



*Marika Griffò*

estratto del curriculum

si laurea con lode nel gennaio 2016 in Architettura (Restauro) presso l'Università di Roma Sapienza con una tesi svolta all'estero sul tema del rilievo e restauro del monastero *Acheiropoietos* a Kyrenia, Cipro. Lo stesso anno è premiata come laureato eccellente per l'A.A 2014-2015 dalla fondazione Sapienza e vince con borsa il concorso per il XXXII ciclo del Dottorato di Storia, Disegno e Restauro dell'Architettura curriculum di Disegno presso la stessa università. Durante il periodo di formazione approfondisce gli argomenti del settore scientifico disciplinare ICAR17 prendendo parte a workshop, seminari e convegni sul tema del disegno e rappresentazione. Nello stesso periodo, affianca la didattica per i corsi di Scienza della Rappresentazione I e II ed Architectural Survey contribuendo al supporto agli studenti e tenendo diverse comunicazioni su tematiche specifiche.

Nel corso del triennio, partecipa ad attività di ricerca nell'ambito del rilievo dell'architettura e dell'archeologia prendendo parte a diverse campagne di rilievo su scala nazionale.

Partecipa col ruolo di tutor a workshop internazionali e master di II livello per l'ambito del rilievo ed acquisizione massiva. Per l'anno 2018, è responsabile di un progetto di avvio alla ricerca sul tema di ricerca dell'integrazione di dati eterogenei in ambiente digitale. Nello stesso anno svolge tutoraggio per l'attività di integrazione alla didattica "I modi del modello. Il BIM per la conoscenza" promossa dal centro di Sperimentazione e Innovazione della Didattica della facoltà di Architettura S.I.D.A della Sapienza.

È autore di diverse pubblicazioni nazionali ed internazionali.

Sapienza Università di Roma - Dipartimento di Storia, Disegno e Restauro dell'Architettura

Dottorato in Storia, Disegno e Restauro dell'Architettura  
Coordinatore prof.ssa Donatella Fiorani

Sezione B - Disegno dell'Architettura  
Responsabile prof.ssa Laura Carnevali

Sede  
Piazza Borghese, 9  
00186 Roma  
[http://www.dsdra.it/drupaluni/didattica\\_/dottorato\\_sdra](http://www.dsdra.it/drupaluni/didattica_/dottorato_sdra)

Marika Griffò

Dal dato all'informazione.  
Integrazioni ed evoluzioni del modello digitale

Scuola Nazionale di Dottorato in Scienze della Rappresentazione e del Rilievo

*Marika Griffò*

## Dal dato all'informazione. Integrazioni ed evoluzioni del modello digitale



### Abstract

*The research here presented aims to investigate the integration processes of typologically heterogeneous data and information in digital environment and the semantic structure of contents for their sharing. The field of application is related to the built cultural heritage at the architectonic scale. In this field, recent development of Information Technology allowed the spread of online and stand-alone databases, they are conceived as gatherer of several data (1D, 2D, 3D) and their strength is linked to the possibility to visualize and manage contents independently from a specific software.*

*The main topics here discussed involves, from one side, integration procedures of heterogeneous data in the virtual and three-dimensional space and, from the other side, the different possibilities of data organization in an information system with a shared semantic logic.*

*The study is focuses on the three phases that are distinctive for all the informatic procedures used to get knowledge, these are the input, as a source data, the elaboration, as a transformation of the initial configuration and the output, as the final product of the process of information.*

*This structure is followed for two different informative systems, one is linked to the process of numeric discretization of reality, related to point clouds, the other, instead, as an interpretation of the real world through models. The interconnection between these two ways to built informative systems is finalised to empower the process of knowledge by merging several aspects of the architectural object.*

In copertina: elaborazione del modello numerico della Basilica Julia al Foro Romano elaborato nell'ambito del progetto di ricerca interdisciplinare, finanziato da Sapienza Awards - Grandi Progetti di Ateneo 2015. Il progetto coinvolge il Parco Archeologico per il Colosseo, l'IBAM CNR, i Dipartimenti di Scienze dell'Antichità e di Storia, Disegno e Restauro dell'Architettura, Sapienza, Università di Roma. Responsabili di progetto: Prof. Marco Galli, dott. Tommaso Ismaelli, prof. Carlo Inglese  
Elaborazione grafica a cura dell'autrice.



