

Università degli Studi di Padova



Dipartimento dei Beni Culturali: archeologia, storia dell'arte,  
del cinema e della musica

Corso di Laurea Magistrale  
in Scienze Archeologiche

**Modelli digitali *reality-based* multiscalari per l'analisi, lo studio e la  
valorizzazione dei centri storici abbandonati.  
Dal rilievo integrato all'HBIM e alle piattaforme 3D geospaziali.  
Il caso di Campo di Brenzone (Verona)**

Candidato: Cristiano Miele  
Matr.: 2104221

Relatore: prof.ssa Alexandra Chavarria Arnau

Anno accademico  
2025/2026

## RINGRAZIAMENTI

Ad Archetipo, Antonio, Federico ed Eleonora  
senza i quali sarebbe stato difficile...

## ***ABSTRACT***

La tesi affronta il tema del rilievo, analisi e valorizzazione dei centri storici minori soggetti a processi di spopolamento e abbandono, proponendo un approccio integrato basato su modelli digitali *reality-based* multiscalari, modellazione HBIM e piattaforme geospaziali tridimensionali *web-oriented* per l'aggregazione e condivisione dei dati. La ricerca propone strumenti metodologici in grado di costruire basi conoscitive condivise per lo studio, la gestione e la valorizzazione di questi contesti, superando la frammentazione delle informazioni e i limiti delle metodologie tradizionali di documentazione.

Il lavoro definisce un *workflow* operativo multi-sensore e multi-scala che integra tecniche di rilievo GNSS, topografia, UAV con sensori LiDAR e RGB, fotogrammetria *Structure-from-Motion* e *laser scanner* terrestre. I modelli *reality-based* prodotti a diverse risoluzioni costituiscono la base per processi di segmentazione e per la successiva modellazione HBIM, con conversione delle geometrie in oggetti IFC interrogabili e collegati a database esterni contenenti informazioni storiche e stratigrafiche.

La metodologia viene applicata al caso studio di Campo di Brenzone, piccolo borgo sulla sponda veronese del lago di Garda, per verificare la solidità dell'approccio proposto.

I risultati consistono nella realizzazione di un sistema digitale multiscalare composto da modelli territoriali, urbani e architettonici interoperabili, collegati a database informativi e integrati in una piattaforma geospaziale 3D basata su CesiumJS.

L'approccio proposto dimostra come la digitalizzazione possa costituire uno strumento efficace per l'organizzazione e l'integrazione delle conoscenze, favorendo nuove forme di analisi, gestione e valorizzazione dei centri storici abbandonati.

## INDICE

1. INTRODUZIONE.....	1
2. CENTRI STORICI ABBANDONATI .....	4
2.1. Il fenomeno dello spopolamento nei centri minori italiani .....	4
2.2. Processi di degrado e perdita di funzione degli insediamenti storici .....	6
2.3. La conoscenza per tutela e la valorizzazione .....	9
2.4. Limiti delle metodologie di documentazione.....	10
3. TECNOLOGIE DIGITALI PER IL PATRIMONIO CULTURALE.....	13
3.1. Metodologie di rilievo integrato.....	13
3.2. Modelli 3D <i>reality-based</i> per lo Scan-to-BIM.....	18
3.3. Dal modello <i>reality-based</i> alla modellazione interpretativa .....	20
3.4. Integrazione e aggregazione dei dati.....	27
4. STRATIGRAFIA MURARIA E MODELLAZIONE DIGITALE .....	31
5. METODOLOGIA .....	37
5.1. Attività preliminari .....	38
5.2. Strumenti .....	39
5.3. Modelli <i>reality-based</i> e integrazione tra <i>dataset</i> .....	43
5.4. Interpretazione e segmentazione: dal DMR all'HBIM .....	45
5.5. Modello IFC e <i>database</i> stratigrafico.....	48
6. IL CASO DI CAMPO DI BREZZONE .....	53
6.1. Progetto Archivio di Comunità' .....	53
6.2. Inquadramento territoriale e storico .....	54
6.3. Inquadramento urbanistico e architettonico .....	56
6.4. Declino, abbandono e rinascita .....	58
6.5. Rilievi.....	60
6.5.1. <i>Attività propedeutiche</i> .....	60
6.5.2. <i>Rilievo topografico</i> .....	61
6.5.3. <i>Rilievo LiDAR da piattaforma UA</i> .....	62

6.5.4.	<i>Rilievo RGB da piattaforma UA</i> .....	63
6.5.5.	<i>Rilievo laser scanner terrestre</i> .....	64
6.6.	Post processing .....	64
6.7.	Output: modelli <i>reality-based</i> come premessa alla segmentazione.....	67
6.8.	Dalla segmentazione alla modellazione HBIM .....	69
7.	RISULTATI.....	72
7.1.	Modello a scala territoriale.....	72
7.2.	Modello a scala urbana.....	73
7.3.	Modelli a scala architettonica.....	73
7.4.	Modello HBIM urbano e architettonico .....	75
8.	INTEGRAZIONE IN AMBIENTE 3D GEOSPAZIALE .....	80
8.1.	Dalla <i>mesh realty-based</i> alla piattaforma 3D .....	83
8.2.	Visualizzazione e interrogazione dei modelli multiscalari.....	86
9.	MODELLI 3D PER LA COMUNICAZIONE E LA VALORIZZAZIONE.....	89
10.	CONCLUSIONI.....	97
	INDICE DELLE FIGURE .....	101
	INDICE DELLE TABELLE.....	105
	BIBLIOGRAFIA .....	106

## 1. INTRODUZIONE

Il fenomeno dell'abbandono dei centri storici costituisce una delle principali criticità del patrimonio territoriale italiano, interessando aree montane, lacustri e interne, dove, a partire dalla seconda metà del Novecento, trasformazioni economiche, industrializzazione e mutamenti nelle reti infrastrutturali ne hanno determinato un progressivo spopolamento generando condizioni diffuse di marginalità territoriale e di crisi del sistema insediativo storico<sup>1</sup>.

La progressiva perdita dell'originaria funzione insediativa ha generato processi di degrado che ne hanno o ne stanno compromettendo leggibilità, stato conservativo e stabilità, mettendone a rischio l'integrità strutturale e la fruibilità<sup>2</sup>.

All'interno di questo quadro, gli studi sul paesaggio storico e sulla morfologia urbana evidenziano come la conoscenza sistematica del patrimonio costruito costituisca il presupposto fondamentale per qualsiasi strategia di tutela e valorizzazione, che solo attraverso una lettura strutturata delle trasformazioni edilizie e urbane rende possibile comprendere i processi storici che hanno generato gli insediamenti e definire interventi coerenti con i loro caratteri morfologici e tipologici<sup>3</sup>. In assenza di un quadro conoscitivo organico, gli interventi di recupero risultano spesso frammentari e privi di una vision d'insieme, con il rischio di alterare i caratteri storici dei centri e ridurre il valore culturale.

Le metodologie tradizionali di documentazione, basate su rilievi parziali, archivi cartacei e schede descrittive, mostrano tuttavia limiti evidenti in termini di integrazione e aggregazione tra dati, aggiornamento nel tempo e interoperabilità tra strumenti, con la conseguente definizione di quadri conoscitivi che per la loro frammentarietà risultano difficilmente utilizzabili come base informativa per progetti di recupero o strategie di valorizzazione.

Lo sviluppo di tecnologie di rilievo digitale e di modelli tridimensionali ha aperto nuove prospettive per la conoscenza del patrimonio storico, grazie all'impiego di metodologie basate su *laser scanning* e fotogrammetria *Structure From Motion* (SfM) capaci di produrre modelli tridimensionali molto accurati integrati con informazioni storiche, materiche e conservative<sup>4</sup>.

In questo contesto, l'approccio *Heritage Building Information Modeling* (HBIM) consente di connettere la geometria tridimensionale con dati stratigrafici, costruttivi e conservativi, trasformando il rilievo da semplice rappresentazione geometrica a vera e propria infrastruttura informativa del patrimonio, capace di supportare analisi, gestione e conservazione nel tempo<sup>5</sup>.

---

<sup>1</sup> DEMATTEIS 1995; MAGNAGHI 2000.

<sup>2</sup> CHOAY 2001, pp. 9-25; SETTIS 2010, pp. 11-34.

<sup>3</sup> MURATORI 1960, pp. 25-48; BENEVOLO 1993, pp. 7-28; CANIGGIA, MAFFEI 2001, pp. 31-66.

<sup>4</sup> REMONDINO, CAMPANA 2014, p. 11-30; FAI, RAFEIRO 2014.

<sup>5</sup> MURPHY, MCGOVERN e PAVIA 2009, pp. 311-327; MURPHY, MCGOVERN, PAVIA 2013, pp. 89-100; BRUMANA *et al.* 2018, pp. 57-71; BANFI 2020, pp. 23-31.

Parallelamente l'evoluzione degli *standard* geospaziali permette di integrare modelli HBIM in sistemi urbani tridimensionali basati su *standard* come *CityGML*, favorendo la gestione e la visualizzazione dei dati a scala urbana e territoriale e aprendo la strada a piattaforme digitali tridimensionali condivise<sup>6</sup>.

All'interno di questo scenario metodologico, I modelli digitali *reality-based* (DMR) multiscalari assumono un ruolo strategico per lo studio dei centri storici abbandonati, poiché consentono di documentare contesti fragili e in rapido degrado, integrare dati a scala territoriale, urbana ed architettonica, supportare analisi storiche e stratigrafiche e costituire la base per la costruzione di modelli 3D del patrimonio, favorendo al tempo stesso la comunicazione e la valorizzazione attraverso piattaforme *web* tridimensionali.

La presente tesi costituisce una riflessione metodologica su Campo di Brenzone, piccolo insediamento storico situato sulle pendici del Monte Baldo in provincia di Verona, che costituisce un caso emblematico di centro minore soggetto a progressiva perdita di funzioni e di abitanti. In questo contesto, la carenza di un quadro conoscitivo unitario, aggiornato e condivisibile ha evidenziato la necessità di individuare una metodologia efficace per il rilievo, lo studio, l'analisi e la condivisione dei dati, in grado di costituire una base informativa solida a supporto di processi decisionali, pianificazione degli interventi e strategie di valorizzazione.

In questo quadro teorico e metodologico viene proposto l'impiego di DMR multiscalari come strumenti per l'analisi, lo studio e la valorizzazione dei centristorici abbandonati, attraverso l'integrazione tra rilievo, HBIM e piattaforme 3D geospaziali tridimensionali, applicati ad una selezione di edificio campione.

In una prima fase verrà effettuato un breve inquadramento storico, cartografico e documentario del borgo, finalizzato alla comprensione dell'evoluzione morfologica dell'insediamento e alla selezione dei casi studio.

La seconda fase sarà dedicata alla descrizione delle attività di rilievo integrato, attraverso l'impiego combinato di *laser scanner* terrestre, fotogrammetria da *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV), sistemi *Global Navigation Satellite System* (GNSS) e stazione totale, per l'acquisizione di dati tridimensionali a diverse scale e la generazione dei modelli.

Nella terza fase I modelli verranno organizzati secondo una struttura multiscalare ed i singoli edificio campione segmentati e trasformati in modelli tridimensionali semplificati.

La quarta fase riguarderà la costruzione dei modelli informativi in ambiente HBIM mediante l'associazione ad un database esterno.

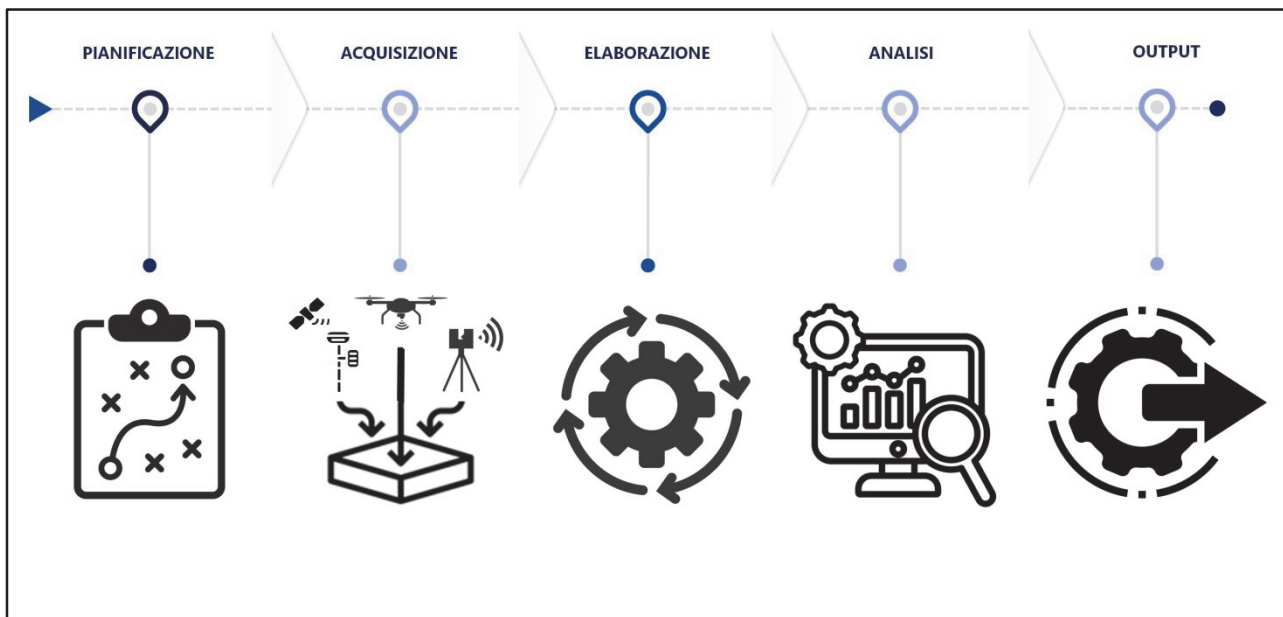
---

<sup>6</sup> KOLBE 2009, 15-25; BILJECKI, LEDOUX e STOTER 2015, pp. 1-17.

I modelli verranno successivamente integrati in una piattaforma 3D geospaziale basata su motore CesiumJS, completando il flusso metodologico dal rilievo alla visualizzazione e gestione dei dati in ambiente *web*.

Infine, verranno esplorate sinteticamente le potenzialità dei modelli tridimensionali come strumenti di comunicazione, fruizione e valorizzazione del patrimonio storico, con particolare riferimento ai contesti caratterizzati da condizioni di abbandono o scarsa accessibilità.

Tabella 1 – Rappresentazione *workflow*.



Il lavoro sviluppato intende proporsi come modello sperimentale finalizzata alla verifica operativa dell'approccio metodologico proposto. L'attività condotta in campo rappresenta quindi un punto di partenza per un futuro sviluppo progettuale esteso all'intero insediamento e l'occasione per accertare concretamente potenzialità, limiti e criticità delle metodologie adottate.

In questa prospettiva, la tesi concentra l'analisi su alcuni settori ritenuti maggiormente significativi dal punto di vista morfologico, architettonico e stratigrafico, utilizzati come casi studio per valutare l'efficacia degli strumenti e delle procedure proposte e per definire un *workflow* replicabile su scala più ampia.

## 2. CENTRI STORICI ABBANDONATI

### 2.1. Il fenomeno dello spopolamento nei centri minori italiani

Il fenomeno dell'abbandono dei centri storici minori rappresenta una delle principali criticità del patrimonio territoriale italiano contemporaneo, interessando un sistema insediativo diffuso che costituisce una componente fondamentale dell'identità storica e paesaggistica del Paese. La struttura policentrica dell'Italia, caratterizzata dalla presenza di migliaia di borghi e nuclei storici di piccola scala, ha prodotto nel tempo un patrimonio edilizio stratificato e fortemente connesso alle dinamiche socio-economiche locali. Tuttavia, a partire dalla seconda metà del Novecento, processi di industrializzazione, trasformazioni economiche e riorganizzazione delle reti infrastrutturali hanno determinato un progressivo fenomeno di spopolamento delle aree interne e marginali, con conseguente perdita delle funzioni originarie degli insediamenti minori<sup>7</sup> (**fig. 1**).

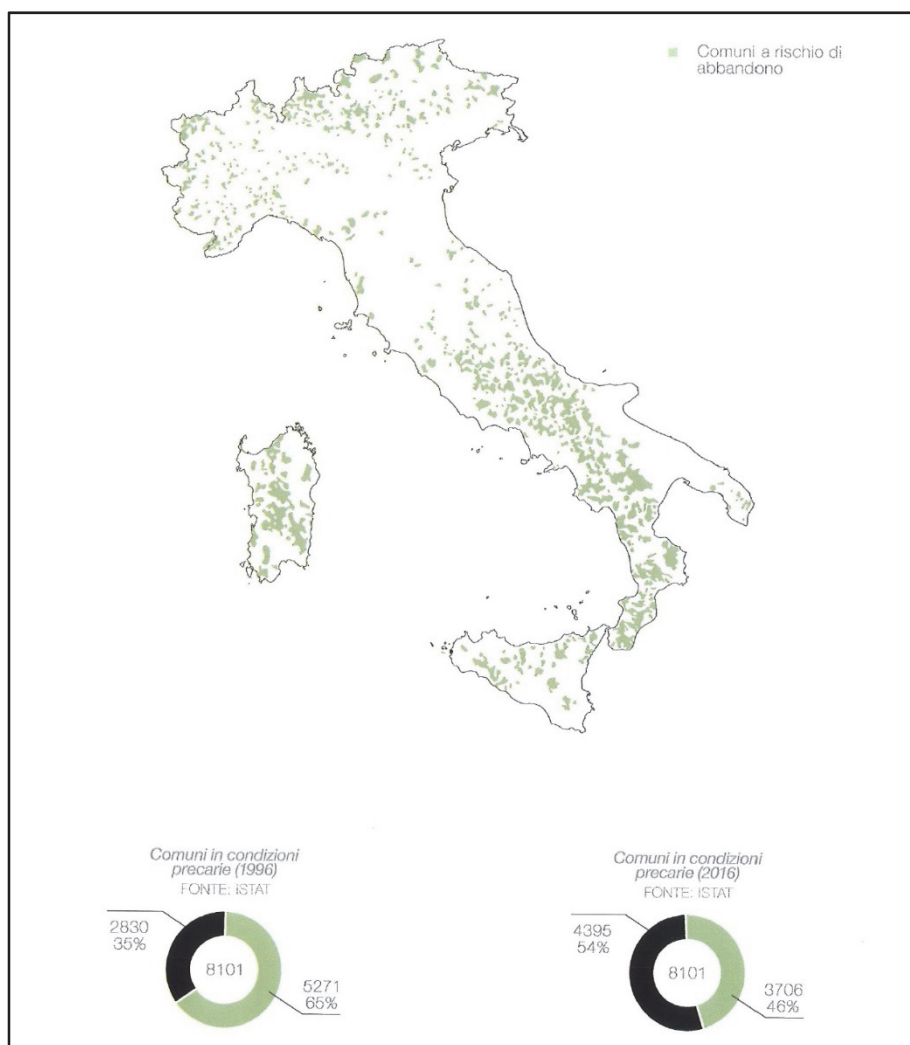


Figura 1 – Distribuzione dei comuni a disagio insediativo 1996 – 2016 (da SACCHETTI 2022, p. 10)

<sup>7</sup> DE MATTEIS 1995, pp. 45-62; MAGNAGHI 2000, pp. 51-70.

Il fenomeno dell'abbandono si è intensificato in particolare nel secondo dopoguerra, periodo in cui numerosi borghi sono stati progressivamente dismessi a favore delle aree urbane, generando un patrimonio edilizio diffuso in condizioni di vulnerabilità crescente<sup>8</sup>.

L'abbandono non rappresenta soltanto una dinamica demografica, ma implica una trasformazione profonda del paesaggio costruito, con la perdita di continuità manutentiva, la progressiva instabilità strutturale e la riduzione della leggibilità storica dei tessuti urbani minori.

Il dibattito disciplinare sui centri storici, sviluppatosi soprattutto a partire dagli anni Settanta, ha progressivamente superato una visione limitata al singolo edificio, proponendo una lettura sistemica in cui il valore risiede nella relazione tra elementi architettonici, morfologia urbana e contesto territoriale<sup>9</sup>. In questo quadro, i centri minori assumono un ruolo particolarmente significativo, poiché rappresentano esempi di evoluzione storica stratificata spesso conservata in forme meno alterate rispetto ai contesti urbani maggiori. Tuttavia, la loro tutela risulta complessa proprio a causa della marginalità geografica e delle condizioni di accessibilità ridotta (**fig. 2**).



**Figura 2 – Campo di Brenzone (VR) – Panoramiche delle condizioni di accessibilità (foto dell'autore, 2025).**

Uno degli aspetti più rilevanti riguarda infatti la difficoltà fisica di accesso a tali contesti. Numerosi borghi abbandonati risultano raggiungibili esclusivamente tramite sentieri escursionistici o strade sterrate, mentre in altri casi le modalità di visita risultano limitate o vietate per motivi di sicurezza<sup>10</sup>. Questa condizione produce conseguenze dirette sulle possibilità di studio e documentazione: la complessità morfologica dei luoghi, la presenza di ruderi instabili e la mancanza di infrastrutture adeguate rendono spesso impossibile l'applicazione sistematica di metodologie di rilievo

---

<sup>8</sup> DALLA BONA, *Dai ruderi nuova vita*. Laurea Magistrale. Università di Trento. Dipartimento di Ingegneria Civile Ambientale Meccanica, 2022, pp. 32-48.

<sup>9</sup> CHOAY 2001, pp. 145-168; BENEVOLO 1993, pp. 9-28.

<sup>10</sup> DALLA BONA 2022, p. 71-89.

tradizionali. Ne deriva una conoscenza frammentaria, basata su dati incompleti o raccolti in tempi differenti, che compromette la possibilità di costruire un quadro conoscitivo coerente e aggiornato. A ciò si aggiunge il problema della progressiva perdita materiale del patrimonio. L'assenza di interventi manutentivi e la continua esposizione agli agenti atmosferici accelerano i processi di degrado, alterando la leggibilità stratigrafica e rendendo sempre più difficile distinguere le fasi evolutive dell'insediamento (**fig. 3**). Questo tema è centrale nelle teorie del restauro contemporaneo, che individuano nella conoscenza preliminare e nella documentazione scientifica il fondamento di qualsiasi intervento conservativo. La stessa impostazione preventiva, richiamata nel concetto di Carta del Rischio, evidenzia come la gestione del patrimonio debba basarsi sulla valutazione sistematica della vulnerabilità e della pericolosità, trasformando la documentazione in uno strumento operativo di pianificazione e prevenzione<sup>11</sup>.



Figura 3 – Apparati radicali infestanti con conseguente perdita della leggibilità degli edifici (foto dell'autore, 2025).

## 2.2. Processi di degrado e perdita di funzione degli insediamenti storici

Lo spopolamento dei centri minori non rappresenta unicamente un fenomeno demografico, ma si traduce in un processo complesso di trasformazione urbana e degrado progressivo del patrimonio edilizio e paesaggistico. La perdita delle funzioni abitative e produttive determina infatti l'interruzione dei cicli di manutenzione ordinaria, accelerando processi di deterioramento del costruito e modificando in modo significativo gli equilibri tra ambiente e costruito<sup>12</sup>. In assenza di una continuità d'uso, il patrimonio costruito tende a perdere progressivamente il proprio ruolo funzionale e simbolico, entrando in una condizione di vulnerabilità crescente che coinvolge sia la dimensione materiale sia quella culturale.

---

<sup>11</sup> BRANDI 1963, pp. 80-91; FIORANI 2019, pp. 102-115; DELLA TORRE 2020, pp. 15-38.

<sup>12</sup> BRANDI 1963, pp. 101-123; FIORANI 2019, pp. 130-143.

Il degrado non interessa soltanto i singoli edifici, ma coinvolge l'intero sistema urbano, alterando le relazioni spaziali, sociali e funzionali che costituiscono l'identità storica dei luoghi. I processi di abbandono tendono a generare dinamiche di regressione morfologica nelle quali gli spazi pubblici perdono progressivamente funzione e leggibilità<sup>13</sup>. Nei borghi abbandonati italiani si riscontra infatti una forte variabilità delle condizioni conservative, che spaziano da nuclei ancora parzialmente integri a contesti ridotti allo stato di rudere, spesso aggravati da eventi naturali quali frane, dissesti idrogeologici o sismicità, fattori che aumentano ulteriormente il grado di rischio e la fragilità del patrimonio insediativo (fig. 4).



Figura 4 – Aggregato edilizio privo di coperture con conseguente attivazione di fenomeni di degrado delle murature (foto dell'autore 2025).

La perdita di leggibilità storica non riguarda esclusivamente la componente architettonica, ma coinvolge anche le relazioni tra insediamento e paesaggio, interrompendo i legami storicamente consolidati tra struttura urbana, sistemi produttivi e ambiente naturale. La progressiva scomparsa delle pratiche agricole tradizionali e delle economie locali modifica infatti l'equilibrio territoriale, favorendo processi di rinaturalizzazione spontanea che, pur contribuendo alla trasformazione ecologica dei luoghi, possono compromettere la comprensione delle strutture insediative originarie<sup>14</sup>

In generale, la progressiva dismissione delle abitazioni e delle attività tradizionali tende a produrre un tessuto urbano caratterizzato da edifici in stato di semiabbandono, fenomeni di degrado materico

---

<sup>13</sup> RODERS, VAN OERS 2011, pp. 5-18; DE ROSA, DI PALMA 2021, pp. 44-63.

<sup>14</sup> ANTROP 2005, pp. 21-34; ESPOSITO DE VITA *et al.* 2022, pp. 88-109.

diffuso e dissesti strutturali localizzati, con effetti cumulativi sulla stabilità complessiva dell'insediamento. L'assenza di manutenzione produce un rapido incremento delle vulnerabilità strutturali, soprattutto in edifici realizzati con tecniche tradizionali e materiali locali, maggiormente sensibili ai cicli di degrado ambientale<sup>15</sup>.

A tali condizioni si aggiunge un elemento ricorrente nei contesti minori abbandonati: la difficoltà di accesso. L'inaccessibilità fisica, dovuta alla localizzazione in aree montane o marginali e alla presenza di infrastrutture limitate, riduce significativamente le possibilità di monitoraggio sistematico e manutenzione ordinaria, favorendo ulteriori processi di deterioramento. Tale condizione genera un circolo vizioso in cui la progressiva perdita di accessibilità contribuisce ad accelerare l'abbandono, rendendo più complessa qualsiasi strategia di conservazione o riattivazione funzionale. Nel processo di conservazione preventiva, infatti, accessibilità e conoscenza sono strettamente interconnesse, poiché la capacità di monitorare e documentare regolarmente un sito rappresenta una delle condizioni fondamentali per ridurre il rischio e migliorare la resilienza del patrimonio culturale<sup>16</sup>.

Queste dinamiche inducono ad adottare approcci integrati di analisi e gestione, capaci di interpretare i centri storici minori come sistemi complessi in trasformazione continua (fig. 5).

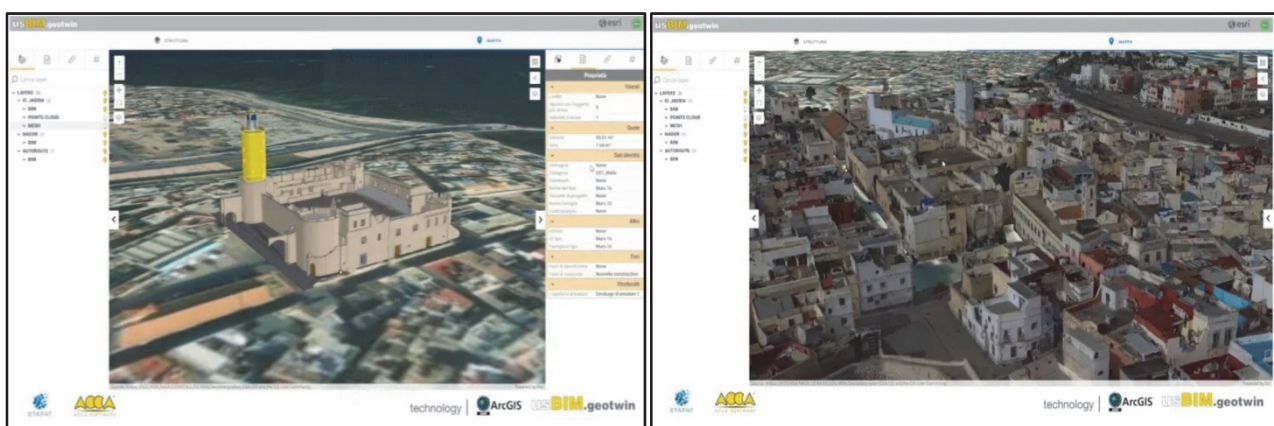


Figura 5 – Piattaforma web per la gestione ed aggregazione dati (Esri ArcGis pro).

La conservazione urbana evidenzia infatti come il patrimonio storico debba essere interpretato come un sistema socio-ecologico dinamico, nel quale le componenti architettoniche risultano strettamente interconnesse con fattori ambientali, economici e sociali<sup>17</sup>.

La comprensione dei processi di degrado non può quindi limitarsi alla scala edilizia, ma deve considerare l'interazione tra fattori territoriali e paesaggistici, adottando approcci multi-scala e

<sup>15</sup> FERREIRA *et al.* 2020, pp. 92-110; ICOMOS 2017, pp. 8-22.

<sup>16</sup> FREGONESE *et al.* 2022, pp. 113-132; DELLA TORRE 2020, pp. 41-58.

<sup>17</sup> RODERS e VAN OERS 2011, pp. 20-34; BANDARIN, VAN OERS 2012, pp. 47-65; DELLA TORRE 2020, pp. 60-74.

multidisciplinari in grado di leggere le trasformazioni nel lungo periodo<sup>18</sup>. In questo quadro, la costruzione di quadri conoscitivi aggiornabili e multidimensionali rappresenta una condizione fondamentale per supportare processi decisionali consapevoli e strategie di gestione orientate alla resilienza del patrimonio culturale<sup>19</sup>.

### 2.3. La conoscenza per tutela e la valorizzazione

La ricerca nel campo della conservazione del patrimonio costruito evidenzia come la conoscenza sistematica rappresenti il presupposto imprescindibile per ogni intervento di tutela, recupero e valorizzazione<sup>20</sup>. La documentazione accurata delle caratteristiche morfologiche, costruttive e storiche consente infatti di orientare strategie consapevoli di gestione e di ridurre il rischio di interventi incongrui.

In questa prospettiva, la documentazione digitale e gli strumenti di monitoraggio avanzato assumono un ruolo sempre più centrale, consentendo di integrare dati geometrici, materici e ambientali in ambienti informativi condivisi e dinamici. Tecnologie quali rilievo *reality-based*, sistemi informativi territoriali e modelli digitali permettono infatti di analizzare l'evoluzione dei fenomeni di degrado, supportando strategie di conservazione preventiva e sostenibile nel lungo periodo<sup>21</sup>.

Negli ultimi anni le tecnologie digitali hanno profondamente trasformato il campo della documentazione del patrimonio culturale. Tecniche quali *laser scanning*, fotogrammetria digitale e modellazione tridimensionale consentono di acquisire dati metrici ad alta risoluzione e di integrare informazioni geometriche e materiche in ambienti digitali condivisi<sup>22</sup> (fig. 6).

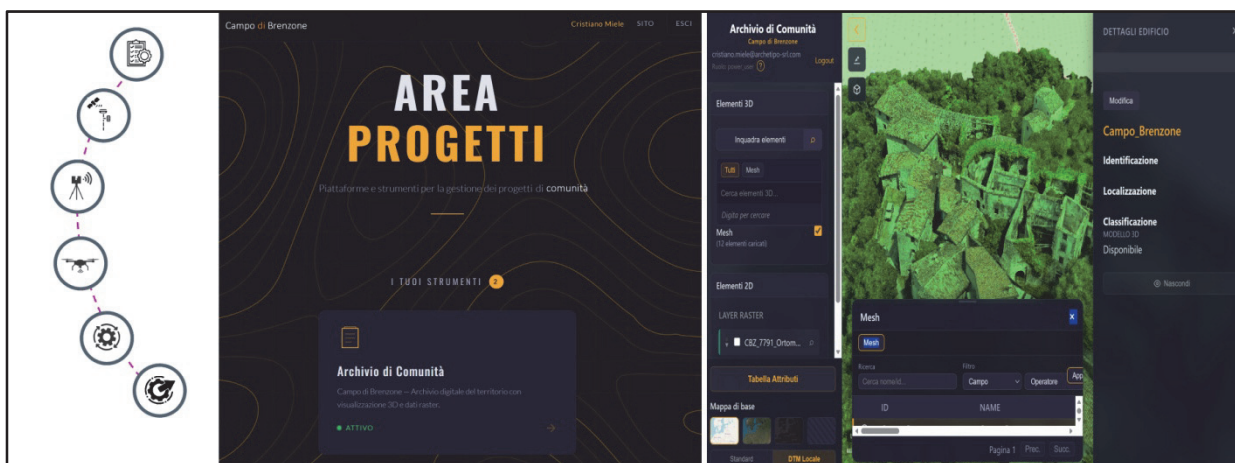


Figura 6 – Workflow e piattaforma di gestione dati (PAC - Progetto Archivio di Comunità).

<sup>18</sup> ANTROP2005, pp. 28-39; ESPOSITO DE VITA *et al.*2022, pp. 110-128.

<sup>19</sup> FERREIRA *et al.* 2020, pp. 125-143; FREGONESE *et al.* 2022, pp. 133-149.

<sup>20</sup> BRANDI1963, pp. 11-25; CHOAY2001, pp. 161-178.

<sup>21</sup> LOPEZ *et al.*2020, pp. 72-89; BRUNO e RONCELLA2019, pp. 95-112; FREGONESE *et al.*2022, pp. 90-112.

<sup>22</sup> REMONDINO e CAMPANA 2014, pp. 11-24.

L'approccio HBIM e le implementazioni su piattaforme geospaziali, come sviluppo futuro, si configurano oggi come strumenti fondamentale per la gestione del patrimonio storico, in quanto permettono di organizzare dati eterogenei e supportare processi decisionali complessi<sup>23</sup>.

#### 2.4. Limiti delle metodologie di documentazione

Le metodologie tradizionali di documentazione del patrimonio costruito, fondate prevalentemente su rappresentazioni bidimensionali e su rilievi frammentari, rivelano evidenti criticità quando applicate a sistemi urbani complessi o a insediamenti storici di ampia estensione. Tali approcci faticano a restituire in modo adeguato la complessità spaziale e informativa dei tessuti storici, soprattutto nei contesti caratterizzati da marcata stratificazione e da trasformazioni progressive nel tempo. Inoltre, l'assenza di un sistema integrato di aggregazione dei dati rende difficile correlare informazioni provenienti da fonti eterogenee quali rilievi geometrici, analisi storiche, dati materici e territoriali, con conseguente perdita informativa e gestione non coordinata del patrimonio culturale<sup>24</sup>. Un ulteriore limite è rappresentato dalla natura statica delle rappresentazioni tradizionali, che ostacola l'aggiornamento continuo dei dati e l'elaborazione di analisi dinamiche a supporto dei processi decisionali. La frammentazione documentaria costituisce infatti una delle principali criticità nella gestione del patrimonio storico, poiché impedisce una lettura sistemica delle relazioni tra edifici, spazio urbano e paesaggio<sup>25</sup>. Tale condizione risulta particolarmente evidente nei centri storici minori, dove la scarsità di dati pregressi e le difficoltà di accesso accentuano la complessità delle attività di rilievo e interpretazione. Anche l'applicazione dell'HBIM presenta specifiche criticità operative.

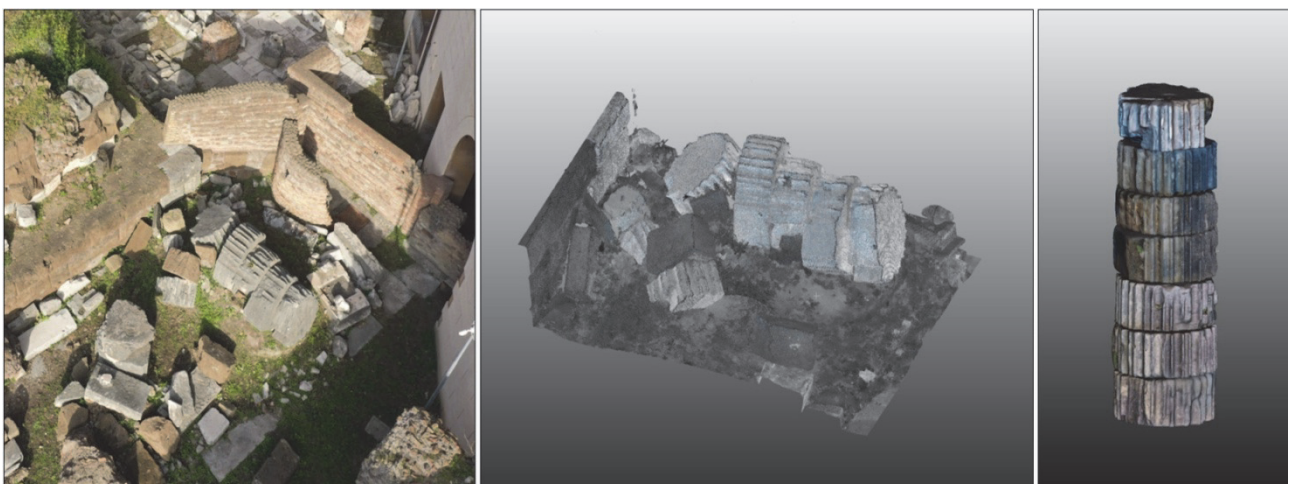


Figura 7 – Rilievo *reality-based*, modellazione Scan-to-BIM ed anastilosi (elaborazione dell'autore).

<sup>23</sup> MURPHY, MCGOVERN e PAVIA 2013, pp. 1-15; BRUMANA *et al.* 2018, pp. 63-82.

<sup>24</sup> MURPHY *et al.* 2013, pp. 3-15; LOGOTHETIS *et al.* 2015, pp. 22-38.

<sup>25</sup> APOLLONIO *et al.* 2021, pp. 40-58.

La modellazione delle geometrie irregolari tipiche dell'architettura storica, insieme alla gestione di *workflow* complessi in tessuti urbani eterogenei e caratterizzati da elevata variabilità tipologica e stratigrafica, richiede procedure avanzate, spesso onerose in termini di tempo e competenze specialistiche<sup>26</sup> (fig. 7). L'adattamento di strumenti BIM, originariamente sviluppati per il settore delle nuove costruzioni, ai contesti storici implica infatti un elevato grado di manualità e frequenti problemi di interoperabilità tra software differenti. Nei centri minori tali problematiche risultano amplificate dalla presenza di edifici fortemente differenziati, dalla limitata disponibilità di dati diagnostici e dalle condizioni di accessibilità ridotta, che rendono complesso sia il rilievo diretto sia la verifica delle informazioni acquisite. Per superare queste criticità, la ricerca più recente propone approcci basati su DMR multiscalarari e *digital twin* territoriali, nei quali rilievi *reality-based* e dati geospaziali convergono in ambienti digitali interoperabili<sup>27</sup>. I DMR consentono di ottenere rappresentazioni ad alta densità informativa direttamente derivate dalla realtà fisica, riducendo l'intermediazione interpretativa e incrementando l'accuratezza metrica e semantica dei modelli digitali. In questa prospettiva, la loro applicazione al patrimonio culturale non si limita alla produzione di un modello tridimensionale avanzato, ma costituisce la base per la costruzione di un ambiente informativo dinamico, capace di integrare dati geometrici, strutturali, ambientali e gestionali e di supportare attività di monitoraggio e conservazione preventiva. Un ulteriore avanzamento metodologico è rappresentato dai modelli HBIM *cluster*, che permettono di trattare i borghi storici come sistemi unitari complessi, superando la visione atomizzata del singolo edificio (fig. 8).

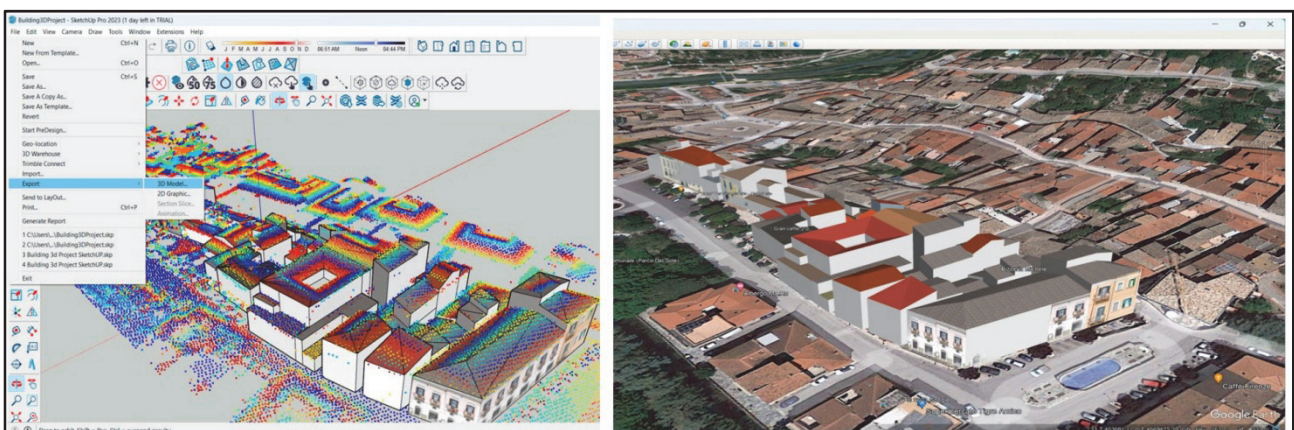


Figura 8 – Modello BIM federato e rappresentazione supiatta forma *SketchUp* (da PEPE *et al.* 2024, p. 6973).

L'approccio multi-edificio favorisce infatti una lettura sistemica del patrimonio urbano, consentendo di analizzare congiuntamente relazioni spaziali, tipologiche e funzionali e di integrare

<sup>26</sup> BRUMANA *et al.* 2018, pp. 70-89; JORDAN-PALOMAR *et al.* 2018, pp. 101-118.

<sup>27</sup> BATTY 2018, pp. 1-15; BOJE *et al.* 2020, pp. 39-58; LÓPEZ *et al.* 2020, pp. 90-109.

informazioni provenienti da scale differenti<sup>28</sup>. Nei centri storici minori, tale impostazione risulta decisiva per costruire quadri conoscitivi coerenti e orientare strategie di conservazione integrate. Parallelamente, l'integrazione con piattaforme geospaziali tridimensionali e ambienti *web-based* fondati su *standard* di modellazione urbana, quali CityGML<sup>29</sup>, *Industry Foundation Classes (IFC)*<sup>30</sup> e motori di visualizzazione 3D come CesiumJS<sup>31</sup>, consente di connettere in modo strutturato la scala architettonica a quella territoriale<sup>32</sup>. Gli ambienti geospaziali 3D favoriscono la gestione collaborativa e la condivisione dei dati tra i diversi attori coinvolti nei processi di tutela e pianificazione, contribuendo alla definizione di sistemi informativi dinamici orientati alla gestione integrata del patrimonio. In contesti come Campo di Brenzone, caratterizzati da accessibilità limitata, elevata complessità morfologica e documentazione frammentaria, tali strumenti permettono di superare i vincoli delle metodologie convenzionali, offrendo una base conoscitiva strutturata, scalabile e continuamente aggiornabile. L'integrazione tra rilievo *reality-based*, HBIM e piattaforme geospaziali tridimensionali si configura dunque come una strategia metodologica avanzata e coerente, in grado di sostenere processi di conservazione preventiva, monitoraggio e valorizzazione sostenibile del patrimonio storico diffuso.

---

<sup>28</sup> BRUNO, RONCELLA 2019, pp. 118-132; FAI *et al.* 2022, pp. 55-74.

<sup>29</sup> OGC 2021.

<sup>30</sup> ISO 2024.

<sup>31</sup> CESIUMJS 2023.

<sup>32</sup> BILJECKI, LEDOUX e STOTER 2015, pp. 12-28; LÖWNER *et al.* 2016, pp. 66-83; DENG *et al.* 2021, pp. 77-95.

### 3. TECNOLOGIE DIGITALI PER IL PATRIMONIO CULTURALE

Nel contesto della documentazione digitale del patrimonio culturale e architettonico, la ricerca contemporanea converge verso approcci integrati capaci di connettere rilievo, modellazione informativa e ambienti digitali interoperabili. L'evoluzione delle tecnologie geomatiche e dei sistemi informativi ha infatti superato la tradizionale separazione tra fase di acquisizione, modellazione e gestione dei dati, favorendo la costruzione di *workflow* digitali continui nei quali le informazioni geometriche e semantiche vengono sviluppate in modo coordinato.

Il quadro teorico di riferimento ruota attorno a tre temi fondamentali: le metodologie di rilievo integrato, l'impiego dei modelli 3D *reality-based* per la rappresentazione e la modellazione della realtà e l'integrazione tra ambienti CAD, GIS, BIM e piattaforme geospaziali tridimensionali in un'ottica di aggregazione e interoperabilità.

#### 3.1. Metodologie di rilievo integrato

L'evoluzione delle metodologie di documentazione digitale ha evidenziato come l'impiego di tecniche integrate rappresenti oggi una delle strategie più efficaci per affrontare la complessità del patrimonio culturale e architettonico. L'integrazione tra rilievo *laser scanning*, fotogrammetria terrestre e aerea, dati topografici e sistemi informativi digitali consente infatti di superare i limiti delle singole tecnologie, combinando accuratezza geometrica, dettaglio materico e capacità di gestione multi-scala delle informazioni<sup>33</sup>.

