/maps/documentation/tile/3d-tiles>
- [12] <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/3D>
- [13] <https://github.com/vvoovv/blosm>
- [14] <https://github.com/cityjson/Up3date>
- [15] <https://www.istat.it/en/data/open-data/>
- [16] <https://www.iesve.com/products/icd>
- [17] <https://geoportale.regione.emilia-romagna.it/approfondimenti/database-topografico-regionale>
- [18] <https://plugins.qgis.org/plugins/citydb-tools>
- [19] <https://plugins.qgis.org/plugins/Qgis2threejs>
- [20] <https://ion.cesium.com>
- [21] <https://earth.google.it>
- [22] <https://workspace.google.com/products/sheets/>

Immagini

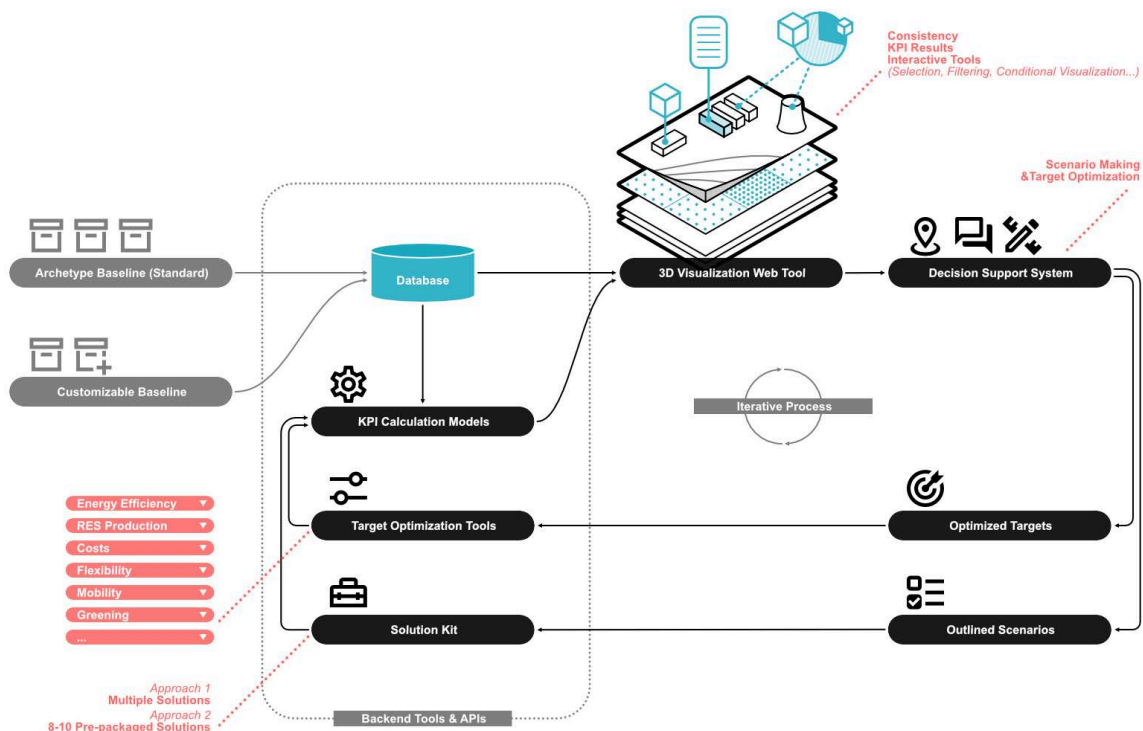


Fig. 1. Quadro metodologico proposto dal progetto: un processo iterativo utilizza il database geospaziale e il repertorio di soluzioni per generare scenari di trasformazione.