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

Dipartimento di Storia, Disegno e Restauro dell'Architettura  
Dottorato in Storia, Disegno e Restauro dell'Architettura  
Sezione B - Disegno dell'Architettura - settore scientifico disciplinare ICAR 17

Università di Roma Sapienza  
Dipartimento di Storia, Disegno e Restauro dell'Architettura  
Dottorato di Ricerca in Storia, Disegno e Restauro dell'architettura  
Sezione B - Disegno dell'Architettura - SSD ICAR17  
Tesi di Dottorato di Ricerca - XXXII Ciclo - 2016/2019

## **Dal dato all'informazione. Integrazioni ed evoluzioni del modello digitale**

Dottoranda: Marika Griffo

Tutor: Proff. Carlo Bianchini, Graziano Mario Valenti

DIPARTIMENTO DI STORIA  
DISEGNO E RESTAURO  
DELL'ARCHITETTURA



**SAPIENZA**  
UNIVERSITÀ DI ROMA



Copyright Dipartimento di Storia, Disegno e Restauro dell'Architettura, Roma 2015

Tutti i diritti sono riservati:

nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta in alcun modo (compresi fotocopie e microfilm) senza il permesso scritto del dottorando di ricerca in "Storia, Disegno e Restauro dell'Architettura"

*Sapienza Università di Roma - Dipartimento di Storia, Disegno e Restauro dell'Architettura*

*Dottorato in Storia, Disegno e Restauro dell'Architettura*

Coordinatore prof.ssa Donatella Fiorani

*Sezione B - Disegno dell'Architettura*

Responsabile prof.ssa Laura Carnevali

*Collegio del Dottorato, XXXII ciclo, 2016/17-2018/19*

*ICAR/17 - Disegno*

Carlo BIANCHINI, Laura CARLEVARIS, Laura CARNEVALI, Marco CARPICECI, Elena IPPOLITI, Alfonso IPPOLITO, Fabio LANFRANCHI, Maria MARTONE, Fabio QUICI, Luca RIBICHINI, Michele RUSSO, Marta SALVATORE, Graziano Mario VALENTI

*ICAR/18 - Storia dell'Architettura*

Aloisio ANTINORI, Simona BENEDETTI, Flavia CANTATORE, Piero CIMBOLLI SPAGNESI, Marzia MARANDOLA, Maurizio RICCI, Augusto ROCA DE AMICIS, Renata SAMPERI, Paola ZAMPA

*ICAR/19 - Restauro dell'Architettura*

Lia BARELLI, Calogero BELLANCA, Maurizio CAPERNA, Roberta Maria DAL MAS, Marina DOCCI, Maria Grazia ERCOLINO, Daniela ESPOSITO, Donatella FIORANI, Alessandro IPPOLITI, Maria Piera SETTE, Maria Grazia TURCO

<i>Dottoranda</i> Marika Griffò
<i>Responsabile Sezione B - Disegno dell'Architettura</i> prof.ssa Laura Carnevali
<i>Tutor</i> prof. Carlo Bianchini, prof. Graziano Mario Valenti



Questo lavoro è esito di molti confronti, di collaborazioni e di un ancora più cospicuo numero di riflessioni condivise. Vorrei quindi, ringraziare tutti coloro che, in diversi modi, vi hanno preso parte.

Ringrazio il prof. Carlo Bianchini per avermi trasmesso la voglia di guardare teorie e concetti da punti di vista inconsueti, perché, in almeno due continenti, è riuscito a direzionare con poche frasi le mie intuizioni, per la saggezza.