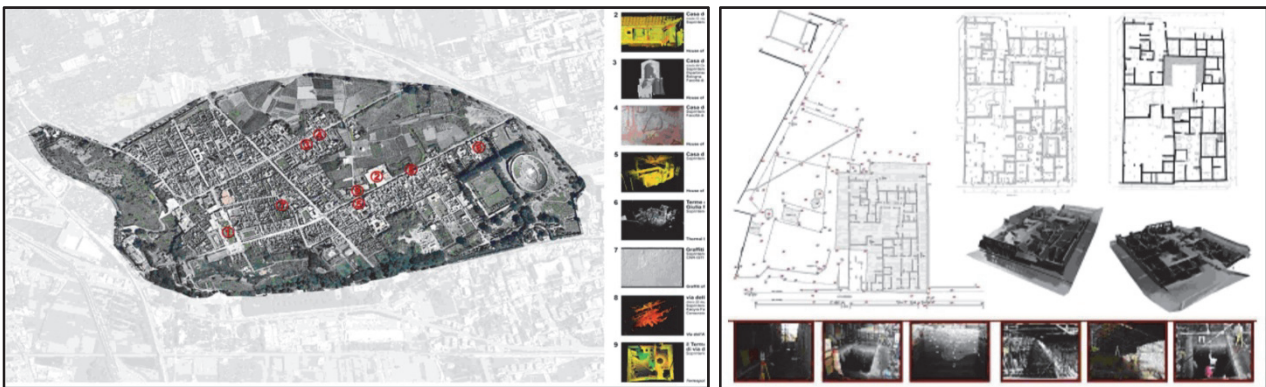


Figura 9 – “Grande Progetto Pompei” (UNIFE – DIAPReM, 2024).

Numerosi esempi dimostrano come l'approccio integrato sia divenuto uno *standard* operativo nei progetti di documentazione avanzata. Un caso emblematico è rappresentato dalle campagne di

---

<sup>33</sup>MURPHY *et al.* 2013, pp. 1-15; LOGOTHETIS *et al.* 2015, pp. 177-183.

rilievo condotte nell’ambito del “Grande Progetto Pompei” dove l’integrazione tra *laser scanning* terrestre, rilievo topografico GPS e fotogrammetria digitale ha permesso di produrre modelli georeferenziati ad alta precisione, utili non solo per la rappresentazione metrica, ma anche per l’analisi morfologica e la gestione della conservazione<sup>34</sup> (fig. 9).

Un altro esempio di rilievo integrato applicato al restauro architettonico è rappresentato dai *workflow* sviluppati nel contesto europeo per la documentazione di edifici storici, nei quali l’unione tra fotogrammetria e *laser scanning* viene utilizzata per migliorare la qualità metrica e radiometrica dei dataset. Studi comparativi metodologici dimostrano come la combinazione delle due tecniche permetta di compensare le debolezze reciproche, ottimizzando accuratezza geometrica e dettaglio superficiale, elementi fondamentali nei processi di restauro e analisi diagnostica<sup>35</sup>.

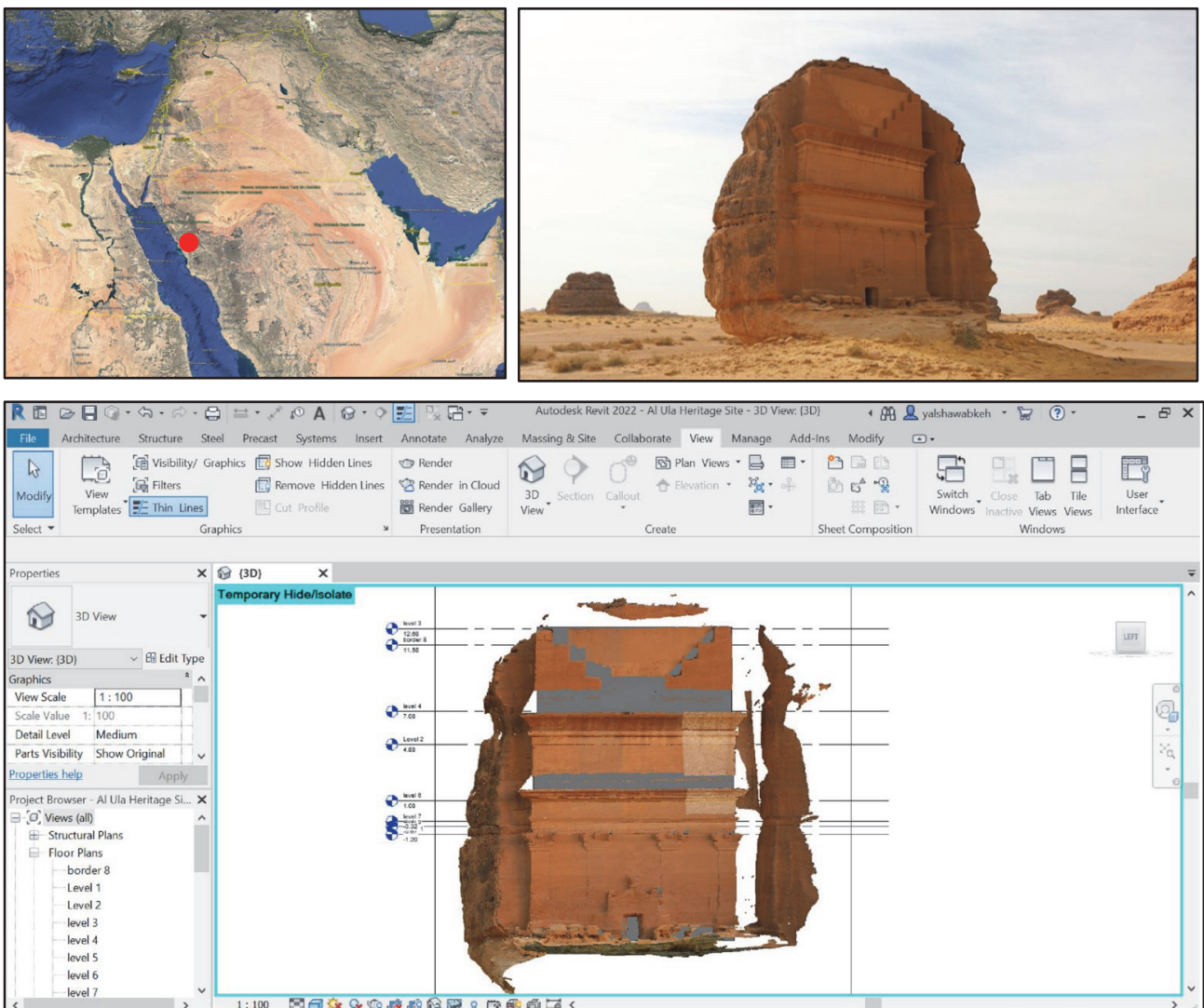


Figura 10 - sito UNESCO di Al Ula (Arabia Saudita) (da ALSHAWABKEH, BAIK 2023. pp. 5-17).

<sup>34</sup> ARGENZIANO 2015, pp. 45-62.

<sup>35</sup> BIANCHI *et al.* 2016, pp. 30-48; BRUNO *et al.* 2022, pp. 45-62.

Particolarmente significativa è inoltre l'applicazione del rilievo integrato nel sito UNESCO di Al Ula (Arabia Saudita), dove la fusione di fotogrammetria e *laser scanning* è stata utilizzata per potenziare il processo Scan-to-HBIM. In questo caso, la combinazione dei dati ha consentito di documentare superfici complesse e fenomeni di degrado materico difficilmente rilevabili con una singola tecnologia, migliorando la qualità informativa del modello digitale e la sua utilità per la conservazione<sup>36</sup> (**fig. 10**).

Su scala territoriale e archeologica, uno dei casi più celebri di rilievo integrato è rappresentato dalle campagne LiDAR ad Angkor Wat, in Cambogia (**fig. 11**). L'utilizzo di scansione *laser* aerea, combinato con indagini archeologiche di terreno e analisi geospaziali, ha rivoluzionato la comprensione del paesaggio urbano antico, rivelando la presenza di un sistema insediativo esteso e precedentemente sconosciuto sotto la copertura forestale. Le indagini hanno dimostrato come la tecnologia LiDAR, integrata con altri strumenti di analisi territoriale, permetta di documentare sistemi urbani complessi su scala paesaggistica, ridefinendo completamente l'interpretazione storica e morfologica del sito<sup>37</sup>.

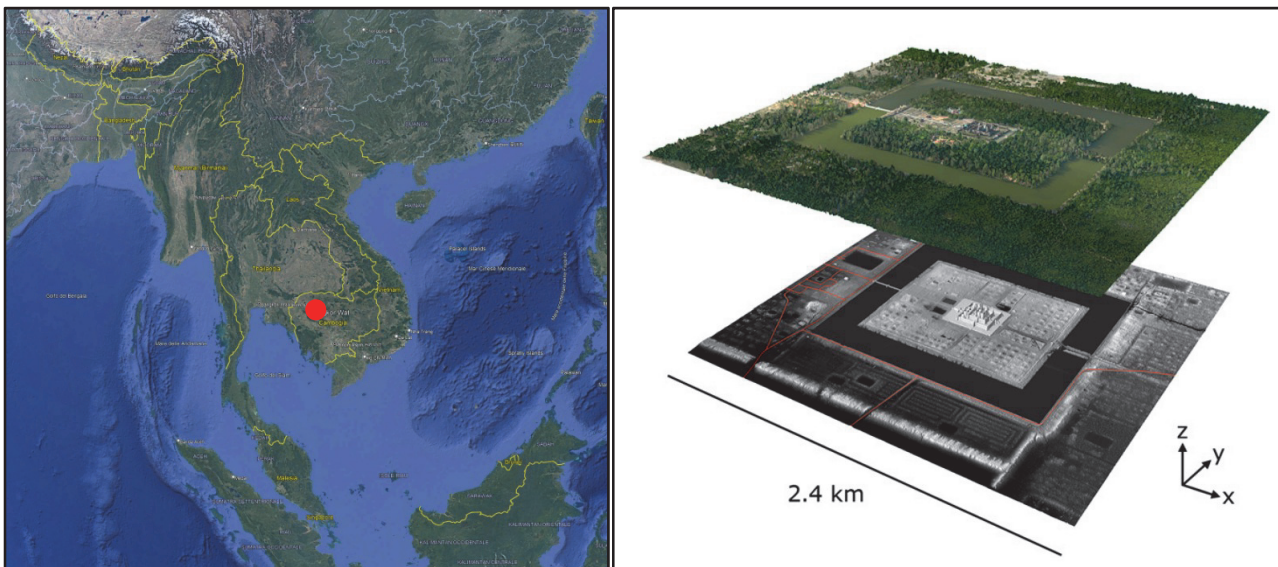


Figura 11 - Angkor Wat - Cambogia (da EVANS *et al.* 2013, p. 12596).

Più recentemente, l'integrazione tra rilievo terrestre e fotogrammetria da piattaforme UAV è stata applicata anche a contesti monumentali complessi, dove la combinazione di tecniche multi-sensore ha permesso di acquisire simultaneamente architettura, decorazioni e contesto paesaggistico, favorendo lo sviluppo di modelli tridimensionali utilizzabili in ambito HBIM e in applicazioni di realtà aumentata e *mixed reality*<sup>38</sup>.

<sup>36</sup>ALSHAWABKEH, BAIK 2023, pp. 3-12.

<sup>37</sup>EVANS *et al.* 2013, pp. 125 - 156.

<sup>38</sup>ZACHOS, ANAGNOSTOPOULOS 2023, pp. 6-14.

Il rapido sviluppo delle tecnologie *hardware* e *software* degli ultimi anni ha profondamente trasformato le modalità di acquisizione, elaborazione e gestione dei dati tridimensionali nel campo della documentazione del patrimonio culturale. L'aumento della potenza di calcolo disponibile, l'evoluzione delle architetture multi-core e l'impiego diffuso di GPU dedicate hanno infatti reso possibile il processamento di *dataset* sempre più estesi e complessi, favorendo l'integrazione operativa tra differenti tecniche di rilievo digitale. In particolare, la possibilità di gestire in tempi sostenibili grandi nuvole di punti ad alta densità ha consentito di superare la tradizionale separazione tra dati fotogrammetrici, TLS e rilievi topografici, aprendo la strada a *workflow* integrati basati sulla fusione multi-sorgente<sup>39</sup>.

Grazie ai progressi nell'ottimizzazione degli algoritmi di *image matching* e *Structure From Motion* (SfM), registrazione automatica e gestione delle nuvole di punti, la fusione dei dati rappresenta una pratica consolidata all'interno dei processi di documentazione avanzata. L'integrazione tra fotogrammetria e TLS, infatti, consente di combinare i vantaggi delle due tecnologie: da un lato l'elevata accuratezza geometrica e metrica del TLS, dall'altro la ricchezza cromatica e il dettaglio superficiale derivante dalla fotogrammetria digitale, come evidenziato dal caso dell' *Al Deir Monument a Petra*<sup>40</sup>.

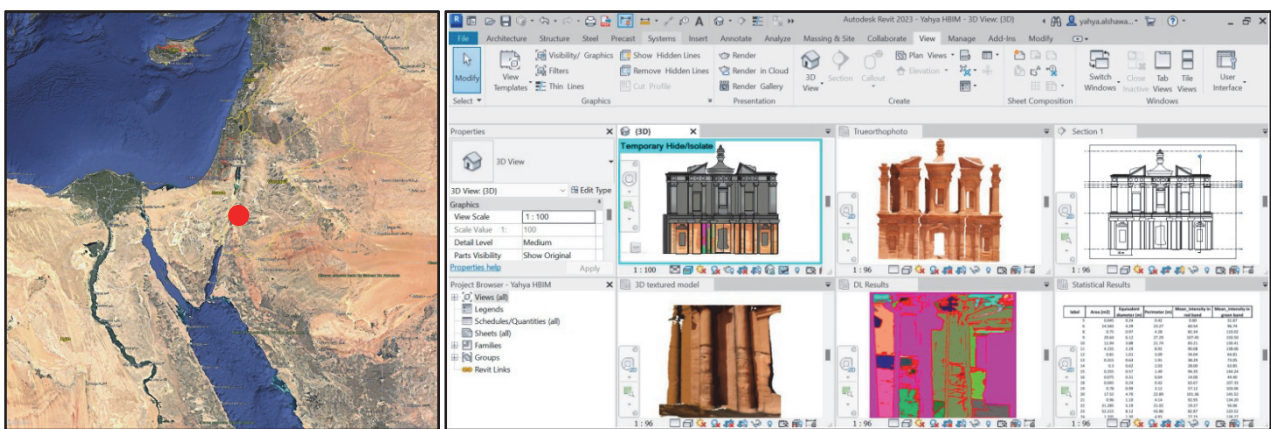


Figura 12 – Al Deir Monument – PETRA (da ALSHAWABKEH *et al.* 2023, p. 21).

L'evoluzione *software* ha avuto un ruolo altrettanto determinante. Le piattaforme contemporanee permettono infatti l'elaborazione congiunta di immagini terrestri e aeree, scansioni *laser* e dati topografici georeferenziati, supportando procedure automatiche di co-registrazione e allineamento dei *dataset*. Approcci recenti mostrano come l'integrazione di rilievi topografici, fotogrammetrici e

<sup>39</sup>BOJE *et al.* 2020, pp. 6–12; ESCUDERO 2023, pp. 22–30.

<sup>40</sup>ALSHAWABKEH, BAIK, MIKY 2023, pp. 3–12; BRUNO *et al.* 2022, pp. 45–62.

*laser scanner* costituisca uno dei *workflow* più completi per il processo Scan-to-BIM, garantendo elevata affidabilità geometrica e coerenza spaziale tra scala architettonica e scala territoriale<sup>41</sup>.

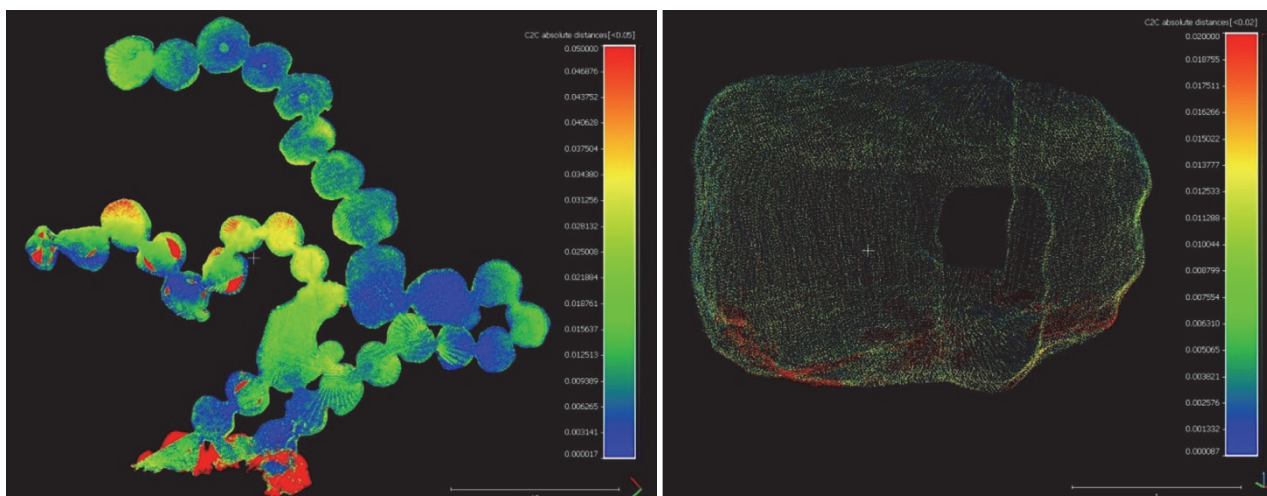


Figura 13 – Hypogeo di Calafano – Ragusa (Sicilia) (da D'AGOSTINO *et al.* 2022, p. 172).

L'approccio integrato risulta particolarmente efficace nei contesti di patrimonio culturale, dove la complessità geometrica e la necessità di acquisire simultaneamente dati metrici e informativi richiedono strategie multi-sensore. L'integrazione tra diverse tecniche di rilievo non rappresenta infatti una semplice sovrapposizione di *dataset*, ma un processo di fusione informativa nel quale ogni tecnica contribuisce con specifiche caratteristiche: precisione geometrica, qualità radiometrica, copertura spaziale e controllo metrico assoluto<sup>42</sup> (**fig. 13**).

Tale convergenza tecnologica consente di ottenere modelli tridimensionali ad elevata completezza, capaci di supportare analisi avanzate e successivi processi di modellazione HBIM.

In questo scenario, la combinazione tra rilievo TLS, fotogrammetria e supporto topografico è oggi considerata uno degli approcci più completi per la documentazione del costruito storico. La disponibilità di *hardware* sempre più performanti e di *software* in grado di processare quantità massicce di dati permette infatti di affrontare anche contesti complessi o difficilmente accessibili, migliorando significativamente la qualità complessiva della documentazione e riducendo le incertezze interpretative. L'integrazione multi-sorgente costituisce quindi la base metodologica per la creazione di DMR ad alta affidabilità, destinati a diventare il nucleo informativo dei processi di gestione e conservazione digitale del patrimonio culturale (**fig. 14**).

---

<sup>41</sup>LO BRUTTO *et al.* 2021, pp. 101–118.

<sup>42</sup>D'AGOSTINO *et al.* 2022, pp. 72–89.



Figura 14 – Campo di Brenzone (VR) – Modello 3D *reality-based* (elaborazione CANELLA, SARTINI 2026).

### 3.2. Modelli 3D *reality-based* per lo Scan-to-BIM

Negli ultimi due decenni la documentazione del patrimonio architettonico e culturale ha conosciuto una profonda trasformazione metodologica, determinata dall'evoluzione delle tecnologie di acquisizione tridimensionale e dalla crescente capacità di elaborare grandi quantità di dati digitali. In tale scenario, i modelli digitali tridimensionali hanno assunto un ruolo centrale come strumenti di rilievo e rappresentazione della realtà, superando progressivamente le limitazioni delle tradizionali forme di documentazione bidimensionale e introducendo nuove possibilità di analisi, gestione e comunicazione del patrimonio costruito<sup>43</sup>.

L'approccio contemporaneo alla documentazione si fonda su metodologie di rilievo integrato, nelle quali diverse tecniche di acquisizione vengono combinate per ottenere modelli geometricamente accurati e informativamente completi. L'integrazione di dati multi-sorgente consente, infatti, di compensare i limiti delle singole tecnologie offrendo una rappresentazione altamente realistica del bene architettonico<sup>44</sup>.

---

<sup>43</sup>MURPHY *et al.* 2013, pp. 1-15; LOGOTHETIS *et al.* 2015, pp. 177-183.

<sup>44</sup>REMONDINO, CAMPANA 2014, 11-24; ALSHAWABKEH e BAIK 2023, pp. 3-12.



Figura 15 – Metropolitana di Napoli – Linea 6 – Approccio di rilievo integrato (da FASI 2021, p. 93).

All'interno di questo quadro tecnologico emergono i cosiddetti DMR ovvero modelli tridimensionali derivati direttamente dai dati acquisiti e caratterizzati da un'elevata aderenza alla realtà fisica, mantenendo la continuità geometrica delle superfici e preservando informazioni dettagliate relative ai materiali, alla *texture* e allo stato di conservazione<sup>45</sup>.

Tale caratteristica li rende particolarmente rilevanti nel campo del rilievo e della conservazione del patrimonio culturale, dove la precisione metrica e la fedeltà alla realtà costituiscono requisiti fondamentali per analisi diagnostiche, valutazioni conservative e processi di monitoraggio nel tempo. Il modello digitale non assume quindi soltanto una funzione rappresentativa, ma diventa un archivio digitale della memoria materiale del bene, capace di documentare lo stato presente e di conservarne traccia per future analisi comparate<sup>46</sup>.

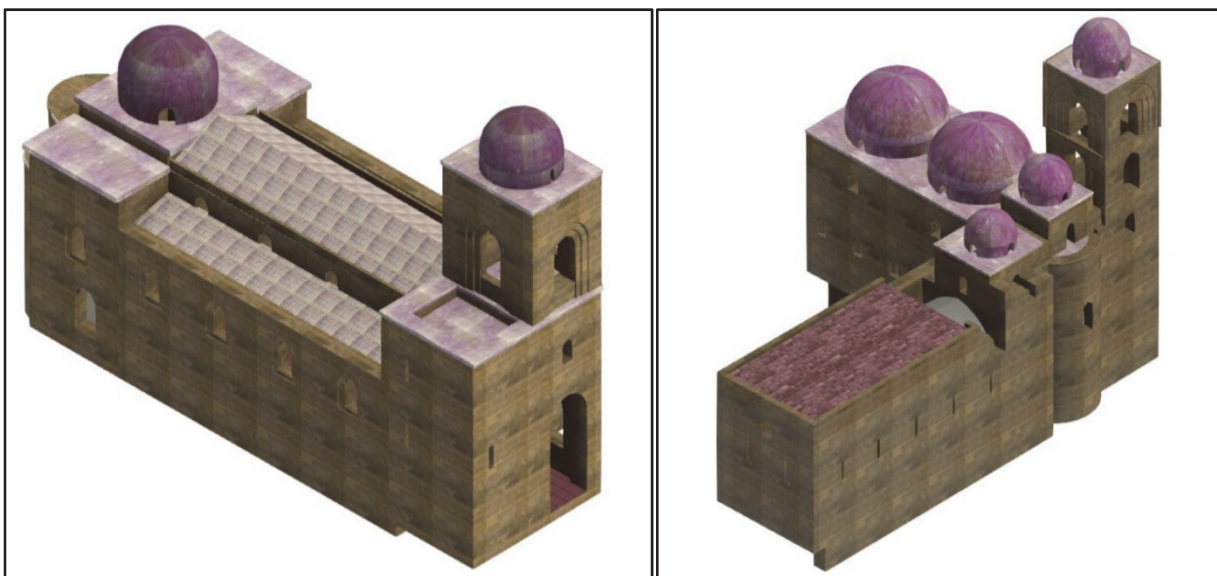


Figura 16 – Modelli HBIM da modelli 3D *reality-based*: San Giovanni dei Lebbresi e San Giovanni degli Eremiti (PA) (da ARICO' 2025, pp. 152-153).

<sup>45</sup>FASSI e CAMPI 2021, pp. 55-72.

<sup>46</sup>BRUNO *et al.* 2022, pp. 45-62.

La letteratura scientifica evidenzia inoltre come i DMR costituiscano la premessa metodologica per successive fasi di modellazione informativa, quali i processi HBIM e i *digital twin* applicati al patrimonio culturale. In questo senso, il modello tridimensionale rappresenta il livello conoscitivo primario sul quale vengono costruite successive strutture semantiche e parametriche, attraverso procedure di segmentazione e interpretazione della geometria reale<sup>47</sup>(fig. 16).

### 3.3. Dal modello *reality-based* alla modellazione interpretativa

Sebbene i DMR rappresentino oggi uno degli strumenti più avanzati per la documentazione oggettiva del patrimonio costruito, essi non costituiscono il punto di arrivo del processo conoscitivo, ma piuttosto la sua fase iniziale: una rappresentazione fedele dello stato di fatto, utile a preservare la complessità geometrica e materica del reale, ma ancora priva di una struttura interpretativa e semantica<sup>48</sup>.

L'affermazione dei modelli digitali ed in particolare delle metodologie *Heritage Building Information Modelling* (HBIM)<sup>49</sup> è ormai accettata nel settore dei beni culturali per supportare il rilievo, l'organizzazione strutturata dei dati, la condivisione delle informazioni e la visualizzazione tridimensionale degli edifici con applicazioni nel monitoraggio del degrado, nella pianificazione di interventi di restauro e nella valutazione della vulnerabilità (fig. 17).

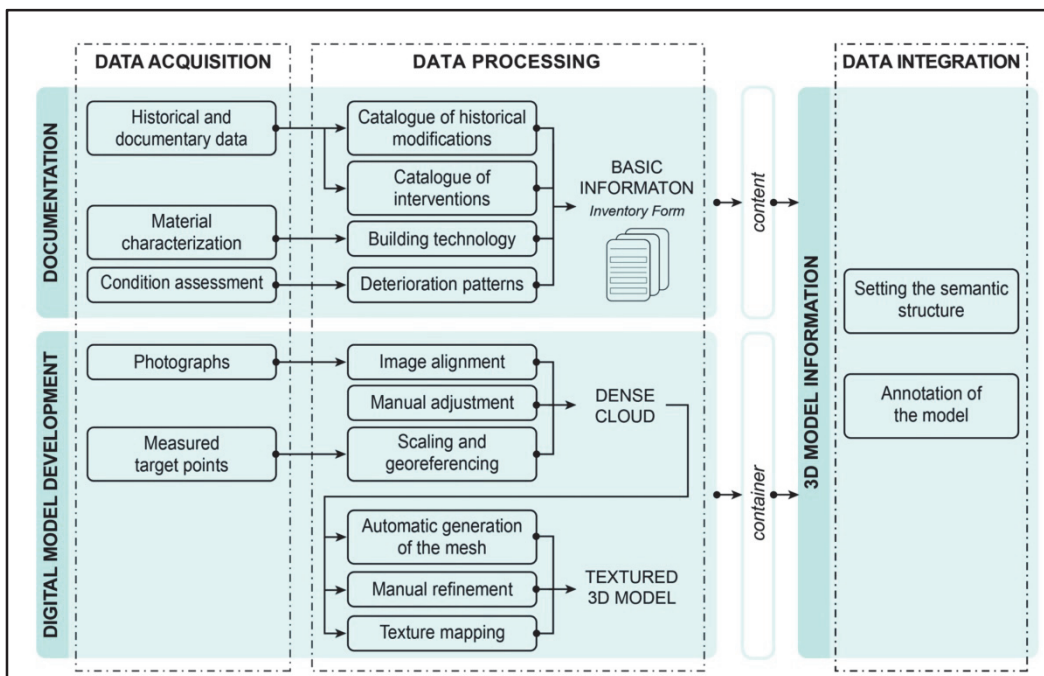


Figura 17 – Workflow Scan-to-BIM (da GIULIANI *et al.* 2024, p. 5).

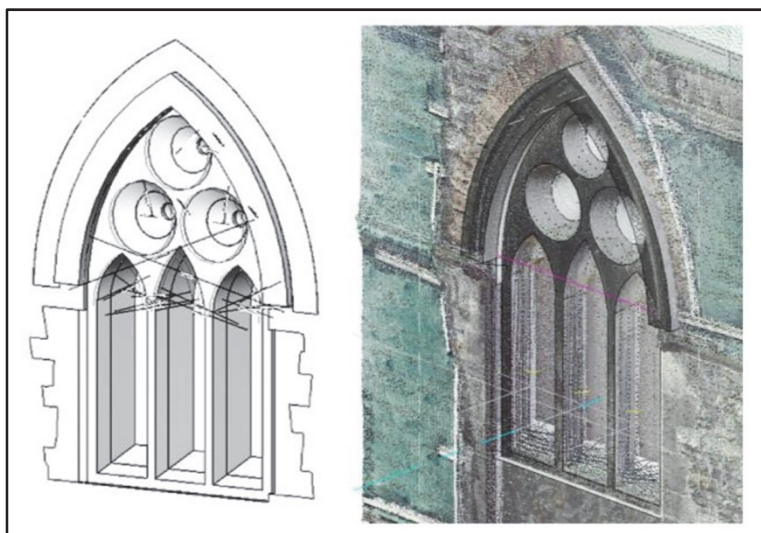
<sup>47</sup>CHIABRANDO *et al.* 2016, pp. 31-48; BANFI 2020, pp. 112-130.

<sup>48</sup>MURPHY *et al.* 2013, pp. 1-15; LOGOTHETIS *et al.* 2015, pp. 177-183.

<sup>49</sup>MURPHY, MCGOVERN, PAVIA 2011, pp. 10-25; BRUNO, RONCELLA 2019, pp. 95-112.

L'HBIM non va tuttavia inteso come mero ambiente di visualizzazione e archiviazione tridimensionale, ma come un ecosistema digitale integrato<sup>50</sup> inserito in un sistema informativo territoriale e culturale più ampio, capace di rendere interoperabili le informazioni edilizie di supportare processi analitici e decisionali. Ciò richiede strategie di semantizzazione<sup>51</sup> delle componenti e di strutturazione dei dati, secondo codifiche condivise, tra le quali lo standard *Industry Foundation Classes (IFC)*<sup>52</sup> è quello di più largo impiego per sistemi BIM generalisti, ossia orientati alle nuove costruzioni. Esistono tuttavia schemi ontologici specifici per il patrimonio architettonico come il CIDOC CRM e il CPM<sup>53</sup>.

La rappresentazione tridimensionale delle strutture storiche in ambiente HBIM offre quindi un possibile approccio metodologico per integrare geometria, codifica semantica e loro relazioni<sup>54</sup>, ma le applicazioni operative hanno mostrato limiti significativi nella rappresentazione realistica e nella digitalizzazione dei dati stratigrafici<sup>55</sup> (**fig. 18**).



**Figura 18 – Modello parametrico e nuvola di punti da TLS (da FAI *et al.* 2011, p. 127).**

La varietà tipologica e la complessità geometrica degli edifici storici riducono l'efficacia della modellazione parametrica<sup>56</sup>, spesso costringendo a incorporare nel modello l'interpretazione<sup>57</sup>, mentre risulta ancora poco sviluppato un approccio realmente multiscalare capace di operare simultaneamente a livello ambientale, urbanistico e architettonico in funzione della risoluzione dei

---

<sup>50</sup> FASSI, CAMPI 2021, pp. 55-72.

<sup>51</sup> DE LUCA *et al.* 2011, pp. 60- 78; DELL'UNTO *et al.* 2013, p. 22-41.

<sup>52</sup> ISO 2018, p. 1-25.

<sup>53</sup> ACIERNO *et al.* 2017, pp. 124-133.

<sup>54</sup> STANGA 2023, pp. 1519-1526

<sup>55</sup> BRUSAPORCI *et al.* 2018, pp. 112-131.

<sup>56</sup> TRIZIO, SAVINI 2020, pp. 84-89.

<sup>57</sup> BRUSAPORCI *et al.* 2018, pp. 112-131.

dati disponibili e degli obiettivi di analisi<sup>58</sup>. Al contempo, l'uso dell'HBIM in archeologia dell'architettura consente di ottenere dati strutturati e georeferenziati, superando il legame con gli elaborati grafici statici e consentendo il riuso delle informazioni, il confronto tra contesti e fasi di studio e l'integrazione con dati storici, territoriali e geometrici<sup>59</sup>.

Come premessa al processo Scan-to-BIM i DMR sono una rappresentazione fedele e accurata degli edifici e della topografia e costituiscono un supporto per la pianificazione degli interventi conservativi<sup>60</sup> e per una più approfondita comprensione delle trasformazioni architettoniche e territoriali<sup>61</sup> (fig. 19).

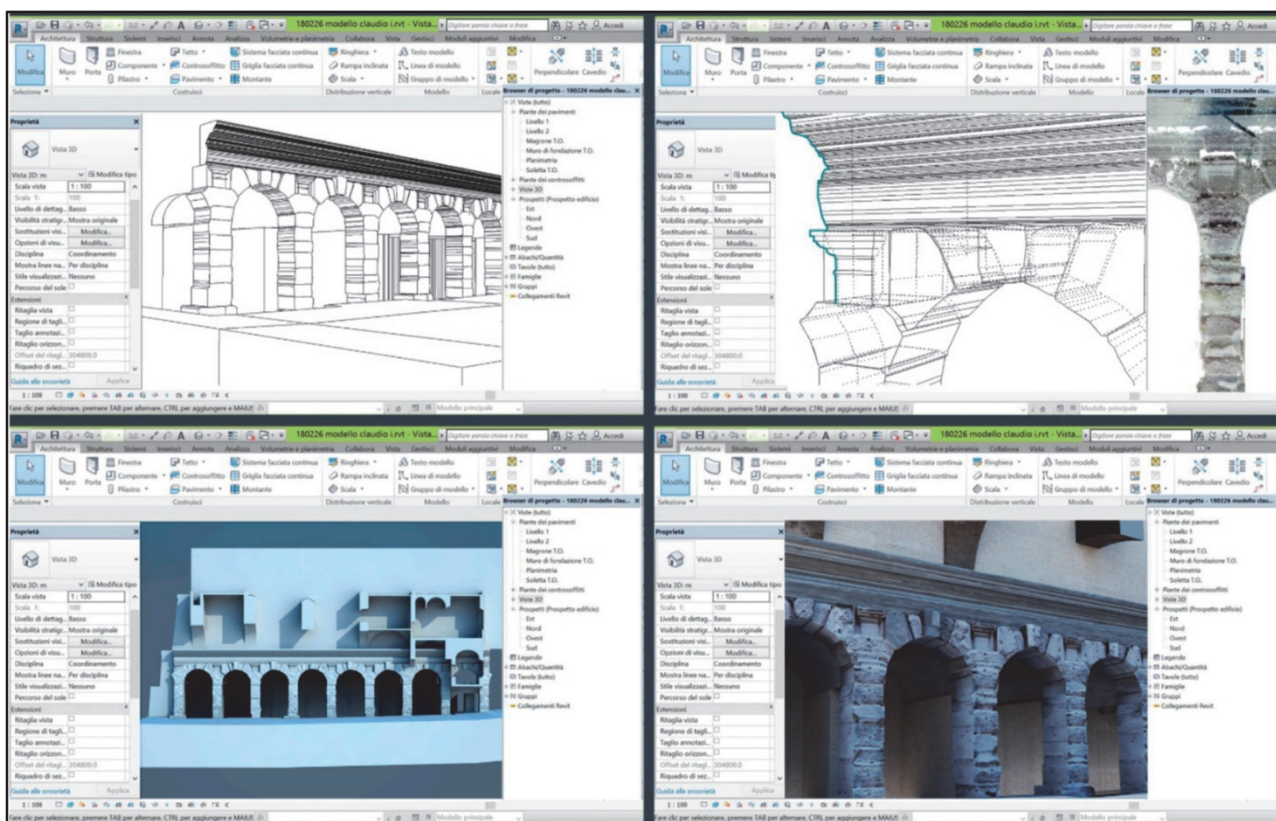


Figura 19 – Processo Scan-to-BIM (da ATTENNI 2019 p. 2082).

Essi integrano dati geometrici ad alta densità, informazioni cromatiche e storiche e i risultati di indagini archeologiche e geofisiche<sup>62</sup>, ponendosi come base per ricostruzioni virtuali scientificamente fondate e per processi integrati di documentazione, analisi e valorizzazione del patrimonio<sup>63</sup>. La loro capacità, inoltre, di rappresentare in modo dettagliato e coerente orografia e

<sup>58</sup> PEPE *et al.* 2023, pp. 70-89.

<sup>59</sup> FAI *et al.* 2011, pp. 30-47; LOGOTHETIS, DELINASIOU, STYLIANIDIS 2015, pp. 177-183; VALENTE, 2011, pp. 55-70.

<sup>60</sup> CORNARO *et al.* 2023, pp. 90-108.

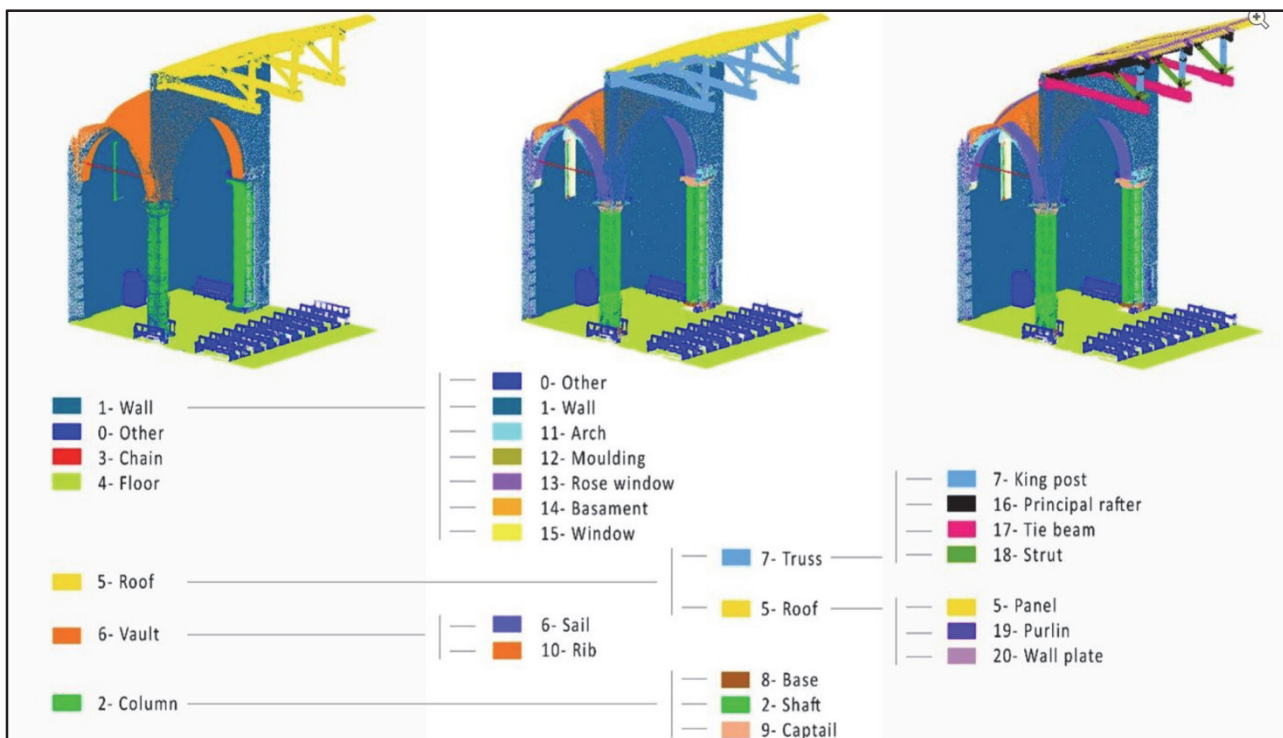
<sup>61</sup> LIMONGIELLO *et al.* 2025, pp. 15-32.

<sup>62</sup> SANSEVERINO *et al.* 2022, pp. 60-78.

<sup>63</sup> BANFI 2020, pp. 112-130; BANFI, BRUMANA 2023, pp. 22-40; BRUMANA *et al.* 2022, pp. 50-72; BRUNO e RONCELLA 2019, pp. 95-112; FASSI, CAMPI 2021, pp. 55-72; LOGOTHETIS, DELINASIOU, STYLIANIDIS 2015, pp. 177-183; JOUAN e HALLOT 2019, pp. 33-49.

morfologia del territorio consente un approccio integrato all'analisi territoriale e di rischio naturale<sup>64</sup>. Nonostante tali potenzialità, i DMR presento criticità legate alla scarsa standardizzazione, alla mancanza di protocolli interoperabili, all'obsolescenza dei dati e allo stato ancora embrionale dei riferimenti normativi e autorizzativi<sup>65</sup>.

IDMR possono fornire la base geometrica ai modelli HBIM<sup>66</sup>, sia come nuvole di punti sia come *mesh* triangolari, secondo procedure Scan-to-BIM o VOX-to-BIM<sup>67</sup> (**fig. 20**), consentendo processo di segmentazione orientati a integrare rappresentazione fedele e informazione<sup>68</sup>.



**Figura 20 – Scan-to-BIM – Processo di addestramento algoritmo di segmentazione automatica/semiautomatica (da CECCARELLI 2024).**

Sebbene le tecniche automatiche di segmentazione e classificazione, anche basate su *machine learning*<sup>69</sup> e *deep learning*<sup>70</sup>, mostrino risultati promettenti, la verifica sul campo e il giudizio esperto restano imprescindibili, poiché la complessità, anche stratigrafica, dell'edilizia storica richiede una capacità critica fondata sull'esperienza e l'osservazione diretta<sup>71</sup>. Il modello digitale non sostituisce, quindi, la competenza umana, ma la potenzia, garantendo tracciabilità,

<sup>64</sup> TAROLLI *et al.* 2014, pp. 23–38; CIGNETTI *et al.* 2025, pp. 12–28.

<sup>65</sup> VOLK *et al.* 2014, pp. 109–127; POCOBELLI *et al.* 2018, pp. 41–58.

<sup>66</sup> BRUGNANA *et al.* 2020, pp. 66–82.

<sup>67</sup> MARTENS *et al.* 2023, pp. 144–160.

<sup>68</sup> ANTONOPOULOU, BRYAN 2017, pp. 77–91.

<sup>69</sup> THOMSON *et al.* 2014, pp. 22–34.

<sup>70</sup> MUKHAMEDIEV *et al.* 2021, pp. 10–25.

<sup>71</sup> MISHRA *et al.* 2024, pp. 88–104.

interoperabilità e coerenza del processo, riducendo le perdite di dati ed evitando semplificazioni arbitrarie<sup>72</sup>.

Negli ultimi anni la ricerca nel campo della documentazione digitale del patrimonio culturale ha evidenziato un crescente interesse verso l'automazione dei processi di rilievo e modellazione, con particolare attenzione all'impiego di tecniche di intelligenza artificiale e di segmentazione semantica applicate alle nuvole di punti. In questo contesto, algoritmi di *machine learning* e *deep learning* vengono progressivamente sperimentati per il riconoscimento automatico degli elementi architettonici e per la classificazione semantica delle geometrie rilevate, con l'obiettivo di ottimizzare i *workflow* Scan-to-BIM, ridurre i tempi di elaborazione e diminuire la complessità delle operazioni manuali di modellazione<sup>73</sup>

Tali approcci rappresentano una delle principali frontiere di sviluppo della digitalizzazione del patrimonio costruito, poiché consentono di affrontare dataset sempre più estesi e complessi, derivanti da rilievi integrati ad alta densità informativa. Tuttavia, la letteratura scientifica evidenzia come i processi automatici di classificazione e segmentazione non siano ancora in grado di sostituire pienamente la componente interpretativa umana. La complessità geometrica e stratigrafica dell'architettura storica, insieme alla presenza di trasformazioni successive e fenomeni di degrado, rende infatti necessario un controllo supervisionato e una validazione critica da parte dello specialista, il cui ruolo resta centrale nella costruzione di modelli affidabili e scientificamente coerenti<sup>74</sup>.

Nel complesso, lo stato dell'arte mostra una progressiva evoluzione dei modelli digitali tridimensionali, che da semplici strumenti di rappresentazione geometrica si stanno trasformando in sistemi complessi di documentazione, analisi e gestione della realtà costruita. La combinazione tra rilievo integrato multi-sensore, DMR e ambienti digitali interoperabili costituisce oggi il paradigma metodologico dominante per la documentazione scientifica del patrimonio culturale, consentendo l'integrazione di dati geometrici, semantici e temporali all'interno di *workflow* digitali condivisi<sup>75</sup>. Questo approccio pone le basi per sviluppi futuri orientati alla modellazione informativa multiscalare e alla gestione dinamica del patrimonio, nella quale il modello digitale non rappresenta più soltanto una restituzione dello stato di fatto, ma diventa un ambiente conoscitivo evolutivo a supporto delle attività di conservazione, monitoraggio e valorizzazione nel lungo periodo.

Se la modellazione Scan-to-BIM di singoli edifici è ormai consolidata, la sua estensione a scala urbana presenta difficoltà tecniche legate al rilievo, alla gestione dei dati e alla sostenibilità

---

<sup>72</sup> BRUNO, DE FINO, FATIGUSO 2018, pp. 35–52; BRUNO *et al.* 2021, pp. 70–88; BOJE *et al.* 2020, pp. 6–12; KLAPA, GAWRONEK 2022, pp. 14–29; MURPHY, MCGOVERN, PAVIA 2011, pp. 10–25; VOLK *et al.* 2014, pp. 109–127.

<sup>73</sup> THOMSON *et al.* 2014, pp. 22–34; MUKHAMEDIEV *et al.* 2021, pp. 10–25; MARTENS *et al.* 2023, pp. 144–160.

<sup>74</sup> BOJE2020, pp. 6–12; MISHRA 2024, pp. 88–104.

<sup>75</sup> MURPHY *et al.* 2013, pp. 1–15; BRUNO, RONCELLA 2019, pp. 95–112; FASSI, CAMPI 2021, pp. 55–72.

operativa, motivando un approccio per scale di approfondimento progressivo. Di converso, se la gestione multiscalare è altrettanto consolidata tramite il GIS, non lo è tramite l'HBIM, per la quale rappresenta a tutti gli effetti una frontiera di sviluppo.

La letteratura recente mostra numerosi esempi applicativi di integrazione tra GIS e HBIM nel settore del patrimonio culturale e archeologico, evidenziando approcci metodologici differenti, ma convergenti verso una gestione multiscalare dei dati. Per Villa Klonaridi (Atene) viene proposto un ambiente digitale integrato in cui rilievi tridimensionali e analisi multisensoriali vengono utilizzati per arricchire i modelli con informazioni sullo stato conservativo e supportare il monitoraggio del degrado e la pianificazione degli interventi di restauro<sup>76</sup> (fig. 21).