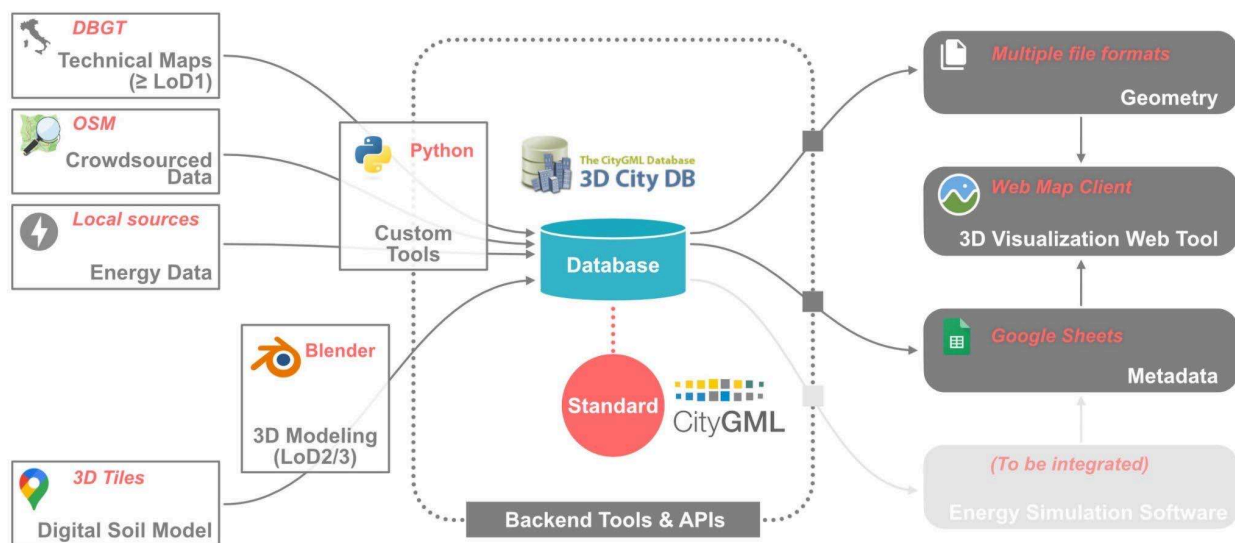


Fig. 2. Diagramma dei componenti software che garantiscono lo studio e la definizione del flusso di dati attraverso il database geospaziale.

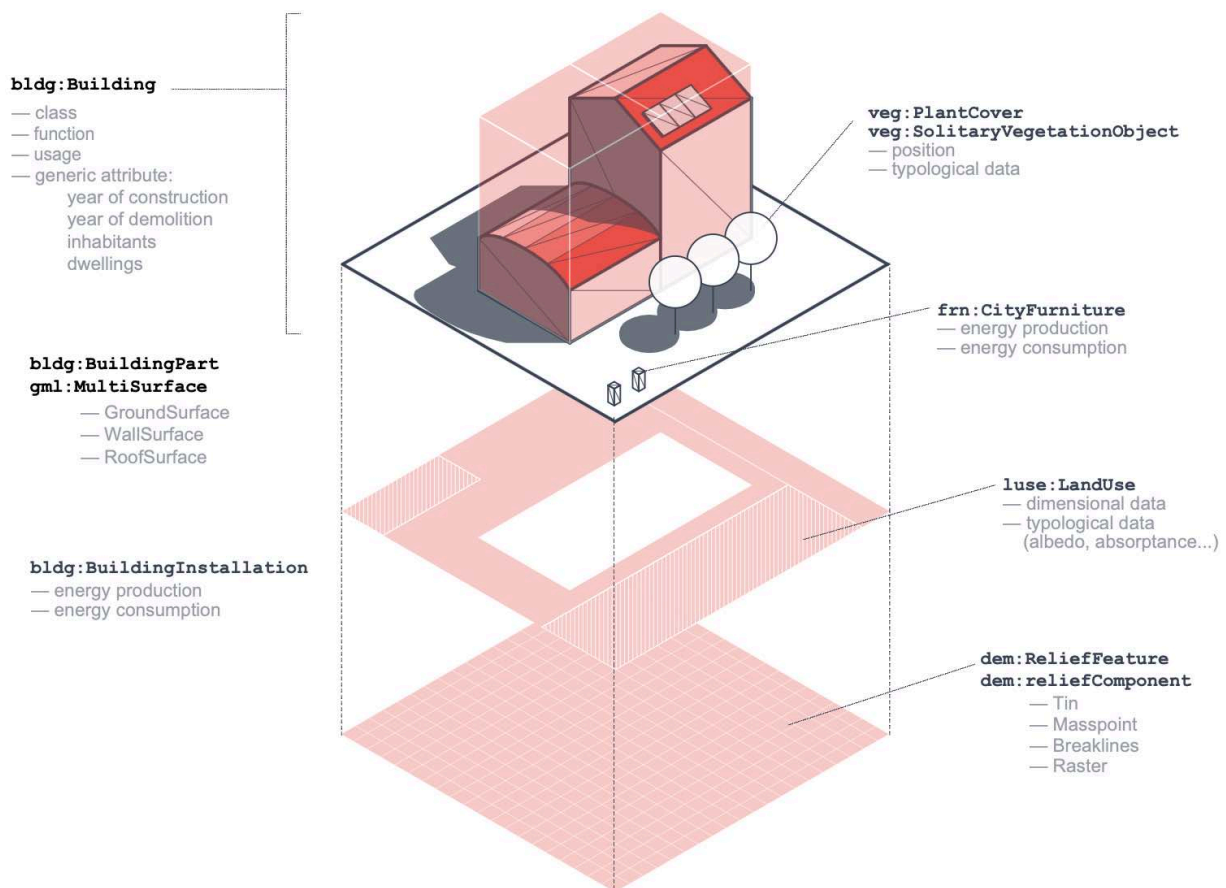


Fig. 3. Note schematiche per la selezione di classi e attributi CityGML ai fini della realizzazione del modello, con particolare attenzione al dominio energetico. Allo stato attuale, parte degli elementi e delle caratteristiche rappresentate è stata considerata solo nell'ambito del progetto MakingPEDs (ad esempio, il modello del suolo). [Immagine dell'autore elaborata da Eusebio A.]