Ringrazio il Prof. Graziano Valenti, per i suoi consigli, puntuali ed attenti, espressi sempre con vivacità intellettuale.

Ringrazio i prof. Carlo Inglese ed Alfonso Ippolito, a loro devo tante esperienze formative ma, soprattutto, li ringrazio per avermi fatto sentire parte di un gruppo, per avermi incoraggiata e motivata incessantemente.

Ringrazio il CHEI lab della UCSD per avermi accolta a San Diego ed aver condiviso con me le loro sorprendenti attività di ricerca, ringrazio in particolare il dott. Dominique Rissolo per gli stimoli di approfondimento sui temi più disparati, per la disponibilità e la gentilezza.

Ringrazio chi ha collaborato con me nei diversi progetti di ricerca presentati in questa tesi tra cui il prof. Carlo Inglese, il prof. Marco Galli, il dott. Tommaso Ismaelli e l'arch. Sofia Menconero, collega instancabile ed amica.

Ringrazio Martina, Adriana e Laura, la loro costante presenza, ed anche i loro lamenti, hanno alleggerito ogni fatica.

Ringrazio Valeria e Francesca per le parentesi di tranquillità ritagliate quando sembrava impossibile.

Ringrazio la mia famiglia che, silenziosamente, ha seguito e supportato ogni mia scelta.

In ultimo, ringrazio Paolo per avermi aiutata in ogni modo pensabile, per i corsivi, la punteggiatura, per le chiacchierate sugli imperatori e sulle tipologie di curve; lo ringrazio per essere il mio costante esempio di determinazione e passione, per la condivisione di progetti, di ricerca e di vita, per non essersi sottratto mai.



# Indice

<i>Abstract</i>	11		
<b>1. Il patrimonio architettonico in digitale: dal dato al modello</b>	13		
1.1. L'approccio metodologico	13		
1.2. Documentazione intrinseca e documentazione estrinseca	18		
1.3. Il modello. Gli aspetti teorici	21		
1.4. Il modello. Gli aspetti applicativi	22		
1.5. Le ragioni dell'integrazione	25		
1.6. Le fasi della ricerca	27		
<b>2. Input: i dati</b>	33		
2.1. Tipologie per l'associazione ai modelli	33		
2.2. Il testo come dato 1D	34		
2.3. L'immagine come dato 2D	35		
2.4. La forma come dato 3D	39		
<b>3. Elaborazione: l'informazione</b>	49		
3.1. I sistemi informativi sui modelli discreti	49		
3.1.1. La semantica			
3.1.2. Integrazione di dati nello spazio discreto			
3.1.3. Segmentazione e machine learning			
3.2. I sistemi informativi sui modelli continui	55		
3.2.4. La semantica			
3.2.5. Lo standard			
3.2.6. Le applicazioni HBIM			
<b>4. Output: variazioni sul tema del modello digitale</b>	65		
4.1. La Basilica Iulia	66		
4.1.1. Il rilievo integrato e le indagini geofisiche			
4.1.2. L'associazione spaziale dei dati			
4.1.3. La segmentazione per fasi stratigrafiche			
4.2. Le terme di Diocleziano	83		
4.2.1. La segmentazione per mappe tematiche			
4.3. Il ninfeo di Egeria	88		
4.3.1. Il rilievo integrato e l'acquisizione termografica			
4.3.2. L'associazione spaziale dei dati			
4.4. Il modello parametrico nel processo HBIM: il ninfeo di Egeria	100		
4.4.1. I criteri di modellazione: la costruzione del modello			
4.4.2. Associazione spaziale: l'information modeling			
4.5. La lettura integrata di dati tra HBIM e modelli numerici	107		
<b>5. Conclusioni: limiti e prospettive di ricerca</b>	111		
<b>Glossario</b>			
<b>Bibliografia</b>			

Ove non diversamente specificato, le immagini sono elaborazioni grafiche a cura dell'autrice. Riguardo alla terminologia, si è scelto di mantenere alcune voci in lingua originale e di non usare la traduzione in italiano.