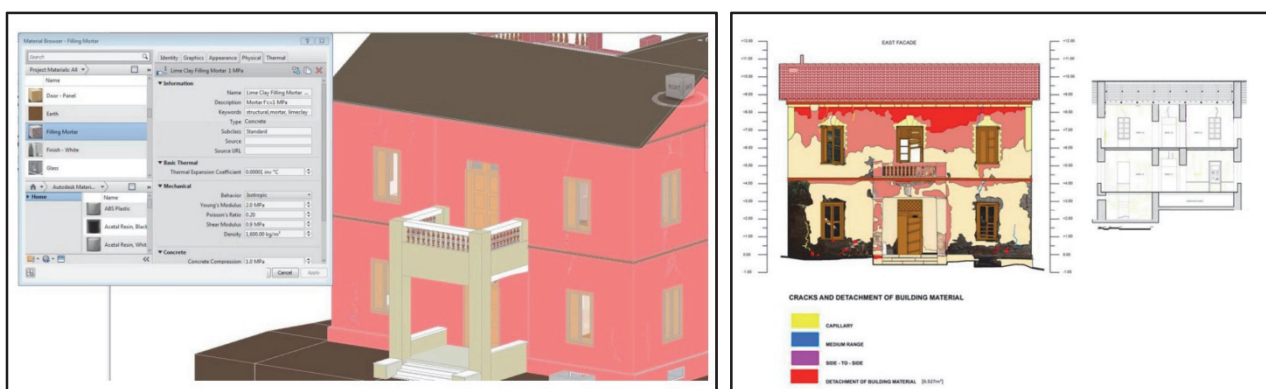


Figura 21 – Modello BIM ed arricchimento informativo in ambiente GIS separato (da TSILIMANTOU *et al.* 2020, pp. 17-18).

Il sistema *web-based* Chimera GIS e HBIM convergono in una piattaforma unica capace di rappresentare dati a scale spaziali e temporali differenti, come dimostrato nel caso studio della città storica di Parma<sup>77</sup> (fig. 22).

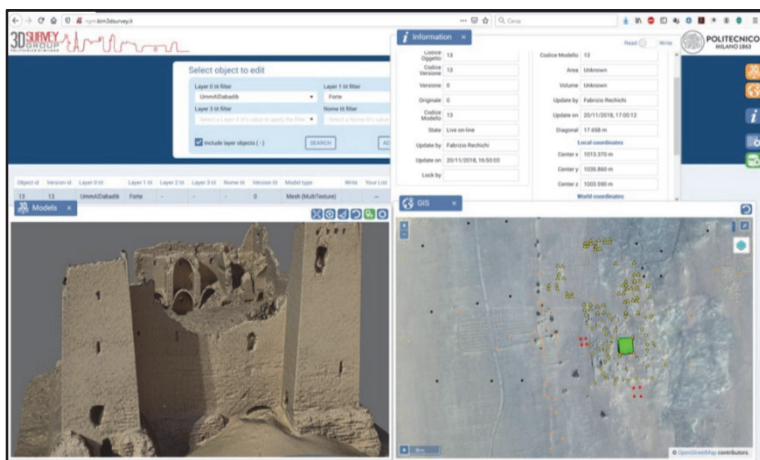


Figura 22 – Progetto CHIMERA – *Umm Al Dabdi* (Egitto), integrazione BIM-GIS (da RECHICI 2022, p. 498).

<sup>76</sup> TSILIMANTOU *et al.* 2020, p.1-26.

<sup>77</sup> BRUNO *et al.* 2020, pp. 1-8.

Un ulteriore sviluppo dell'approccio multiscalare è rappresentato dall'applicazione di modelli GIS-HBIM integrati al centro storico di Popoli (Abruzzo), combinando rilievi UAV, TLS e fonti storiche per supportare analisi di vulnerabilità, pianificazione urbana e conservazione sostenibile del patrimonio<sup>78</sup>.

In ambito archeologico, il castello di Palaiokastro in Grecia rappresenta un esempio di utilizzo combinato di GIS, UAV e TLS per la ricostruzione delle fasi costruttive e la pianificazione conservativa, mentre il caso del Tempio di Antas in Sardegna mostra l'impiego di *workflow* HBIM basati su rilievi SfM e modellazione algoritmica per la gestione di geometrie complesse<sup>79</sup>.

Analogamente, il progetto archeologico di Chan Chan (Perù) evidenzia l'uso del GIS per la georeferenziazione dei dati, il monitoraggio del degrado e la definizione di *buffer zone* di protezione su scala territoriale.

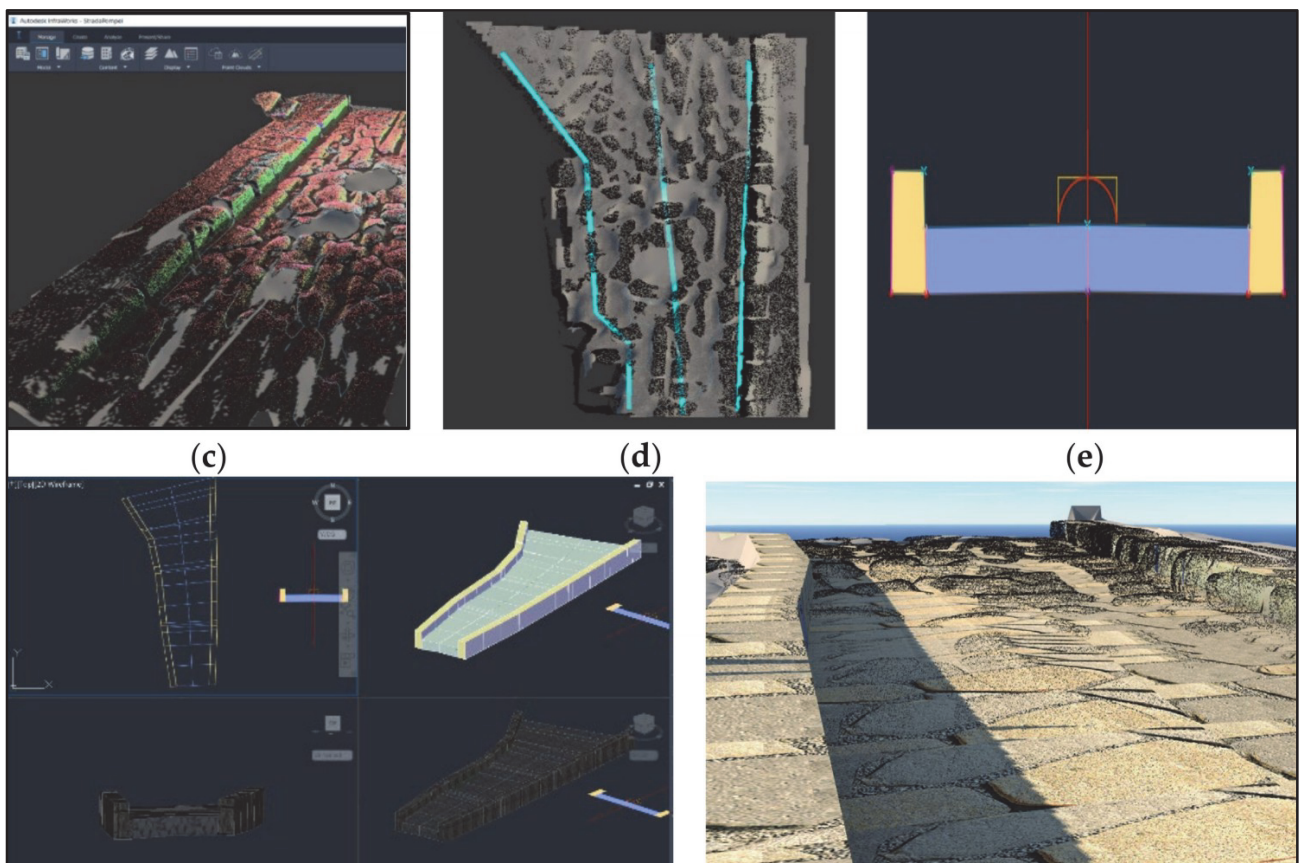


Figura 23 – Pompei – Scan-to-BIM per la documentazione e la valutazione degli interventi manutentivi (da INTIGNANO *et al.* 2021, p. 3043).

Per quanto riguarda gli approcci HBIM applicati a singoli complessi architettonici, il progetto su Villa Rufolo (Ravello) utilizza rilievi integrati fotogrammetrici e TLS per la creazione di modelli

<sup>78</sup> PEPE *et al.* 2024, p. 6966-6980.

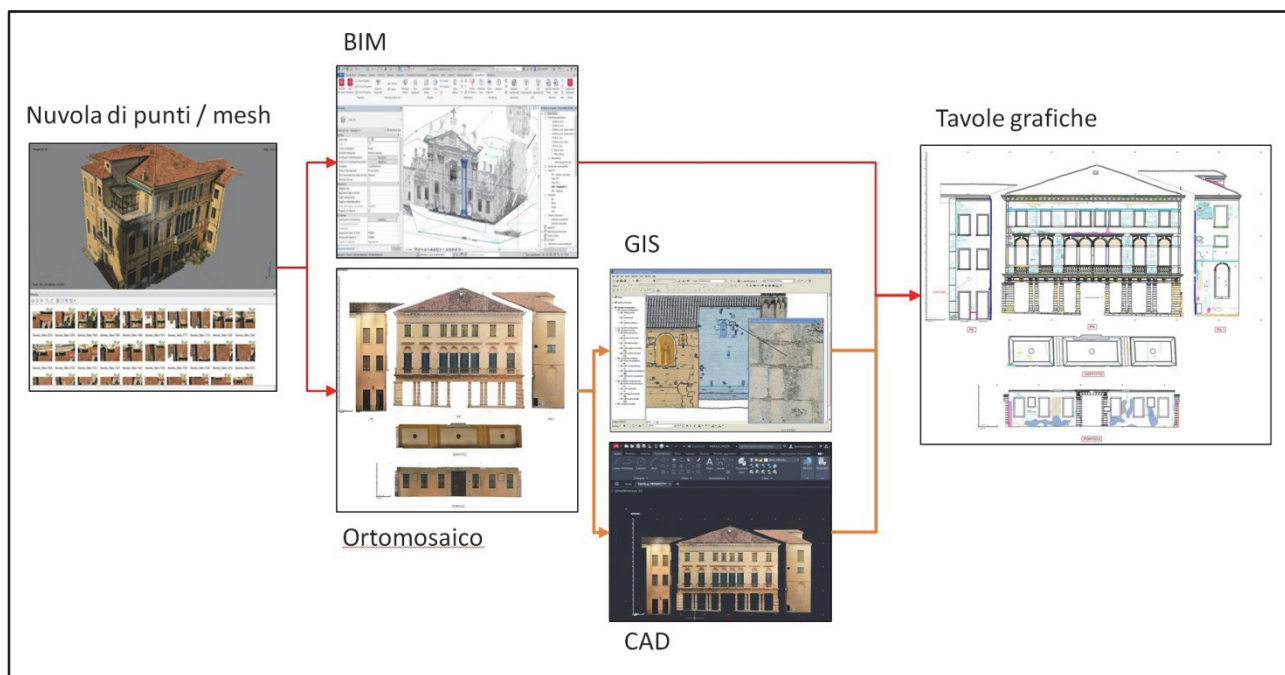
<sup>79</sup> LIMONGIELLO *et al.* 2025, p. 4.

parametrici destinati al supporto delle decisioni di restauro; metodologie Scan-to-BIM sono inoltre adottate nel sito di Pompei per la documentazione delle pavimentazioni archeologiche (**fig. 23**), mentre il caso del Castello del Valentino (Torino) dimostra come la segmentazione di nuvole di punti e la modellazione parametrica possano supportare analisi stratigrafiche e gestione informativa a lungo termine.

Nel complesso, tali esempi evidenziano come l'integrazione GIS-HBIM consenta di collegare analisi territoriali e modellazione architettonica di dettaglio, favorendo processi conoscitivi e decisionali basati su sistemi informativi multiscala e semanticamente strutturati.

### 3.4. Integrazione e aggregazione dei dati

Nonostante i significativi progressi ottenuti negli ultimi anni nella documentazione digitale del patrimonio culturale, una delle principali criticità riguarda la persistente disaggregazione dei dati.



**Figura 24 – Rappresentazione grafica della frammentazione informative di un sistema di gestione tradizionale (elaborazione dell'autore).**

Le informazioni prodotte attraverso rilievo tridimensionale, analisi territoriale, modellazione BIM e studi stratigrafici tendono infatti a rimanere separate sia dal punto di vista disciplinare sia rispetto alle scale di analisi. In molti casi, chi si occupa di territorio opera attraverso strumenti GIS, mentre le analisi edilizie e stratigrafiche vengono sviluppate in ambienti distinti, determinando una

frammentazione informativa che limita la costruzione di quadri conoscitivi unitari e dinamici<sup>80</sup> (fig. 24). La ricerca più recente si orienta verso approcci integrati basati sulla convergenza tra CAD, GIS e BIM, supportata da *standard* aperti quali IFC e *CityGML* che consentono la costruzione di ecosistemi informativi multilivello capaci di integrare dati geometrici, territoriali e semantici all'interno di un'unica infrastruttura digitale<sup>81</sup>. In questo contesto si inserisce il paradigma GeoBIM, che mira alla connessione tra modelli edilizi e sistemi geospaziali, favorendo letture multi-scala e una maggiore interoperabilità dei dati. Tuttavia, la letteratura sottolinea come la reale interoperabilità tra GIS e BIM rappresenti ancora una sfida aperta, a causa delle differenze concettuali tra modelli orientati alla scala territoriale e modelli orientati all'edificio.

Parallelamente allo sviluppo degli *standard* aperti, si osserva una crescente diffusione di piattaforme *software* orientate alla gestione integrata dei dati. In ambito proprietario, ambienti come *ArcGIS* integrati con modelli BIM provenienti da Autodesk Revit attraverso soluzioni *cloud* collaborative permettono oggi la georeferenziazione dei modelli, la loro visualizzazione tridimensionale e la gestione condivisa dei *workflow* digitali<sup>82</sup>. Analogamente, piattaforme *Common Data Environment* (CDE) come quelle sviluppate da *ACCA Software*<sup>83</sup> evidenziano la crescente tendenza verso la centralizzazione dei dati in ambienti *cloud* condivisi e interoperabili (fig. 25).

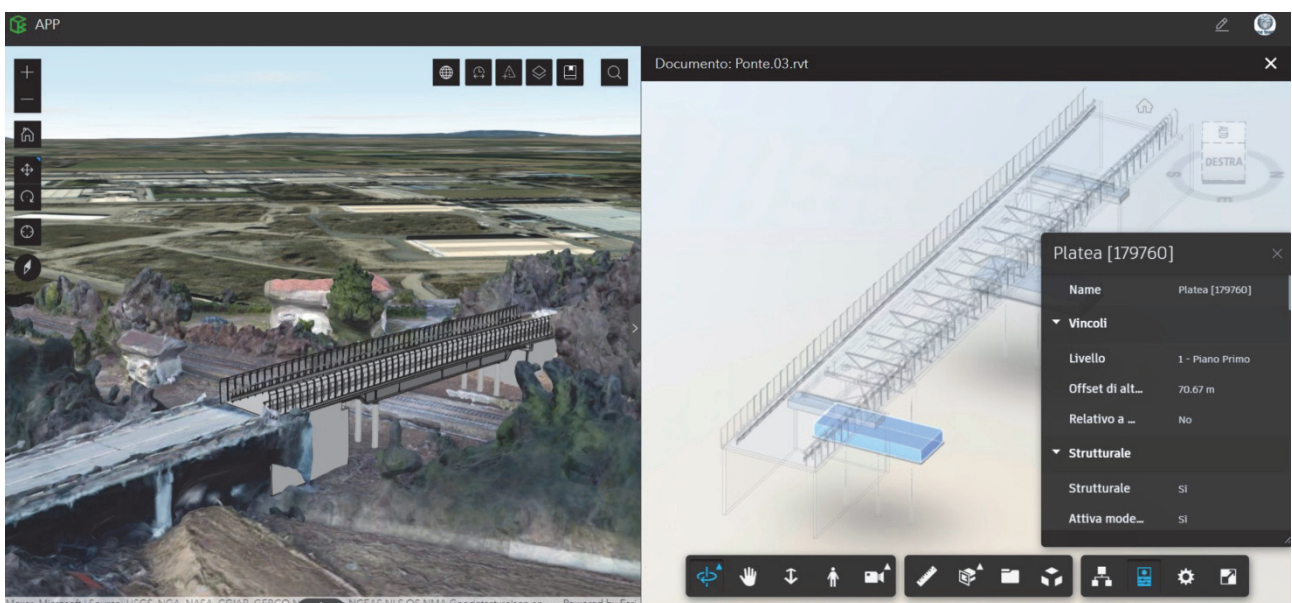


Figura 25 – ArcGis GeoBim – Piattaforma web (<https://www.esri.com/it-it/arcgis/products/arcgis-geobim/overview>).

<sup>80</sup> NOARDO *et al.* 2020, pp. 44-63; DENG *et al.* 2021, pp. 77-95.

<sup>81</sup> KOLBE 2009, pp. 45-55; GRÖGER, PLÜMER 2012, pp. 12-27; BILJECKI *et al.* 2015, pp. 1-17.

<sup>82</sup> WANG *et al.* 2022, pp. 12-40.

<sup>83</sup> ACCA software 2024: <https://www.accasoftware.com/en/bim-management-system>.

Accanto ai *software* proprietari si collocano strumenti *open source*, tra cui QGIS<sup>84</sup>, che negli ultimi anni ha ampliato le capacità di gestione tridimensionale e integrazione con *dataset* complessi e *plugin* per la visualizzazione 3D (fig. 26).

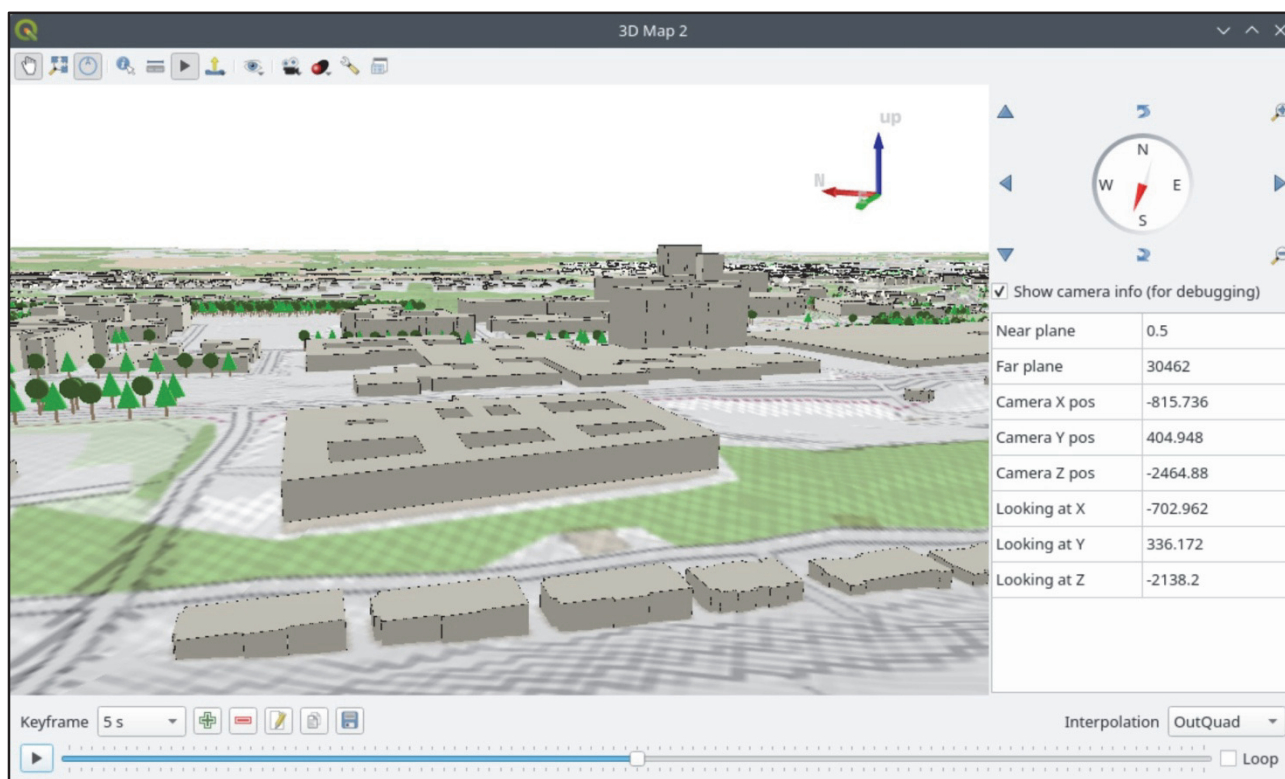


Figura 26 – QGIS visualizzatore 3D.

Tuttavia, la coesistenza tra ecosistemi *software* differenti evidenzia ancora criticità legate alla diffusione dei formati e alla reale circolazione dei dati: nonostante la presenza di *standard* aperti, molte implementazioni restano parzialmente proprietarie, limitando la piena interoperabilità e la condivisione delle informazioni<sup>85</sup>.

Negli ultimi anni hanno assunto un ruolo crescente le piattaforme geospaziali tridimensionali basate su motori *web*, tra cui Cesium, che consentono la visualizzazione e la gestione online di modelli tridimensionali georeferenziati. Questi ambienti permettono l'integrazione simultanea di *meshreality-based*, modelli BIM, dati GIS e informazioni tematiche, favorendo la costruzione di ambienti digitali navigabili e collaborativi e rappresentando un passaggio chiave verso l'implementazione di *digital twin* territoriali<sup>86</sup> (fig. 27). La disponibilità di piattaforme *web* riduce inoltre la necessità di *software* specialistici locali, favorendo la diffusione dei dati e la collaborazione tra discipline diverse.

<sup>84</sup> QGIS software: <https://www.qgis.org>.

<sup>85</sup> NOARDO *et al.* 2020, pp. 44-63.

<sup>86</sup> YAO *et al.* 2018, pp. 701-708; VIRTANEN *et al.*, 2022, pp. 5-12.

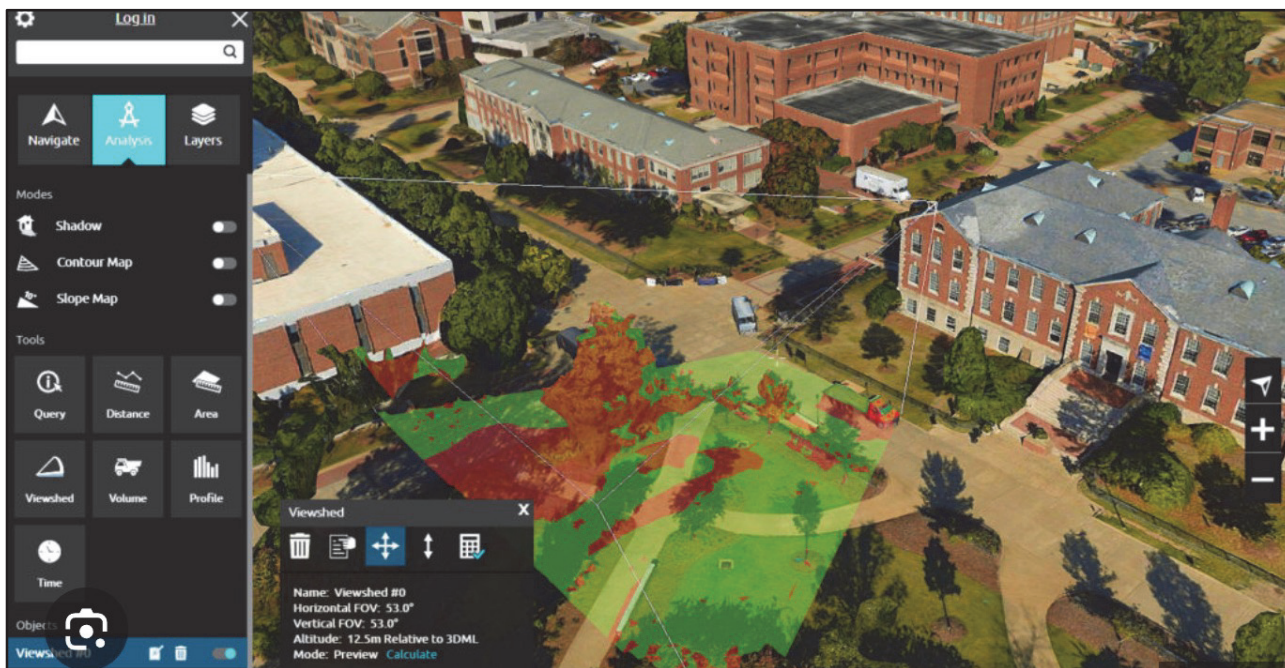


Figura 27 – Cesium – Piattaforma web (<https://cesium.com/platform/>).

Un ulteriore aspetto dello stato dell'arte riguarda la progressiva estensione della scala di applicazione dei modelli digitali. Se inizialmente le tecniche di rilievo tridimensionale erano orientate prevalentemente alla scala architettonica, le ricerche più recenti mostrano una crescente attenzione verso modelli multi-scala capaci di integrare livello architettonico, urbano e territoriale, consentendo interpretazioni sistemiche del patrimonio culturale e analisi morfologiche avanzate<sup>87</sup>. Alla luce di queste evoluzioni, la ricerca contemporanea converge verso sistemi digitali integrati nei quali la documentazione *reality-based*, la modellazione informativa e le piattaforme geospaziali *web-based* costituiscono componenti complementari di un unico ecosistema conoscitivo.

<sup>87</sup>BILJECKI *et al.* 2016, pp. 25-37; DENG *et al.* 2021, pp. 77-95.

#### 4. STRATIGRAFIA MURARIA E MODELLAZIONE DIGITALE

La rappresentazione digitale dell'architettura storica costituisce uno dei principali nodi teorici all'interno delle ricerche contemporanee su HBIM e *digital heritage*, poiché richiede l'integrazione tra i modi di rappresentare i dati in ambito architettonico–ingegneristico e quelli propri dell'archeologia dell'architettura<sup>88</sup>. Il vero problema non è quale strumento informatico usare, ma come "tradurre" la storia e la complessità di un edificio antico in dati digitali, decidendo quale conoscenza inserire nel modello e come organizzarla.

Nei centri storici tale complessità assume una dimensione ancora maggiore. Gli edifici storici raramente coincidono con unità costruttive univoche: processi di accrescimento, sopraelevazione, fusione e trasformazione funzionale hanno generato organismi edilizi complessi in cui la distinzione tra aggregato urbano, corpo di fabbrica ed elemento edilizio risulta spesso sfumata. Studi condotti nei Sassi di Matera hanno evidenziato come la continuità spaziale tra abitazioni ipogee e strutture emergenti renda problematica una classificazione rigida degli oggetti edilizi all'interno di ambienti HBIM tradizionali<sup>89</sup>. Analogamente, le ricerche sulla modellazione digitale del tessuto storico di Venezia mostrano come la compenetrazione tra edifici adiacenti e la presenza di murature condivise impongano strategie di rappresentazione capaci di gestire entità non chiaramente separabili<sup>90</sup>.

Situazioni analoghe sono documentate anche in ambito internazionale. Nel centro storico di Toledo, ad esempio, l'integrazione tra rilievo *reality-based* e modellazione semantica ha evidenziato la difficoltà di definire limiti univoci tra edifici storicamente accorpati, imponendo approcci multi-livello basati sulla separazione tra geometria e interpretazione storico-funzionale<sup>91</sup>. Allo stesso modo, gli studi condotti nel patrimonio medievale di Bruges e nelle città storiche fiamminghe hanno dimostrato che la modellazione a oggetti necessita di livelli semantici flessibili capaci di adattarsi alla variabilità morfologica del costruito storico<sup>92</sup>.

Dal punto di vista concettuale, la conoscenza storico-costruttiva si caratterizza per un processo di progressiva riduzione della complessità: le relazioni fisiche osservabili tra elementi edilizi, come murature, aperture, corpi aggregati o porzioni edilizie, vengono progressivamente sintetizzate in strutture interpretative che esprimono relazioni temporali e funzionali. Tale articolazione entra in tensione con i modelli HBIM, basati su oggetti dotati di identità stabile e relazioni gerarchicamente organizzate, nei quali la conoscenza risulta distribuita e semanticamente strutturata<sup>93</sup> (**fig. 28**).

---

<sup>88</sup> DORE, MURPHY 2017, pp. 120–136.

<sup>89</sup> FASSI *et al.* 2022, pp. 40–58.

<sup>90</sup> MURPHY *et al.* 2013, pp. 1–15.

<sup>91</sup> LERONES *et al.* 2010, pp. 65–78.

<sup>92</sup> BILJECKI *et al.* 2015, pp. 1–17.

<sup>93</sup> BANFI 2017, pp. 85–102.

Tradizionalmente tali relazioni vengono descritte attraverso schede analitiche che mettono in relazione una pluralità di elementi edilizi. Dal punto di vista informatico, tuttavia, queste relazioni devono essere tradotte in sistemi relazionali basati su associazioni univoche, implementate mediante tabelle che registrano coppie di elementi associate a specifiche tipologie di relazione.

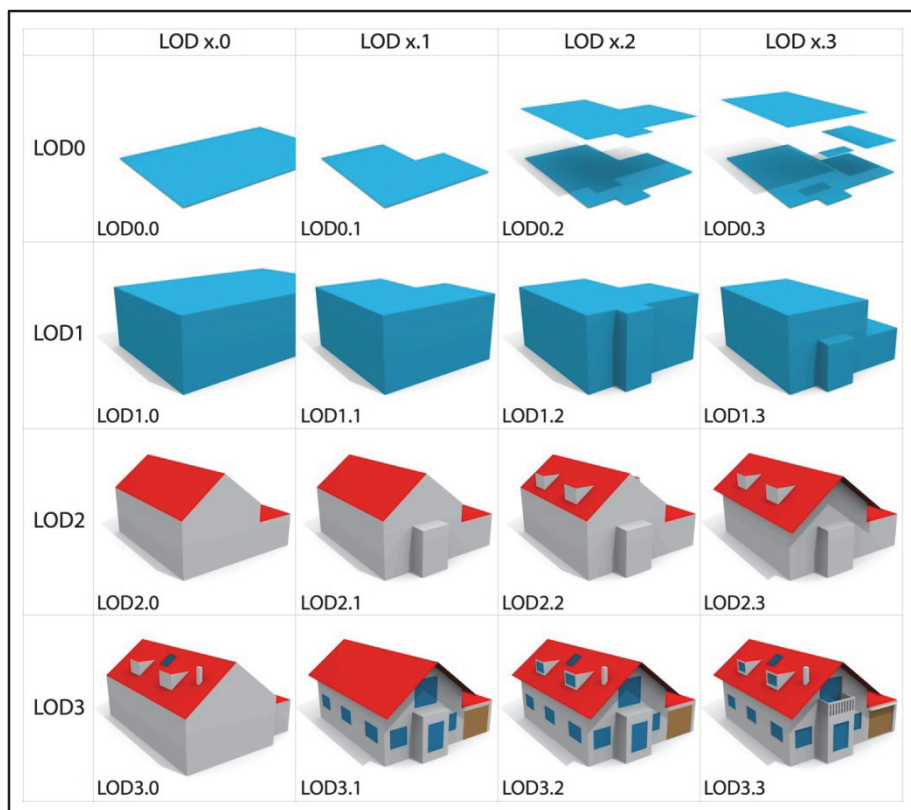


Figura 28 – Schema di riduzione della complessità (da BILJECKI *et al.* 2015, p. 8).

Questo approccio consente di conservare integralmente le relazioni osservate, incluse ridondanze e parallelismi, mentre le sintesi interpretative rappresentano grafi derivati per inferenza e finalizzati alla costruzione di una gerarchia temporale minima. Ne deriva che *database* descrittivo e struttura interpretativa appartengono a livelli logici distinti: il primo documenta fenomeni osservabili, il secondo sintetizza interpretazioni storiche.

La letteratura internazionale evidenzia come i modelli digitali a oggetti risultino particolarmente efficaci nella gestione di entità complesse dotate di geometria, proprietà e relazioni semantiche<sup>94</sup>, ma mostrino limiti significativi quando applicati a contesti storici caratterizzati da incertezza interpretativa. Diversi studi hanno sottolineato come la rigidità classificatoria dei sistemi BIM possa

<sup>94</sup>DORE, MURPHY 2017, pp. 120–136; BANFI 2017, pp. 85–102.

entrare in conflitto con la natura incrementale e non deterministica della ricerca storico-architettonica, riducendo la capacità dei modelli di rappresentare scenari interpretativi multipli<sup>95</sup>.

Una strategia proposta dalla ricerca consiste nel tradurre le relazioni storiche direttamente in relazioni IFC tra oggetti digitali, ad esempio mediante entità come *IfcRelConnects*, approccio sperimentato in recenti applicazioni all'archeologia dell'architettura<sup>96</sup> (fig. 29).

Building element/feature	IFC Class (Type)
Building complex	IfcBuilding (COMPLEX)
Building unit	IfcBuilding (PARTIAL)
Internal room	IfcSpace
Wall	IfcWall
Wall part	IfcBuildingElementPart
Foundation	IfcFooting (STRIP_FOOTING)
Facade	IfcBuiltSystem (OUTERSHELL)
Plaster	IfcCovering (CLADDING)
Lintel	IfcBeam (LINTEL)
Window	IfcWindow
Door	IfcDoor
Opening	IfcVoidingElement
Niches / chases	IfcVoidingFeature (CUTOUT)
Joist	IfcBeam (JOIST)
Floor	IfcElementAssembly (DECK)
Floor substructure	IfcSlab (FLOOR)
Flooring	IfcCovering (FLOORING)
Suspended Ceiling	IfcCovering (CEILING)
Rafter/Purlin	IfcMember (RAFTER, PURLIN)
Roof Substructure	IfcRoof/IfcSlab (ROOF)
Vault	IfcRoof (BARREL_ROOF)
Dome	IfcRoof (DOME_ROOF)
Ties	IfcMember (TIEBAR)
Arch	IfcMember (ARCH_SEGMENT), IfcElementAssembly (ARCH)
Crack	IfcVoidingFeature (USERDEFINED) (IfcBuildingElementProxy)
Degradation	IfcSurfaceFeature (DEFECT) (IfcBuildingElementProxy)

Figura 29 – Elementi di edifici storici e relative classi IFC (da SBROGIO' 2024, pp. 94-97).

Tuttavia, tale soluzione presenta due criticità principali: da un lato tende a cristallizzare relazioni interpretative che non costituiscono dati certi; dall'altro rischia di sovrapporre rappresentazione spaziale e interpretazione storica, incorporando inferenze nella struttura descrittiva del modello. Problematiche analoghe emergono nell'uso delle entità IFC dedicate alla temporalità (*IfcTask*, *IfcRelSequence*), nate per il *construction management* e difficilmente adattabili ai processi storici, caratterizzati da evoluzioni non lineari.

Questa criticità diventa particolarmente evidente alla scala urbana, dove elementi appartenenti a differenti aggregati possono condividere strutture comuni e dove le analisi vengono condotte con

<sup>95</sup> POCOBELLI *et al.* 2018, pp. 41–58.

<sup>96</sup> SBROGIO 2024, pp. 22–39.

livelli di dettaglio diversi. Esperienze di digitalizzazione nei centri storici di Siena e nelle aree medievali di York hanno mostrato come la conoscenza del costruito emerga progressivamente, richiedendo modelli capaci di integrare analisi parziali e aggiornamenti successivi nel tempo. Numerosi esempi internazionali confermano la complessità della gestione multi-scala. I progetti GeoBIM sviluppati nei Paesi Bassi hanno evidenziato la necessità di separare livelli geometrici e livelli semantici nell'integrazione BIM-GIS, evitando conflitti tra strutture dati e garantendo interoperabilità<sup>97</sup>. Analogamente, le ricerche sulla piattaforma ARK-BIM del Politecnico di Torino hanno dimostrato che l'interoperabilità IFC deve essere affiancata da sistemi esterni di gestione della conoscenza per mantenere flessibilità interpretativa e collaborazione interdisciplinare<sup>98</sup> (fig. 30). *Workflow* Scan-to-HBIM applicati a complessi archeologici romani e monumentali europei hanno inoltre evidenziato l'importanza di mantenere separati modello geometrico *reality-based* e strutture interpretative, soprattutto in presenza di dataset ad alta complessità derivanti da rilievo *laser* e fotogrammetrico<sup>99</sup>.

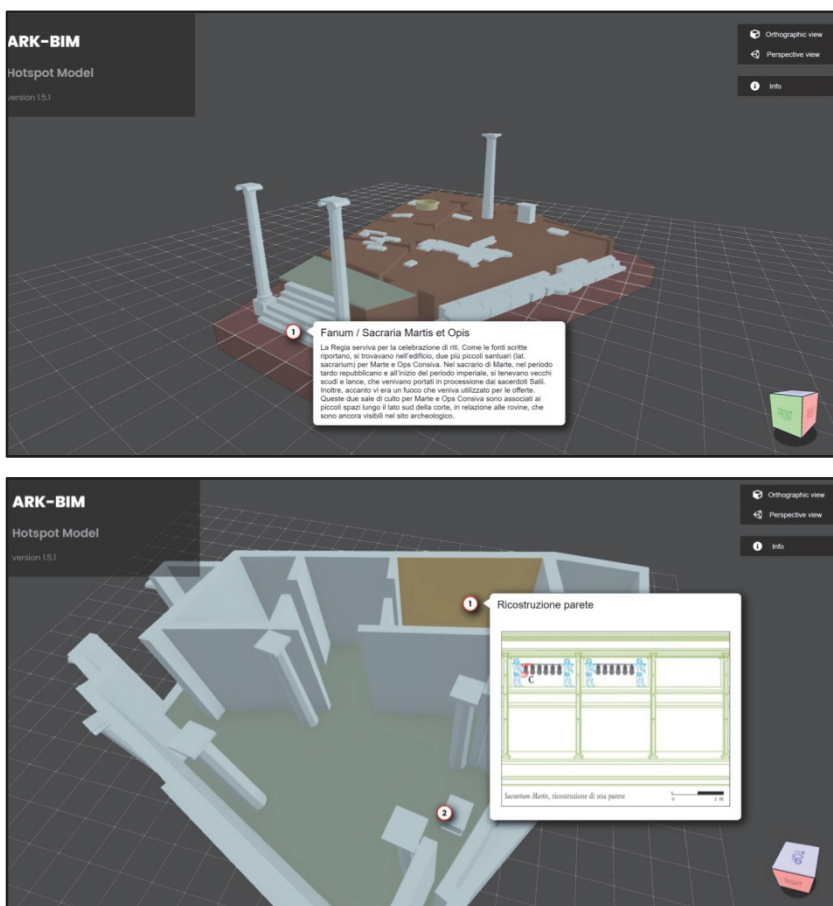


Figura 30 – Progetto ARK – BIM con DB esterno ad oggetto (da DIARIA, RINAUDO *et al.* 2022, pp. 13-14).

<sup>97</sup> ARROYO, OHORI *et al.* 2018, pp. 50–68.

<sup>98</sup> DIARA, RINAUDO 2021, pp. 90–108.

<sup>99</sup> BANFI *et al.* 2022, pp. 1-22.

In tale contesto, l'impiego di geometrie *mesh* derivate da rilievi TLS e fotogrammetrici rappresenta una soluzione particolarmente efficace, poiché consente una rappresentazione continua del costruito, aggiornabile mediante nuove acquisizioni e indipendente da una preventiva semplificazione parametrica. All'interno dello *standard IFC*, la geometria rappresenta infatti un attributo dell'oggetto e può essere definita in forma non parametrica, includendo superfici complesse *reality-based*.

Alla luce di queste considerazioni, tale impostazione si fonda sulla separazione dei livelli informativi. Lo *standard IFC* viene utilizzato come contenitore geometrico e semantico minimo, evitando di attribuirgli funzioni interpretative. Gli elementi edilizi, indipendentemente dalla loro natura di aggregato, corpo di fabbrica o componente costruttiva, vengono rappresentati come oggetti dotati di geometria *mesh*, identificativo persistente e *set* di proprietà dedicate (livello di dettaglio, affidabilità interpretativa, riferimenti a *database* esterni)<sup>100</sup>.

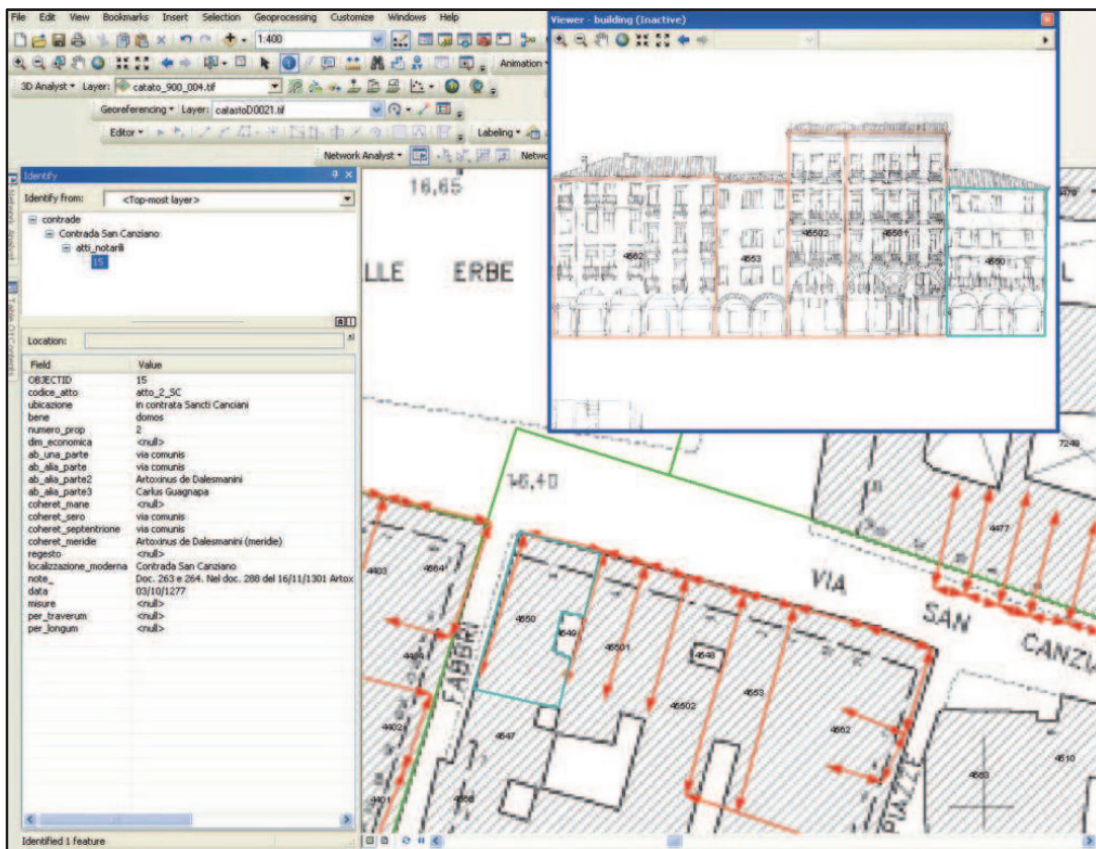


Figura 31 – Progetto ARMEP - Gis con analisi di elementi 2D (da VALENTE, BOARETTO 2011, p. 203).

La logica storica e le relazioni interpretative vengono invece mantenute esterne al modello IFC attraverso strutture dati autonome. Il collegamento tra modello tridimensionale e strutture

<sup>100</sup> MIELE, SBROGIO' 2026.

conoscitive avviene tramite identificativi univoci, consentendo una navigazione bidirezionale tra spazio costruito e sequenza temporale. In questa configurazione, il modello HBIM non assume un ruolo deduttivo, ma diventa un supporto geometrico e semantico condiviso, capace di accogliere conoscenze multi-scala in continua evoluzione.

Rispetto a sistemi basati esclusivamente su GIS<sup>101</sup>, tale approccio offre il vantaggio di una rappresentazione nativamente tridimensionale e di una costruzione automatica del *database* derivata direttamente dalla rappresentazione geometrica (**fig. 31**).

---

<sup>101</sup> VALENTE 2011, pp. 55–70.

## 5. METODOLOGIA

Il presente capitolo descrive il *workflow* metodologico adottato per la documentazione digitale, l'interpretazione e la strutturazione informative di un bene borgo storico, basato su un approccio integrato multi-sensore e multi-scala.

Il rilievo digitale del patrimonio costruito richiede infatti strategie operative capaci di combinare tecniche differenti di acquisizione e modellazione tridimensionale, con l'obiettivo di ottenere rappresentazioni geometriche affidabili, metricamente controllate e ad alta risoluzione. L'evoluzione delle tecnologie geomatiche ha progressivamente consolidato *workflow* integrati nei quali dati fotogrammetrici, scansioni *laser* e misurazioni topografiche convergono all'interno di un unico sistema georeferenziato, permettendo la produzione di DMR impiegabili per documentazione, analisi e gestione del patrimonio storico<sup>102</sup>.

La metodologia adottata segue unalogica *pyramidal scale*, nella quale acquisizione, modellazione e analisi procedono progressivamente dal generale al particolare, garantendo continuità geometrica e coerenza informative tra i diversi livelli di osservazione. In questa prospettiva, il rilievo non rappresenta una fase autonoma, ma il primo passaggio di una *pipeline* unitaria che conduce alla strutturazione informativa del dato in ambiente HBIM/IFC. Tale logica implica che il livello di dettaglio venga calibrato in funzione delle esigenze conoscitive e operative, ottimizzando tempi, risorse e quantità di dati prodotti<sup>103</sup>. La piramide metodologica assume quindi non solo un valore operativo, ma anche epistemologico, rappresentando un processo di costruzione progressiva della conoscenza in cui l'approfondimento guida tanto le scelte tecniche quanto la successiva organizzazione semantica del dato<sup>104</sup>.

Il *workflow* adottato può essere sintetizzato in una sequenza di fasi interconnesse che costituiscono l'ossatura dell'intero processo metodologico:

1. Pianificazione e inquadramento preliminare;
2. Acquisizione multi-sensore;
3. Generazione di DMR multi-scala;
4. Interpretazione e segmentazione;
5. Modellazione concettuale;
6. Implementazione e strutturazione semantica in IFC.

---

<sup>102</sup> REMONDINO *et al.* 2011, pp. 1106–1112; REMONDINO, CAMPANA 2014, pp. 32–41.

<sup>103</sup> NOCERINO *et al.* 2017, pp. 15–23.

<sup>104</sup> BANFI 2020, pp. 211–220; NOCERINO *et al.* 2024, pp. 12-19.