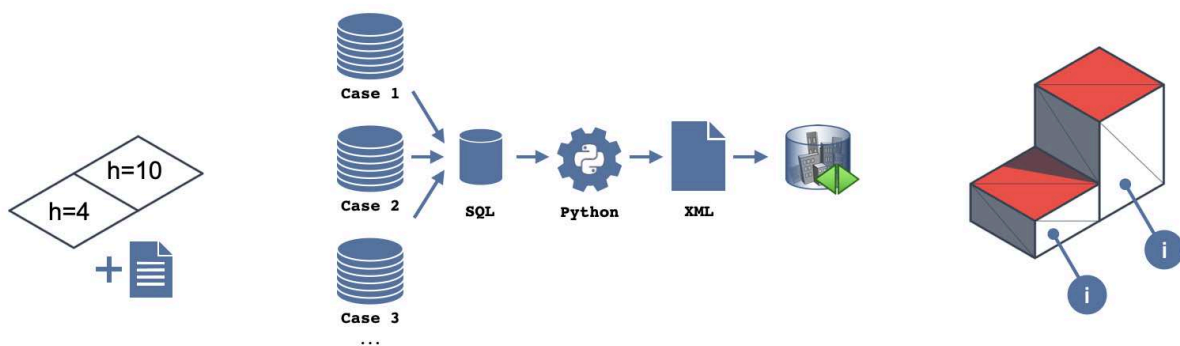


Fig. 4. Schema della generazione del modello CityGML (in formato GML/XML caricato in 3DCityDB) a partire dal set di dati assegnati in input allo script Python sviluppato.

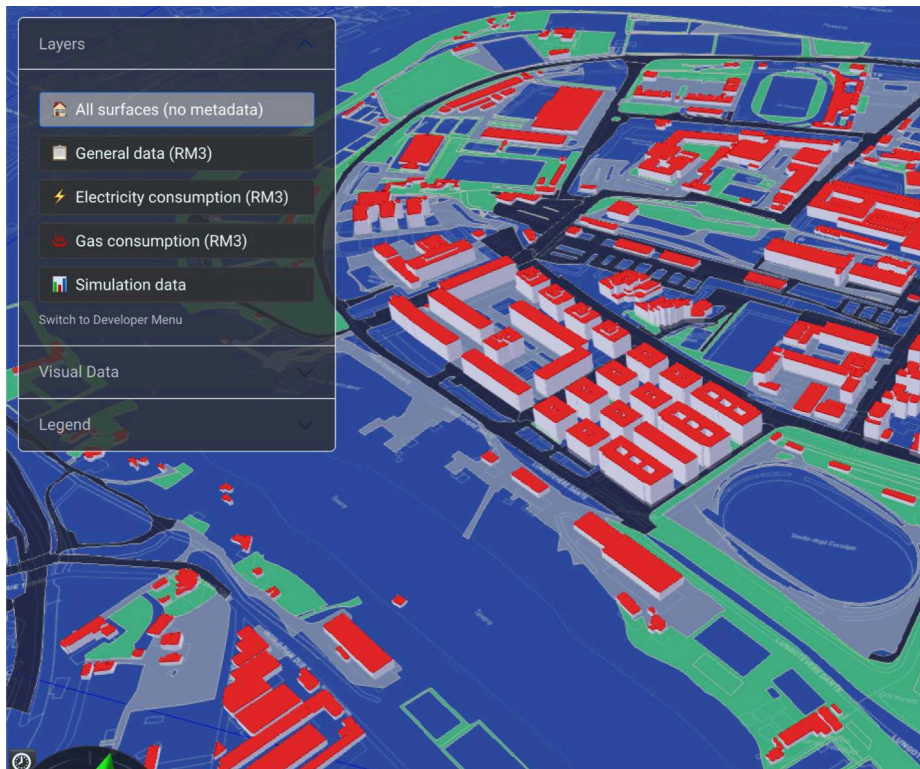


Fig. 5. Schermata del visualizzatore personalizzato basato su 3DCityDB Web Map Client (CesiumJS). In alto a sinistra, il menu di selezione dei livelli tematici.