Nella sezione Glossario si trovano i termini più utilizzati nel testo e quelli non immediatamente riconducibili alla lingua italiana, che tuttavia vengono utilizzati nel nostro linguaggio corrente.

## Abstract

L'entropia nello spazio tridimensionale virtuale sembra inarrestabile. La creazione dei "cloni digitali" pare essere l'unica precauzione efficace per assicurare che rimanga traccia del mondo reale, così come noi lo conosciamo, anche in futuro. Di fronte questa prospettiva pare evidente la necessità di comporre sistemi di gestione dei dati che diano l'ordine della produzione esistente e che ne assicurino l'intelligibilità futura.

La ricerca qui presentata investe l'ambito della rappresentazione del patrimonio culturale costruito indagando le possibilità di interazione tra dati eterogenei nel dominio del modello digitale. Questo approccio si affida ad un principio di complementarità dei processi di conoscenza finalizzato alla convergenza, in ambiente virtuale, dei diversi ambiti di indagine coinvolti. Le tematiche fondanti affrontate riguardano da una parte, le procedure d'integrazione di dati eterogenei nello spazio virtuale tridimensionale e dall'altra, le diverse possibilità di organizzazione di questi stessi dati in un sistema informativo dotato di una struttura logica condivisa.

Lo studio si articola ripercorrendo ed analizzando le fasi distintive delle operazioni informatiche necessarie a produrre conoscenza: l'input, ossia il dato di partenza, la materia prima; l'elaborazione, ossia il processo di trasformazione della configurazione iniziale; e l'output, inteso come prodotto, come fase informativa. Questa impostazione viene declinata rispetto a due diverse tipologie di sistemi informativi, il primo, è quello legato alla discretizzazione numerica della realtà e si avvale di modelli numerici, l'altro, invece, interpreta la realtà mediante i modelli continui di rappresentazione.

I due approcci agiscono su campi di applicazione con più punti di intersezione, l'interferenza tra i due sistemi contribuisce significativamente alla produzione di un unico strumento conoscitivo che porti con sé non solo la traccia dell'intero ciclo di vita del bene architettonico, ma anche la testimonianza di tutto l'iter conoscitivo ad esso connesso. Con questo scopo, la ricerca parte dall'analisi dei diversi modi di comporre il modello di architettura per valutarne le affinità e la compatibilità. La ricerca qui presentata intende valutare le potenzialità delle varie modalità d'integrazione attualmente in uso e di sviluppare un approccio di sistematizzazione dei dati integrati in modelli conoscitivi avanzati.

Rispetto a questi panorami speculativi, lo studio affronta i sistemi informativi sviluppati nell'ambito della modellazione numerica: le strategie di segmentazione e classificazione, di manipolazione spaziale di dati eterogenei e gli strumenti di organizzazione semantica dei dati. Dall'altra parte, il tema d'indagine tocca l'ambito dell'HBIM, della costruzione di modelli parametrici relazionali semanticamente strutturati.