In questo assetto i prodotti del rilievo non costituiscono semplici *output* geometrici, ma rappresentano livelli progressivi di conoscenza che alimentano le fasi successive del processo. La *pipeline* metodologica garantisce quindi continuità tra acquisizione metrica, interpretazione e costruzione del modello informativo, trasformando DMR in un sistema digitale integrato capace di supportare analisi avanzate e interrogazioni multi-scala.

Le sezioni seguenti approfondiscono ciascuna fase del *workflow*, descrivendone principi operativi, strumenti utilizzati e scelte metodologiche, con l'obiettivo di evidenziare la continuità tra rilievo, interpretazione e strutturazione informative tridimensionale.

## 5.1. Attività preliminari

La fase preliminare riveste un ruolo metodologicamente centrale, poiché consente di impostare le attività di campo in modo efficiente e controllato tramite un'analisi preventiva basata su strumenti GIS. L'impiego di dati territoriali disponibili (DTM/DSM, cartografia tecnica, ortofoto, dati catastali e informazioni ambientali) permette di definire una strategia di rilievo coerente con morfologia, accessibilità e condizioni ambientali del sito, riducendo criticità operative e ottimizzando risorse<sup>105</sup> (fig. 32).

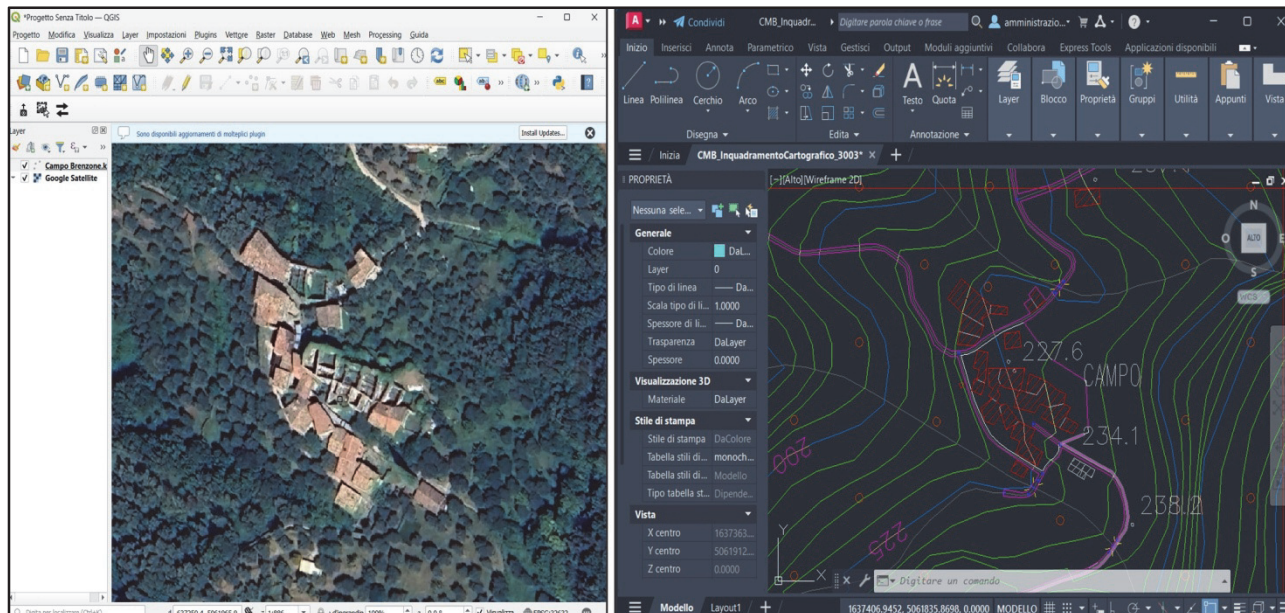


Figura 32 – Strumenti per la pianificazione (elaborazione dell'autore).

Un primo passaggio riguarda la progettazione della rete geodetica di supporto, necessaria per garantire la coerenza metrica e la georeferenziazione comune delle acquisizioni. Mediante analisi GIS è possibile individuare posizioni ottimali, valutando distribuzione spaziale, accessibilità e


<sup>105</sup> REMONDINO *et al.* 2011, pp. 1106–1112; NEX, REMONDINO 2014, pp. 1–12.

potenziale visibilità satellitare, così da ridurre errori di propagazione nella successiva integrazione dei *dataset*. Parallelamente, analisi morfologiche (*slope/aspect*) e valutazioni di ombreggiamento supportano la pianificazione delle missioni UAV, influenzando la scelta del sensore (RGB o LiDAR), delle quote di volo, delle sovrapposizioni e delle traiettorie di acquisizione<sup>106</sup>. La valutazione preliminare di copertura vegetale, pendenze e condizioni ambientali permette inoltre di prevedere zone occluse e di impostare strategie integrate di rilievo, massimizzando qualità geometrica e continuità spaziale dei modelli finali.

## 5.2. Strumenti

La selezione degli strumenti di rilievo è stata calibrata in funzione della scala di analisi e del livello di dettaglio richiesto. L'obiettivo non è l'impiego di singole tecnologie isolate, ma la costruzione di un sistema di acquisizione multi-sensore capace di garantire continuità geometrica e informativa tra scala ambientale, urbana e architettonica.

A scala generale, il controllo metrico e la georeferenziazione dell'intero rilievo sono stati garantiti mediante strumentazione GNSS e topografica, che costituisce la base geometrica comune su cui vengono integrati i *dataset* acquisiti con sensori differenti. In particolare, l'inquadramento topografico è stato realizzato mediante ricevitore GNSS Geomax Z55 in modalità *Network Real Time Kinematic* (NRTK), tecnica che permette il posizionamento in tempo reale con precisione centimetrica attraverso correzioni differenziali fornite da reti di stazioni permanenti, riducendo tempi operativi e necessità di installazione di basi locali (**fig. 33**).

	Nome	GNSS Geomax Z55
	Scheda tecnica	<a href="https://prontogeomax.com/wp-content/uploads/2025/01/GeoMax-Zenith55-DS-A4-1005543-1224-it.pdf">https://prontogeomax.com/wp-content/uploads/2025/01/GeoMax-Zenith55-DS-A4-1005543-1224-it.pdf</a>

**Figura 33** – Ricevitore GNSS Geomax Z55.

<sup>106</sup> COLOMINA, MOLINA 2014, pp. 79–97.

La rete geodetica di raffittimento è stata successivamente integrata mediante stazione totale Topcon IS, utilizzata per il controllo locale delle misure e per il collegamento metrico tra rilievi differenti, assicurando coerenza geometrica durante le fasi di acquisizione e *post-processing* (fig. 34).


	Nome	Stazione topografica Topcon IS <i>Image</i>
	Scheda tecnica	<a href="https://pdf.directindustry.it/pdf/topcon-europe-positioning/is-imaging-station/23468-311097.html">https://pdf.directindustry.it/pdf/topcon-europe-positioning/is-imaging-station/23468-311097.html</a>

Figura 34 – Stazione topografica Tocon IS.

Per l'inquadratura territoriale e la restituzione tridimensionale del contesto ambientale è stato impiegato un sistema UAV DJI Matrice 300 dotato di sensore LiDAR Zenmuse L1. Tale tecnologia consente di acquisire rapidamente nuvole di punti ad alta densità grazie all'emissione di impulsi laser e alla misura del tempo di ritorno (*time of flight*), integrando sistemi GNSS e unità inerziali (IMU) per la georeferenziazione diretta. La capacità di registrare ritorni multipli permette di distinguere superfici vegetali e terreno, rendendo il rilievo particolarmente efficace in contesti complessi dal punto di vista morfologico e ambientale.


	Piattaforma UA	DJI Matrice 300 RTK
	Scheda tecnica	<a href="https://www.dji.com/it/matrice-300/specs">https://www.dji.com/it/matrice-300/specs</a> .
	Sensore LiDAR	Zenmuse L1
	Scheda tecnica	<a href="https://www.dji.com/it/zenmuse-l1/specs">https://www.dji.com/it/zenmuse-l1/specs</a> .

Figura 35 – Sistema UA con sensore LiDAR Zenmuse L1.

Le acquisizioni RGB da UAV sono state impiegate principalmente alla scala urbana e architettonica, mediante piattaforme differenti selezionate in funzione del livello di dettaglio richiesto e delle condizioni di illuminazione.

I rilievi di inquadramento sono stati effettuati con piattaforma DJI Matrice 300 con sensore *full frame* da 45 MP (fig. 36).


	Piattaforma UA	DJI Matrice 300 RTK
	Scheda tecnica	<a href="https://www.dji.com/it/matrice-300/specs">https://www.dji.com/it/matrice-300/specs</a>
	Sensore RGB	Zenmuse P1
	Scheda tecnica	<a href="https://enterprise.dji.com/it/zenmuse-p1/specs">https://enterprise.dji.com/it/zenmuse-p1/specs</a>

Figura 36 - Sistema UA con sensore LiDAR Zenmuse P1.

Le acquisizioni di dettaglio sono state eseguite mediante piattaforme leggere ad alta risoluzione, particolarmente efficaci in condizioni di luce variabile o in spazi parzialmente chiusi. obiettivi conoscitivi (fig. 37).

	Nome	DJI Mavic Cine pro
	Scheda tecnica	<a href="https://www.dji.com/it/mavic-3-pro/specs">https://www.dji.com/it/mavic-3-pro/specs</a>
	Nome	DJI Mavic 4 pro
	Scheda tecnica	<a href="https://www.dji.com/it/mavic-4-pro/specs">https://www.dji.com/it/mavic-4-pro/specs</a>

Figura 37 – Sistemi UA DJI Mavic Cine pro e 4 pro.

I rilievi di dettaglio a scala architettonica sono stati realizzati mediante *laser scanner* Trimble X9 (fig. 38) in modalità statica e tempo di volo. Il principio di funzionamento si basa sull'emissione di impulsi *laser* verso le superfici *target* e sulla misura della distanza tramite due principali metodologie: il *Time of Flight* (ToF), basato sulla misura del tempo impiegato dall'impulso per

raggiungere l'oggetto e tornare al sensore, e il *Phase Shift*, che calcola la distanza analizzando lo sfasamento tra onda emessa e onda riflessa<sup>107</sup>.


	Nome	Laser scanner Terrestre – Trimble X9
	Scheda tecnica	<a href="https://trl.trimble.com/docushare/dsw eb/Get/Document-1049931/022516-728A-G-en-UK_Trimble%20X9_SpecSheet_Core LT_A4_0925_LR_SEC.pdf">https://trl.trimble.com/docushare/dsw eb/Get/Document-1049931/022516-728A-G-en-UK_Trimble%20X9_SpecSheet_Core LT_A4_0925_LR_SEC.pdf</a>

Figura38 – Laser scanner terrestre Trimble X9.

Durante la scansione, il sistema integra la misura della distanza con gli angoli orizzontali e verticali determinati da specchi rotanti o meccanismi di scansione, generando una nuvola di punti tridimensionale in cui ciascun punto è definito da coordinate spaziali (X, Y, Z) e, frequentemente, da informazioni aggiuntive quali intensità del segnale riflesso e valori cromatici RGB derivati da camere integrate<sup>108</sup>. L'elevata densità di campionamento consente una rappresentazione metrica accurata e non invasiva, particolarmente adatta alla documentazione di beni architettonici e archeologici complessi.

Poiché ogni scansione è acquisita in un sistema di riferimento locale dello strumento, il rilievo completo richiede l'esecuzione di più stazioni di scansione. Le diverse nuvole di punti vengono successivamente allineate mediante processi di registrazione, basati su target artificiali, elementi geometrici comuni o algoritmi automatici di *matching*, ottenendo un modello coerente in un unico sistema di riferimento<sup>109</sup>. Gli algoritmi di *cloud matching* ottimizzati da Trimble consentono di registrare le singole scansioni direttamente in fase di acquisizione e di verificarne qualità e copertura. Tale modalità di registrazione consente di non dover utilizzare un appoggio topografico per l'unione dei singoli rilievi, ma esclusivamente per la georeferenziazione dell'intero progetto. In fase di *post processing* un'ulteriore fase di registrazione (**fig. 39**) consente di ottenere il massimo grado di accuratezza e di allineare il rilievo al sistema topografico di riferimento stabilito, consentendo la successiva integrazione con *dataset* fotogrammetrici.

<sup>107</sup> BOEHLER, MARBS 2003, pp. 9–16.

<sup>108</sup> LERMA *et al.* 2010, pp. 136–144.

<sup>109</sup> CHENG *et al.* 2018, pp. 322–331.

Nel complesso, l'insieme degli strumenti adottati non costituisce una semplice sommatoria di tecnologie, ma un sistema integrato in cui ciascun sensore contribuisce in modo complementare alla costruzione del modello digitale: GNSS e topografia garantiscono controllo metrico e georeferenziazione, UAV-LiDAR supporta la lettura ambientale e morfologica, fotogrammetria UAV-RGB e di prossimità restituisce qualità visiva e dettaglio geometrico, mentre il TLS assicura precisione metrica alle scale più ravvicinate.



Figura 39 – Procedura di finalizzazione delle scansioni TLS.

Tale integrazione rappresenta la base operativa per la successiva generazione dei modelli *reality-based* e per il loro impiego nelle fasi di analisi e strutturazione informativa.

### 5.3. Modelli *reality-based* e integrazione tra dataset

La fotogrammetria SfM costituisce una componente centrale per la produzione di modelli tridimensionali ad alta risoluzione. Il *workflow* comprende acquisizione con adeguata sovrapposizione, estrazione e *matching* di *feature*, *bundle adjustment*, generazione di *sparse* e *dense cloud*, produzione di *mesh* e *texture*<sup>110</sup>.

L'introduzione di nuovi *software*, come ad esempio *Agisoft Metashape*<sup>111</sup>, *Reality Capture*<sup>112</sup>, *Pix4D*<sup>113</sup> e *DJI Terra Pro*<sup>114</sup>, che implementano questi algoritmi permette di combinare dati provenienti da sensori differenti all'interno di modelli *reality-based* estremamente densi e dettagliati, contribuendo all'evoluzione dei *workflow* digitali verso sistemi sempre più integrati<sup>115</sup>.

<sup>110</sup> SNAVELY *et al.* 2006, pp. 835–846; WESTOBY *et al.* 2012, pp. 300–314.

<sup>111</sup> <https://metashapeitalia.it>

<sup>112</sup> <https://www.weissoft.it/realitycapture/>

<sup>113</sup> <https://www.pix4d.com/>

<sup>114</sup> <https://enterprise.dji.com/it/dji-terra>

<sup>115</sup> NOCERINO *et al.* 2017, pp. 15–23.

Il rilievo TLS terrestre costituisce una componente essenziale nei *workflow* integrati grazie alla sua elevata precisione metrica e alla capacità di acquisire rapidamente grandi quantità di dati tridimensionali.

L'integrazione con i modelli fotogrammetrici avviene tramite procedure di registrazione e allineamento geometrico, tra cui l'algoritmo ICP (*Iterative Closest Point*), che determina iterativamente la trasformazione rigida ottimale minimizzando la distanza tra punti corrispondenti di scansioni sovrapposte, è uno dei maggiormente impiegati. Questo approccio permette di ottenere un allineamento accurato basato sulla geometria delle superfici rilevate<sup>116</sup> consentendo la creazione di *dataset* unificati in cui precisione e qualità visiva risultano complementari, ottimizzando anche la componente *texture* che nei *laser scanner* con fotocamera integrata risulta di non sufficiente risoluzione (**fig. 40**).



**Figura 40** – Modello 3D ottenuto mediante integrazione di scansioni TLS e fotogrammetria da piattaforma UA (elaborazione SARTINI 2024).

Nei *workflow* integrati contemporanei, l'integrazione tra SfM e TLS avviene tramite registrazione e allineamento geometrico (ad es. ICP), ottenendo *dataset* unificati in cui accuratezza metrica (TLS) e qualità visiva/texture (SfM) risultano complementari. In un quadro evolutivo recente, le rappresentazioni neurali della scena (es. *Gaussian Splatting*) introducono nuove possibilità di integrazione efficiente e visualizzazione ad altissima qualità, consentendo la creazione di modelli sempre più densi e continui<sup>117</sup>.

---

<sup>116</sup> BESL, MCKAY 1992, pp. 239–256; CHENG *et al.* 2018, pp. 322–331.

<sup>117</sup> KERBL *et al.* 2023, pp. 146–155; NOCERINO *et al.* 2024, pp. 55–65.

All'interno della metodologia adottata, i prodotti *reality-based* vengono declinati in tre livelli di rappresentazione a diversa risoluzione, funzionali alle successive fasi di interpretazione, segmentazione e strutturazione informativa:

- modello a scala territoriale, orientato all'inquadramento territoriale e morfologico: DMR-LR (*Digital model reality-based low resolution*);
- modello a scala urbana, orientato alla lettura del tessuto costruito e alla distinzione dei corpi di fabbrica: DMR-MR (*Digital model reality-based medium resolution*);
- modello a scala architettonica, orientato alla documentazione metrica e materica del dettaglio costruttivo: DMR-HR (*Digital model reality-based high resolution*).

#### 5.4. Interpretazione e segmentazione: dal DMR all'HBIM

La segmentazione dei modelli tridimensionali costituisce una fase centrale del *workflow* metodologico proposto. L'approccio adottato si sviluppa secondo una logica multiscalare, procedendo dal livello territoriale verso il livello urbano ed architettonico.

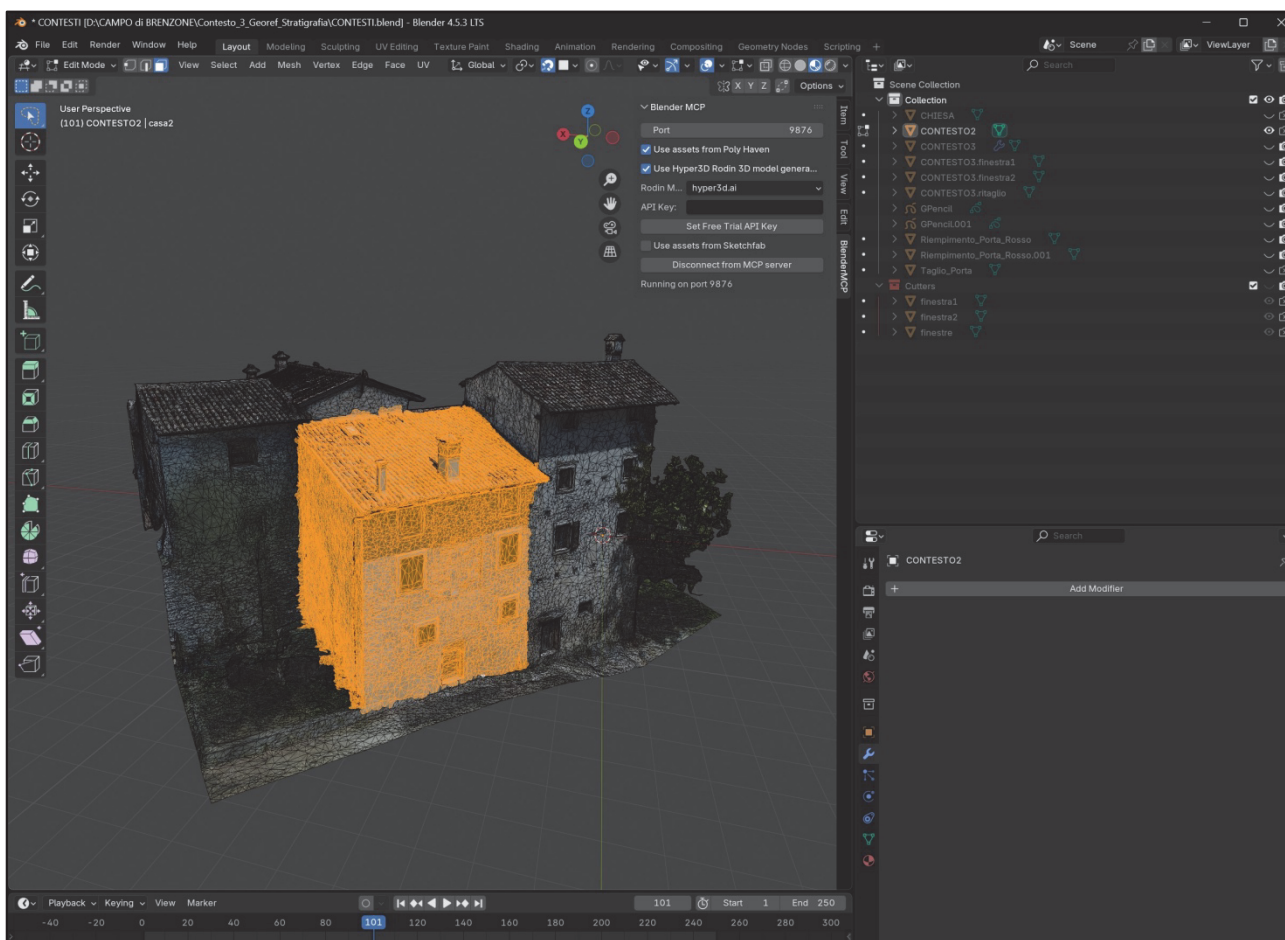


Figura 41 – Processo di segmentazione degli aggragati edilizi in singoli CF in ambiente Blender (elaborazione dell'autore).

La prima fase di segmentazione avviene a scala urbana attraverso la separazione delle porzioni di *mesh* corrispondenti ai diversi aggregate architettonici (AC) o corpi di fabbrica (CF) e la successiva suddivisione delle principali componenti edilizie riconoscibili dall'esterno, quali coperture, superfici murarie e altri elementi morfologicamente distinguibili (fig. 41).

In questa fase operativa viene generalmente utilizzato un modello digitale a risoluzione ridotta (DMR-LR), scelto per ottimizzare la gestione computazionale dei *dataset* mantenendo comunque un livello di dettaglio sufficiente alla distinzione preliminare delle principali unità stratigrafiche murarie (USM) o unità edilizie (UE) osservabili nei prospetti esterni. Qualora necessario, il processo può essere supportato o affinato mediante l'impiego di modelli a maggiore risoluzione (DMR-M/HR), utili per incrementare l'accuratezza interpretativa.

Dopo la segmentazione dei singoli elementi edilizi, si procede all'individuazione delle USM attraverso la selezione diretta delle porzioni di *mesh* di interesse o mediante strumenti di disegno vettoriale tridimensionale disponibili in ambienti di modellazione, come *Grease Pencil* in Blender (fig. 42).

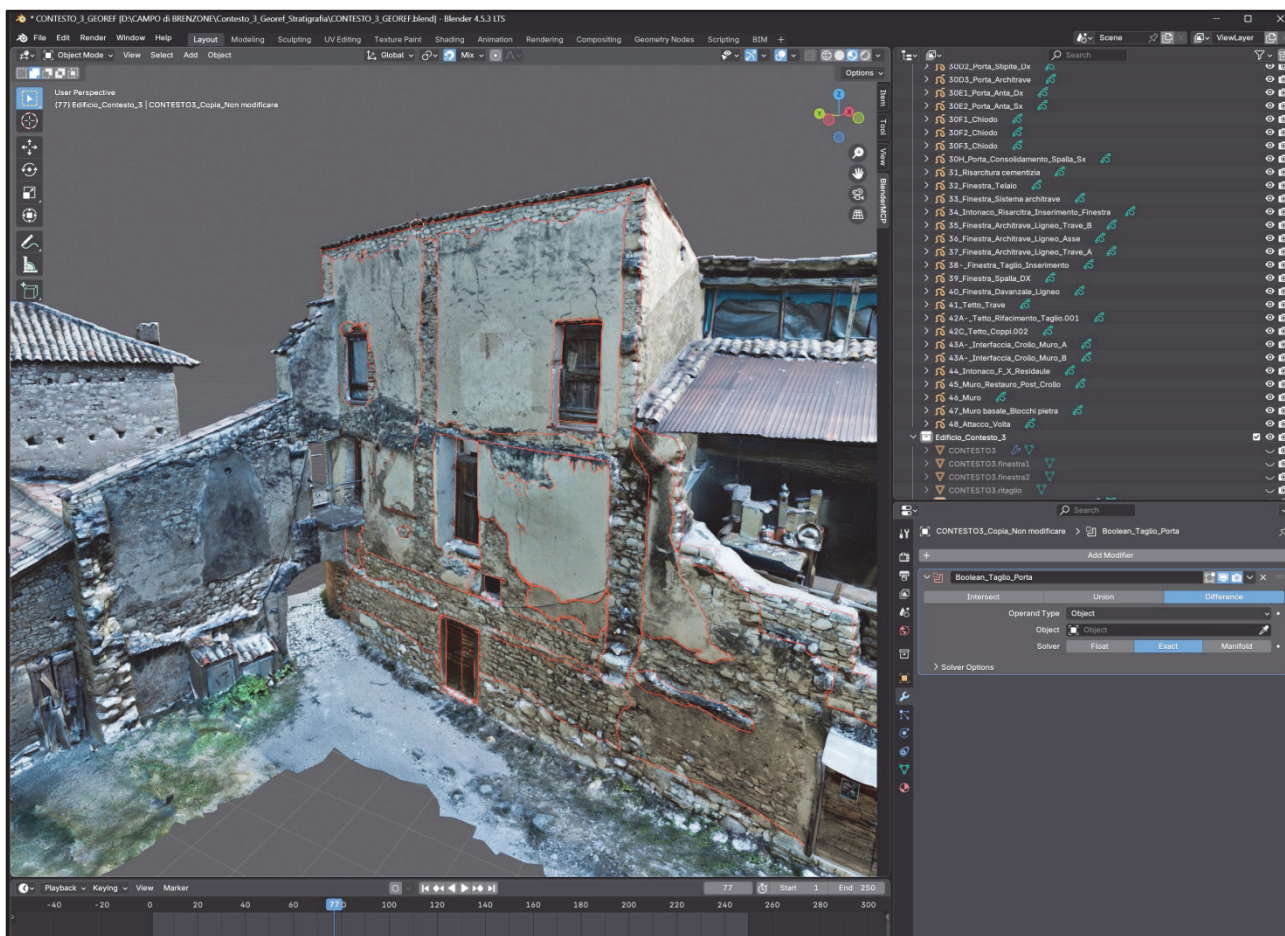


Figura 42 - Lettura della stratigrafia muraria direttamente sul modello 3D in ambiente Blender (elaborazione dell'autore).

A support dell'interpretazione vengono inoltre impiegati strumenti di *photo filtering by point* presenti nei *software* SfM, che permettono di selezionare specifiche porzioni del modello ed estrarre automaticamente le immagini originali utilizzate nel processo di ricostruzione tridimensionale. Questa procedura consente di accedere alla massima risoluzione fotografica disponibile, migliorando l'accuratezza dell'analisi e facilitando l'osservazione di dettagli non leggibili nelle tradizionali rappresentazioni bidimensionali<sup>118</sup> (fig. 43).

L'utilizzo di DMR permette inoltre di analizzare porzioni difficilmente accessibili in fase di rilievo diretto, quali parti elevate delle murature, coperture o superfici non raggiungibili senza opere provvisorie, ampliando le possibilità interpretative e riducendo la necessità di interventi invasivi in campo. Nonostante ciò, l'interpretazione condotta sul modello digitale richiede una fase di verifica diretta sul manufatto, finalizzata al confronto tra osservazione digitale e osservazione *in situ*, con lo scopo di validare, integrare o correggere la lettura stratigrafica effettuata.

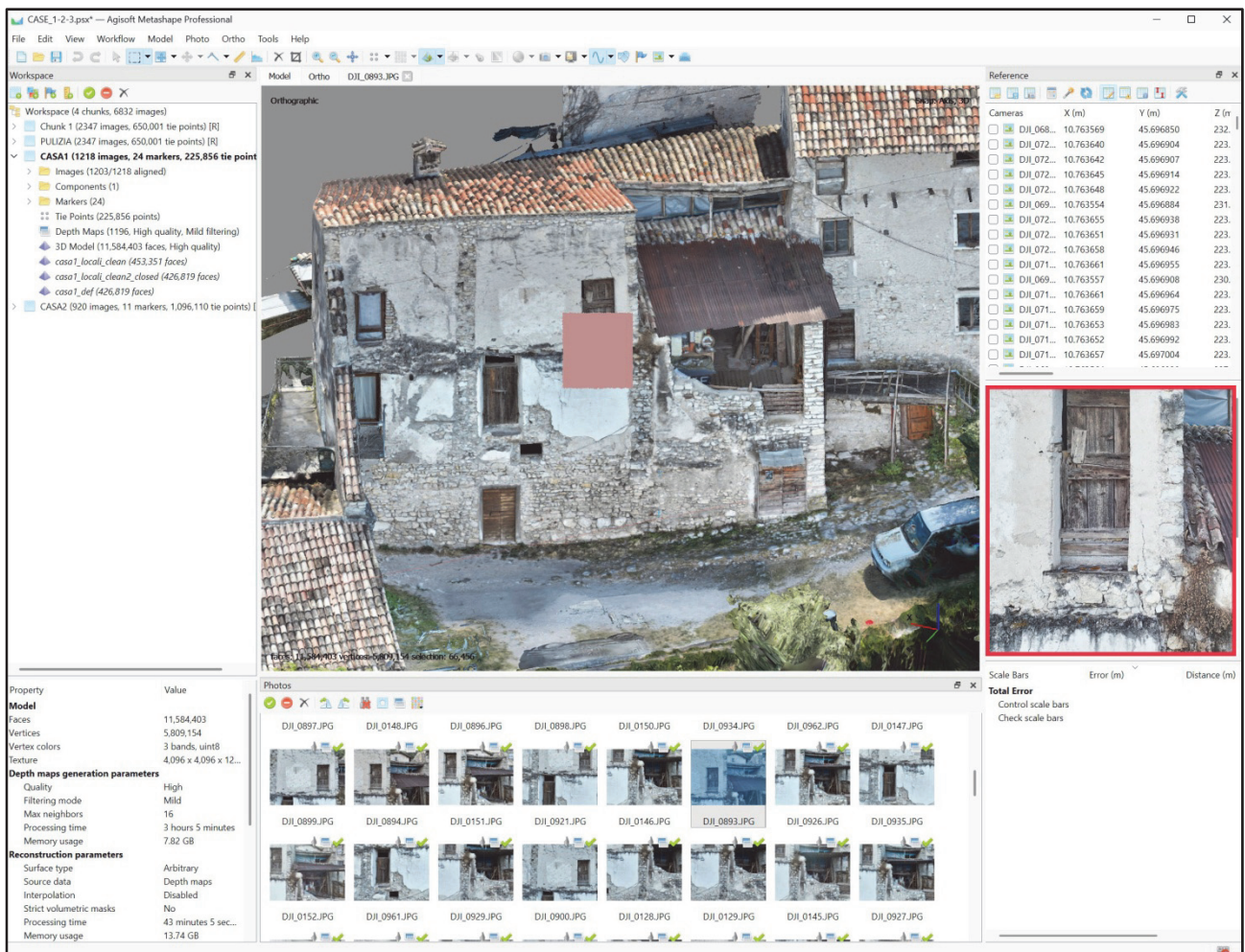


Figura 43 – Funzione di *filtering by point* con estrazione delle immagini a risoluzione originale utilizzate nel processo SfM.

<sup>118</sup> ELTNER, SOFIA 2020, pp. 1–17.

Una volta validate l'interpretazione, I tracciati vettoriali vengono utilizzati per la segmentazione geometrica del modello mediante strumenti di taglio della *mesh*, quali *Knife tool* di Blender. Tale operazione consente di trasformare le unità stratigrafiche individuate in oggetti 3D da utilizzare nel processo di semantizzazione HBIM<sup>119</sup> (fig. 44).

Questa fase metodologica rappresenta il passaggio fondamentale dalla semplice rappresentazione bidimensionale alla costruzione di una geometria tridimensionale strutturata e semanticamente organizzata, predisposta per la codifica in ambiente HBIM. Attraverso tale processo, le USM, le discontinuità e le relazioni stratigrafiche vengono interpretate e modellate direttamente nello spazio tridimensionale, superando i limiti delle rappresentazioni bidimensionali e favorendo una lettura spazialmente coerente e integrata<sup>120</sup>.

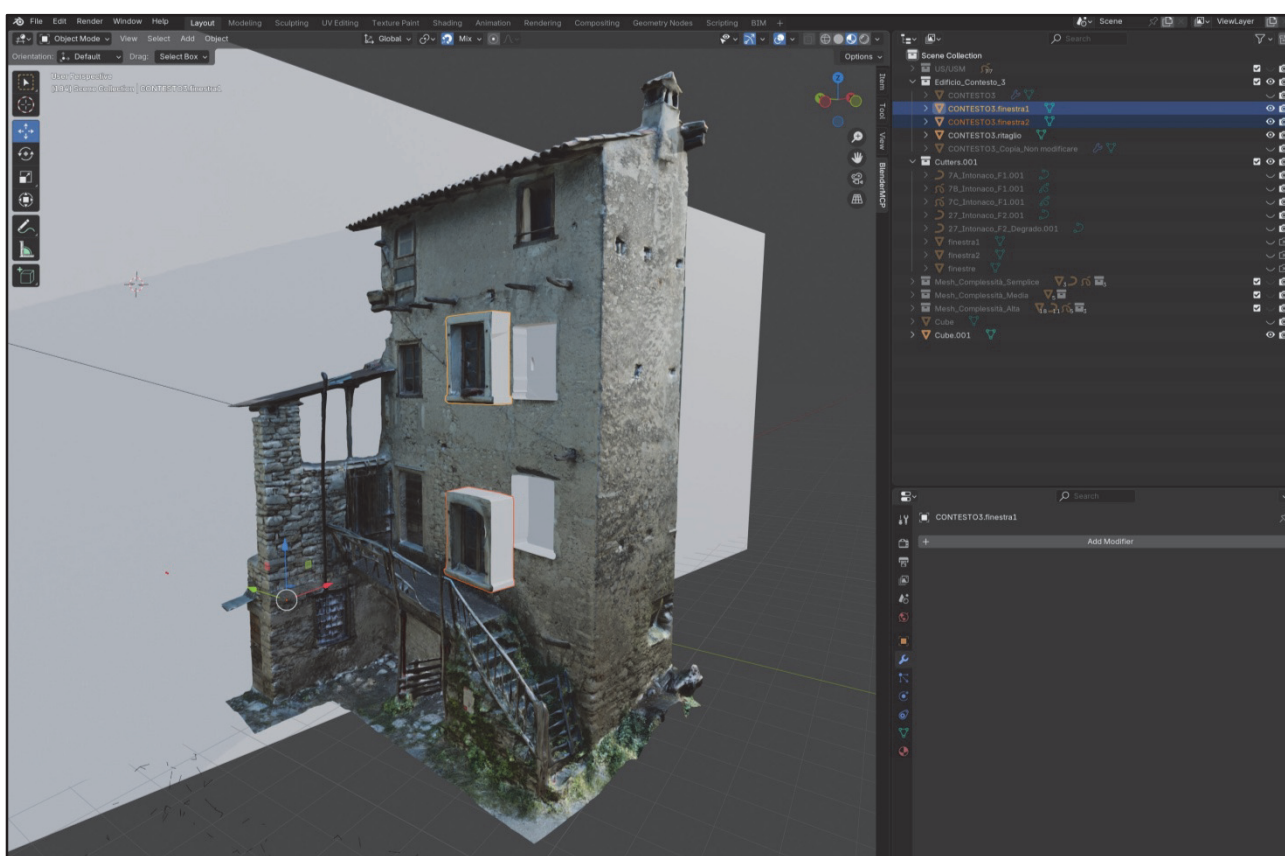


Figura 44 – Segmentazione delle finestre tramite strumento *Knife tool* in ambiente Blender.

## 5.5. Modello IFC e database stratigrafico

Una volta completata la segmentazione geometrica, il *workflow* prevede l'implementazione della struttura semantica secondo lo *standard* IFC, al fine di trasformare la geometria *reality-based* in un

<sup>119</sup>DORE, MURPHY 2017, pp. 85–102.

<sup>120</sup> BANFI 2017, pp. 145–158.

modello informativo interrogabile e semanticamente organizzato. Tale fase viene sviluppata all'interno del *software open source Blender* mediante l'utilizzo dell'*add-on Bonsai*<sup>121</sup>, che consente la creazione e gestione di modelli IFC nativi, salvati direttamente nel format *.ifc*, evitando procedure di esportazione intermedie e garantendo la coerenza tra ambiente di modellazione e struttura informativa<sup>122</sup>.

All'interno di questo *framework*, Blender svolge un duplice ruolo: da un lato fornisce l'interfaccia grafica per la gestione e visualizzazione del modello, dall'altro mette a disposizione una console di programmazione in linguaggio *Python*, attraverso cui risulta possibile accedere in modo avanzato alla struttura dati del modello e automatizzare numerose operazioni di interrogazione e gestione. La visualizzazione e verifica del *database* tridimensionale IFC può essere effettuata mediante *software* dedicati; nel presente *workflow* viene utilizzato *usBIMViewer+* (ACCA Software), che permette l'ispezione delle relazioni semantiche e degli attributi associate agli oggetti, sebbene sia in fase di implementazione l'impiego di una piattaforma *web-based* per la gestione e visualizzazione dei dati<sup>123</sup>.

La traduzione della segmentazione geometrica in struttura informativa avviene mediante l'associazione dei component individuati alle corrispondenti classi IFC. I corpi di fabbrica (CF) vengono implementati come entità *IfcBuilding*, concepite come contenitori logici che aggregano le diverse component edilizie, quali pareti (*IfcWall*), solai (*IfcSlab*) e coperture (*IfcRoof*), tra loro relazionate mediante la relazione *IfcRelAggregates* (Tabb. 1 e 2).

Tabella 2 – Attributi degli oggetti IFC impiegati nel modello (da MIELE, SBROGIO' 2026).

Attributo	Relazione	Descrizione
GlobalID	-	Identificativo univoco
HasAssignments	<i>IfcRelAssigns</i>	Collegamento a soggetti/attori
Decomposes	<i>IfcRelAggregates</i>	Scomposizione in parti
HasAssociations	<i>IfcRelAssociates</i>	Collegamento a documenti
ObjectType	-	Tipo
IsTypedBy	<i>IfcRelDefinesByType</i>	Riferimento al tipo
Tag	-	Codice USM/CF
ConnectedTo	<i>IfcRelConnectsElements</i>	Ammorsamento
HasOpenings	<i>IfcRelVoidsElements</i>	Presenza di aperture
ContainedInStructure	<i>IfcRelContainedInSpatialStructure</i>	Riferimento al CF
HasCoverings	<i>IfcRelCoversBldgElements</i>	Presenza di intonaco
HasSurfaceFeature	<i>IfcRelAdheresToElement</i>	Presenza di degrado
Name	-	Nome
Description	-	Descrizione libera

<sup>121</sup> BONSAI BIM s.d., *Bonsai — Open BIM add-on for Blender* [software], IfcOpenShell Project. <https://bonsaibim.org/>

<sup>122</sup> MIELE, SBROGIO' 2026, *manoscritto inviato*.

<sup>123</sup> Cfr. *infra*, cap. p. 55.

**Tabella 3 - Attributi degli oggetti IFC impiegati nel modello (da MIELE, SBROGIO' 2026).**

Gruppo di proprietà	Proprietà	Descrizione
Pset_Common	BuildingID	Identificativo catastale o piano particolareggiato
	Construction Method	Tecnica costruttiva muraria
	OccupancyType	Frequenza d'uso dell'edificio
	YearOfConstruction	Anno (epoca) di costruzione
PSet_Custom	Condition	Stato di conservazione
	RiskName	Nome del rischio
	NatureOfRisk	Natura del rischio

Le unità stratigrafiche murarie (USM) sono assegnate alla classe *IfcBuildingElementPart* e aggregate all'interno della parete di appartenenza (*IfcWall*). Analogamente, la segmentazione può essere estesa a elementi architettonici specifici (ad esempio conci di arco, cornici, aperture) e a componenti non murari, quali infissi o elementi decorativi, successivamente aggregate nella relativa entità complessiva (**Tab. 3**).

**Tabella 4 – Proprietà degli oggetti IFC impiegati nel modello (da MIELE, SBROGIO' 2026).**

Tabella	Campo	Oggetto IFC	Attributo IFC	Descrizione
Anagrafica	USM_ID	<i>IfcBuildingElementPart</i>	GlobalID	Identificativo USM
	USM_Nome	<i>IfcBuildingElementPart</i>	Tag	Codice USM
	USM_PG_ID	<i>IfcWall</i>	Global ID	Identificativo PG
	USM_PG_Nome	<i>IfcWall</i>	Tag	Codice PG
	USM_CF_ID	<i>IfcBuilding</i>	Global ID	Identificativo CF
	USM_CF_Nome	<i>IfcBuilding</i>	Tag	Codice CF
Rapporti	USM1_ID	<i>IfcBuildingElementPart</i>	GlobalID	Identificativo USM
	USM1_Nome	<i>IfcBuildingElementPart</i>	Tag	Codice USM
	USM1_CF	<i>IfcBuilding</i>	Tag	Codice CF
	USM2_ID	<i>IfcBuildingElementPart</i>	GlobalID	Identificativo USM
	USM2_Nome	<i>IfcBuildingElementPart</i>	Tag	Codice USM
	USM2_CF	<i>IfcBuilding</i>	Tag	Codice CF
	tipo	-	-	si lega/è analogo/si appoggia taglia/riempie

Ne deriva un'architettura semantic gerarchica nella quale le parti più minute compongono progressivamente gli elementi complessi, consentendo una distribuzione della conoscenza direttamente all'interno del modello tridimensionale. Le informazioni non sono quindi descritte esternamente, ma risultano interrogabili attraverso le relazioni intrinseche al *database* IFC.

Agli oggetti così definite possono essere attribuiti tipi, attributi, proprietà e relazioni, consentendo analisi anche a scala urbana. I tipi (*IfcTypeObject*) descrivono caratteristiche condivise da più

elementi appartenenti alla medesima classe e risultano particolarmente utili per l'individuazione di componenti architettoniche ricorrenti. Le proprietà (Property Sets – Psets) descrivono invece caratteristiche specifiche dei singoli elementi, come stato di conservazione, fase costruttiva o condizioni di degrado. Le relazioni IFC permettono di stabilire collegamenti tra componenti e tra questi e soggetti esterni, documentali o interpretativi; ad esempio, *IfcRelConnectsElements* consente di descrivere rapporti fisici tra elementi edilizi, mentre *IfcRelAssociates* permette di collegare componenti a documentazione tecnica, bibliografica o amministrativa, oppure a soggetti coinvolti nel processo di studio e conservazione.

In questa fase vengono privilegiate le proprietà già codificate dallo *standard* IFC per garantire interoperabilità e standardizzazione, pur mantenendo la possibilità di estensione tramite *script Python* qualora siano necessarie proprietà personalizzate. Il modello IFC ottenuto riproduce progressivamente la complessità del reale e consente interrogazioni tridimensionali native, con un livello di dettaglio superiore rispetto ai tradizionali *database* GIS bidimensionali.

Gli attributi implementati definiscono l'identità degli oggetti e la loro collocazione all'interno della struttura gerarchica del modello, comprendendo identificativi univoci (Global ID), codici di classificazione, relazioni di aggregazione e collegamenti documentali. Le proprietà descrivono invece caratteristiche osservabili direttamente nel manufatto, quali tecnica costruttiva, stato di conservazione, rischio o fase storica di riferimento, utilizzate principalmente come strumenti di consultazione e interrogazione del modello.

Una volta predisposto il modello HBIM, il *workflow* prevede la creazione di un *database* stratigrafico attraverso algoritmi sviluppati in linguaggio Python mediante la libreria *IfcOpenShell*<sup>124</sup> progettata per l'interazione programmatica con modelli IFC. Le informazioni vengono estratte e salvate in un file con estensione *.db*, consultabile attraverso strumenti *open source* per la gestione di *database* relazionali.

Un primo algoritmo estrae l'identificativo univoco di ciascun componente e genera una tabella di anagrafica, nella quale ogni USM risulta associata alla parete e al corpo di fabbrica di appartenenza. Grazie alla struttura gerarchica del modello IFC, non è necessario selezionare manualmente tutti gli elementi: partendo da una singola istanza di *IfcBuildingElementPart*, l'algoritmo è in grado di risalire automaticamente agli elementi contenitori attraverso le relazioni di aggregazione.

Un secondo algoritmo consente di compilare la tabella dei rapporti stratigrafici selezionando coppie di USM e registrando il tipo di relazione fisica tra esse. I rapporti vengono definite mediante un dizionario controllato di valori e registrati come relazioni direzionali; qualora venga riconosciuta l'appartenenza a uno stesso tipo, il sistema assegna automaticamente un rapporto di analogia. Questo

---

<sup>124</sup> KRIJNEN 2024, pp. 1–12.

*database* ammette relazioni multiple tra gli stessi elementi, permettendo una rappresentazione completa delle interazioni stratigrafiche.

L'informazione relativa ai corpi di fabbrica viene successivamente impiegata per la costruzione del Matrix stratigrafico a scala urbana, poiché i rapporti tra USM appartenenti a CF differenti consentono di inferire relazioni temporali tra le diverse unità edilizie. La costruzione del Matrix viene realizzata mediante strumenti di analisi delle reti implementati nella libreria *PythonNetworkX*<sup>125</sup> che permette di rappresentare le relazioni stratigrafiche sotto forma di grafo.

Il Matrix urbano costituisce una vista gerarchica nella quale i CF risultano connessi attraverso le USM di interfaccia; aumentando progressivamente il livello di dettaglio, ciascun nodo può essere espanso nei Matrix interni alle singole unità edilizie. Un ulteriore algoritmo *Python* gestisce la lettura delle relazioni stratigrafiche e la generazione grafica automatica del Matrix. Al termine del processo, i componenti appartenenti a una medesima fase vengono aggregati in specifici *IfcGroup*, facilitando la visualizzazione e l'analisi delle dinamiche evolutive del costruito. L'architettura complessiva del *database* IFC e il flusso informativo tra le diverse fasi metodologiche costituiscono la base operativa del modello HBIM proposto.

---

<sup>125</sup> HAGBERG, SCHULT e SWART 2008, pp. 11-15.

## 6. IL CASO DI CAMPO DI BRENZONE

### 6.1. Progetto Archivio di Comunità'

Le attività descritte si inseriscono nell'ambito del *Progetto Archivio di Comunità* (PAC), inserito nel quadro delle ricerche di archeologia partecipata che l'insegnamento di Archeologia Medievale dell'Università di Padova sotto la direzione di Alessandra Chavarria Arnau svolge nel territorio del Monte Baldo. Queste prevedono la documentazione e lo studio dei beni storici e paesaggistici di questo territorio, esteso tra le province di Trento e Verona, in collaborazione con le comunità locali.