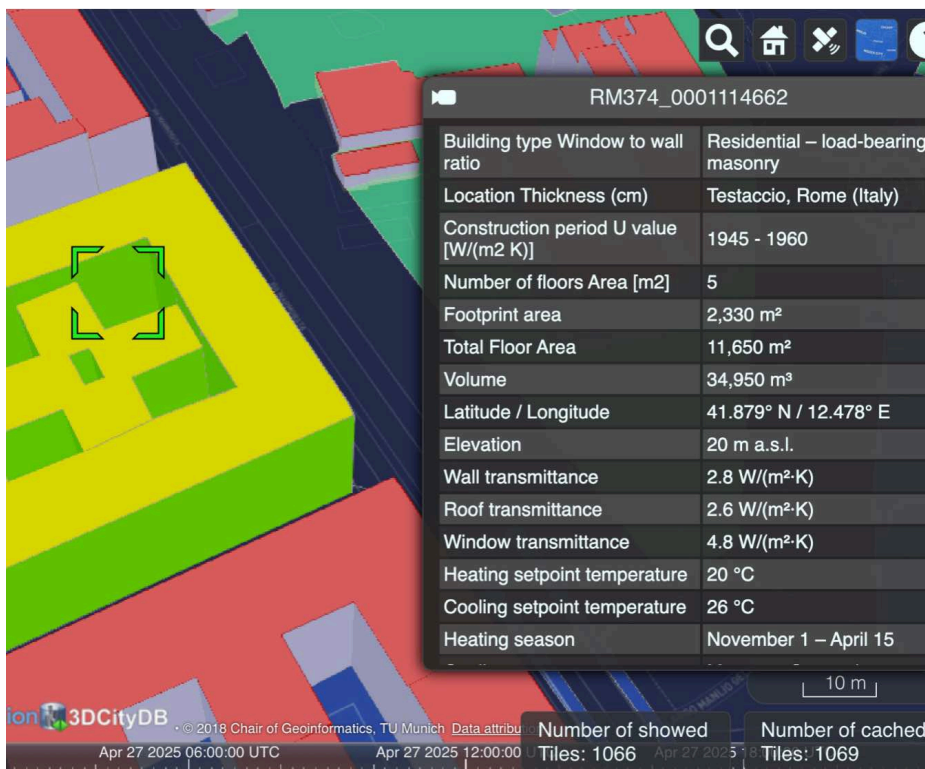


Fig. 6. Dettaglio dell'UDT che mostra un edificio residenziale selezionato e i relativi dati di caratterizzazione utilizzati per la simulazione del modello, estratti dinamicamente dal documento Google Sheets collegato.

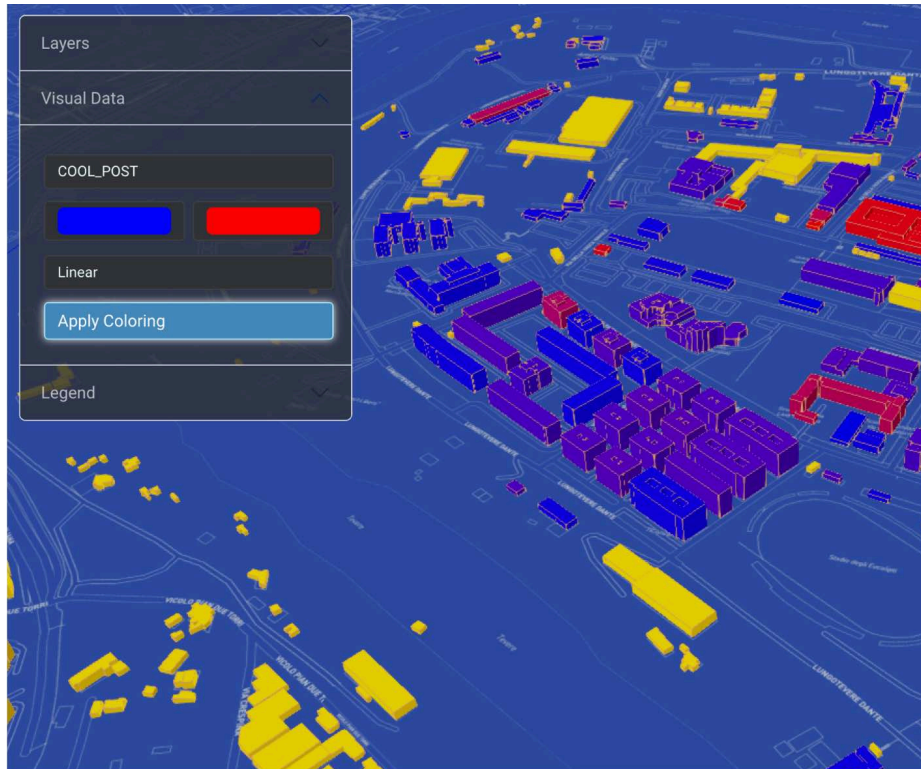


Fig. 7. Schermata del visualizzatore che mostra le funzioni di colorazione condizionale basate sui dati collegati attraverso documenti Google Sheets.