Figura 45 – Campo di Brenzone (VR) – Panoramica (da Garda-outdoors.com).

Nel caso di Campo la ricerca è stata commissionata dall'associazione Campo Teatro degli Ulivi e dal Comune di Brenzone per comprendere le caratteristiche e l'evoluzione del centro storico in gran parte abbandonato, come base per un futuro progetto di valorizzazione e rioccupazione del luogo (fig. 45).

Nel corso degli anni il borgo è stato oggetto di una serie di studi<sup>126</sup> e isolati interventi di restauro<sup>127</sup>, finalizzati alla stabilizzazione delle parti più antiche e già rudericizzate. Queste ricerche, unitamente al repertorio cartografico ed iconografico storico, ai rilievi geometrici e fotografici più o meno recenti, hanno portato alla produzione di una considerevole mole di dati di difficile consultazione. Il

<sup>126</sup> DALLA BONA 2022; LEVA 1988; PERBELLINI 2002; SCACCHETTI 2020, VARANINI 2005.

<sup>127</sup> BRAGGIO *et al.* 2004, pp. 15-25.

caso studio rappresenta quindi il punto di partenza per la definizione di una metodologia in grado di superare la frammentarietà dei dati, che potrà consentire l'integrazione e l'aggregazione di tutte le informazioni in un unico sistema di analisi e gestione, con l'obiettivo finale di un eventuale restauro e valorizzazione.

## 6.2. Inquadramento territoriale e storico

Campo di Brenzone si sviluppa sul versante orientale del lago di Garda, in una fascia altimetrica intermedia compresa tra la costa lacustre e le prime pendici del Monte Baldo (**fig. 46**). La morfologia fortemente acclive, la ridotta disponibilità di superfici pianeggianti e la natura rocciosa del substrato hanno influenzato in modo determinante sia la distribuzione dell'abitato sia la configurazione del paesaggio agrario (**fig. 47**). L'assetto territorial deriva, infatti, da un lungo processo di antropizzazione fondato sulla costruzione di terrazzamenti e sistemi colturali adattati alle condizioni del versante, che hanno prodotto un paesaggio agrario strutturato e stabile nel tempo<sup>128</sup>.

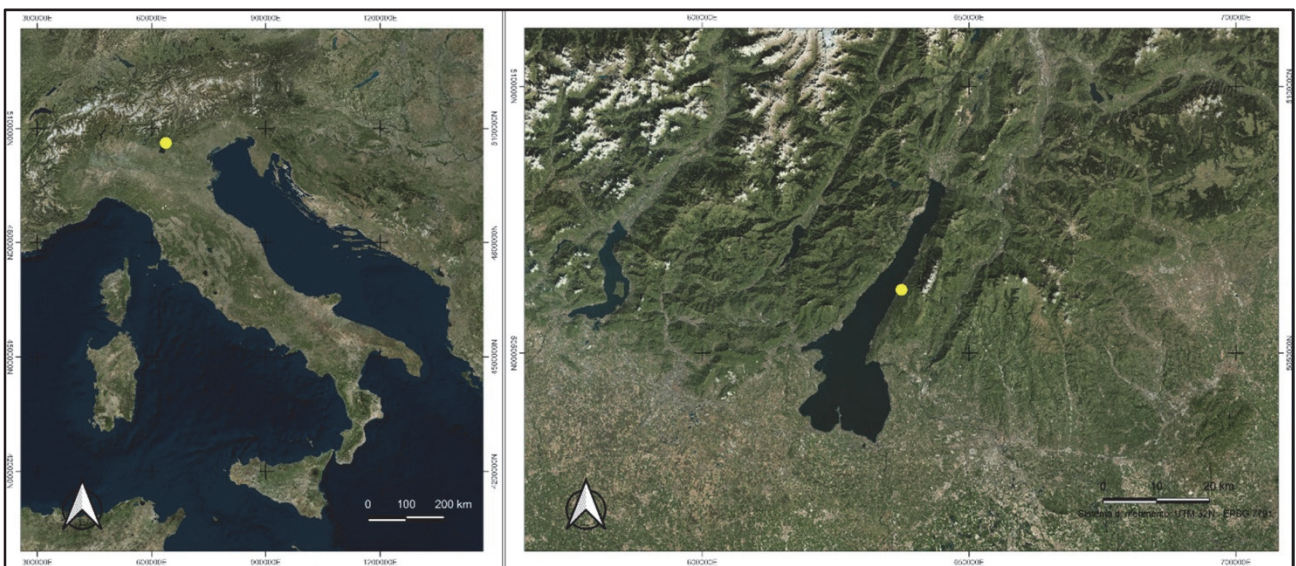


Figura 46 – Campo di Brenzone – Ubicazione (Estratto LANDSAT/COPERNICUS 2021).

In tale contesto la coltivazione dell'olivo assume un ruolo centrale, resa possibile dal micro clima lacustre e documentata come risorsa economica fondamentale per le comunità locali. Gli oliveti rappresentano non soltanto un element paesaggistico, ma anche un indicatore della specializzazione

<sup>128</sup> VARANINI 1999, pp. 169-173.

agricola e della connessione economica con I centri rivieraschi, nei quali si concentrano trasformazione e commercializzazione del prodotto<sup>129</sup>.

L'organizzazione territoriale locale è caratterizzata da un sistema policentrico di piccoli nuclei e contrade distribuiti lungo il versante, descritti dalle fonti come realtà “*sparsa e sparpagliata*”, priva di una vera centralità urbana e contraddistinta da una forte frammentazione insediativa.

La più antica attestazione documentaria relative all'insediamento di Campo è costituita da un atto datato al 1023, pertinente alla documentazione monastica legata al monastero veronese di San Zeno, nel quale compare la formula latina “...*famuli Sancti Zenonis vico Malesiçine locus ubi dicitur Campi...*”. Tale documento rappresenta la prima menzione nota del sito e ne testimonia l'inserimento all'interno del quadro territoriale del *vicus Malesiçine*, evidenziando l'esistenza di un nucleo abitato già riconosciuto e funzionalmente legato alla gestione fondiaria ecclesiastica<sup>130</sup>. La presenza dei *famuli*, identificati come soggetti dipendenti dall'ente monastico, indica una struttura socio-economica rurale basata su rapporti di subordinazione personale e fondiaria, nella quale i coloni risultano coinvolti nella coltivazione e gestione di beni agricoli, in particolare oliveti, collocate nel territorio gardesano. L'atto del 1023 assume quindi un ruolo centrale nella ricostruzione delle origini insediative di Campo, poiché attesta l'esistenza di una comunità rurale già organizzata e inserita in reti economiche e amministrative più ampie, confermando il ruolo degli enti ecclesiastici nella strutturazione del paesaggio agrario e nella stabilizzazione degli insediamenti altomedievali dell'alto Garda<sup>131</sup>.

La definizione degli abitanti mediante formule identitarie come *de Campo* evidenzia la progressiva stabilizzazione della comunità locale in un nucleo insediativo descritto come *locus*, termine che identifica un nucleo rurale riconosciuto, ma privo delle caratteristiche istituzionali di *villa* o *burgus*, suggerendo una realtà insediativa locale inserita in un sistema contradale diffuso.

Fondamentali per la ricostruzione dell'organizzazione fondiaria risultano le *manifestationes* della fine del XII secolo, documentazione notarile e amministrativa nella quale compaiono unità economiche denominate *casamenta*, ovvero complessi abitativo-produttivi composti da abitazioni, pertinenze e spazi agricoli. Il *casamentum* costituisce la cellula fondamentale dell'economia rurale medievale, evidenziando la stretta integrazione tra spazio domestico e produzione agricola<sup>132</sup>.

Le stesse fonti permettono di cogliere la centralità economica dell'olivicoltura: atti di compravendita e trasferimento di alberi mostrano una struttura fondiaria frammentata e diffusa, in cui la gestione degli olivi rappresenta un indicatore della specializzazione agricola locale.

---

<sup>129</sup> VARANINI 2005, pp. 186-190.

<sup>130</sup> VARANINI 1999, p. 29.

<sup>131</sup> VARANINI 2005, pp. 178; 217.

<sup>132</sup> VARANINI 1999, pp. 196-197; VARANINI 2005, p. 223.

Le relazioni con Malcesine delineano un rapporto di complementarità territoriale, nel quale il *vicus* costiero di Brenzone svolge funzioni amministrative e commerciali mentre Campo mantiene una vocazione agricola e montana.

La rete ecclesiastica contribuisce alla strutturazione del territorio come indicato in una bolla pontificia del XII secolo che elenca le cappelle soggette mediante la formula *capella ... cum decimis et possessionibus suis*, definendo diritti ecclesiastici e gerarchie locali. La documentazione pastorale di età moderna conferma la persistenza di una struttura policentrica con la formula *extant ...capellae sex, quarum unaquaeque habet suum paramentum*, che descrive la diffusione di cappelle nel territorio<sup>133</sup>, cui ricondurre, verosimilmente, l'edificazione della chiesa di San Pietro in Vincoli quale polo religioso e comunitario, che le ipotesi cronologiche collocano in una fase medievale avanzata<sup>134</sup>.

La cartografia tra XVI e XVII secolo rappresenta Campo come nucleo riconoscibile, talvolta dotato di elementidi fensivi, confermando la permanenza di un'identità insediativa consolidata<sup>135</sup>.

Nel XIX e XX secolo la crisi dell'economia Agricola tradizionale e la crescent centralità della fascia rivierasca determinano un progressive spopolamento. L'abbandono si consolida negli anni Settanta del Novecento, segnando la perdita della funzione residenziale stabile e l'avvio del degrade edilizio.

### 6.3. Inquadramento urbanistico e architettonico

L'impianto urbanistico di Campo è l'esito di un processo evolutivo adattato alle caratteristiche morfologiche dell'area e alla limitata disponibilità di spazi (**fig. 47**), che tende a svilupparsi a partire da un nucleo originario ubicato in una posizione la cui scelta rimane ancora da indagare.

Le analisi stratigrafiche individuano il fulcro originario dell'abitato in un aggregato edilizio tradizionalmente definito "Castello", interpretabile come complesso con caratteri difensivi e riconducibile ad un'edilizia di rangosuperiore. Il nucleo, identificato con una casa-torre e una possibile cintamuraria, occupa una posizione strategica e rappresenta il punto di partenza dell'evoluzione urbanistica del borgo<sup>136</sup> (**fig. 48**).

Le indagini stratigrafiche ad oggi condotte ricostruiscono inquest nucleo originario una sequenza evolutiva articolata in almeno cinque grandi periodi storici, cui segue una fase più tarda di ristrutturazioni diffuse. La fase più antica è caratterizzata da murature di elevate qualità, con pietre

---

<sup>133</sup> VARANINI 2005, p. 50.

<sup>134</sup> DALLA BONA 2022, p. 72.

<sup>135</sup> DALLA BONA 2022, p. 87.

<sup>136</sup> LEVA 2000, pp. 17-19.

sbozzate disposte in corsi regolari e malta tenace, attribuibili a un orizzonte romanico databile entro il XIII secolo<sup>137</sup>.

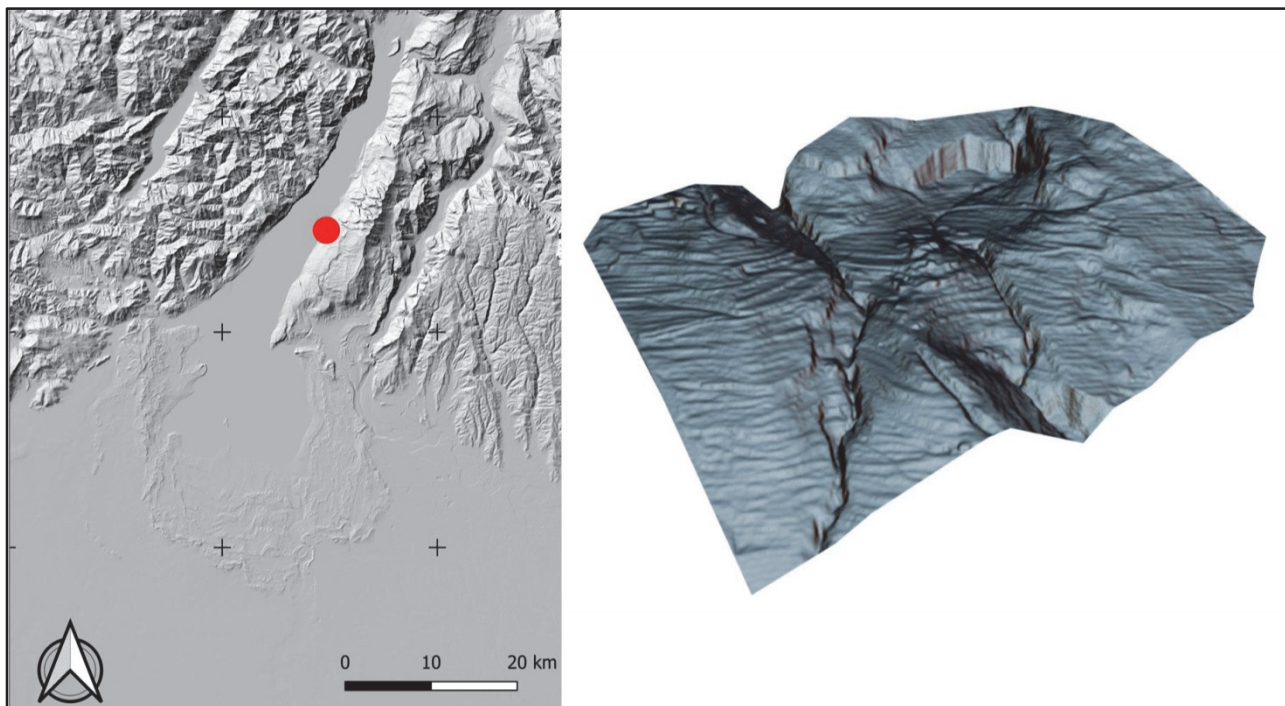


Figura 47 – Campo di Brenzone – Ubicazione su rilievo LiDAR (da <https://tinality.pi.ingv.it/>- Risoluzione 10 m Pix) e DTM (da rilievo mediante piattaforma UA – Risoluzione campionata a 0,5 m Pix).

Un secondo momento evolutivo vede l'ampliamento dell'insediamento mediante nuovi corpi di fabbrica, con tecniche murarie meno accurate, ma ancora di buona qualità; la tipologia delle aperture suggerisce una datazione tra la fine del XIII e l'inizio del XIV secolo.

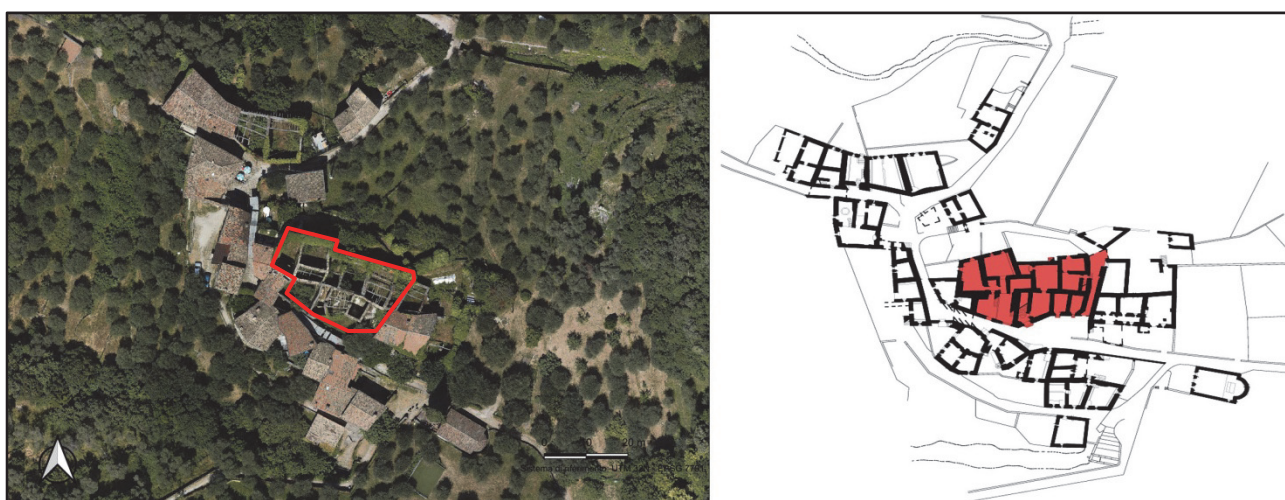


Figura 48 – Ubicazione nucleo originario su ortomosaico realizzato da piattaforma UA e da DALLA BONA 2022.

<sup>137</sup> LEVA 2000, pp. 15-17.

Le fasi successive evidenziano una trasformazione della natura dell'insediamento legata ad eventi traumatici, tra cui crolli e incendi, che determinano ristrutturazioni generali e modifiche all'organizzazione interna degli edifici.

Tra XV e XVI secolo si osserva una gestione più unitaria del complesso, con inserimento di volte strutturali al piano terra, specializzazione funzionale degli ambienti e diffusione di tecniche edilizie meno accurate, spesso in opera incerta intonacata.

Dal punto di vista urbanistico, il nucleo antico presenta una struttura aggregata basata su corpi di fabbrica addossati e spazi condivisi, indice di una crescita organica progressiva piuttosto che di un impianto unitario originario, secondo un modello insediativo medievale minore caratteristico delle aree lacustri e montane<sup>138</sup>.

Nel corso dei secoli successivi il nucleo originario viene progressivamente ampliato, trasformandosi da complesso difensivo e rappresentativo a organismo edilizio residenziale articolato, mentre l'insieme del borgo è caratterizzato da interventi edilizi diffusi, ad oggi, ancora in corso di definizione.

#### **6.4. Declino, abbandono e rinascita**

La fase compresa tra XVIII e inizio XX secolo è caratterizzata da una sostanziale assenza di nuove costruzioni e da interventi limitati alla manutenzione dell'esistente, condizione che riflette una fase di stagnazione economica e di progressive decline dell'abitato<sup>139</sup>. Nel corso del Novecento la crisi del sistema agricolo tradizionale accelera ulteriormente i processi di spopolamento e abbandono, inserendosi in una più ampia trasformazione economica e territoriale che interessa l'intero versante orientale gardesano. La perdita di centralità delle economie montane e lo spostamento delle attività verso i centri rivieraschi determinano una graduale riduzione della popolazione residente e l'abbandono delle funzioni originarie del borgo<sup>140</sup>.

L'abbandono, consolidatosi tra gli anni Sessanta e Settanta del Novecento, comporta fenomeni di degrado edilizio, con perdita delle coperture, crolli parziali e progressiva rovina delle strutture murarie (**fig. 49**). Tale processo, tuttavia, non cancella la leggibilità storica dell'insediamento; al contrario, l'assenza di interventi modernizzanti impedisce trasformazioni invasive, preservando l'impianto originario e le stratificazioni architettoniche e urbanistiche medievali e moderne.

---

<sup>138</sup> BROGIOLO 2000, pp. 19-24; MANNONI 2000, pp. 21-26.

<sup>139</sup> LEVA 2000, p. 19.

<sup>140</sup> DALLA BONA 2022, pp. 99-101.

Condizione che rappresenta una forma di “*conservazione involontaria*”, nella quale l’arresto della vita insediativa diventa paradossalmente un fattore di tutela storica<sup>141</sup>.



Figura 49 – Fasi di abbandono (da DALLA BONA 2022, p. 96, fig. 26).

Un momento decisivo nel processo di rilettura del borgo è rappresentato dal convegno del 1988, i cui atti segnano l’avvio di una nuova attenzione scientifica verso Campo.

A partire dagli anni Novanta prende avvio una fase di progressiva rinascita culturale e scientifica, durante la quale Campo diventa oggetto di ricerche interdisciplinari orientate alla conoscenza, alla tutela e alla valorizzazione del patrimonio storico e paesaggistico. In questa prospettiva il borgo assume il ruolo di laboratorio di studio per l’archeologia dell’architettura e per le strategie di conservazione dei centri storici abbandonati; la condizione di sospensione tra rovina e conservazione acquisisce infatti un valore conoscitivo, poiché consente di leggere con chiarezza le diverse fasi evolutive dell’insediamento<sup>142</sup>.

Nel quadro contemporaneo, il percorso che conduce dal declino alla rinascita di Campo viene quindi interpretato non come un semplice processo di recupero edilizio, ma come un percorso cultural fondato sulla conoscenza storica, sulla tutela delle stratificazioni e sulla reinterpretazione del borgo come patrimonio condiviso e contest privilegiato per lo studio della lunga durata insediativa e delle strategie di conservazione e riusocompatibile.

---

<sup>141</sup> DALLA BONA 2022, pp. 102–103.

<sup>142</sup> SACCHETTI 2020, pp. 3-12.

## 6.5. Rilievi

Il caso di Campo si inserisce pienamente nel quadro metodologico delineato, presentando caratteristiche morfologiche, conservative e di accessibilità che rendono necessario un approccio integrato alla documentazione. Il borgo è caratterizzato da una morfologia complessa, da un'elevata variabilità altimetrica e da condizioni di accesso limitate, che rendono difficoltosa l'applicazione di metodologie di rilievo tradizionali. A tali fattori si aggiungono lo stato di conservazione eterogeneo del costruito, la presenza di edifici in semiabbandono e la necessità di operare su differenti scale di analisi, dalla dimensione territoriale a quella architettonica.

L'obiettivo metodologico del rilievo non era quello di acquisire fin da subito dati di dettaglio sull'intero insediamento, ma di costruire un quadro conoscitivo progressivo, capace di guidare in modo razionale le successive fasi di approfondimento. Per questo motivo la strategia adottata ha previsto rilievi multiscalari con diversi gradi di dettaglio.

Una prima fase di acquisizione estensiva, basata su rilievo LiDAR ed RGB a scala territoriale e urbana, è stata finalizzata alla costruzione di un modello complessivo del contesto. Il rilievo LiDAR ha consentito di definire con elevata accuratezza la componente orografica e morfologica del sito, offrendo una base quantitativa per l'analisi del rapporto tra insediamento e topografia, mentre il rilievo RGB ha permesso la generazione di una base cartografica tridimensionale ad alta risoluzione utile alla lettura del tessuto edilizio e delle relazioni spaziali tra gli elementi del borgo<sup>143</sup>.

L'integrazione dei due livelli informativi ha costituito un quadro conoscitivo preliminare, impiegato non come risultato finale ma come strumento analitico per orientare le fasi successive del lavoro.

### 6.5.1. Attività propedeutiche

Le attività di rilievo sono state precedute da una fase di pianificazione in ambiente GIS *open source* volta innanzitutto a verificare la coerenza e l'aggiornamento dei dati disponibili sui geoportali nazionali e regionali, individuando eventuali lacune o criticità da colmare. All'interno della piattaforma GIS è stata inoltre simulata la distribuzione dei caposaldi della rete di inquadramento topografico e dei Ground Control Points (GCP) valutando le posizioni più idonee in relazione alla morfologia del borgo, alla visibilità satellitare e alle esigenze di calibrazione dei rilievi LiDAR e fotogrammetrici (**fig. 50**). Il GIS è stato infine concepito come ambiente integrato di gestione e visualizzazione di tutti i dati geografici e topografici a supporto delle successive analisi e come base cartografica di riferimento per la gestione unitaria di tutte le informazioni spaziali.

---

<sup>143</sup> REMONDINO *et al.* 2017, pp. 1-11; MURPHY *et al.* 2013, pp. 89-100.

Questa impostazione metodologica ha reso il GIS uno strumento non solo operativo, ma anche strategico, consentendo, da un lato di fornire le *basemap* su cui inserire tutte le acquisizioni, dall'altro di rappresentare un punto di partenza per la creazione di un geo database per la gestione, l'aggiornamento e la condivisione dei dati, aprendo la strada a possibili sviluppi verso una piattaforma WebGIS condivisa funzionale ad eventuali future analisi sulla vocazione insediativa e sulla genesi di Campo.

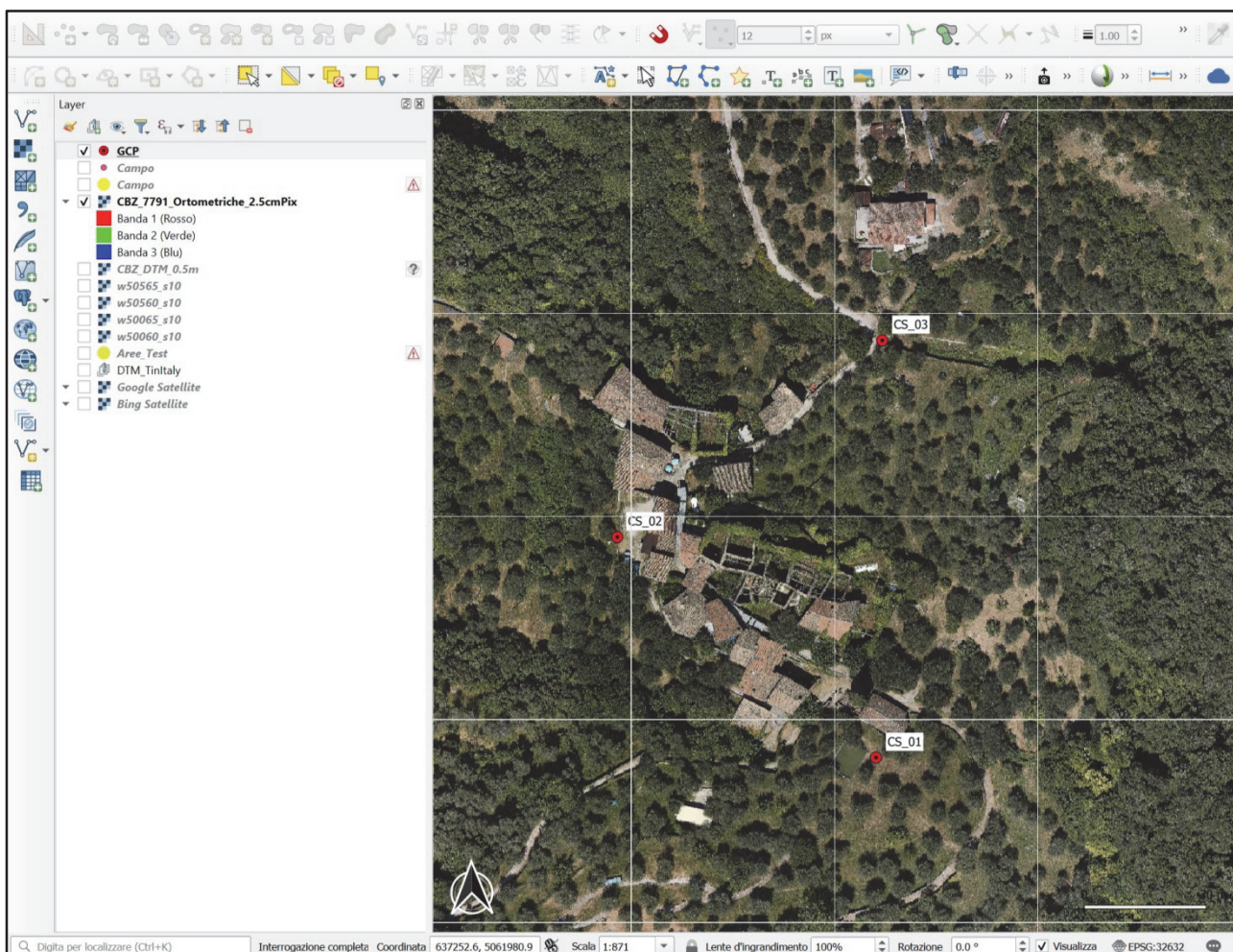


Figura 50 – QGIS - Interfaccia grafica per la pianificazione del rilievo topografico ed ipotesi di ubicazione CS topografici.

### 6.5.2. Rilievo topografico

Per supportare i rilievi topografici di dettaglio è stata realizzata una rete di inquadramento geodetico basata su misure acquisite con ricevitore GNSS Geomax Z55 in modalità NRTK e collegamento alla rete ETRF2000/RDN2008 tramite servizio di correzione Hexagon<sup>144</sup>.

<sup>144</sup> Servizio di correzioni GNSS in tempo reale e per la post-elaborazione, con appoggio alla rete di stazioni permanenti nota come [Hexagon SmartNet](https://hxgnsmartnet.com/it-it/services/smartnet-nrtk) - <https://hxgnsmartnet.com/it-it/services/smartnet-nrtk>.

La rete primaria, costituita da N. 3 caposaldi (CST) materializzati e stabilmente riconoscibili, ha costituito la struttura di controllo permettendo di ridurre le incertezze dovute alle deformazioni locali e alla complessità morfologica del borgo. Su questa base è stato quindi possibile procedere al raffittimento con reti secondarie mediante stazione totale (TS) Topcon IS, utilizzate come appoggio per i rilievi ad alta risoluzione eseguiti con TLS e fotogrammetria da drone, garantendo un risultato omogeneo all'interno dello stesso quadro di riferimento, rendendo possibile la fusione dei modelli tridimensionali. Contestualmente alla rete geodetica primaria, sono stati materializzati una serie di *ground control points* (GCP) distribuiti strategicamente all'interno e all'esterno del borgo e fondamentali in due fasi cruciali del processo di acquisizione e integrazione dei dati. Da un lato hanno consentito la calibrazione delle scansioni LiDAR da drone, garantendo che le nuvole di punti ottenute fossero correttamente allineate al sistema di riferimento definito dalla rete primaria. Dall'altro, sono stati utilizzati come vincoli per la scalatura e la georeferenziazione dei modelli fotogrammetrici, la verifica dell'accuratezza metrica e la compatibilità con gli altri *dataset*. L'adozione di una rete di inquadramento ha costituito dunque il presupposto metodologico fondamentale per la realizzazione di un gemello digitale coerente del borgo, garantendo la coerenza geometrica e spaziale di tutte le tecniche impiegate.

### 6.5.3. Rilievo LiDAR da piattaforma UA

Considerata la particolare conformazione morfologica dell'area, caratterizzata da forti dislivelli e accentuate variazioni altimetriche, che hanno in parte condizionato lo stesso sviluppo insediativo del borgo, si è ritenuto opportuno integrare il dataset informativo con un rilievo LiDAR da drone.

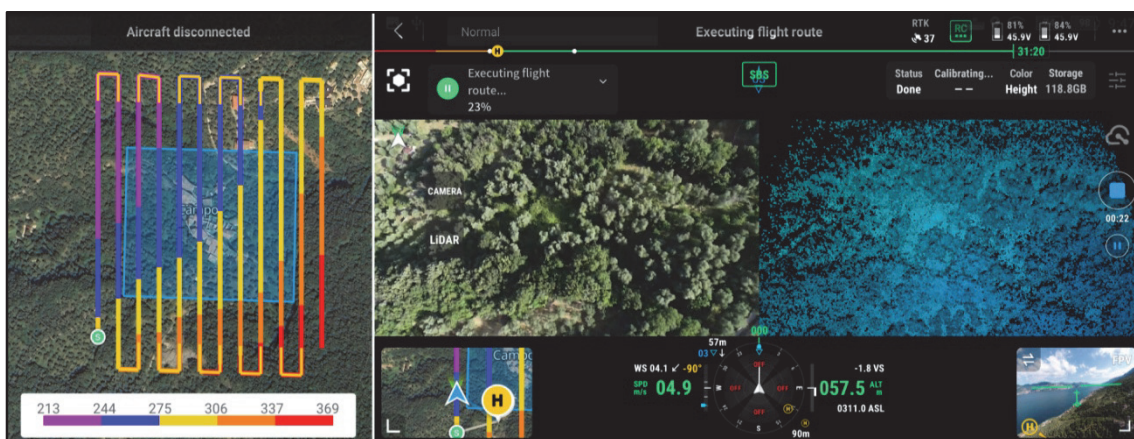


Figura 51 – Interfaccia di navigazione con indicazione rotta, parametri di volo e scansione LiDAR in progress.

Questa scelta ha permesso di ottenere un *Digital Terrain Model* (DTM) di contesto ad alta risoluzione, capace di restituire in modo accurato l'andamento del terreno, anche nelle aree difficilmente accessibili o parzialmente coperte da vegetazione. L'acquisizione è stata realizzata mediante piattaforma UA DJI Matrice 300 e sensore LiDAR Zenmuse L1 con volo pianificato e correzione NRtk (**fig. 51**).

Per i voli è stata utilizzata la modalità *terrain follow* (**fig. 52**), che consente di adattare automaticamente la traiettoria di volo alle variazioni morfologiche riducendo al minimo le distorsioni geometriche dovute alla complessità altimetrica del sito.



**Figura 52** – Modalità di volo *terrain follow*.

Le acquisizioni sono state effettuate secondo i parametri e le modalità di seguito indicate (**Tab. 5**)

**Tabella 5** – Parametri di volo e scansione LiDAR.

PARAMETRI VOLO													
Volo	Tipologia volo		Terrain follow			Altezza volo		Angolo spazzate	Velocità m/s	OL %	OF %	GSD IMG m/Pix	
	Mapping	Cooridor	SI	NO	Cella/m	AGL m	SLM m						
1	X		X		10	70		129°	5	40	70	0.05	
PARAMETRI LIDAR													
Volo	Scansione		ECHI			Frequenza campionamento/HZ				Nuvola			
N	Rip	Non rip	1	2	3	240	160	120	80	Rgb	Non Rgb	Punti /mq	GSD foto
1		X			X	X				X		485	0.05

#### 6.5.4. Rilievo RGB da piattaforma UA

I rilievi fotogrammetrici sono stati realizzati utilizzando tre diverse tipologie di piattaforma UA in funzione degli obiettivi conoscitivi e delle diverse scale di analisi. I voli per la realizzazione di una

*basemap* di contesto sono stati realizzati mediante DJI Matrice 300RTK e fotocamera RGB Zenmuse P1 con sensore *full frame* da 45 MP, con le medesime modalità impiegate per le acquisizioni con sensore LiDAR (**Tab. 6**).

**Tabella 6 - Parametri di volo RGB.**

PARAMETRI VOLO												
Volo	Tipologia volo		Terrain follow			Altezza volo		Angolo spazzate	Velocità m/s	OL %	OF %	GSD m/Pix
	Mapping	Cooridor	SI	NO	Cella/m	AGL m	SLM m					
1	x		x		10	100		129°	10	70	80	0.015

I rilievi finalizzati alla realizzazione del modello 3D complessivo del borgo sono stati effettuati mediante DJI Mavic 3 Cine pro con sensore RGB CMOS da 48 MP, generalmente impiegato in ambito cinematografico per le specifiche caratteristiche di luminosità, stabilità e capacità di registrare informazioni sul colore. I rilievi al dettaglio architettonico e degli interni sono stati realizzati mediante DJI Mavic 4 pro con fotocamera RGB *Hasselblad* e sensore da 100 MP. I voli sono stati realizzati in modalità manuale, ovvero senza l’ausilio di rotte di volo autonomo, per garantire una copertura quanto più aderente alle caratteristiche morfologiche e geometriche del contesto, alternando rotte con sensore in posizione nadirale, inclinata e frontale. I voli di dettaglio sono stati eseguiti in modalità manuale, ovvero senza l’ausilio di sistemi di volo autonomo, per una migliore aderenza alle geometrie degli edifici.

#### **6.5.5. Rilievo laser scanner terrestre**

Il rilievo geometrico è stato realizzato mediante TLS Trimble X9 in modalità statica e le singole scansioni pre-registrate direttamente in campo con software Trimble Perspective. Gli algoritmi sviluppati da Trimble consentono l’allineamento delle scansioni direttamente in fase di acquisizione in modo da verificare la coerenza geometrica delle nuvole di punti e l’effettiva copertura di tutti gli elementi architettonici, requisiti fondamentali per il post-processing dei dati e l’integrazione con i rilievi da drone delle coperture e delle porzioni superiori dei prospetti murari.

### **6.6. Post processing**

Punto di partenza è stata la proiezione delle coordinate della rete geodetica di appoggio nel sistema di riferimento cartografico UTM32 (EPSG 7792) mediante *software* topografici (*Geomax Fusion pro*; *Topcon Meridiana*) ed il calcolo delle quote ortometriche con grigliato IGM nella versione GK2 (IGM Verto 3K). Il sistema di riferimento plano-altimetrico così definito ha costituito la base

di appoggio per l'elaborazione dei rilievi con stazione totale mediante metodo delle poligonali aperte vincolate (fig. 53).

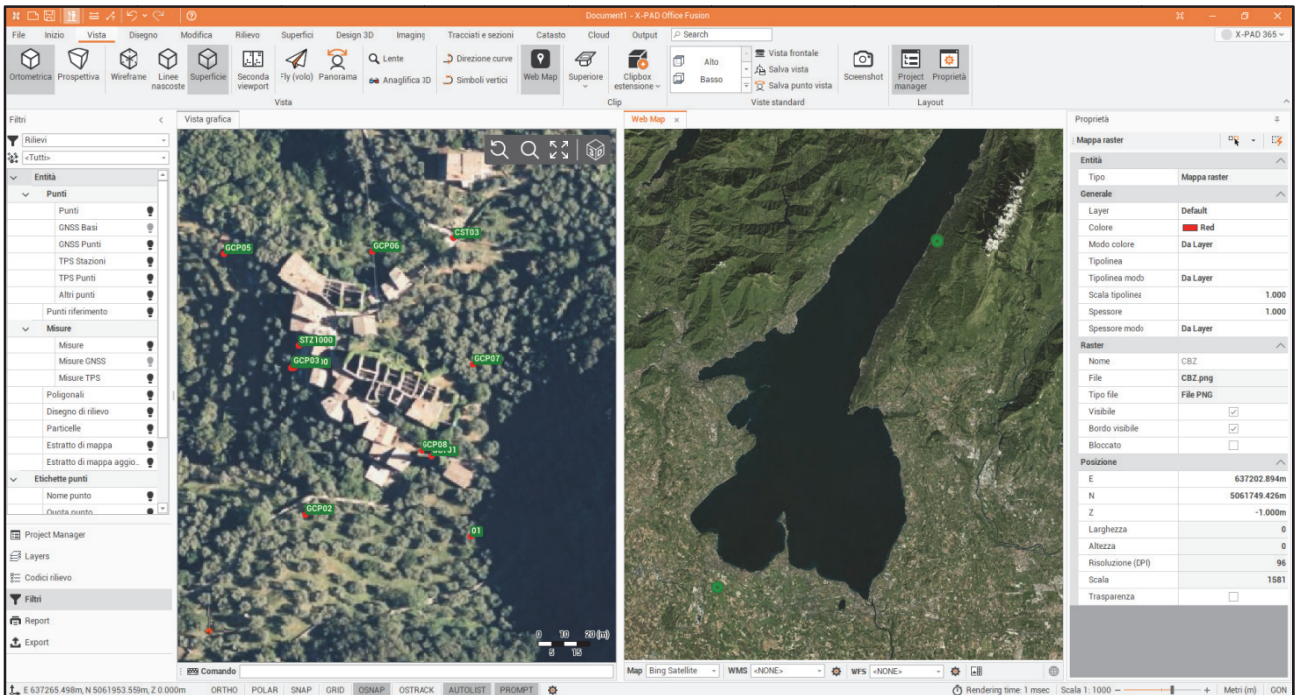


Figura 53 – Fusion Geomax: interfaccia elaborazione rilievo topografico.

Le scansioni sono state allineate ed ottimizzate tramite *software* specifici (DJI Terra *pro*; Terra Scan e Cloud Compare), la nuvola di punti classificata e segmentata con algoritmi automatici e raffinata tramite controllo supervisionato (fig. 54).

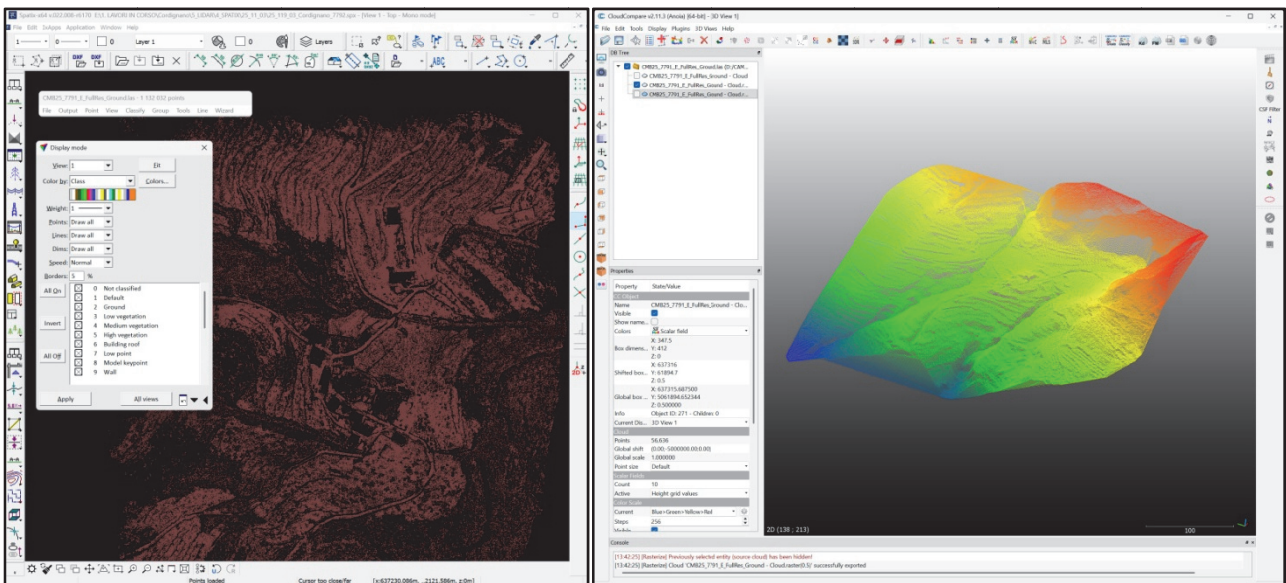


Figura 54 – Classificazione della nuvola di punti da rilievo LiDAR per creazione DTM e modello 3D del terreno classificato in base all'altimetria.

Successivamente si è proceduto alla proiezione della nuvola nel sistema cartografico UTM32 (EPSG 7792) e alla trasformazione delle altezze ellissoidiche in quote ortometriche mediante *software* topografici (IGM Verto 3K; ConVergo) e grigliato IGM nella versione GK2 su modello geoidico ITALGEO2005. La calibrazione del sensore LiDAR e la verifica delle tolleranze, infine, sono state verificate con punti di controllo a terra misurati con ricevitore GNSS in modalità NRTK. Le immagini sono state elaborate con *software* SfM (AgisoftMetashape) mediante processo di allineamento, realizzazione *sparse cloud* successiva ottimizzazione delle camere e georeferenziazione mediante GCP per garantire accuratezza metrica e coerenza rispetto al sistema di inquadramento topografico. Successivamente si è proceduto alla generazione della *dense cloud* e della *mesh* texturizzata da cui ricavare ortomosaici RGB con risoluzione 2,5 cm/Pix e Modello 3D testurizzati (fig. 55).

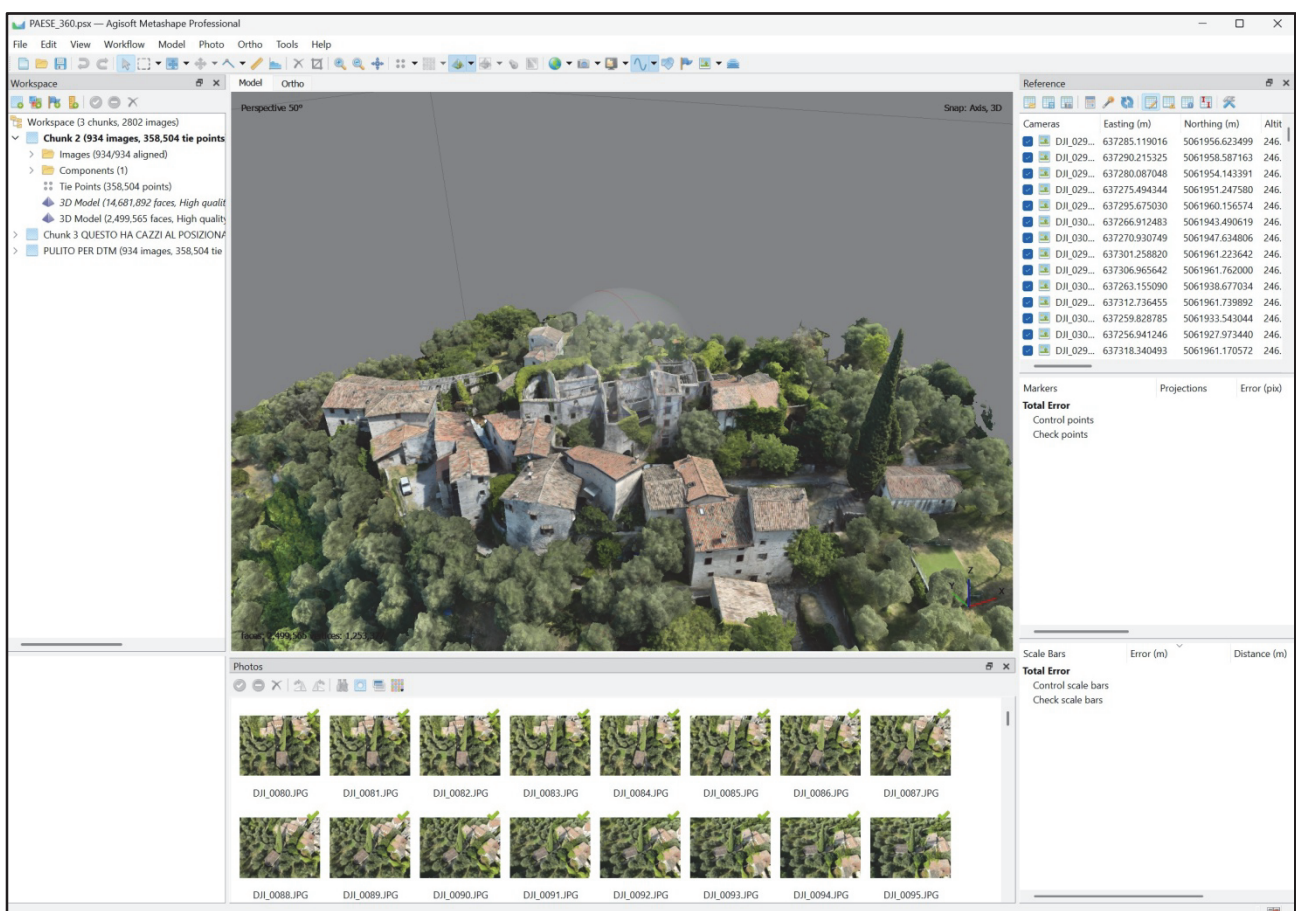


Figura 55 – Interfaccia di elaborazione SfM per la generazione di modelli 3D (Agisoft Metashape).

I rilievi TLS sono stati ottimizzati e georeferenziati mediante *software* specifici (Trimble *Perspective*; TrimbleReal Works) che consentono la registrazione delle scansioni utilizzando la sovrapposizione delle superfici. Le scansioni TLS e le immagini ottenute da fotogrammetria aerea sono state successivamente impiegate nel processo SfM mediante *software* dedicati (Agisoft

*Metashape*) che hanno consentito di integrare le parti non rilevabili da terra, ma, soprattutto, di ottenere *mesh* con accuratezza sub-centimetrica e con dettaglio fotografico ad altissima risoluzione (+/- 0.5 cm/Pix).

### 6.7. Output: modelli *reality-based* come premessa alla segmentazione

Il passaggio alla modellazione informativa è stato sviluppato attraverso una metodologia progressiva di segmentazione, finalizzata alla trasformazione del modello tridimensionale continuo in un insieme di geometrie strutturate, non ancora semantizzate, ma predisposte alla successiva codifica HBIM. Il *workflow* adottato prevede un incremento progressivo del livello di approfondimento a partire dai modelli a scala territoriale e urbana fino ai modelli di dettaglio.

La prima fase ha riguardato la realizzazione dei modelli tridimensionali mediante rilievi integrati LiDAR e fotogrammetrici, che hanno consentito la produzione di DMR a scala territoriale, urbana e architettonica. I modelli derivati costituiscono una restituzione geometrica dello stato dei luoghi, utilizzata come base per le successive operazioni di analisi e segmentazione. In questa fase il modello non è ancora strutturato secondo una logica informativa, ma rappresenta un supporto metrico e materico continuo.



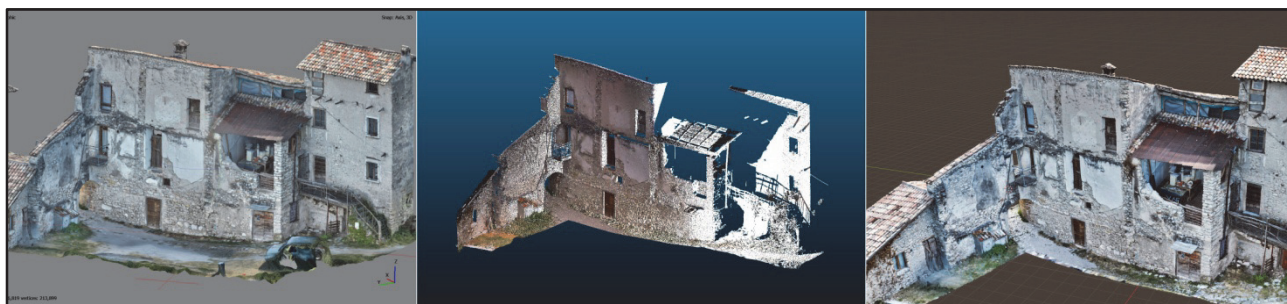
Figura 56 – Ubicazione contesti d'interesse.

La prima segmentazione a scala urbana è avvenuta separando le porzioni di *mesh* corrispondenti ai diversi CF e, per ciascun CF, suddividendone le componenti edilizie principali (es. tetto, pareti), per quanto comprensibili dall'esterno. Tale processo ha consentito di ottenere un modello sintetico costituito da singole geometrie isolate corrispondenti ai diversi edifici e alle principali componenti edilizie, costituendo il primo livello di organizzazione gerarchica della geometria.

L'analisi critica del modello urbano ha portato alla selezione di tre contesti specifici, individuati in funzione della loro rilevanza architettonica, della leggibilità stratigrafica e del grado di complessità geometrica (**fig. 56**):

- Contesto 01 – Chiesa;
- Contesto 02 – Edificio presso la sorgente;
- Contesto 03 – Tracce di edifici crollati.

Sui tre contesti sono stati quindi effettuati rilievi di approfondimento integrando fotogrammetria di prossimità da piattaforma UAV e laser scanner terrestre (**fig. 27**). Il Contesto 3 è stato selezionato come caso pilota per la sperimentazione di un livello avanzato di analisi. Nell'ambito dell'approfondimento metodologico condotto, è stato sviluppato un *workflow* operativo basato sull'integrazione tra *software* SfM, utilizzati per la generazione dei DMR ed il *software open source* Blender per le fasi di interpretazione e segmentazione della *mesh* tridimensionale, mediante l'importazione del modello tramite formati interoperabili (OBJ).



**Figura 57 – Contesto 3: modello fotogrammetrico, scansione TLS e fusione.**

Tale passaggio si colloca come livello di dettaglio successivo rispetto al modello urbano: una volta isolato e separato il contesto dal modello complessivo, il modello ad alta risoluzione diventa la base per estrarre informazione analitica e strutturabile, in particolare in relazione alla lettura stratigrafica e alla preparazione del dato per la successiva codifica HBIM.

L'analisi stratigrafica muraria è stata eseguita direttamente sul modello 3D texturizzato attraverso lo strumento di disegno vettoriale *Grease Pencil* in ambiente Blender, consentendo l'individuazione e

la delimitazione delle unità stratigrafiche murarie (USM), delle discontinuità e delle relazioni costruttive direttamente nello spazio 3D.

La fruizione tridimensionale del modello ha inoltre reso possibile l'osservazione di dettagli non leggibili in proiezione bidimensionale e l'analisi di porzioni architettoniche difficilmente accessibili in campo.

L'analisi stratigrafica non è stata condotta sull'intero paramento murario, ma esclusivamente su porzioni selezionate e ritenute maggiormente significative dal punto di vista stratigrafico e morfologico, con l'obiettivo di testare e validare la procedura proposta.

L'interpretazione stratigrafica condotta sul modello digitale è stata successivamente verificata in campo attraverso osservazione diretta dell'edificio, permettendo un confronto tra lettura virtuale e dato materico reale. A seguito della validazione, le unità stratigrafiche sono state utilizzate per la segmentazione della *mesh* traducendo l'interpretazione stratigrafica in una segmentazione geometrica *reality-based*<sup>145</sup>. Alle superfici segmentate è stato successivamente attribuito uno spessore mediante modificatore *Solidify*, sulla base della lettura stratigrafica effettuata. Questo passaggio ha consentito la generazione di geometrie tridimensionali strutturate, costituenti il prerequisito per la successiva modellazione informativa HBIM<sup>146</sup>.

Il *workflow* proposto rappresenta quindi un passaggio metodologico intermedio tra rilievo *reality-based* e modellazione informativa, integrando interpretazione stratigrafica, segmentazione geometrica e preparazione del modello per la strutturazione HBIM. Una volta segmentata la geometria, il modello può essere implementato secondo la logica IFC tramite strumenti dedicati<sup>147</sup>, consentendo la successiva costruzione del *database* stratigrafico e la gestione delle relazioni tramite strumenti di *network analysis*<sup>148</sup>.

## 6.8. Dalla segmentazione alla modellazione HBIM

Dopo la segmentazione geometrica, le entità tridimensionali ottenute sono state progressivamente trasformate in oggetti BIM attraverso logica IFC, passando da una semplice organizzazione geometrica a una strutturazione informativa gerarchica. Tale passaggio rappresenta la transizione dalle geometrie *reality-based* segmentate a un modello informativo in cui gli elementi vengono definiti come oggetti dotati di classi, proprietà e relazioni, secondo un approccio coerente con le metodologie scan-to-HBIM<sup>149</sup>.

---

<sup>145</sup> DORE, MURPHY, 2017, pp. 34–49.

<sup>146</sup> BANFI 2017, pp. 92–105.

<sup>147</sup> KRIJNEN 2024, pp. 10–27.

<sup>148</sup> HAGBERG, SCHULT, SWART 2008, pp. 11–15.

<sup>149</sup> DORE, MURPHY 2017, pp. 34–49; BANFI 2017, pp. 92–105.

Il modello HBIM urbano è stato ottenuto attraverso una segmentazione progressiva, distinguendo inizialmente i complessi architettonici dall'ambiente circostante e successivamente, all'interno di ciascun complesso, i vari CF componenti. Definita la geometria, le diverse porzioni segmentate sono state ricondotte alle classi IFC in funzione del livello di approfondimento raggiunto.

La traduzione delle geometrie in oggetti BIM è stata effettuata tramite l'implementazione del sistema IFC in ambiente Blender, utilizzando strumenti dedicati che consentono di creare modelli IFC nativi e mantenere la struttura gerarchica del modello. In questa logica, il modello risultante mostra la propria struttura di composizione attraverso un albero gerarchico, nel quale la selezione di un componente "genitore" consente la visualizzazione dei relative componenti "figli", quali USM, elementi architettonici o parti edilizi e riconducibili a uno specific tipo (IfcTypeObject). Tale organizzazione permette di mantenere la coerenza tra livello geometrico e livello informativo e di collegare progressivamente le parti più piccole alle entità architettoniche di livello superiore.

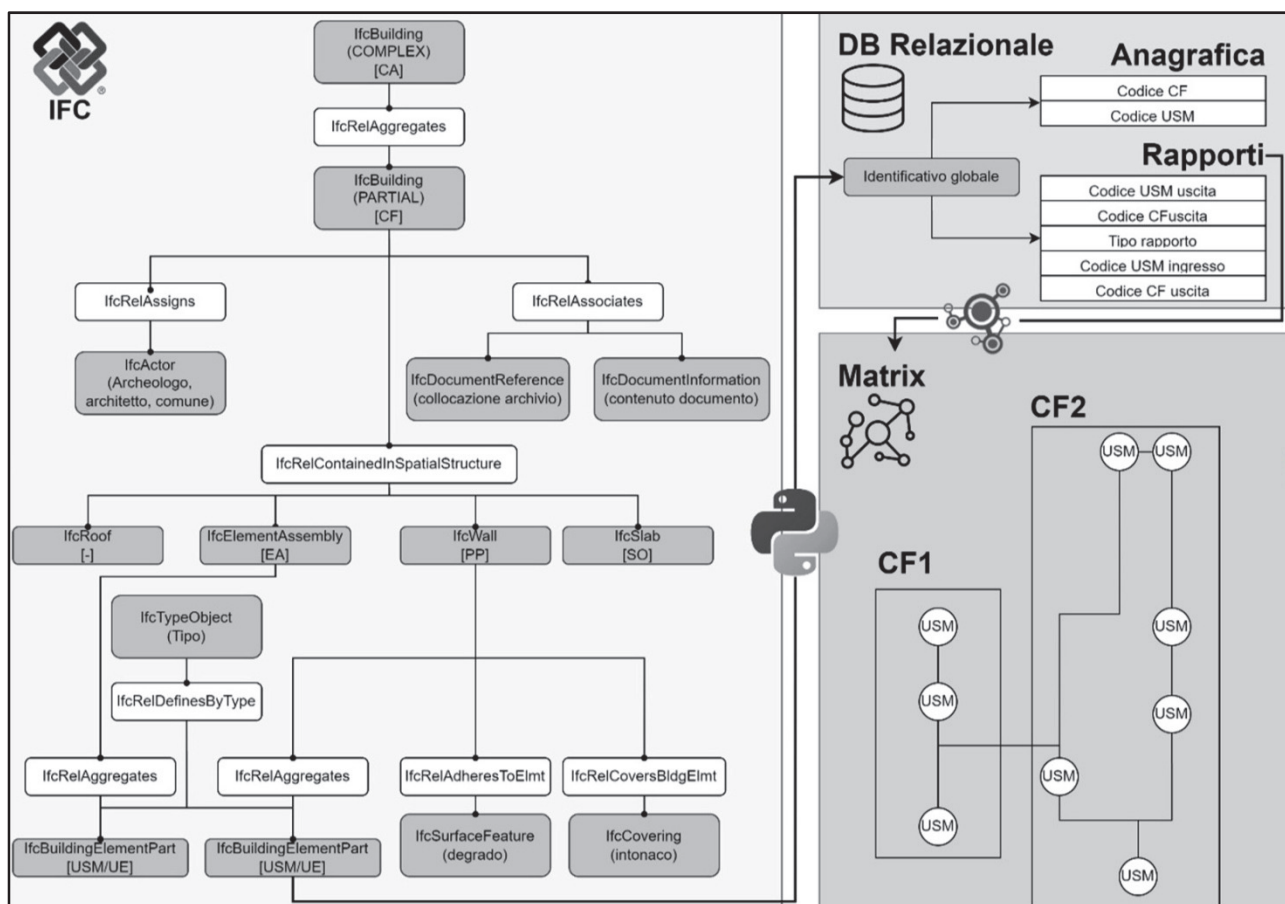


Figura 58 – Architettura del database IFC e flusso delle informazioni.

Alla definizione delle classi IFC segue la strutturazione delle informazioni mediante attribuzione di tipi, proprietà e relazioni. I tipi (IfcTypeObject) descrivono caratteristiche condivise tra elementi appartenenti alla stessa classe, mentre le proprietà (Psets) rappresentano caratteristiche specifiche

dei singoli oggetti, quali fase costruttiva, stato di conservazione, degrado o condizioni di rischio. Le relazioni IFC permettono inoltre di stabilire collegamenti tra componenti e tra componenti ed entità documentali o soggettive: tramite `IfcRelConnects` possono essere descritte relazioni costruttive, mentre `IfcRelAssociates` consente di collegare CF o USM a documenti o immagini. (**fig. 53**).

La strutturazione informative viene ulteriormente sviluppata attraverso la creazione di un database stratigrafico collegato al modello IFC. Mediante algoritmi Python e l'utilizzo della libreria `IfcOpenShell`<sup>150</sup>, le informazioni vengono estratte dagli oggetti BIM e salvate in un database esterno, nel quale i codici identificativi univoci delle componenti costituiscono la chiave di collegamento tra modello geometrico e dati descrittivi. Un primo algoritmo consente la compilazione di una tabella anagrafica contenente codice USM, parete e CF di appartenenza; un secondo algoritmo permette di registrare le relazioni stratigrafiche tra le USM utilizzando un dizionario controllato, mentre un terzo algoritmo elabora tali informazioni per la costruzione del Matrix tramite strumenti di analisi basati sulla libreria `NetworkX`<sup>151</sup>.

L'architettura risultante può essere interpretata come un sistema gerarchico multilivello, in cui le geometrie segmentate vengono progressivamente trasformate in oggetti BIM e successivamente arricchite tramite proprietà e relazioni registrate nel *database*.

---

<sup>150</sup> KRIJNEN 2024, pp. 10-27.

<sup>151</sup> HAGBERG, SCHULT e SWART 2008, pp. 11-15.

## 7. RISULTATI

L'intero processo ha consentito di costruire un sistema coerente di modelli tridimensionali articolato su più livelli e diversi gradi di dettaglio (territoriale, urbano e architettonico) mantenendo continuità geometrica e informativa tra le diverse scale di analisi.

Il modello a scala territoriale ha costituito la base generale del sistema, fornendo il quadro morfologico e spaziale di riferimento. Il modello urbano ha rappresentato il livello centrale del processo, consentendo una lettura estensiva del tessuto edilizio e introducendo una prima organizzazione informativa mediante segmentazione della *mesh*. Gli approfondimenti a scala architettonica hanno permesso di sperimentare procedure di segmentazione di dettaglio e lettura stratigrafica direttamente sui modelli tridimensionali, fino alla costruzione di geometrie strutturate predisposte alla modellazione informativa HBIM.

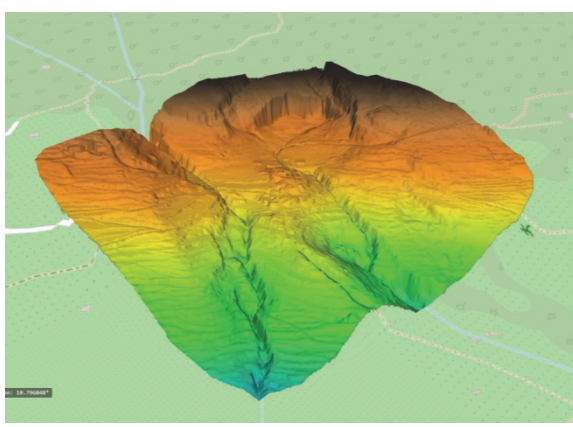
Il risultato complessivo consiste in un sistema multi-scala in cui i modelli *reality-based* e i modelli BIM risultano integrati, derivando i secondi dai primi e consentendo la costruzione di un *database* stratigrafico e la lettura tridimensionale delle relazioni tra elementi edilizi.

### 7.1. Modello a scala territoriale

Il modello a scala territoriale costituisce la base generale dell'intero sistema e rappresenta il livello di inquadramento entro cui si collocano le successive analisi. Esso ha restituito il quadro tridimensionale unitario del contesto ambientale e morfologico, evidenziando le relazioni tra topografia, assetto insediativo e distribuzione del costruito.

Questo livello ha garantito la coerenza spaziale dell'intero processo, permettendo di ricondurre ogni analisi puntuale al sistema territoriale complessivo e costituendo il riferimento geometrico su cui sono stati progressivamente innestati i modelli di scala urbana e architettonica (**tab. 7**).


Tabella 7 – Modello a scala territoriale

	<b>Nome</b>	Modello a scala territoriale
	<b>Metodologia acquisizione</b>	Rilievo LiDAR da piattaforma UA
	<b>Estensione ha</b>	10
	<b>Densitàpnt/mq nominale</b>	450
	<b>Densitàpnt/mq ground</b>	280
	<b>Poligoni</b>	7.540.748
	<b>Accuratezza plan. cm (X/Y)</b>	+/- 2.5
	<b>SQM altimetrico</b>	+/- 4.5

## 7.2. Modello a scala urbana

Il DMR a scala urbana rappresenta uno dei risultati più significativi dell'intero *workflow*, configurandosi come livello centrale della metodologia multi scalare. Esso ha permesso di ottenere una rappresentazione tridimensionale ad alta risoluzione del borgo, capace di restituire simultaneamente dimensione geometrica e materica dello stato dei luoghi e di costituire una base conoscitiva strutturata per le successive analisi (**tab. 8**).

Tabella 8 – Modello a scala urbana.

	<b>Nome</b>	Modello a scala urbana
	<b>Metodologia acquisizione</b>	Rilievo RGB da piattaforma UA
	<b>Estensione ha</b>	1,5
	<b>GSD/m</b>	0.25
	<b>Poligoni</b>	14.681.892
	<b>Accuratezza planimetrica cm (X/Y)</b>	+/- 2.5
	<b>SQM altimetrico cm</b>	+/- 2.5

Il rilievo estensivo del borgo, caratterizzato da *texture* ad elevata risoluzione, ha consentito una lettura integrata del tessuto edilizio<sup>152</sup>, rendendo possibile una preliminare analisi delle relazioni tra edifici, spazi aperti e morfologia del sito. In un contesto caratterizzato da accessibilità ridotta e condizioni conservative eterogenee, il modello urbano ha assunto un ruolo centrale come strumento di analisi virtuale.

Una prima analisi visiva ha permesso di individuare configurazioni edilizie ricorrenti e criticità utili alla selezione delle aree di approfondimento. Un risultato fondamentale è rappresentato dalla segmentazione preliminare della *mesh* urbana, attraverso la quale la geometria continua è stata suddivisa in aggregati edilizi (AE) e corpi di fabbrica (CF), trasformando il DMR in un sistema di entità discrete predisposte alla successiva strutturazione informativa<sup>153</sup>.

## 7.3. Modelli a scala architettonica

L'analisi del DMR urbano ha portato all'individuazione di tre contesti di approfondimento sui quali sono stati eseguiti rilievi di dettaglio integrando fotogrammetria di prossimità e *laser scanner* terrestre<sup>154</sup> (**tabb. 9, 10 e 11**).

<sup>152</sup> REMONDINO *et al.* 2017, pp. 1–11.

<sup>153</sup> BANFI 2017, pp. 25-45.

<sup>154</sup> BESL, MCKAY 1992, pp. 239–256.

Tabella 9 - Modello a scala architettonica – Contesto 1.


	<b>Nome</b>	Contesto 1
	<b>Metodologia acquisizione</b>	Rilievo RGB da piattaforma UA e <i>TLS</i>
	<b>Estensione mq</b>	250
	<b>GSD/m</b>	0.015
	<b>Poligoni</b>	19.650.000
	<b>Accuratezza planimetrica cm (X/Y)</b>	+/- 1
	<b>SQM altimetrico cm</b>	+/- 0.5

Tabella 10 - Modello a scala architettonica – Contesto 2.



	<b>Nome</b>	Contesto 2
	<b>Metodologia acquisizione</b>	Rilievo RGB da piattaforma UA e <i>TLS</i>
	<b>Estensione mq</b>	450
	<b>GSD/m</b>	0.015
	<b>Poligoni</b>	9.176.000
	<b>Accuratezza planimetrica cm (X/Y)</b>	+/- 1
	<b>SQM altimetrico cm</b>	+/- 0.5

Tabella 11 - Modello a scala architettonica – Contesto 3.

	<b>Nome</b>	Contesto 3
	<b>Metodologia acquisizione</b>	Rilievo RGB da piattaforma UA e <i>TLS</i>
	<b>Estensione mq</b>	380
	<b>GSD/m</b>	0.015
	<b>Poligoni</b>	11.584.892
	<b>Accuratezza planimetrica cm (X/Y)</b>	+/- 1
	<b>SQM altimetrico cm</b>	+/- 0.5

Il Contesto 3 è stato scelto come caso pilota per la sperimentazione di una lettura stratigrafica eseguita direttamente sul modello tridimensionale mediante strumenti di segmentazione in ambiente Blender<sup>155</sup> (fig. 59).

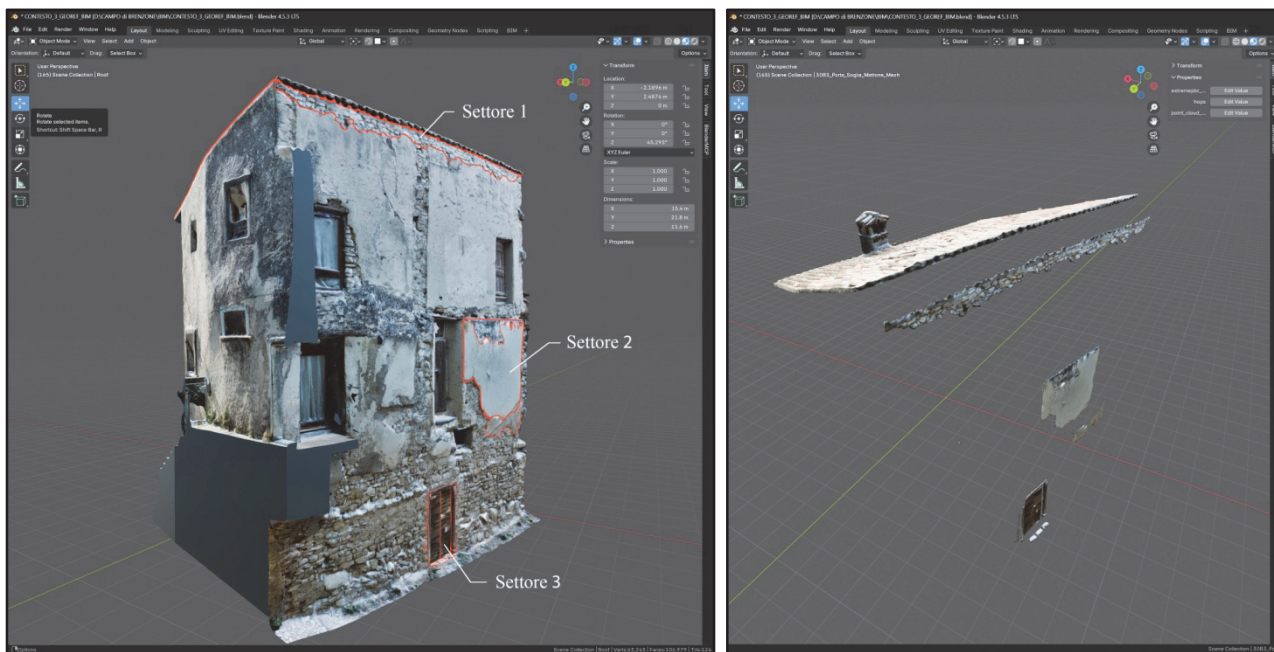


Figura 59 – Analisi stratigrafica eseguita direttamente sul modello in ambiente Blender ed evidenziazione degli elementi utilizzati come esempio di segmentazione di dettaglio.

Come *test* di segmentazione sono stati scelti, per il diverso grado di complessità, il rifacimento del tetto, un settore con livelli successivi di intonaci e patine biologiche e il sistema di apertura della porta centrale. La segmentazione ha consentito la trasformazione progressiva della *mesh reality-based* in geometrie strutturate predisposte alla successiva codifica informativa<sup>156</sup>.

#### 7.4. Modello HBIM urbano e architettonico

L'approccio adottato si è basato sulla costruzione di un sistema di DMR organizzati secondo una logica multiscalare.

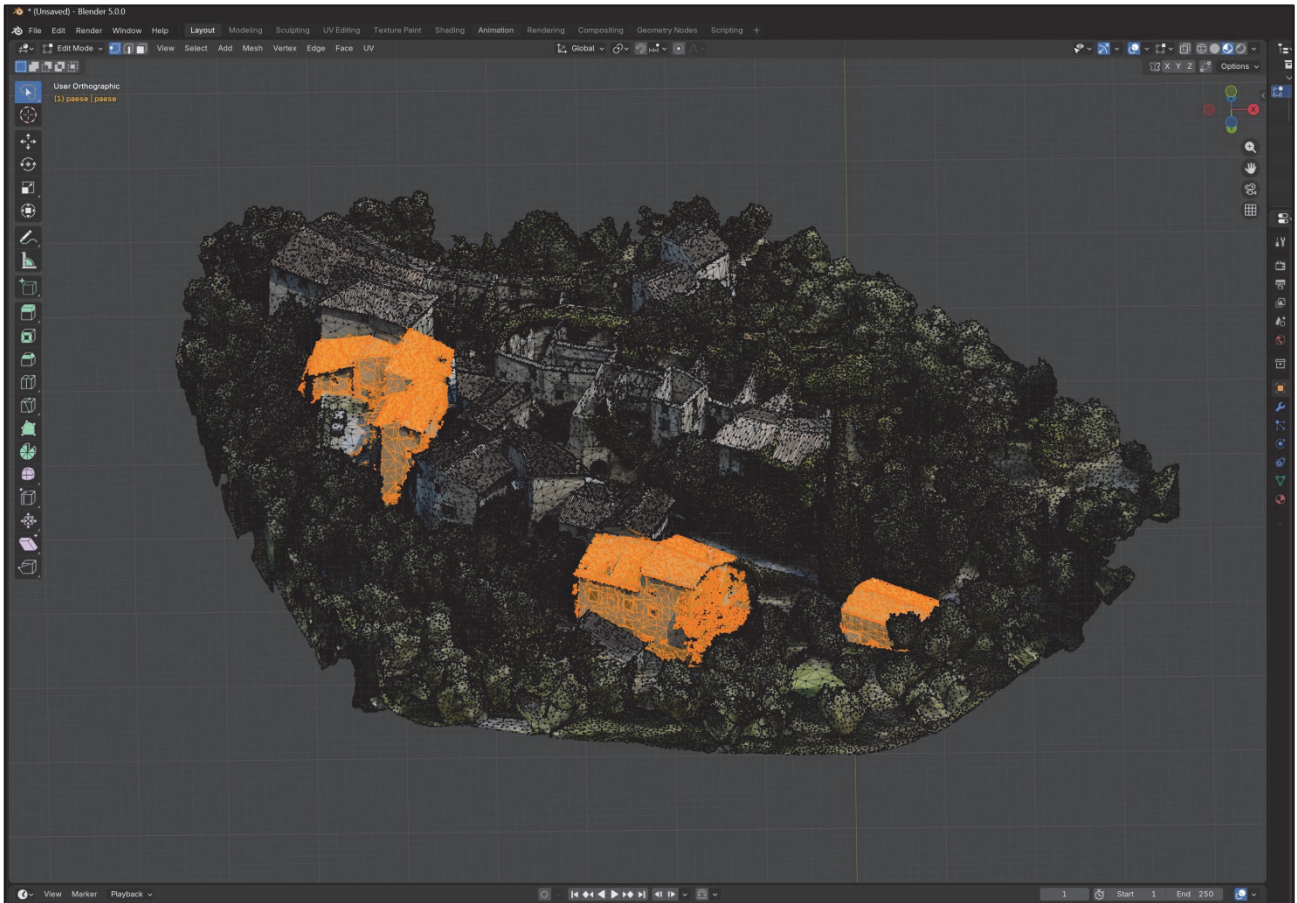
Il primo livello è costituito dal modello del terreno, derivato da rilievi LiDAR e fotogrammetrici, utilizzato come base per l'inquadratura territoriale e per le verifiche morfologiche e ambientali. Sul modello a scala urbana sono stati segmentati i modelli a scala architettonica, sui quali è stato avviato il processo HBIM, permettendo l'integrazione tra geometria *reality-based* e informazioni

<sup>155</sup> MANNONI, GIANNICCHEDDA, 2004, pp. 45–68.

<sup>156</sup> BANFI 2017, pp. 92–105.

semantiche. In questa prospettiva, i modelli territoriale, urbano e architettonico non costituiscono prodotti autonomi, ma livelli interconnessi di un unico *framework* conoscitivo, nel quale ciascuna scala supporta la successiva in termini di interpretazione, gestione del dato e sviluppo del modello informativo.

Il modello HBIM urbano è stato ottenuto mediante una segmentazione progressiva, distinguendo inizialmente i complessi architettonici dall'ambiente circostante e successivamente, all'interno di ciascun complesso, i diversi corpi di fabbrica componenti (**fig. 60**).



**Figura 60 - Modello a scala urbana con segmentazione in ambiente Blender dei contesti d'interesse.**

La georeferenziazione del modello è stata trasferita da Blender all'ambiente IFC attraverso la compilazione delle entità *IfcMapConversion* e *IfcProjectedCRS*. Definita la geometria, ai vari segmenti sono state assegnate classi IFC in relazione al livello di approfondimento raggiunto. Nei casi di rilievo speditivo, il modello coincide con l'intero involucro edilizio ed è classificato come *IfcBuilding*, registrandone le proprietà descrittive generali; nei casi in cui è stata condotta l'analisi

delle USM, queste sono state segmentate e assegnate alla classe *IfcBuildingElementPart*, aggregate successivamente nelle pareti (*IfcWall*) e nei relativi corpi di fabbrica<sup>157</sup> (fig. 61).

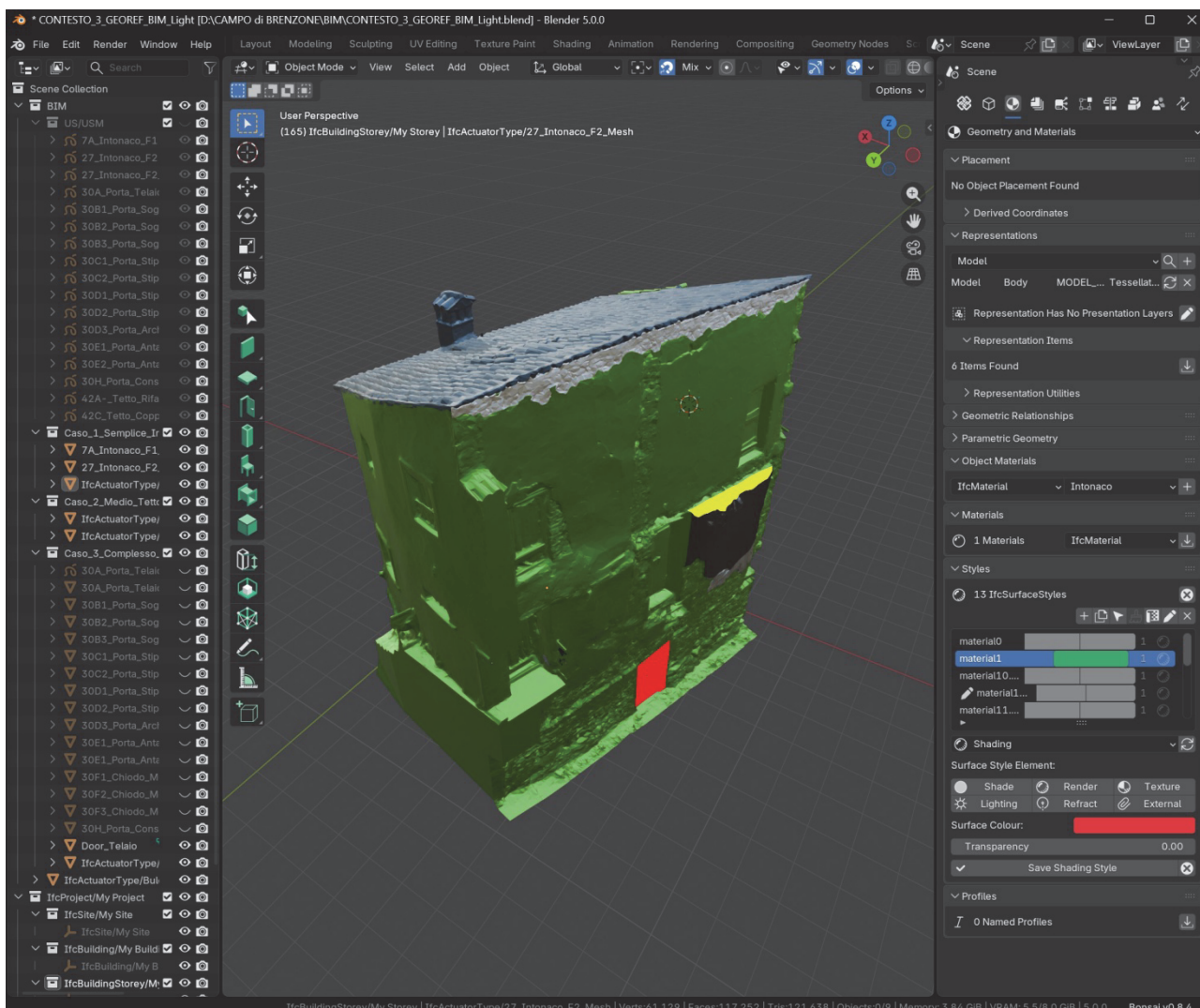


Figura 61 – Modello architettonico contesto 3 con assegnazione IFC. In evidenza le unità segmentate e semantizzate.

Mediante gli strumenti di interrogazione delle proprietà, disponibili sia in Blender sia nei visualizzatori BIM, è stato possibile evidenziare edifici o elementi corrispondenti a determinati valori di proprietà, anche per combinazione di filtri. Gli elementi riferiti a uno stesso periodo cronologico sono stati raggruppati tramite *IfcGroup* e interrogati mediante selezione del gruppo.

La segmentazione delle USM nel DMR è stata effettuata tramite strumenti di segmentazione ed utilizzando la console Python interna a Blender, è stato possibile eseguire direttamente il codice per la selezione dei componenti e il popolamento del *database* nelle tabelle con i dati relativi all'Anagrafica e Rapporti (fig. 62).

<sup>157</sup> DORE, MURPHY 2017, pp. 34-49.

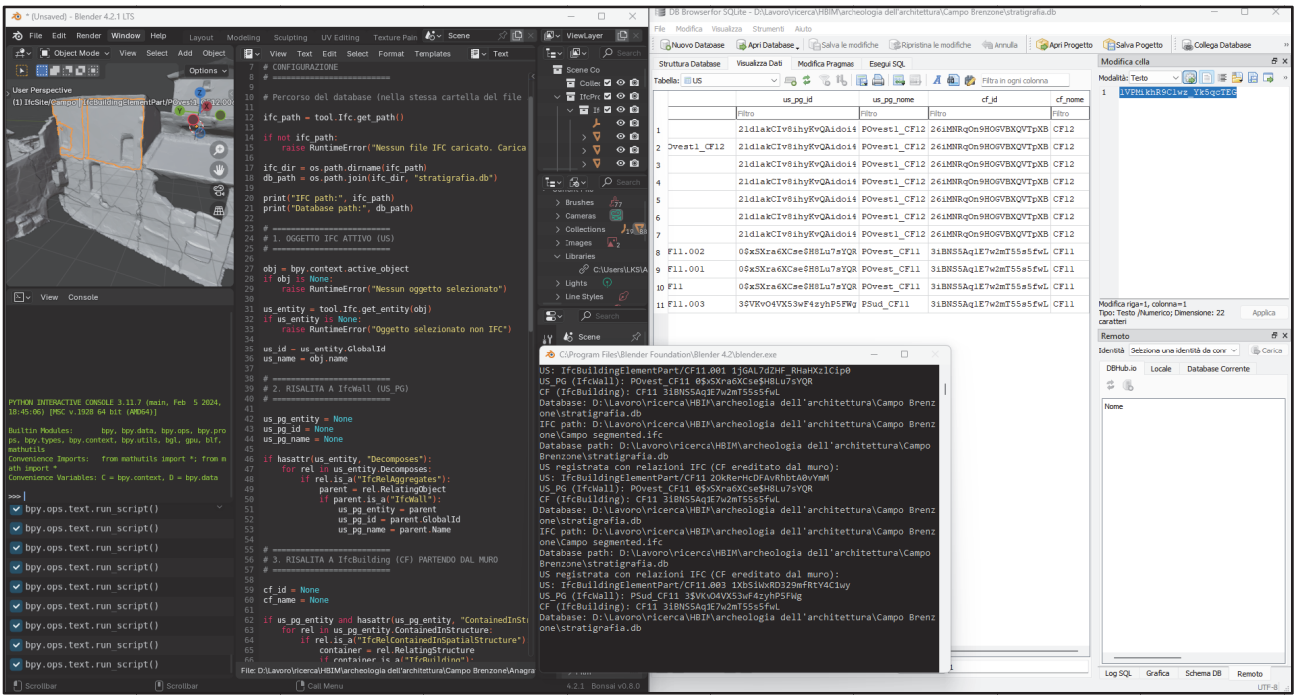


Figura 62 – Blender – console Phython per la compilazione del DB (da MIELE, SBROGIO' 2026).

L'esecuzione del terzo algoritmo ha consentito di utilizzare i dati salvati nel database per la generazione di un grafo stratigrafico (fig. 63). Sebbene non adotti ancora le convenzioni grafiche tradizionali del Matrix, il grafo rappresenta le relazioni stratigrafiche in forma strutturata: le USM, rappresentate da nodi numerati e colorati in funzione del CF di appartenenza, sono disposte in successione verticale dalla più antica alla più recente, con allineamenti orizzontali per elementi contemporanei e ramificazioni nei casi di rapporti multipli.

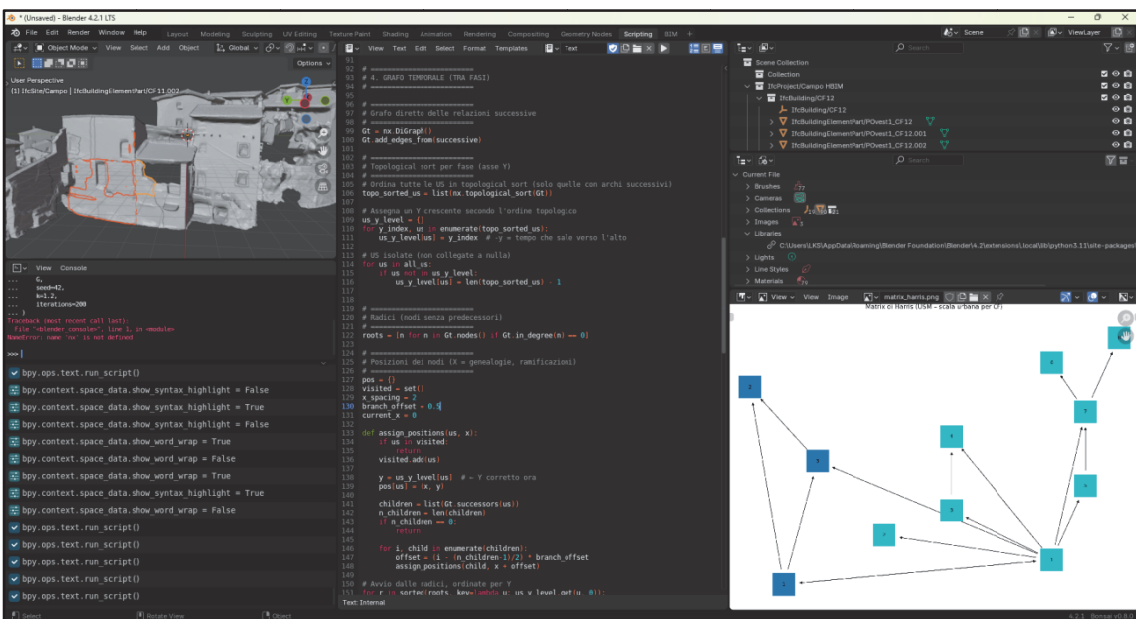


Figura 63 – Interfaccia Blender e grafo stratigrafico (da MIELE, SBROGIO' 2026).

L'analisi dei dati tramite NetworkX<sup>158</sup> ha inoltre permesso di individuare eventuali errori nell'assegnazione dei rapporti stratigrafici, evidenziando automaticamente la presenza di cicli incompatibili con la successione temporale.

---

<sup>158</sup> HAGBERG, SCHULT e SWART 2008, pp. 11–15.

## 8. INTEGRAZIONE IN AMBIENTE 3D GEOSPAZIALE

Negli ultimi anni l'integrazione tra modelli informativi BIM, dati geografici e ambienti tridimensionali geospaziali ha assunto un ruolo centrale nello sviluppo dei *digital twin* urbani e territoriali, configurandosi come uno dei principali ambiti di convergenza tra geomatica, modellazione informativa e analisi spaziale. L'evoluzione delle piattaforme tridimensionali *web-based* ha progressivamente superato la tradizionale separazione tra scala architettonica e scala territoriale, favorendo la costruzione di ambienti digitali nei quali geometrie, attributi semantici e informazioni geografiche possono essere integrati e interrogati all'interno di un unico sistema informativo<sup>159</sup>. In questa prospettiva, la convergenza tra BIM e GIS non rappresenta soltanto una questione di interoperabilità tecnica, ma una trasformazione metodologica che consente di collegare la modellazione dettagliata dell'edificio con analisi spaziali più ampie, supportando processi avanzati di gestione, monitoraggio e valorizzazione del patrimonio costruito.

L'introduzione di *standard* aperti per la rappresentazione dei dati tridimensionali ha favorito lo sviluppo di approcci orientati all'integrazione multi-sorgente delle informazioni. In questo contesto, *standard* come IFC e *CityGML*<sup>160</sup> permettono di collegare modelli BIM, nuvole di punti e basi cartografiche attraverso strutture semantiche condivise<sup>161</sup>. In particolare, *CityGML* rappresenta uno *standard* internazionale sviluppato dall'*Open Geospatial Consortium* (OGC)<sup>162</sup> per la rappresentazione e lo scambio di modelli tridimensionali di città e territori in ambiente geospaziale. Il modello dati consente di descrivere elementi urbani quali edifici, infrastrutture, vegetazione e morfologia del terreno, associando alla geometria tridimensionale informazioni semantiche e relazioni topologiche. Una delle sue caratteristiche principali è l'organizzazione dei modelli secondo diversi *Levels of Detail* (LoD), che permettono di rappresentare il territorio a differenti scale di analisi e di gestire dataset urbani complessi in ambienti GIS tridimensionali interoperabili<sup>163</sup>.

All'interno di questo quadro, le piattaforme geospaziali tridimensionali consentono non solo la visualizzazione di modelli complessi, ma anche l'esecuzione di analisi multi-scala e interrogazioni semantiche, configurando l'integrazione BIM-GIS come un sistema multilivello in cui i modelli informativi architettonici vengono progressivamente inseriti all'interno di strutture spaziali più ampie, collegando edificio, infrastruttura e contesto territoriale<sup>164</sup>.

---

<sup>159</sup> LIU *et al.* 2017, pp. 2–6; ZHU *et al.* 2018, pp. 3–7.

<sup>160</sup> GRÖGER *et al.* 2012, pp. 12–33.

<sup>161</sup> HOR *et al.* 2016, pp. 74–77; DENG *et al.* 2025, pp. 66–69.

<sup>162</sup> PERCIVALL 2010 pp. 5–15.

<sup>163</sup> BILJECKI *et al.* 2015, pp. 286–288.

<sup>164</sup> DORE, MURPHY 2017, pp. 47–48.

In questo scenario assumono un ruolo rilevante le piattaforme geospaziali basate su tecnologie WebGL e 3D Tiles, tra cui il sistema Cesium<sup>165</sup>, che consente la visualizzazione e gestione di grandi quantità di dati tridimensionali georeferenziati attraverso *streaming* progressivo e rappresentazione multi-risoluzione. In tale prospettiva, le piattaforme 3D geospaziali consentono non solo la visualizzazione di modelli complessi, ma anche l'esecuzione di analisi multi-scala e interrogazioni semantiche<sup>166</sup>, che consentono l'integrazione BIM-GIS come un sistema multilivello in cui i modelli informativi architettonici vengono progressivamente inseriti all'interno di strutture spaziali più ampie, collegando edificio, infrastruttura e contesto ambientale<sup>167</sup>.

Nel campo del patrimonio culturale tali piattaforme consentono inoltre di superare la tradizionale frammentazione tra rilievo, modellazione e rappresentazione, trasformando il modello tridimensionale in un sistema informativo dinamico e interrogabile. Il modello digitale non rappresenta più soltanto un prodotto finale di documentazione, ma diventa una vera e propria infrastruttura informativa capace di connettere dati geometrici, informazioni stratigrafiche e metadati territoriali.

Diversi studi recenti hanno dimostrato le potenzialità di questi ambienti digitali nella gestione e valorizzazione del patrimonio architettonico. Uno di questi è rappresentato dalla piattaforma sviluppata per la città storica di Xingcheng (Cina nord orientale) (**fig. 64**), nella quale Cesium è utilizzato per la visualizzazione di modelli urbani tridimensionali integrati con dati GIS e archivi documentari, consentendo la navigazione interattiva dell'ambiente urbano e l'interrogazione delle informazioni associate agli edifici<sup>168</sup>.

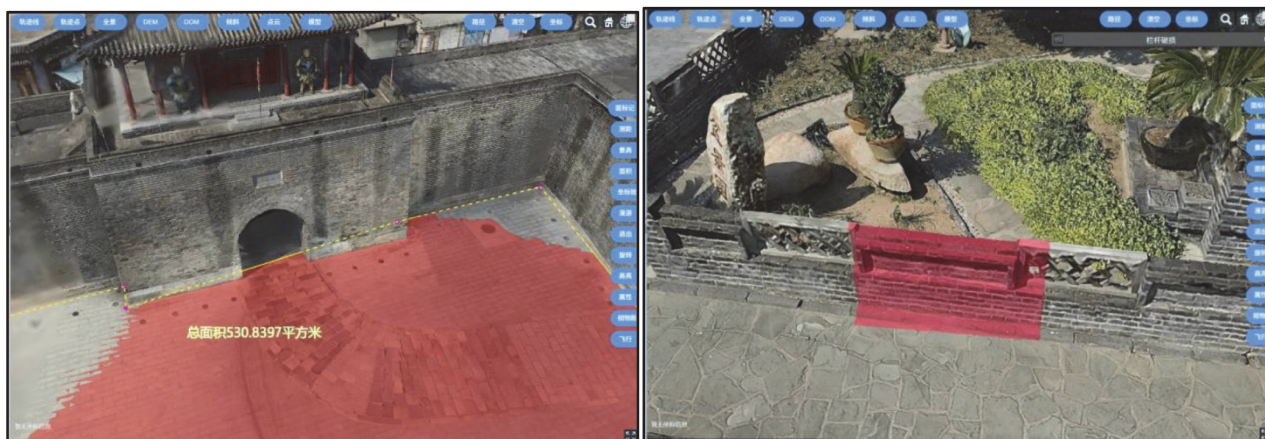


Figura 64 – Piattaforma web su base Cesium (da LIU et al. 2005, p. 170).

Un ulteriore esempio applicato al patrimonio culturale è rappresentato dal progetto sviluppato per il complesso monumentale di Blenheim Palace (Oxfordshire, Inghilterra), nel quale la piattaforma

<sup>165</sup> REFERENCE DOCS: <https://cesium.com/docs/cesiumjs-ref-doc/>.

<sup>166</sup> WU et al. 2020, pp. 1–5.

<sup>167</sup> LAM et al. 2024, pp. 2–8.

<sup>168</sup> LIU et al. 2025, pp. 166–169.

Cesium è impiegata per integrare modelli tridimensionali, dati di monitoraggio e informazioni gestionali all'interno di un ambiente digitale a supporto della conservazione e della gestione del sito storico<sup>169</sup> (fig. 65).

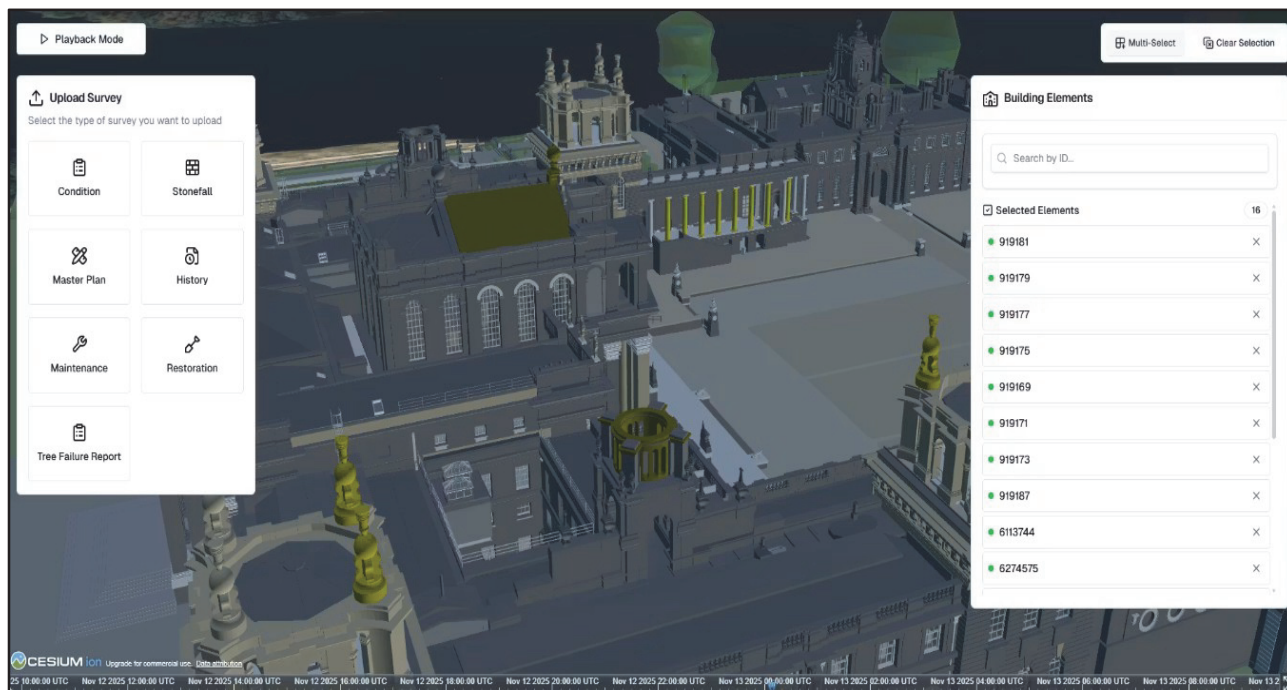


Figura 65 – Piattaforma web su base Cesium (da CHOW 2006).

In questo quadro teorico e tecnologico si colloca anche il caso studio di Campo, che ha rappresentato un primo banco di prova orientato all'integrazione sperimentale di alcune componenti del modello HBIM all'interno di un ambiente tridimensionale geospaziale basato su Cesium. La sperimentazione ha consentito di valutare le potenzialità di connessione tra scala urbana, modello architettonico e dati informativi. L'implementazione completa della piattaforma e l'estensione dell'interoperabilità tra modelli, *database* e servizi geospaziali rappresentano tuttavia una fase di sviluppo successiva del progetto, nell'ambito dell'iniziativa "Archivio di Comunità" finalizzata alla costruzione di un ambiente digitale condiviso per la raccolta e l'organizzazione delle informazioni relative al borgo, come sistema informativo aperto, nel quale potranno essere progressivamente integrati dati storici, rilievi e documentazione (fig. 66). La piattaforma, inoltre, basata su un approccio *open source*, è pensata come base conoscitiva condivisa per future attività di ricerca, conservazione e valorizzazione del sito.

<sup>169</sup> CHOW 2026.

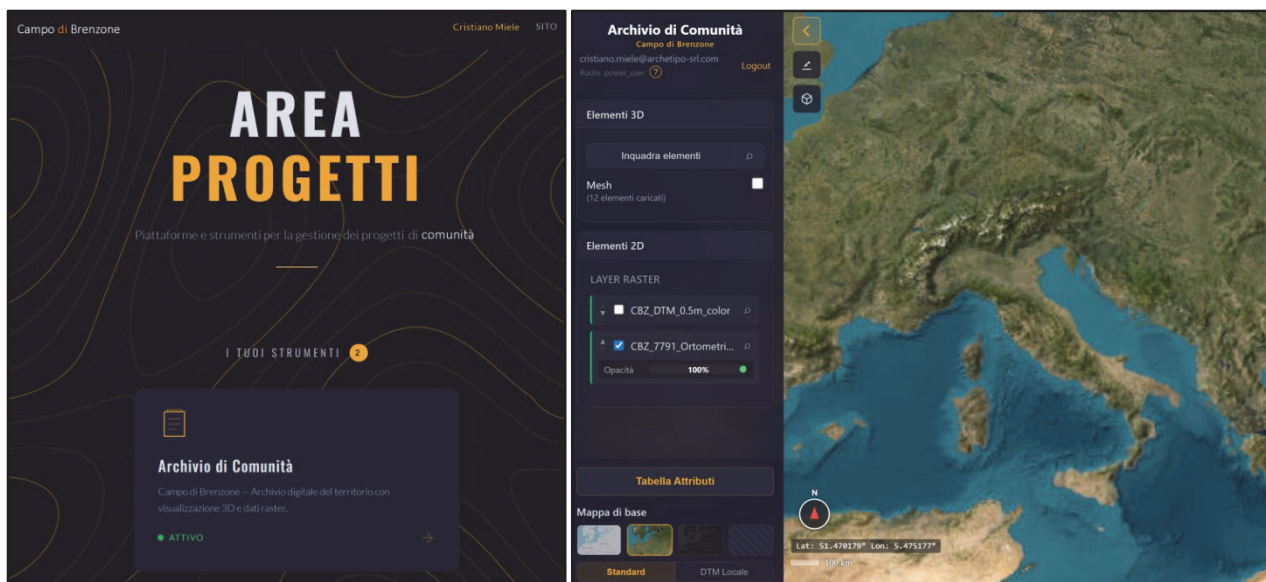


Figura 66 – Interfaccia di accesso e *Home Page* piattaforma Archivio di Comunità.

### 8.1. Dalla *mesh realty-based* alla piattaforma 3D

Il *workflow* adottato nel caso studio si articola in tre fasi principali: preparazione del modello, conversione in formato geospaziale e pubblicazione sulla piattaforma.

La prima fase riguarda la preparazione della *mesh* derivata da rilievo fotogrammetrico e *laser scanner*, generalmente in formato OBJ e relative *texture*. In ambiente Blender il modello viene sottoposto a operazioni di controllo qualità finalizzate alla verifica della coerenza geometrica, della corretta gestione delle *texture* e dell'orientamento spaziale del sistema di riferimento (fig. 67).

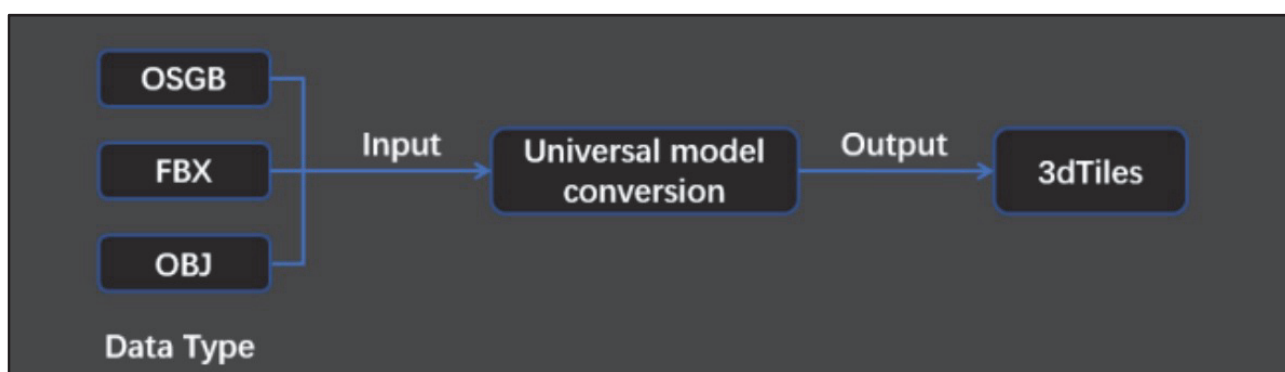
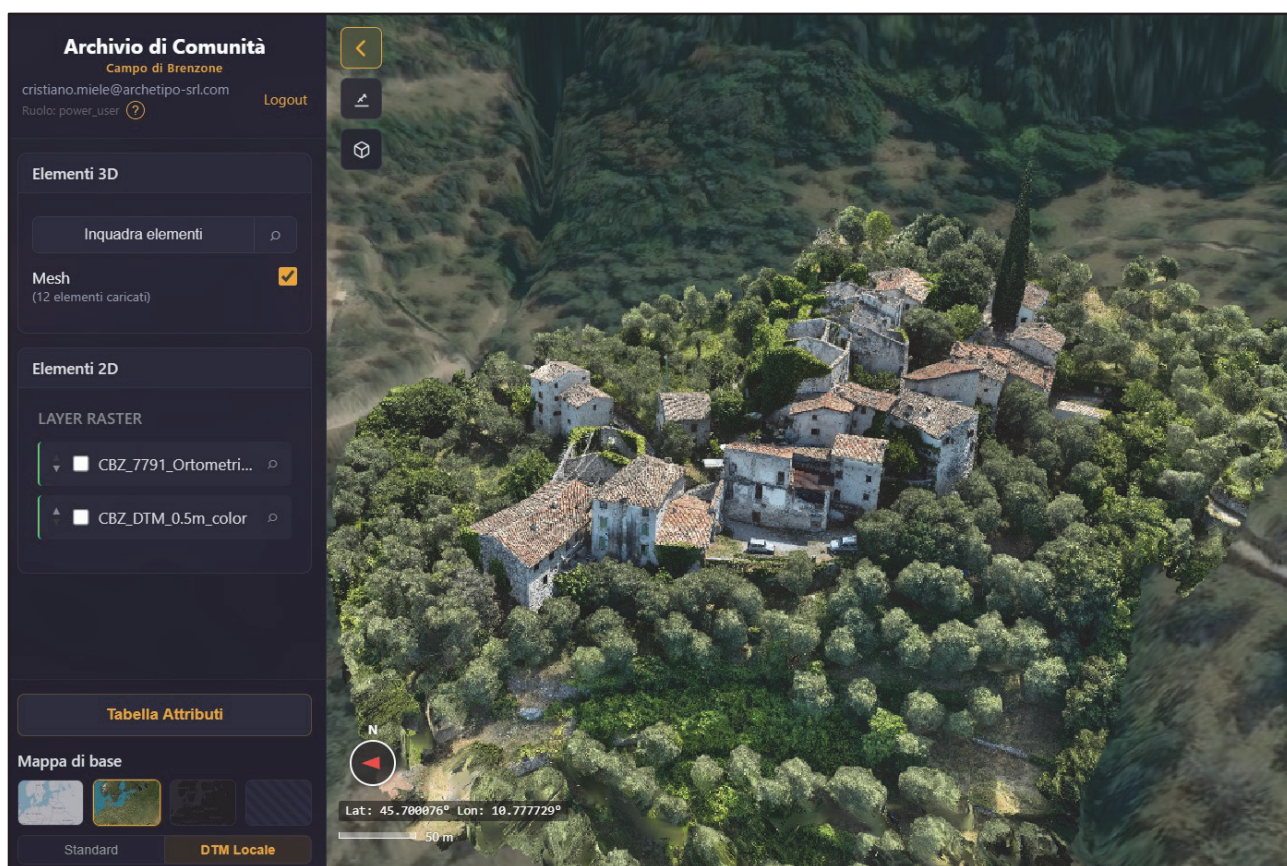


Figura 67 – Schematizzazione del passaggio dalla *mesh* al formato 3D Tiles (da LIU et al. 2025, p. 167).

La seconda fase prevede la conversione della *mesh* in formato compatibile con il sistema di visualizzazione *web-based* attraverso la generazione di pacchetti ottimizzati per lo *streaming* tridimensionale (3D Tiles). Questo processo consente di preservare precisione spaziale, materiali e

*texture*, rendendo possibile la gestione multi-risoluzione del modello e la sua visualizzazione progressiva all'interno del *viewer* geospaziale<sup>170</sup>.

L'ultimo passaggio consiste nel caricamento del *tileset* all'interno della piattaforma, associandolo agli elementi territoriali e ai dati informativi del progetto. Una volta pubblicato, il modello diventa parte integrante dell'ambiente geospaziale, permettendo attività di navigazione, misurazione, interrogazione e confronto con altri *layer* territoriali. In questo modo il rilievo tridimensionale assume un ruolo operativo e non meramente descrittivo, costituendo un riferimento comune per l'analisi e la gestione del sito (**fig. 68**).



**Figura 68** – Interfaccia web con inserimento del DMR a scala urbana.

Il nucleo operativo della piattaforma è costituito da un *viewer* 3D geospaziale, ovvero un ambiente tridimensionale interattivo nel quale la geometria viene visualizzata nel proprio contesto territoriale reale. Tale soluzione consente di navigare il modello a differenti livelli di scala (**fig. 69**), mantenendo il collegamento tra geometria, localizzazione geografica e informazioni associate<sup>171</sup>.

<sup>170</sup> YAO *et al.* 2018, pp. 313–317.

<sup>171</sup> WU *et al.* 2020, pp. 1–5.

Le funzionalità disponibili in questa fase *beta* comprendono sia aspetti visuali che strumenti di organizzazione del dato. Da un lato, la gestione dei *tileset* 3D consente il caricamento e il controllo del posizionamento geospaziale dei modelli, dall'altro, strumenti quali misurazioni in scena,

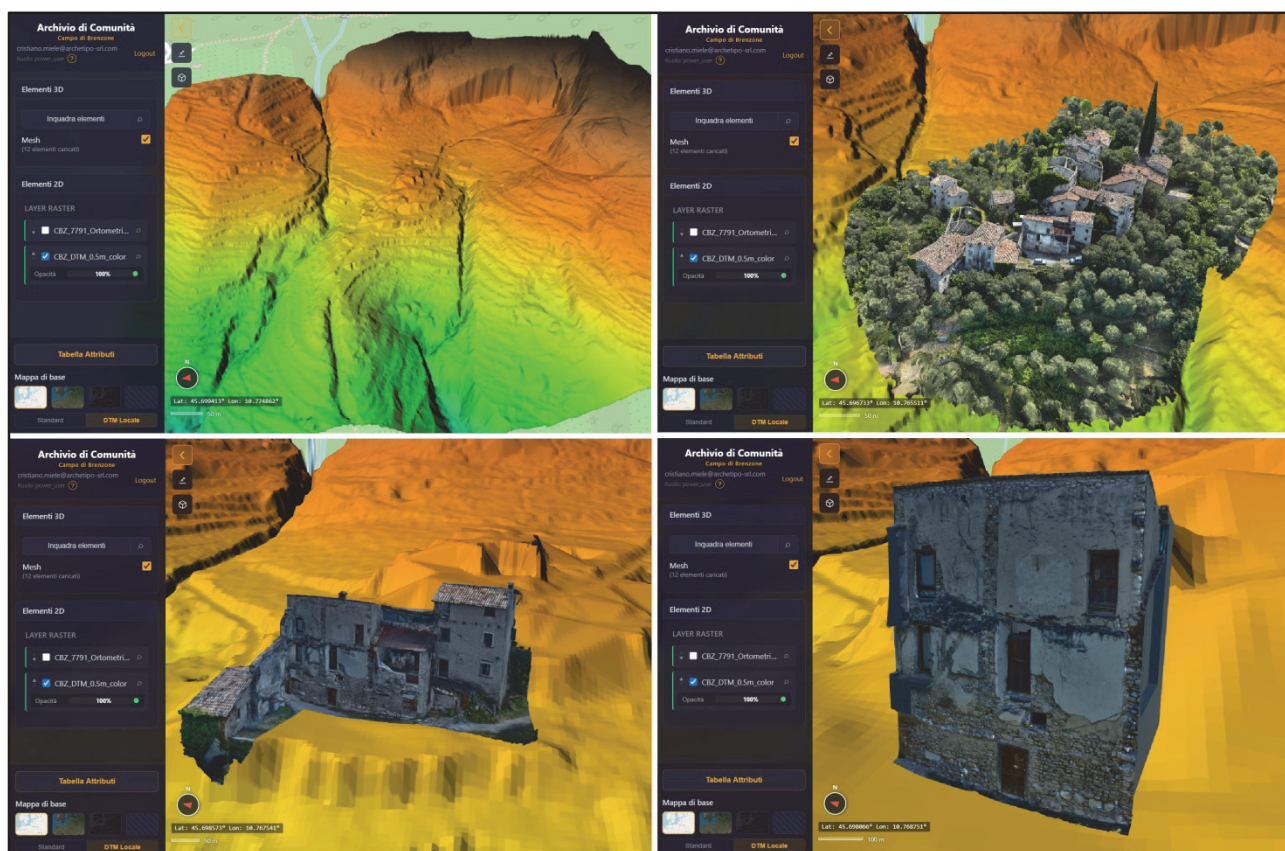


Figura 69 – Piattaforma web con visualizzazione dei modelli a diverse scale.

La struttura modulare della piattaforma permette inoltre l'integrazione di dati *raster* (fig. 70), *layer* vettoriali, servizi WMS, nuvole di punti e *dataset* territoriali, configurandosi come un ambiente interoperabile capace di connettere modelli 3D e informazioni GIS in un unico *framework* operativo<sup>172</sup>.

Un aspetto centrale riguarda la dimensione collaborativa del sistema: il modello tridimensionale non viene più gestito come allegato statico, ma come contenuto dinamico inserito in un'infrastruttura digitale condivisa, aggiornabile e interrogabile da utenti differenti. Tale passaggio riflette la transizione concettuale dalla semplice modellazione alla gestione informativa del dato 3D, elemento chiave nei processi contemporanei di *digital twin* applicati al patrimonio costruito<sup>173</sup>.

<sup>172</sup> HOR *et al.* 2016, pp. 74–77.

<sup>173</sup> LAM *et al.* 2024, pp. 2–8.

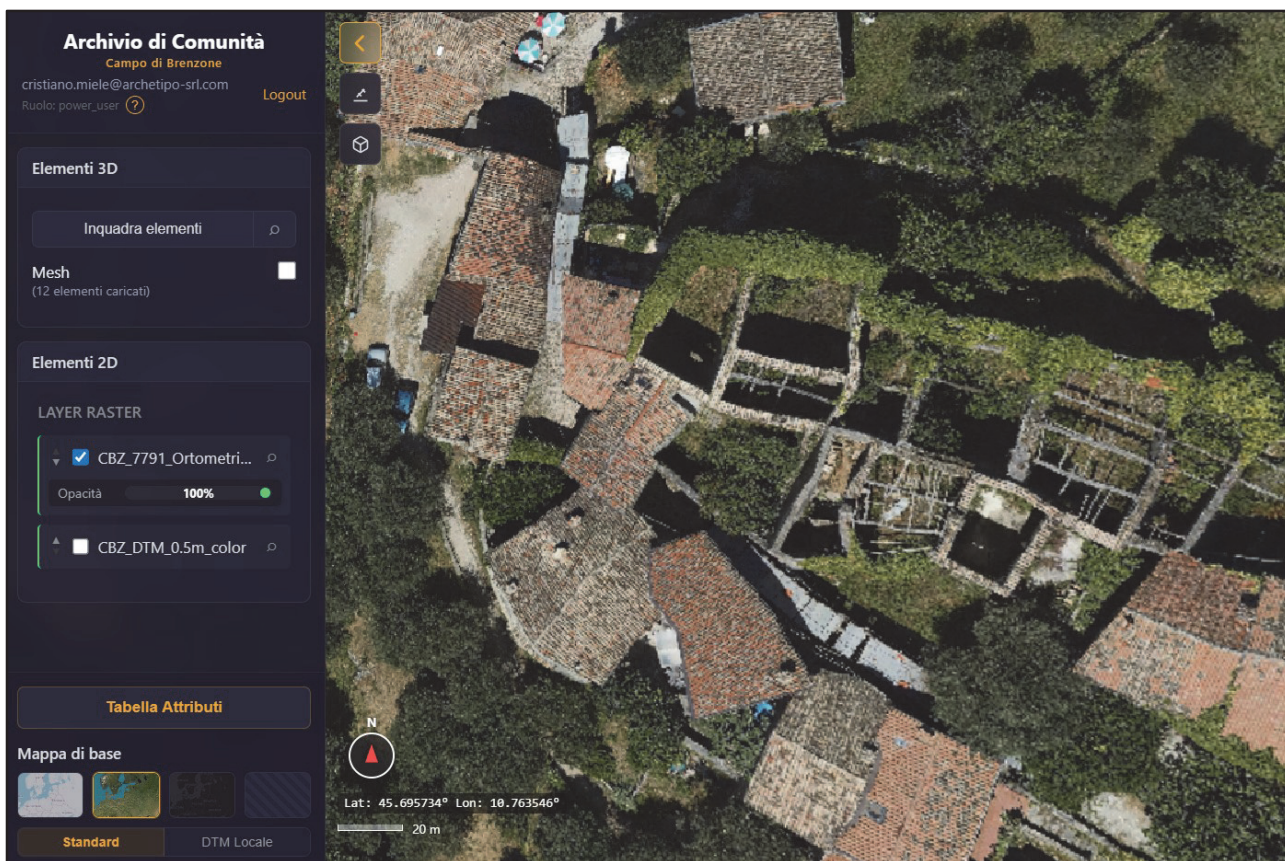


Figura 70 – Piattaforma con visualizzazione dati *raster* (ortomosaico ricavato da rilievo UA).

## 8.2. Visualizzazione e interrogazione dei modelli multiscalari

Un elemento centrale dell'integrazione tra modello HBIM e piattaforma 3D geospaziale riguarda la gestione delle informazioni associate agli oggetti tridimensionali e la costruzione di un *database* collegato al modello. (fig. 71).

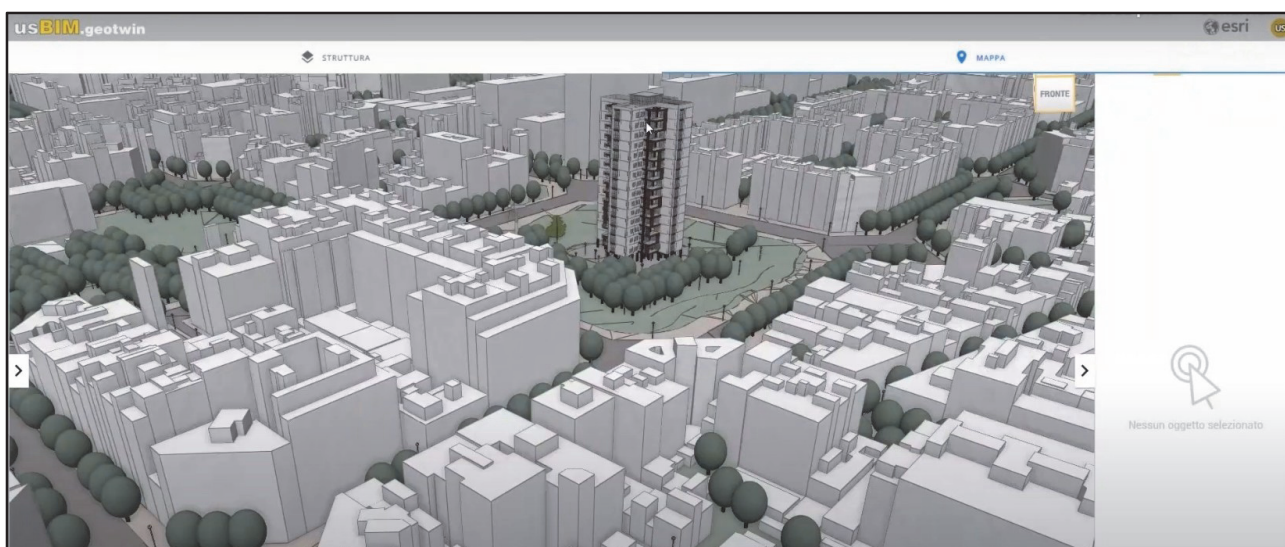


Figura 71 – Integrazione di modelli a diverse scale (da ESRI ArcGis Geobim).

In un approccio orientato alla modellazione informativa, infatti, la componente geometrica rappresenta soltanto uno dei livelli del sistema, mentre il reale valore del modello risiede nella possibilità di associare a ciascun elemento attributi semantici, relazioni e metadati interrogabili. La letteratura recente evidenzia come l'integrazione BIM-GIS e *digital twin* richieda strutture informative multilivello in cui geometria e database siano strettamente interconnessi, consentendo interrogazioni spaziali e semantiche all'interno di ambienti geospaziali condivisi<sup>174</sup>.

Nel caso di Campo, il modello HBIM è stato strutturato secondo la logica gerarchica IFC, nella quale gli elementi vengono classificati in classi, tipi e proprietà (*Property Sets*), configurando differenti livelli informativi. Le entità geometriche derivate dalla segmentazione *reality-based* risultano quindi potenzialmente arricchibili con informazioni relative a cronologia, stato di conservazione, dati stratigrafici e relazioni costruttive. Tuttavia, una delle criticità ancora aperte riguarda la modalità con cui tali proprietà IFC vengono effettivamente lette e interpretate all'interno della piattaforma, nonché la possibilità di implementare procedure di trasferimento automatico e sincronizzazione tra modello informativo e *database* esterno (fig. 72).

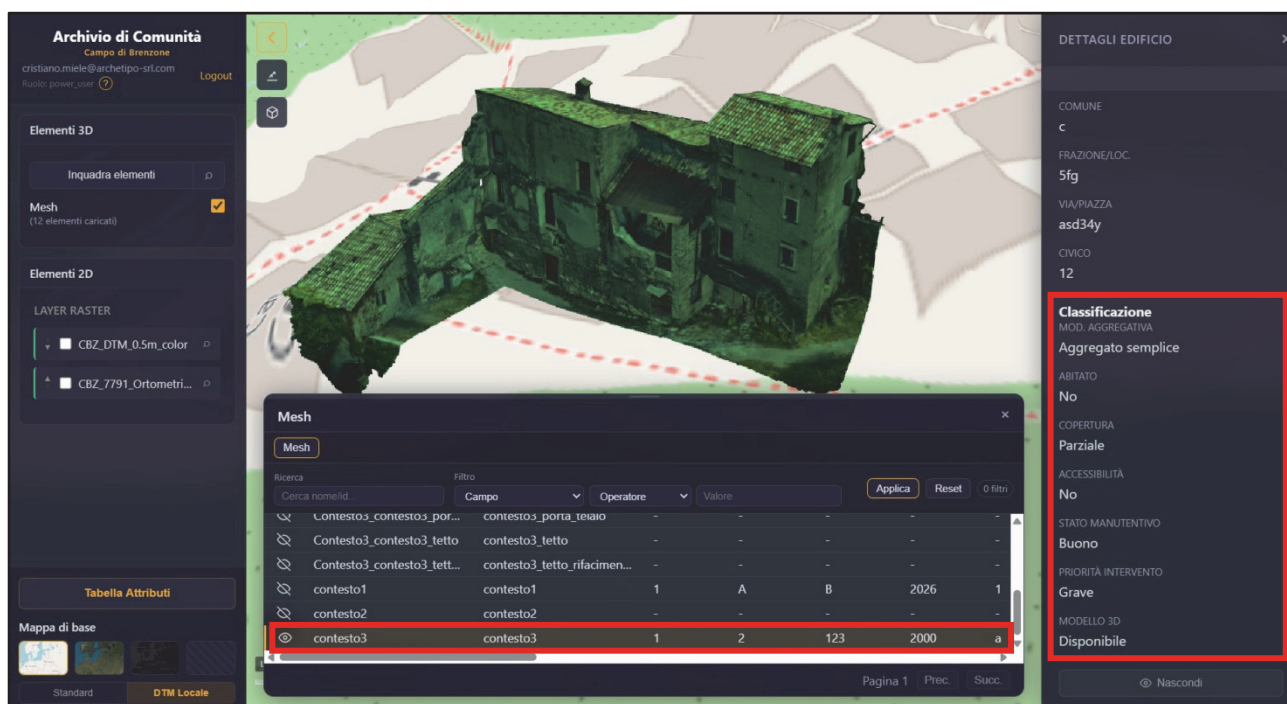


Figura 72 – Piattaforma con evidenza del DB associato al modello a scala architettonica.

In questa fase della ricerca è stato sviluppato un primo livello sperimentale di integrazione informativa, consistente nella creazione di un *database* di tipo anagrafico associato agli oggetti del modello. Tale struttura contiene le informazioni identificative essenziali come codice univoco,

<sup>174</sup> LIU *et al.* 2017, pp. 4–6; LAM *et al.* 2024, pp. 3–8.

appartenenza gerarchica (USM, parete, corpo di fabbrica) e descrizioni principali, costituendo un primo collegamento tra livello geometrico e livello informativo.

Gli sviluppi futuri saranno orientati alla verifica delle modalità con cui le proprietà IFC possono essere correttamente interpretate dalla piattaforma, valutando la possibilità di esporre e interrogare direttamente i *Property Sets* e le relazioni semantiche degli oggetti (fig. 73).

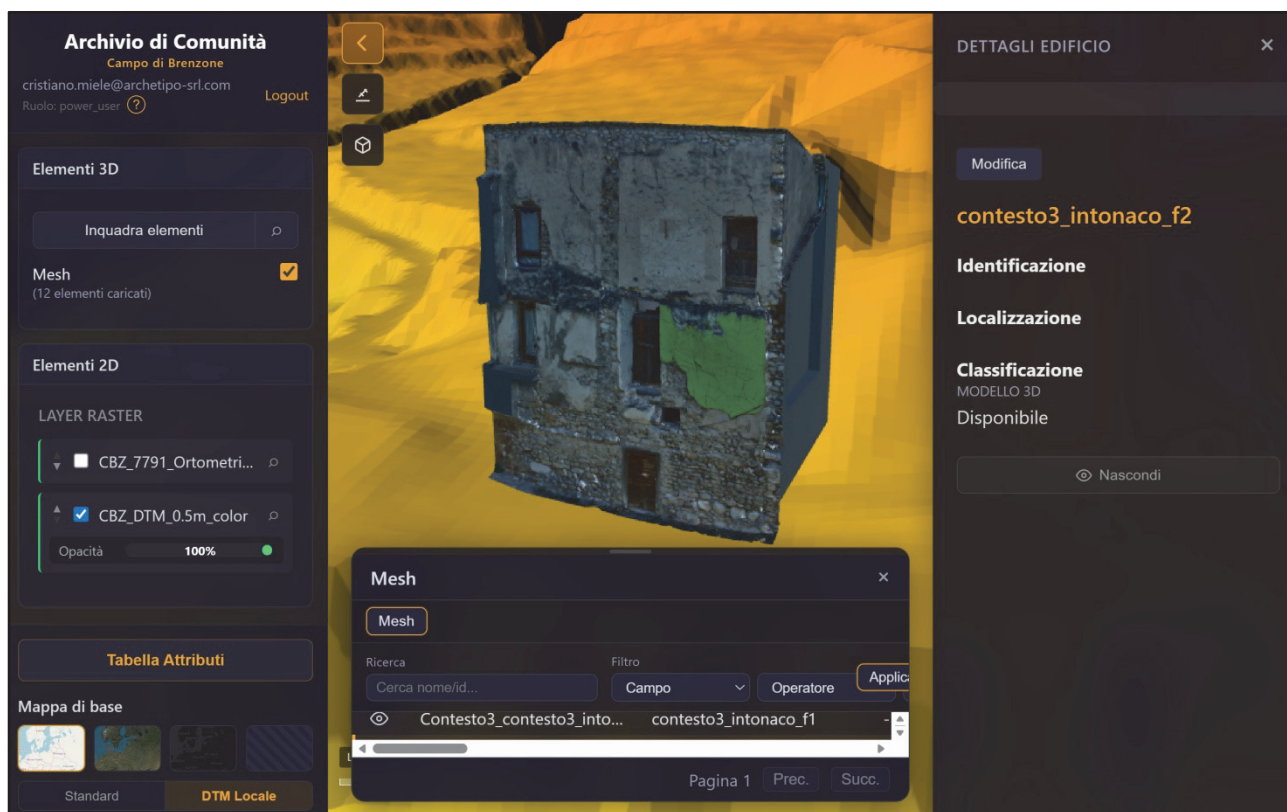


Figura 73 – Piattaforma in modalità interrogazione.

L'obiettivo sarà evolvere da un *database* anagrafico a un sistema informativo multilivello capace di integrare dati stratigrafici, informazioni cronologiche e attributi gestionali, in linea con i recenti approcci orientati alla costruzione di *digital twin* geospaziali del patrimonio costruito<sup>175</sup>. In tale prospettiva, il modello tridimensionale non rappresenta soltanto una geometria navigabile, ma diventa una struttura informativa dinamica in cui componente geometrica, semantica e database convergono all'interno di un ambiente geospaziale unificato.

<sup>175</sup> WU *et al.* 2020, pp. 1–5; DENG *et al.* 2025, pp. 66–69.



bidimensionale, rendendo leggibili contesti complessi, strutture stratificate o edifici in stato di rudere, spesso difficili da interpretare per un visitatore non specialista<sup>178</sup>. Un esempio significativo in ambito italiano è rappresentato dal progetto di documentazione tridimensionale di Pompei<sup>179</sup>, in cui modelli ad alta risoluzione sono stati utilizzati per la conservazione digitale, la ricerca archeologica e la fruizione pubblica attraverso piattaforme virtuali e applicazioni interattive<sup>180</sup> (**fig. 74**).

Analogamente, progetti di rilievo tridimensionale condotti nei siti archeologici di *Paestum* e *Nora*<sup>181</sup> hanno dimostrato come la modellazione fotogrammetrica e TLS possa supportare sia l'analisi scientifica sia la comunicazione verso il pubblico<sup>182</sup> (**fig. 75**).



**Figura 75 – Nora (CA) – Modello 3D da fotogrammetria da drone (da CARRARO *et al.* 2019, p. 270).**

Nel campo del patrimonio architettonico, l'impiego di modelli tridimensionali ad alta risoluzione si inserisce all'interno di una più ampia trasformazione delle strategie di valorizzazione e gestione dei beni culturali. I modelli digitali permettono infatti di creare rappresentazioni navigabili degli edifici e degli insediamenti storici, utilizzabili sia per scopi scientifici sia per finalità divulgative e turistiche<sup>183</sup>. Un caso emblematico è rappresentato dal progetto di digitalizzazione del centro storico

<sup>178</sup> BRUNO *et al.* 2010, pp. 472–478; HERMON, KALISPERIS, 2011, pp. 36–41.

<sup>179</sup> BADILLO *et al.* 2024, p. 8.

<sup>180</sup> GUIDI *et al.* 2014, pp. 686–689.

<sup>181</sup> DA VILLA *et al.* 2025, pp. 1-20; CARRARO *et al.* 2019, pp. 63-273.

<sup>182</sup> REMONDINO, CAMPANA 2014, pp. 52–60.

<sup>183</sup> TUCCI *et al.* 2019, pp. 13-18.

di Firenze, in cui DMR sono stati utilizzati per la documentazione urbana e la creazione di ambienti virtuali destinati alla fruizione pubblica. Analogamente, nel borgo medievale di Civita di Bagnoregio<sup>184</sup> (fig. 76), campagne di rilievo tridimensionale hanno prodotto modelli ad alta risoluzione impiegati per la gestione del rischio, la comunicazione e la promozione turistica del sito<sup>185</sup>.

In contesti di borghi minori e centristorici a rischio abbandono, i DMR si configurano come strumenti particolarmente efficaci per la valorizzazione territoriale. Esperienze italiane come il rilievo digitale del borgo di Calcata, del centro storico di Matera o di alcune frazioni alpine oggetto di progetti di documentazione tridimensionale hanno dimostrato come la costruzione di modelli navigabili possa contribuire alla promozione culturale e turistica, oltre che alla conservazione della memoria dei luoghi. In questi casi, la visualizzazione tridimensionale consente di restituire la complessità morfologica degli insediamenti storici, spesso difficilmente leggibile attraverso forme di documentazione tradizionali.

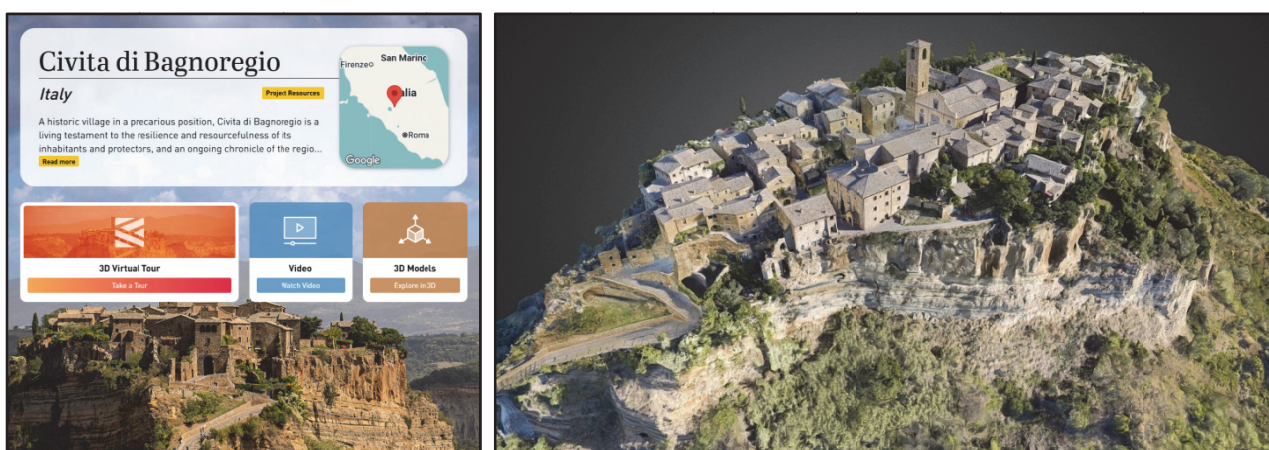


Figura 76 – Civita di Bagnoregio (VT) (da CYARK project, 2022 <https://www.cvark.org/projects/civita-di-bagnoregio/overview>).

Un aspetto particolarmente rilevante riguarda la possibilità di rendere fruibili digitalmente luoghi inaccessibili o difficilmente accessibili, sia per motive fisici, sia per ragioni conservative o di sicurezza. Molti contesti archeologici e architettonici presentano infatti percorsi irregolari, pendenze elevate, scale strette o ambienti instabili, che limitano l'accesso a determinate categorie di visitatori, tra cui persone con disabilità motorie, anziani o bambini. In questi casi, I modelli tridimensionali

<sup>184</sup> KACYRA 2009, pp. 315-320.

<sup>185</sup> FASSI et al. 2015, pp. 92-99; REMONDINO, CAMPANA 2014, p. 72-76.

consentono di costruire ambienti virtuali navigabili che permettono l'esplorazione dei siti senza barriere fisiche, ampliando le possibilità di accesso al patrimonio<sup>186</sup>.

Esperienze in ambito museale e archeologico hanno dimostrato come le tecnologie tridimensionali e immersive possano migliorare l'accessibilità culturale, permettendo a persone con disabilità motorie o sensoriali di esplorare ambienti altrimenti non raggiungibili. Modelli virtuali di siti archeologici complessi, come ambienti sotterranei, torri, rovine su pendii o edifici con percorsi non adeguati alle normative sull'accessibilità, sono stati utilizzati in applicazioni di realtà virtuale e piattaforme *web* per offrire esperienze di visita alternative e inclusive. In questo senso, il modello tridimensionale diventa non solo uno strumento di documentazione o comunicazione, ma anche un mezzo per superare barriere fisiche e sociali, favorendo una fruizione più equa e diffusa del patrimonio culturale.

L'integrazione dei modelli 3D all'interno di piattaforme *web* e ambienti geospaziali interattivi consente inoltre la creazione di percorsi virtuali, applicazioni di visita remota e strumenti di *story telling* digitale, ampliando l'accessibilità e favorendone la conoscenza da parte di un pubblico più ampio<sup>187</sup>. Esperienze internazionali, come il progetto CyArk (**fig. 77**) per la documentazione tridimensionale di siti patrimonio mondiale quali Petra, Machu Picchu o I templi di Bagan, dimostrano come i DMR possano diventare strumenti di divulgazione globale e di sensibilizzazione alla tutela del patrimonio<sup>188</sup>.

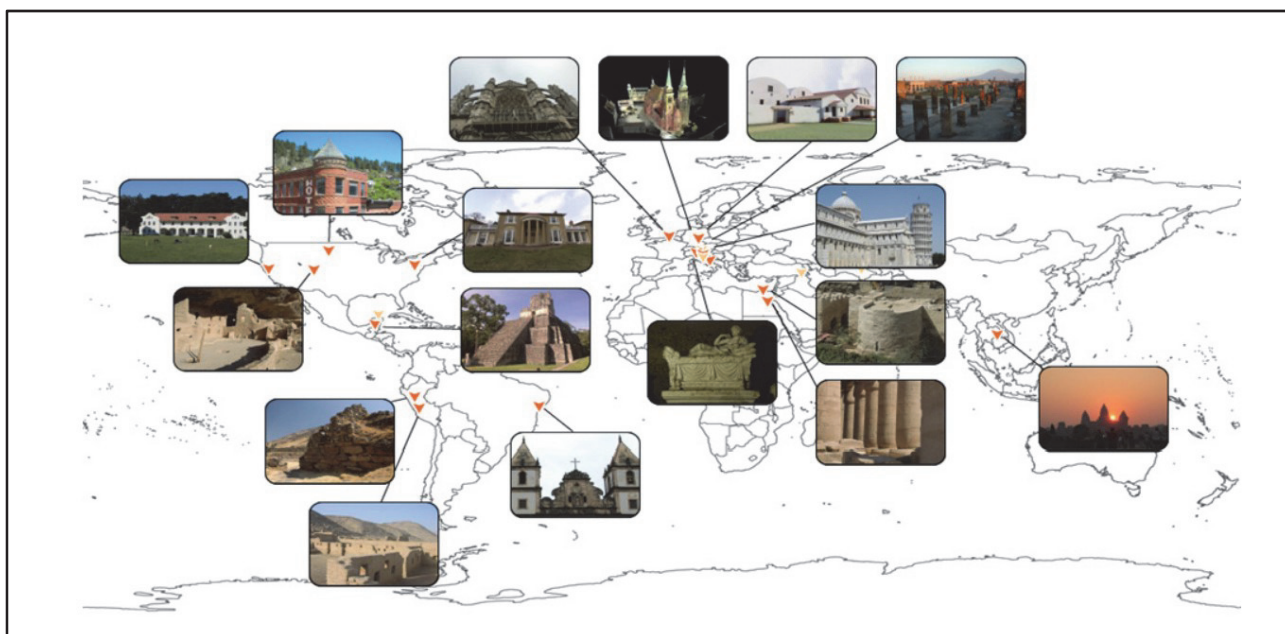


Figura 77 – Progetto CYARK (da KACYRA 2009, p. 316).

<sup>186</sup> BEKELE *et al.* 2018, pp. 3-9; ECONOMOU, MEINTANI 2011, pp. 2-6.

<sup>187</sup> YAO *et al.* 2018, pp. 150-158; VIRTANEN *et al.* 2022, pp. 2-8.

<sup>188</sup> ADDISON 2000, pp. 22-25.

Numerosi studi hanno evidenziato come le tecnologie tridimensionali possano svolgere un ruolo chiave nella valorizzazione turistica dei siti culturali, contribuendo a migliorare l'esperienza di visita e a rafforzare l'identità dei luoghi. I modelli *reality-based*, integrati in applicazioni di realtà virtuale o aumentata, consentono di visualizzare fasi storiche differenti, accedere a spazi non visitabili o comprendere l'organizzazione originaria di contesti oggi frammentari. In questo senso, il modello tridimensionale non rappresenta soltanto un prodotto tecnico, ma diventa un vero e proprio strumento di mediazione culturale, capace di tradurre dati complessi in esperienze visive e interattive comprensibili anche a un pubblico non specialistico.

Nel caso dei centristorici e dei borghi minori, spesso caratterizzati da fenomeni di spopolamento o da limitata accessibilità, I modelli 3D possono assumere un ruolo strategico nella promozione territoriale. La possibilità di esplorare virtualmente un insediamento, comprenderne la struttura urbana e accedere a contenuti informative integrati contribuisce infatti a rafforzare l'attrattiva turistica e a supportare strategie di valorizzazione sostenibile<sup>189</sup>. Le piattaforme *web* tridimensionali e I *digital twin* territoriali permettono inoltre di integrare modelli architettonici, dati storici, informazioni geografiche e contenuti multimediali all'interno di un'unica infrastruttura digitale, favorendo nuove forme di fruizione e narrazione del patrimonio<sup>190</sup>.

Negli ultimi anni, l'emergere delle tecnologie di intelligenza artificiale generativa ha aperto nuove prospettive nel campo della ricostruzione virtuale e della rappresentazione del patrimonio, rendendo possibile la generazione automatica di ambienti e scenari storici plausibili. Tali strumenti presentano indubbi vantaggi in termini di rapidità di produzione e potenzialità narrative, soprattutto nei contesti museali o didattici. Tuttavia, la diffusione di ricostruzioni sintetiche solleva questioni critiche legate all'autenticità, alla trasparenza scientifica e al rapporto tra dato documentato e interpretazione<sup>191</sup>.

Nel campo della documentazione del patrimonio architettonico e archeologico, diversi autori sottolineano l'importanza di mantenere una distinzione chiara tra modelli derivati da rilievo e ricostruzioni ipotetiche, al fine di preservare la leggibilità delle fonti materiali e la tracciabilità del processo conoscitivo. In questo senso, l'impiego DMR consente di mantenere un rapporto diretto con la materialità costruita, documentando il bene nel suo stato attuale, anche quando esso si presenta in forma di rudere o di struttura parzialmente conservata.

La scelta di non ricorrere a ricostruzioni generate artificialmente, pur nella consapevolezza delle potenzialità offerte dall'intelligenza artificiale, si inserisce dunque in una precisa posizione metodologica e culturale: non restituire un'immagine idealizzata del manufatto, ma valorizzarne la

---

<sup>189</sup> NOARDO *et al.* 2020, pp. 3-11.

<sup>190</sup> VIRTANEN *et al.* 2022, pp. 2-8.

<sup>191</sup> HERMON, KALISPERIS 2011, pp.41-45.

dimensione storica e materiale, mantenendo visibili stratificazioni, lacune e trasformazioni. Questo approccio, coerente con le teorie della conservazione e della tutela del patrimonio, privilegia la documentazione dello stato di fatto e la comunicazione del bene nella sua autenticità<sup>192</sup>.

In questo quadro, il caso di Campo ha consentito di costruire una rappresentazione digitale dell'insediamento capace di restituire con continuità la morfologia del sito, l'articolazione degli spazi urbani e la relazione tra gli edifici e il contesto paesaggistico circostante. Il modello tridimensionale permette infatti di osservare il borgo come un sistema unitario, rendendo leggibili le relazioni spaziali tra le diverse componenti dell'insediamento e offrendo una base visiva utile sia per l'analisi scientifica sia per la comunicazione del patrimonio (**figg. 78-80**).



Figura 78 – DMR del borgo e relative QR per la visualizzazione *on-line*.

Nel contesto di un centro storico caratterizzato da fenomeni di progressivo abbandono e da una fruizione limitata, la rappresentazione tridimensionale consente inoltre di restituire una visione complessiva del sito anche a distanza, rendendo più immediata la comprensione della sua struttura urbana e delle caratteristiche architettoniche degli edifici.

La navigazione del modello permette infatti di esplorare il borgo da differenti punti di vista, facilitando la lettura di spazi, percorsi e relazioni tra gli edifici che risultano spesso difficilmente percepibili attraverso rappresentazioni bidimensionali tradizionali.

L'obiettivo di questa ricerca non è tuttavia quello di esaurire il tema dell'impiego dei modelli tridimensionali nella comunicazione e nella valorizzazione del patrimonio, ambito che negli ultimi anni ha conosciuto un rapido sviluppo grazie all'integrazione con piattaforme *web*, sistemi informativi geospaziali e applicazioni immersive, ma di offrire un primo contributo e uno spunto operativo per il supporto alla conoscenza e alla rappresentazione di Campo.

---

<sup>192</sup> CHOAY 2001, pp. 147-152; SETTIS 2010, pp. 95-103.



Figura 79 – DMR Contesto 1.

In questa prospettiva, il modello tridimensionale non si configura soltanto come un prodotto di rilievo, ma come una base conoscitiva aperta, potenzialmente integrabile con informazioni storiche, archeologiche e territoriali. La sua evoluzione futura potrà infatti prevedere l'integrazione con piattaforme digitali ampliando le possibilità di fruizione, studio e comunicazione del borgo e contribuendo alla definizione di nuove strategie di valorizzazione del patrimonio storico diffuso.



Figura 80 – DMR Contesti 2 e 3 DMR.

Pur essendo stato concepito principalmente come strumento di documentazione e rilievo, il modello tridimensionale assume infatti un significato più ampio, configurandosi come una vera e propria memoria digitale del luogo. A differenza della fotografia tradizionale, che restituisce una visione puntuale e limitata dello stato dei luoghi, il modello 3D consente una rappresentazione multiprospettica e navigabile, capace di restituire l'organizzazione spaziale dell'insediamento e le relazioni tra le sue componenti architettoniche e paesaggistiche. In questo senso, esso costituisce un archivio tridimensionale interrogabile nel tempo, utilizzabile non solo per finalità di studio e documentazione, ma anche per applicazioni legate alla comunicazione culturale, alla gestione del patrimonio e allo sviluppo di strumenti digitali di valorizzazione e fruizione del territorio.

## 10. CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha avuto come obiettivo la definizione e la sperimentazione di una metodologia integrata per il rilievo, l'analisi e la gestione digitale del patrimonio storico costruito, applicata al caso studio del borgo di Campo di Brenzone. La ricerca si colloca all'interno del dibattito contemporaneo sulla digitalizzazione del patrimonio culturale, nel quale il passaggio da semplici rappresentazioni geometriche a ecosistemi informativi integrati costituisce un tema centrale<sup>193</sup>.

L'approccio adottato nasce dalla necessità di costruire un quadro conoscitivo multilivello capace di connettere differenti scale di analisi territoriale, urbana e architettonica attraverso tecniche di rilievo *reality-based* e strumenti digitali interoperabili, interpretando il modello digitale come infrastruttura dinamica di conoscenza piuttosto che come semplice *output* grafico<sup>194</sup>.

Uno dei principali risultati della ricerca consiste nella definizione di un *workflow* multiscala sviluppato secondo una logica piramidale, dal generale al particolare, che ha permesso di articolare il rilievo e la modellazione in funzione delle specifiche esigenze conoscitive.

A scala territoriale, il rilievo LiDAR da drone ha consentito la ricostruzione della morfologia del contesto e delle relazioni paesaggistiche, confermando l'efficacia di questa tecnologia nella lettura di aree caratterizzate da vegetazione e morfologie complesse<sup>195</sup>. L'elevata densità degli impulsi emessi e la possibilità di selezionare differenti ritorni hanno permesso di ottenere modelli del terreno utili alla comprensione geomorfologica e insediativa.

A scala urbana, la fotogrammetria da UAV ha consentito la generazione di modelli *mesh* ad alta risoluzione, caratterizzati da elevata accuratezza geometrica e qualità fotorealistica, come strumento di supporto per attività di pianificazione preliminari<sup>196</sup>.

A scala architettonica, l'integrazione tra *laser scanner* terrestre e fotogrammetria di prossimità ha permesso di ottenere un livello di accuratezza adeguato alla lettura stratigrafica e materica, evidenziando il valore delle metodologie integrate Scan-to-BIM per la documentazione del costruito storico<sup>197</sup>.

Il risultato complessivo consiste nella creazione di un sistema digitale coerente, in cui i modelli tridimensionali rappresentano strutture informative predisposte per successive fasi di analisi, modellazione HBIM e integrazione geospaziale, quest'ultima come sviluppo futuro, considerata la rapida evoluzione degli strumenti digitali.

---

<sup>193</sup> MURPHY, MCGOVERN e PAVIA 2013, pp. 314-320; BANFI 2020, pp. 21-40; LÓPEZ *et al.* 2018, pp. 203-210.

<sup>194</sup> BRUNO *et al.* 2018, pp. 45-52; DORE, MURPHY 2017, pp. 28-34.

<sup>195</sup> NEX, REMONDINO 2014, pp. 65-72

<sup>196</sup> REMONDINO *et al.* 2017, pp. 1106-1112.

<sup>197</sup> FASSI *et al.* 2015, pp. 92-99.

Il lavoro conferma come l'approccio multi-sensore e multi-scala costituisca una strategia efficace per affrontare la complessità dei contesti storici minori, spesso caratterizzati da elevata stratificazione e condizioni di accessibilità limitata. La combinazione ragionata tra LiDAR, fotogrammetria e *laser scanner* consente infatti di superare i limiti delle singole tecnologie, integrando dati geometrici, cromatici e metrici in un unico sistema informativo<sup>198</sup>.

Un elemento centrale emerso dal lavoro riguarda il ruolo del modello 3D *reality-based* come premessa alla semantizzazione degli oggetti, secondo un processo in cui il modello non viene inteso come semplice restituzione geometrica, ma come contenitore informativo capace di integrare dati storici, tecnici e analitici<sup>199</sup>.

La ricerca conferma inoltre come la definizione di livelli di dettaglio differenti, connessi a specifiche finalità analitiche, rappresenti un elemento chiave per garantire scalabilità e sostenibilità dei processi digitali.

Nel quadro metodologico sviluppato, gli oggetti digitali derivati dalla segmentazione del modello *reality-based* vengono concepiti e organizzati secondo una logica IFC, che consente di strutturare il costruito in entità gerarchiche dotate di geometria, identità e proprietà semantiche minime, garantendo interoperabilità e coerenza informativa all'interno di *workflow* HBIM basati su standard aperti<sup>200</sup>. Tuttavia, la componente propriamente stratigrafica, intesa come sistema interpretativo fondato su relazioni temporali e processi evolutivi del costruito, non viene incorporata direttamente all'interno dell'architettura BIM, ma viene gestita tramite tabelle esterne dedicate, prevedendo la separazione tra modello geometrico e strutture informative interpretative<sup>201</sup>.

Ne deriva la definizione di due sistemi paralleli, ma interconnessi: da un lato il modello IFC, che definisce il "dove", ossia la dimensione spaziale, geometrica e organizzativa degli oggetti digitali; dall'altro il *database* stratigrafico, che descrive il "quando" e la componente archeologica, includendo relazioni stratigrafiche, sequenze temporali e livelli di affidabilità interpretativa. Tale separazione consente di preservare la natura dinamica e incrementale della conoscenza archeologica, evitando la cristallizzazione delle ipotesi interpretative all'interno del modello BIM e mantenendo la possibilità di aggiornare in modo indipendente la componente analitica<sup>202</sup>. Il collegamento tra i due livelli avviene attraverso identificativi univoci condivisi, che permettono la navigazione bidirezionale tra spazio tridimensionale e sequenze cronologiche, configurando un sistema informativo duale nel quale il modello BIM agisce come infrastruttura spaziale comune, mentre il database esterno rappresenta il livello interpretativo evolutivo del dato archeologico.

---

<sup>198</sup> REMONDINO *et al.* 2017, pp. 221-230.

<sup>199</sup> MURPHY *et al.* 2013, pp. 314-320; DORE, MURPHY 2017, pp. 28-34.

<sup>200</sup> SBROGIO' 2024, pp. 35-36.

<sup>201</sup> LOMBARDI, RIZZI 2024, pp. 1-9; SANSEVERINO, GIOVANNINI 2026, pp. 423-430.

<sup>202</sup> WANG *et al.* 2025, pp. 365 - 372.

Un contributo significativo del lavoro, tuttavia in fase di continua evoluzione per la rapidità di sviluppo di tali strumenti digitali, riguarda l'integrazione dei modelli tridimensionali all'interno di piattaforme geospaziali *web-based*, concepite come ambienti di aggregazione e visualizzazione di dati eterogenei. Tali sistemi permettono infatti di superare la frammentazione tra GIS e BIM, favorendo la convergenza tra analisi territoriale e rappresentazione architettonica<sup>203</sup>.

L'impiego di piattaforme geospaziali 3D consente di collegare modelli *reality-based*, dati informativi e *layer* territoriali in un unico ambiente interoperabile, supportando processi decisionali e attività di gestione del patrimonio su base integrata, favorendo approcci olistici alla conoscenza del territorio<sup>204</sup>.

L'aggregazione dei dati tridimensionali in ambiente geospaziale rappresenta dunque non solo un'evoluzione tecnologica, ma anche un cambiamento concettuale nel modo di interpretare la documentazione del patrimonio.

Il lavoro ha evidenziato alcune criticità ricorrenti nei processi di digitalizzazione avanzata del patrimonio. La gestione di modelli ad alta densità comporta problematiche legate alla pesantezza dei *dataset* e alla necessità di semplificazione per la visualizzazione *web*, aspetto ampiamente discusso nella letteratura sullo Scan-to-BIM<sup>205</sup>.

Ulteriori limiti riguardano la conversione delle *mesh reality-based* in modelli semanticamente strutturati e l'interoperabilità tra ambienti BIM e GIS, ancora oggi oggetto di ricerca e sviluppo<sup>206</sup>.

La segmentazione e classificazione manuale dei modelli risulta inoltre un processo oneroso in termini di tempo, evidenziando la necessità di sviluppare procedure semi-automatiche e sistemi di annotazione avanzata.

Uno degli aspetti centrali della ricerca riguarda l'utilizzo dei modelli 3D *reality-based* come strumenti di valorizzazione e comunicazione del patrimonio. Le più recenti ricerche evidenziano come la visualizzazione tridimensionale e le piattaforme *web* immersive siano in grado di migliorare la comprensione dei beni culturali e ampliare l'accessibilità dei contenuti.

Nel caso di Campo di Brenzone, la scelta metodologica è stata orientata alla conservazione del dato reale, evitando ricostruzioni interpretative o generative, al fine di mantenere il legame con la materialità del rudere e con la sua complessità storica. Il modello tridimensionale diventa così uno strumento di mediazione culturale e di comunicazione scientifica, capace di supportare sia attività di ricerca sia processi di *public engagement* e valorizzazione territoriale.

Le prospettive future della ricerca riguardano principalmente lo sviluppo di un'architettura informativa aggiornabile nel tempo, integrabile con dati diagnostici, stratigrafici e monitoraggi

---

<sup>203</sup> NOARDO *et al.*, 2020, pp. 3-11.

<sup>204</sup> BAIK 2025, pp. 22-39.

<sup>205</sup> FASSI *et al.* 2015, pp. 92-99; LÓPEZ *et al.* 2018, pp. 203-210.

<sup>206</sup> NOARDO *et al.* 2020, pp. 3-11.

futuri. In linea con le tendenze più recenti, risulta particolarmente rilevante l'adozione di modelli di gestione dei dati secondo principi FAIR (*Findable, Accessible, Interoperable, Reusable*), finalizzati a garantire interoperabilità e riuso nel lungo periodo<sup>207</sup>.

Ulteriori sviluppi riguardano l'impiego di tecniche di automazione e intelligenza artificiale per supportare segmentazione e classificazione dei modelli, pur mantenendo un approccio critico orientato alla validazione scientifica dei risultati<sup>208</sup>.

In conclusione, il lavoro dimostra come l'integrazione tra rilievo *reality-based*, modellazione HBIM e piattaforme geospaziali tridimensionali possa costituire una strategia efficace per la conoscenza e la gestione del patrimonio storico diffuso. Il modello 3D assume il ruolo di infrastruttura informativa capace di aggregare dati multidisciplinari, supportare processi decisionali e favorire nuove forme di valorizzazione e fruizione.

Il caso di Campo di Brenzone evidenzia il potenziale di un approccio integrato e replicabile, nel quale la digitalizzazione diventa uno strumento di costruzione della conoscenza e di mediazione tra ricerca scientifica, gestione del patrimonio e comunicazione culturale.

---

<sup>207</sup> BARZAGHI *et al.* 2024, pp. 25-36.; WILKINSON *et al.* 2016, pp. 1-9.

<sup>208</sup> KARAMATSKOS *et al.* 2026, pp. 12 - 28.

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 – Distribuzione dei comuni a disagio insediativo 1996 – 2016 (da SACCHETTI 2022, p. 10) .....	4
Figura 2 – Campo di Brenzone (VR) – Panoramiche delle condizioni di accessibilità (foto dell'autore, 2025).....	5
Figura 3 – Apparati radicali infestanti con conseguente perdita della leggibilità degli edifici (foto dell'autore, 2025).....	6
Figura 4 – Aggregato edilizio privo di coperture con conseguente attivazione di fenomeni di degrado delle murature (foto dell'autore 2025).....	7
Figura 5 – Piattaforma <i>web</i> per la gestione ed aggregazione dati (Esri ArcGis pro).....	8
Figura 6 – <i>Workflow</i> e piattaforma di gestione dati (PAC - Progetto Archivio di Comunità).....	9
Figura 7 – Rilievo <i>reality-based</i> , modellazione Scan-to-BIM ed anastilosi (elaborazione dell'autore).....	10
Figura 8 – Modello BIM federato e rappresentazione supiatta forma <i>SketchUp</i> (da PEPE <i>et al.</i> 2024, p. 6973).....	11
Figura 9 – “Grande Progetto Pompei” (UNIFE – DIAPReM, 2024).....	13
Figura 10 - sito UNESCO di Al Ula (Arabia Saudita) (da ALSHAWABKEH, BAIK 2023. pp. 5-17).....	14
Figura 11 - Angkor Wat - Cambogia (da EVANS <i>et al.</i> 2013, p. 12596).....	15
Figura 12 – Al Deir <i>Monument</i> – PETRA (da ALSHAWABKEH <i>et al.</i> 2023, p. 21).....	16
Figura 13 – Hypogeo di Calafano – Ragusa (Sicilia) (da D'AGOSTINO <i>et al.</i> 2022, p. 172).....	17
Figura 14 – Campo di Brenzone (VR) – Modello 3D <i>reality-based</i> (elaborazione CANELLA, SARTINI 2026).....	18
Figura 15 – Metropolitana di Napoli – Linea 6 – Approccio di rilievo integrato (da FASI 2021, p. 93).....	19
Figura 16 – Modelli HBIM da modelli 3D <i>reality-based</i> : San Giovanni dei Lebbresi e San Giovanni degli Eremiti (PA) (da ARICO' 2025, pp. 152-153).....	19
Figura 17 – <i>Workflow</i> Scan-to-BIM (da GIULIANI <i>et al.</i> 2024, p. 5).....	20
Figura 18 – Modello parametrico e nuvola di punti da TLS (da FAI <i>et al.</i> 2011, p. 127).....	21
Figura 19 – Processo Scan-to-BIM (da ATTENNI 2019 p. 2082).....	22
Figura 20 – Scan-to-BIM – Processo di addestramento algoritmo di segmentazione automatica/semiautomatica (da CECCARELLI 2024).....	23
Figura 21 – Modello BIM ed arricchimento informativo in ambiente GIS separato (da TSILIMANTOU <i>et al.</i> 2020, pp. 17-18).....	25

Figura 22 – Progetto CHIMERA – <i>Umm Al Dabdib</i> (Egitto), integrazione BIM-GIS (da RECHICI 2022, p. 498). .....	25
Figura 23 – Pompei – Scan-to-BIM per la documentazione e la valutazione degli interventi manutentivi (da INTIGNANO <i>et al.</i> 2021, p. 3043).....	26
Figura 24 – Rappresentazione grafica della frammentazione informative di un sistema di gestione tradizionale (elaborazione dell'autore). .....	27
Figura 25 – ArcGis GeoBim – Piattaforma <i>web</i> ( <a href="https://www.esri.com/it-it/arcgis/products/arcgis-geobim/overview">https://www.esri.com/it-it/arcgis/products/arcgis-geobim/overview</a> ). .....	28
Figura 26 – QGis visualizzatore 3D.....	29
Figura 27 – Cesium – Piattaforma <i>web</i> ( <a href="https://cesium.com/platform/">https://cesium.com/platform/</a> ).....	30
Figura 28 – Schema di riduzione della complessità (da BILJECKI <i>et al.</i> 2015, p. 8).....	32
Figura 29 – Elementi di edifici storici e relative classi IFC (da SBROGIO' 2024, pp. 94-97).....	33
Figura 30 – Progetto ARK – BIM con DB esterno ad oggetto (da DIARIA, RINAUDO <i>et al.</i> 2022, pp. 13-14).....	34
Figura 31 – Progetto ARMEP - Gis con analisi di elementi 2D (da VALENTE, BOARETTO 2011, p. 203). .....	35
Figura 32 – Strumenti per la pianificazione (elaborazione dell'autore). .....	38
Figura 33 – Ricevitore GNSS Geomax Z55. ....	39
Figura 34 – Stazione topografica Tocon IS. ....	40
Figura 35 – Sistema UA con sensore LiDAR <i>Zenmuse</i> L1. ....	40
Figura 36 - Sistema UA con sensore LiDAR <i>Zenmuse</i> P1. ....	41
Figura 37 – Sistemi UA DJI Mavic Cine pro e 4 pro. ....	41
Figura38 – <i>Laser scanner</i> terrestre Trimble X9.....	42
Figura 39 – Procedura di finalizzazione delle scansioni TLS.....	43
Figura 40 – Modello 3D ottenuto mediante integrazione si scansioni TLS e fotogrammetria da piattaforma UA (elaborazione SARTINI 2024).....	44
Figura 41 – Processo di segmentazione degli aggragati edilizi in singoli CF in ambiente Blender (elaborazione dell'autore). .....	45
Figura 42 - Lettura della stratigrafia muraria direttamente sulmodello 3D in ambiente Blender (elaborazione dell'autore). .....	46
Figura 43 – Funzione di <i>filtering by point</i> con estrazione delle immagini a risoluzione originale utilizzate nel processo SfM.....	47
Figura 44 – Segmentazione delle finestre tramite strumento <i>Knife tool</i> in ambiente Blender. ....	48
Figura 45 – Campo di Brenzone (VR) – Panoramica (da Garda-outdoors.com).....	53
Figura 46 – Campo di Brenzone – Ubicazione (Estratto LANDSAT/COPERNICUS 2021). ....	54

Figura 47 – Campo di Brenzone – Ubicazione su rilievo LiDAR (da <a href="https://tinality.pi.ingv.it/">https://tinality.pi.ingv.it/</a> - Risoluzione 10 m Pix) e DTM (da rilievo mediante piattaforma UA – Risoluzione campionata a 0,5 m Pix).....	57
Figura 48 – Ubicazione nucleo originario su ortomosaico realizzato da piattaforma UA e da DALLA BONA 2022.....	57
Figura 49 – Fasi di abbandono (da DALLA BONA 2022, p. 96, fig. 26).....	59
Figura 50 – QGis - Interfaccia grafica per la pianificazione del rilievo topografico ed ipotesi di ubicazione CS topografici.....	61
Figura 51 – Interfaccia di navigazione con indicazione rotta, parametri di volo e scansione LiDAR in <i>progress</i> . ....	62
Figura 52 – Modalità di volo <i>terrain follow</i> . ....	63
Figura 53 – <i>Fusion Geomax</i> : interfaccia elaborazione rilievo topografico. ....	65
Figura 54 – Classificazione della nuvola di punti da rilievo LiDAR per creazione DTM e modello 3D del terrenoclassificato in base all’altimetria.....	65
Figura 55 – Interfaccia di elaborazione SfM per la generazione di modelli 3D (Agisoft <i>Metashape</i> ). .....	66
Figura 56 – Ubicazione contesti d’interesse. ....	67
Figura 57 – Contesto 3: modello fotogrammetrico, scansione TLS e fusione.....	68
Figura 58 – Architettura del <i>database</i> IFC e flusso delle informazioni.....	70
Figura 59 – Analisi stratigrafica eseguita direttamente sul modello in ambiente Blender ed evidenziazione degli elementi utilizzati come esempio di segmentazione di dettaglio.....	75
Figura 60 - Modello a scala urbana con segmentazione in ambiente Blender dei contesti d’interesse. .....	76
Figura 61 – Modello architettonico contesto 3 con assegnazione IFC. In evidenza le unità segmentate e semantizzate. ....	77
Figura 62 – Blender – <i>console</i> Phyton per la compilazione del DB (da MIELE, SBROGIO’ 2026). .....	78
Figura 63 – Interfaccia Blender e grafo stratigrafico (da MIELE, SBROGIO’ 2026). ....	78
Figura 64 – Piattaforma web su base Cesium (da LIU et al. 2005, p. 170).....	81
Figura 65 – Piattaforma <i>web</i> su base Cesium (da CHOW 2006).....	82
Figura 66 – Interfaccia di accesso e <i>Home Page</i> piattaforma Archivio di Comunità.....	83
Figura 67 – Schematizzazione del passaggio dalla <i>mesh</i> al formato 3D Tiles (da LIU et al. 2025, p. 167). ....	83
Figura 68 – Interfaccia web con inserimento del DMR a scala urbana. ....	84
Figura 69 – Piattaforma web con visualizzazione dei modelli a diverse scale. ....	85

Figura 70 – Piattaforma con visualizzazione dati <i>raster</i> (ortomosaico ricavato da rilievo UA). .....	86
Figura 71 – Integrazione di modelli a diverse scale (da ESRI ArcGis Geobim). .....	86
Figura 72 – Piattaforma con evidenza del DB associato al modello a scala architettonica. ....	87
Figura 73 – Piattaforma in modalità interrogazione. ....	88
Figura 74 – Impiego di tecniche di restituzione digitale a Pompei (da BADILLO et al. 2024, p. 8). .....	89
Figura 75 – Nora (CA) – Modello 3D da fotogrammetria da drone (da CARRARO <i>et al.</i> 2019, p. 270). ....	90
Figura 76 – Civita di Bagnoregio (VT) (da CYARK <i>project</i> , 2022 <a href="https://www.cyark.org/projects/civita-di-bagnoregio/overview">https://www.cyark.org/projects/civita-di-bagnoregio/overview</a> ). ....	91
Figura 77 – Progetto CYARK (da KACYRA 2009, p. 316). ....	92
Figura 78 – DMR del borgo e relative QR per la visualizzazione <i>on-line</i> . ....	94
Figura 79 – DMR Contesto 1. ....	95
Figura 80 – DMR Contesti 2 e 3 DMR. ....	95

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 – Rappresentazione <i>workflow</i> . .....	3
Tabella 2 – Attributi degli oggetti IFC impiegati nel modello (da MIELE, SBROGIO' 2026).....	49
Tabella 3 - Attributi degli oggetti IFC impiegati nel modello (da MIELE, SBROGIO' 2026).....	50
Tabella 4 – Proprietà degli oggetti IFC impiegati nel modello (da MIELE, SBROGIO' 2026).....	50
Tabella 5 – Parametri di volo e scansione LiDAR.....	63
Tabella 6 - Parametri di volo RGB. ....	64
Tabella 7 – Modello a scala territoriale .....	72
Tabella 8 – Modello a scala urbana. ....	73
Tabella 9 - Modello a scala architettonica – Contesto 1.....	74
Tabella 10 - Modello a scala architettonica – Contesto 2.....	74
Tabella 11 - Modello a scala architettonica – Contesto 3.....	74

## BIBLIOGRAFIA

- ACIERNO M., CURSI S., SIMEONE D., FIORANI D. 2017, *Architectural heritage knowledge modelling: An ontology-based framework for conservation process*, in «Journal of Cultural Heritage», XXIV, pp. 124–133.
- ADDISON A. 2000, *Emerging trends in virtual heritage*, in «IEEE Multimedia», 7(2), pp. 22–25.
- ALSHAWABKEH Y., BAIK A. 2023, *Integration of photogrammetry and laser scanning for enhancing scan-to-HBIM modeling of Al Ula heritage site*, in «Heritage Science», 11, 167.
- ANTONOPOULOU S., BRYAN P. 2017, *BIM for Heritage: Developing a Historic Building Information Model*, Swindon.
- ANTROP M. 2005, *Why landscapes of the past are important for the future*, in «Landscape and Urban Planning», 70(1–2), pp. 21–34.
- APOLLONIO F. I., GAIANI M., SUN Z. 2016, *A reality integrated BIM for architectural heritage conservation*, in F. I. APOLLONIO (ed.), *Handbook of Research on Emerging Digital Tools for Architectural Surveying, Modeling, and Representation*, IGI Global, Hershey, pp. 412–430.
- APOLLONIO F. I., GAIANI M., SUN Z. 2021, *BIM-based modeling and management of cultural heritage*, in «Applied Sciences», 11(9), 4129.
- ARGENZIANO P. 2015, *Integrated digital survey of the Pompeii Amphitheater*, Università degli Studi di Salerno.
- BADILLO A. E. et al. 2024, *A paperless and 3D workflow for documenting excavations at Insula I.14, Pompeii, Italy*, in «Advances in Archaeological Practice», 12(2), pp. 159–175.
- BAIK A. 2025, *Three decades of innovation: BIM, HBIM, digital twins and IoT*, in «Buildings», 15(10), 1587.
- BANDARIN F., VAN OERS R. 2012, *The Historic Urban Landscape: Managing Heritage in an Urban Century*, Wiley-Blackwell, Oxford.
- BANFI F. 2017, *BIM orientation: grades of generation and information for different type of analysis and management process*, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLII-2/W5, pp. 57–64.
- BANFI F. 2017, *HBIM generation from point clouds for historical building information modelling*, in «ISPRS Archives», XLII-2/W5, pp. 91–98.
- BANFI F. 2020, *HBIM generation: extending geometric modeling to parametric modeling of historical buildings*, in «Journal of Cultural Heritage», 45, pp. 23–31.
- BANFI F. 2020, *HBIM, 3D drawing and virtual reality for archaeological sites and ancient ruins*, in «Virtual Archaeology Review», XI, pp. 16–33.

- BANFI F. *et al.* 2022, *Building archaeology informative modelling turned into 3D volume stratigraphy and extended reality time-lapse communication*, in «Virtual Archaeology Review», 13(26), pp. 1–21.
- BANFI F., BRUMANA R. 2023, *Digital twins for cultural heritage: From reality-based modeling to predictive conservation*, in «ISPRS Annals», XLVIII, pp. 102–115.
- BARZAGHI S. *et al.* 2024, *A proposal for a FAIR management of 3D data in cultural heritage*, in «Data Intelligence», 6(4), pp. 1191–1221.
- BEKELE M. K. *et al.* 2018, *A survey of augmented, virtual, and mixed reality for cultural heritage*, in «Journal on Computing and Cultural Heritage», 11(2), pp. 1–36.
- BENEVOLO L. 1993, *La città nella storia d'Europa*, Laterza, Roma-Bari.
- BESL P. J., MCKAY N. D. 1992, *A method for registration of 3-D shapes*, in «IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence», 14(2), pp. 239–256.
- BIANCHI G. *et al.* 2016, *Integrated survey for architectural restoration: a methodological comparison of two case studies*, in «ISPRS Archives», XLI-B5, pp. 175–182.
- BILJECKI F. *et al.* 2015, *Applications of 3D city models: state of the art review*, in «ISPRS International Journal of Geo-Information», 4(4), pp. 2842–2889.
- BILJECKI F. *et al.* 2021, *Extending CityGML for IFC-sourced 3D city models*, in «ISPRS International Journal of Geo-Information», 10(4).
- BILJECKI F., LEDOUX H., STOTER J. 2015, *An improved LOD specification for 3D building models*, in «Computers, Environment and Urban Systems», 59, pp. 25–37.
- BOJE C. *et al.* 2020, *Towards a semantic construction digital twin*, in «Automation in Construction», 114, 103179.
- BRAGGIO R., CASTIGLIONI G., LEGNAGHI F., DE ADAMICH M., MANZONI E., PALO C., RAFFAELI M., GRIMOLDI A., JURINA L., SANDRINIA 2004, *Studio per il recupero e la valorizzazione dell'ambiente naturale con finalità abitative e turistiche – Campo di Brenzone*, in G. FORTI (a cura di), *Recupero di borghi rurali del Monte Baldo. Metodologie di intervento*, G.A.L. Baldo Lessinia, Comunità Montana del Baldo, CIP, Arbizzano di Negrar (VR).
- BRANDI C. 1963, *Teoria del restauro*, Einaudi, Torino.
- BROGIOLO G. P., ZONCA A., ZIGRINO L. 1988, *Archeologia dell'edilizia storica. Documenti e metodi*, Como.
- BRUGNANA R., ORENI D., BARAZZETTI L., CUCA B., PREVITALI M., BANFI F. 2020, *Survey and Scan to BIM Model for the Knowledge of Built Heritage and Management of Conservation Activities*, in B. DANIOTTI, M. GIANINETTO, S. DELLA TORRE (eds.), *Digital Transformation of the Design, Construction and Management Processes of the Built Environment*, Cham, pp. 391–400.
- BRUMANA R. *et al.* 2018, *HBIM challenge among the paradigm of complexity*, in «ISPRS Annals», IV-2, pp. 97–104.
- BRUMANA R., DELLA TORRE S., ORENI D., PREVITALI M. 2022, *Digital twin and HBIM for the built heritage: Toward interoperable models*, in «Applied Geomatics», XIV, pp. 241–259.

- BRUMANA R., DELLA TORRE S., ORENI D., PREVITALI M., CANTINI L., BARAZZETTI L. 2018, *Generative HBIM modelling for complex structures*, in «Applied Geomatics», X, pp. 545–567.
- BRUNO F. *et al.* 2010, *From 3D reconstruction to virtual reality: a complete methodology for digital archaeological exhibition*, in «Journal of Cultural Heritage», 11(1), pp. 42–49.
- BRUNO N., RONCELLA R. 2019, *HBIM for conservation: a new proposal for information modelling*, in «Applied Geomatics», 11, pp. 165–180.
- BRUNO S., DE FINO M., FATIGUSO F. 2018, *Historic Building Information Modelling: performance assessment for diagnosis-aided information modelling and management*, in «Automation in Construction», LXXXVI, pp. 256–276.
- BRUNO S., MUSICCO A., FATIGUSO F., DELL’OSSO G. R. 2021, *The role of digital twin for cultural heritage management*, in «Journal of Cultural Heritage», pp. 10–18.
- BRUSAPORCI S., TRIZIO I., RUGGERI G., MAIEZZA P., TATA A., GIANNANGELI A. 2018, *AHBIM per l’analisi stratigrafica dell’architettura storica*, in «Restauro Archeologico», XXVI, pp. 112–131.
- BUILDINGSMART INTERNATIONAL 2021, *Industry Foundation Classes (IFC) Standard Documentation*, building SMART International.
- CANIGGIA G., MAFFEI G. L. 2001, *Interpretazione dell’edilizia di base*, Marsilio, Venezia.
- CARRARO F. *et al.* 2019, *New perspectives on the sanctuary of Aesculapius in Nora*, in «Open Archaeology», 5, pp. 263–273.
- CHENG L. *et al.* 2018, *Registration of laser scanning point clouds: a review*, in «Sensors», 18(5), 1641.
- CHIABRANDO F. *et al.* 2017, *UAV systems for photogrammetric surveys in archaeological areas*, in «Journal of Cultural Heritage», 26, pp. 1–14.
- CHOAY F. 2001, *L’allegoria del patrimonio*, Officina Edizioni, Roma.
- CHOW S. 2026, *Blenheim Palace performing smart conservation with Cesium*, Cesium Blog.
- CIGNETTI M., GODONE D., FERRARI TRECATE D., BALDO M. 2025, *New Paradigms for Geomorphological Mapping: A Multi-Source Approach for Landscape Characterization*, in «Remote Sensing», XVII, p. 581.
- COLOMINA I., MOLINA P. 2014, *Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review*, in «ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing», 92, pp. 79–97.
- CORNARO C., BOVESECCHI G., CALCERANO F., MARTINELLI L., GIGLIARELLI E. 2023, *An HBIM Integrated Approach Using Non-Destructive Techniques (NDT) to Support Energy and Environmental Improvement of Built Heritage: The Case Study of Palazzo Maffei Borghese in Rome*, in «Sustainability», XV, pp. 1–36.
- COSTANTINO D., PEPE M., RESTUCCIA A. G. 2023, *Scan-to-HBIM for conservation and preservation of Cultural Heritage building: the case study of San Nicola in Montedoro church (Italy)*, in «Applied Geomatics», XV, pp. 607–621.

- DALLA BONA A. 2022, *Dai ruderi nuova vita. Il castello medievale del borgo abbandonato di Campo Brenzone sul Garda. Progetto di restauro e progetto di fruizione e valorizzazione*, tesi di laurea, Università degli Studi di Trento.
- DE LUCA L., BUSAYARAT C., STEFANI C., VÉRON P., FLORENZANO M. 2011, *A semantic-based platform for the digital analysis of architectural heritage*, in «Computers & Graphics», XXXV, pp. 227–241.
- DELL'UNTO N., LEANDER A. M., DELLEPIANE M., CALLIERI M., FERDANI D., LINDGREN S. 2013, *Digital reconstruction and visualization in archaeology: Case-study drawn from the work of the Swedish Pompeii Project*, in *Proceedings of the Digital Heritage International Congress* (Marseille), pp. 621–628.
- DENG Y., CHENG J. C. P., ANUMBA C. 2021, *Mapping between BIM and GIS*, in «Automation in Construction», 125, 103609.
- DENG Z., HIJAZI I., KOLBE T. H. 2025, *CityGML 3.0 as a hub: integrating BIM, GIS and point cloud data*, in «ISPRS Annals».
- DORE C., MURPHY M. 2012, *Integration of HBIM and 3D GIS for recording and managing cultural heritagesites*, in «VSMM Proceedings».
- DORE C., MURPHY M. 2017, *Current state of the art historic building information modelling*, in «ISPRS Archives», XLII-2/W5, pp. 185–192.
- ELTNER A., SOFIA G. 2020, *Structure from motion photogrammetric technique*, in P. TAROLLI, S. MUDD (eds.), *Remote Sensing of Geomorphology*, pp. 1–24.
- FAI S., GRAHAM K., DUCKWORTH T., WOOD N., ATTAR R. 2011, *Building Information Modeling and Heritage Documentation*, in *Proceedings of the XXIII CIPA International Symposium* (Prague, 12–16 September).
- FASSI F., CAMPI M. 2021, *Digital twins for built heritage conservation: state of the art and future perspectives*, in «Journal of Cultural Heritage», XLIX, pp. 198–210.
- FREGONESE L., TAFFURELLI L., ADAMI A., ACHILLE C. 2017, *Surveying and monitoring for vulnerability assessment of historical buildings*, in «ISPRS Archives», XLII-2/W5, pp. 241–248.
- GRÖGER G., PLÜMER L. 2012, *CityGML – interoperable semantic 3D city models*, in «ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing», 71, pp. 12–33.
- HAGBERG A. A., SCHULT D. A., SWART J. P. 2008, *Exploring network structure, dynamics, and function using NetworkX*, in G. VAROQUAUX, T. VAUGHT, J. MILLMAN (eds.), *Proceedings of the VII Python in Science Conference (SciPy2008)*, Pasadena (CA), pp. 11–15.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION 2024, *16739—Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries. Part 1: Data schema*.
- JOUAN P., HALLOT P. 2018, *Digital twin: a HBIM-based methodology to support preventive conservation of historic assets through heritage significance awareness*, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLII-2/W15, pp. 609–615.

- KLAPA P., GAWRONEK P. 2023, *Synergy of Geospatial Data from TLS and UAV for Heritage Building Information Modeling (HBIM)*, in «Remote Sensing», XV, p. 128.
- KOLBE T. H. 2009, *Representing and exchanging 3D city models with CityGML*, in *3D Geo-Information Sciences*, Springer, Berlin, pp. 15–31.
- KRIJNEN T. 2024, *IfcOpenShell*, disponibile su: <https://github.com/IfcOpenShell/IfcOpenShell>.
- LAM P. D., NGUYEN T. T., NGUYEN H. T. 2024, *Digital twin smart city: integrating IFC and CityGML with semantic graph*, in «Sensors», 24(12), 3761.
- LEVA A. 1998, *Analisi stratigrafiche del nucleo antico di Campo di Brenzone*, in E. CAVADA, G. GENTILINI (a cura di), *Atti del Seminario Archeologia dei Centri Storici: analisi, conoscenza e conservazione* (Trento, 14–21 novembre 1998), Trento, pp. 15–19.
- LIMONGIELLO M., MUSMECI D., RADAELLI L., CHIUMIENTO A., DI FILIPPO A., LIMONGIELLO I. 2025, *Parametric GIS and HBIM for Archaeological Site Management and Historic Reconstruction Through 3D Survey Integration*, in «Remote Sensing», XVII, pp. 1–20.
- LIU H., ZHANG Y., LI J. 2025, *Design of an architectural heritage visualization system based on Cesium*, in «ISPRS Archives», XLVIII-4/W14, pp. 165–171.
- LOGOTHETIS S., DELINASIOU A., STYLIANIDIS E. 2015, *Building Information Modelling for Cultural Heritage: A review*, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», II-5/W3, pp. 177–183.
- MARTENS J., BLANKENBACH J. 2023, *VOX2BIM. A fast and robust approach for automated indoor point cloud segmentation and building model generation*, in «Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science», XCI, pp. 273–294.
- MIELE C., SBROGIÒ L. 2026, *Modelli digitali reality-based multiscalarari per l'analisi della stratigrafia muraria a scala urbanain ambiente HBIM. Il caso di Campo di Brenzone (Verona)*, in «Archeologia dell'architettura», *in press*.
- MISHRA M., ZHANG K., MEA C., BARAZZETTI L., FASSI F., FIORILLO F., PREVITALI M. 2024, *Deep learning-based AI-assisted visual inspection systems for historic buildings and their comparative performance with ChatGPT-4O*, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLVIII-2/W8, pp. 327–334.
- MUKHAMEDIEV M., SYMAGULOV A., KUCHIN Y., YAKUNIN K., YELIS M. 2021, *From classical machine learning to deep neural networks: a simplified scientometric review*, in «Applied Science», XI, pp. 1–26.
- MURPHY M., MCGOVERN E., PAVIA S. 2009, *Historic building information modelling (HBIM)*, in «Structural Survey», 27(4), pp. 311–327.
- MURPHY M., MCGOVERN E., PAVIA S. 2011, *Historic building information modelling – adding intelligence to laser and image based surveys*, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XXXVIII-5/W16, pp. 1–7.
- MURPHY M., MCGOVERN E., PAVIA S. 2013, *Historic building information modelling – adding intelligence to laser and image-based surveys*, in «ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing», 76, pp. 89–102.
- NOARDO F. et al. 2020, *Opportunities and challenges for GeoBIM*, in «ISPRS International Journal of Geo-Information», 9(8), 503.

OPEN GEOSPATIAL CONSORTIUM 2021, *OGC CityGML 3.0 Conceptual Model Standard*.

PEPE M. et al. 2024, *Toward combination of GIS-HBIM models for multi scale representation and management of historic centres*, in «Heritage», 7, pp. 6966–6980.

PERBELLINI L. 2002, *Applicazione delle procedure per l'analisi della vulnerabilità sismica ad un centro storico nella zona del Monte Baldo: Campo di Brenzone (VR)*, tesi di laurea, Università di Trento.

POCOBELLI D. P., BOEHM J., BRYAN P., STILL J., GRAU-BOVÉ J. 2018, *BIM for heritage science: a review*, in «Heritage Science», VI, p. 30.

REMONDINO F. et al. 2011, *Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and laser scanning*, in «Remote Sensing», 3(6), pp. 1104–1138.

REMONDINO F., CAMPANA S. (a cura di) 2014, *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage*, Archaeopress, Oxford.

SANSEVERINO A., MESSINA B., LIMONGELLO M., GUIDA C. G. 2022, *An HBIM methodology for the accurate and georeferenced reconstruction of urban context surveyed by UAV: The case of the Castle of Charles V*, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLVIII, pp. 1–23.

SBROGIÒ L. 2024, *Un approccio IFC per la modellazione informativa (HBIM) dell'archeologia dell'architettura*, in «Archeologia dell'architettura», XXIX, pp. 35–56.

STANGA C. 2023, *Stratigraphic units inside heritage building information model: a novel approach for the representation of building archaeology*, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLVIII-M-2, pp. 1519–1526.

TAROLLI P. 2014, *High-resolution topography for understanding Earth surface processes*, in «Geomorphology», CCXVI, pp. 295–312.

TOSCO C. 2003, *Una proposta di metodo per la stratigrafia dell'architettura*, in «Archeologia dell'architettura», VIII, pp. 17–27.

TRIZIO I., SAVINI F. 2020, *Archaeology of buildings and HBIM methodology: Integrated tools for documentation and knowledge management of architectural heritage*, in *Proceedings of the IMEKO TC4 International Conference on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage* (Trento, 22–24 October), pp. 84–89.

VALENTE V. 2011, *La gestione GIS del progetto ARMEP*, in A. CHAVARRIA ARNAU (a cura di), *Padova: Architetture medievali*, Mantova, pp. 153–195.

VARANINI G. M. 2005, *Il territorio fra l'Adige, il Baldo e il Garda nei secoli IX e X*, in «Ricerche di storia gardesana», pp. 15–19.

VIRTANEN J.-P. et al. 2022, *Interactive web-based 3D visualization for cultural heritage using Cesium*, in «ISPRS Annals», X-4/W1, pp. 575–582.

VOLK R., STENGEL J., SCHULTMANN F. 2014, *Building information modeling for existing buildings — literature review and future needs*, in «Automation in Construction», 38, pp. 109–127.

WILKINSON M. D. et al. 2016, *The FAIR guiding principles for scientific data management and stewardship*, in «Scientific Data», 3, 160018.