## 1. Il patrimonio architettonico in digitale: dal dato al modello

Nell'ambito del patrimonio culturale, la conservazione e la trasmissione del bene passa attraverso la sua documentazione: dal disegno di progetto al progetto di restauro, la conoscenza dell'oggetto d'indagine assicura e favorisce la tutela. Questo principio risulta tanto più solido quanto più il sistema informativo contribuisce in maniera attiva alla comprensione intrinseca del bene nei suoi caratteri materiali ed immateriali. La produzione di una copia digitale dell'elemento fa parte dell'eterogeneo apparato documentale e riguarda la sua interpretazione e la sua scomposizione semantica. Il tema è oggi ampiamente discusso in tutti i settori coinvolti, da una parte, nella conservazione del patrimonio culturale costruito e, dall'altra, nell'ambito dell'*Information and Communication Technology* (ICT)<sup>1</sup>. La rivoluzione tecnologica ha consentito una rapidissima crescita numerica ed un notevole sviluppo, in ambiente digitale, di modelli interpretativi tra loro molto differenti. Questo processo ha favorito, per certi versi, la diffusione, sia in termini di divulgazione che di disseminazione, dei dati e delle informazioni. Al contempo, questa rivoluzione ha generato una loro sovrabbondanza tanto da rendere spesso complicata la distinzione tra il dato ricercato e tutto ciò che non lo è (il cosiddetto "rumore di fondo"). La tematica sta diventando preponderante in tutti i settori la cui componente tecnologica e digitale è rilevante così da generare filoni di ricerca consistenti nell'ambito del *data-mining*, dell'estrazione di dati utili da sistemi di gestione articolati e complessi<sup>2</sup>. Riguardando il controllo e la gestione ordinata dei dati, il problema ha un risvolto applicativo molto forte. In aggiunta, a ciò si affianca un problema di carattere teorico legato alle metodologie di acquisizione della conoscenza. L'ICT da un lato, ed il campo di studi umanistici dall'altro, sono attualmente i due settori fondanti delle cosiddette *digital humanities*. In questo ambito, si assiste ad un numero sempre crescente di sperimentazioni e ricer-

che, volte ad impostare nuove metodologie d'indagine. L'obiettivo primario è quello di sfruttare gli strumenti di computazione automatica, non soltanto per trovare il surrogato digitale di archivi e collezioni, quanto per avviare nuove "sinapsi digitali", nuovi meccanismi di connessione, capaci di impostare il salto metodologico nell'approccio alla conoscenza. Alla società delle informazioni si devono tutte le strategie di manipolazione dei dati che si sviluppano intorno alla condivisione in rete di contenuti multimodali. Questi contenuti coinvolgono un numero ampio e sempre più eterogeneo, di prodotti digitali che, in riferimento al patrimonio culturale, trasferiscono informazioni attraverso testi, immagini, simulazioni di spazi tridimensionali, video ecc. La capacità di riconoscere tra i dati nuovi nodi e nuove reti concettuali, contestualmente all'individuazione di nuove modalità di interrogazione, è strategico ad un assorbimento fattuale della rivoluzione dell'informazione nel settore delle *digital humanities*.

### 1.1. L'approccio metodologico

Il tema di ricerca intende indagare i processi di integrazione di dati tipologicamente eterogenei in ambiente digitale e il modo in cui la loro struttura informatica influenzi la loro fruizione. L'ambito di applicazione è pertinente al patrimonio culturale costruito. In questo contesto, i recenti sviluppi tecnologici hanno consentito la diffusione di banche dati online e stand-alone, le quali si configurano come collettori di dati 1D<sup>3</sup>,2D,3D ecc. capaci di svincolare la visualizzazione di contenuti dall'utilizzo di software specifici e, parzialmente, dalle capacità di calcolo del dispositivo. La strutturazione delle informazioni in un sistema ordinato e condivisibile è indispensabile alla fruizione dei contenuti. In ambiente digitale, sono molte le piattaforme in via di sviluppo capaci di includere al loro interno informazioni

eterogenee per consentire una loro condivisione; in ambito archeologico, si pensi alle piattaforme collaborative di impronta GIS e webGIS <sup>4</sup> ed all'intera panoramica di banche dati connesse al mondo dell'arte ed alla sua digitalizzazione (Il progetto "Europeana"<sup>5</sup> è forse quello più conosciuto in tal senso).

L'inserimento nelle banche dati esistenti di elementi complessi come modelli 3D, immagini ad altissima risoluzione, panorami esplorabili ecc. ha seguito lo stesso trend ed oggi è possibile accedere ad una serie di contenuti un tempo relegati ad una fetta di utenza ad alto grado di specializzazione. Dal 2012 ad oggi, la piattaforma "Sketchfab"<sup>6</sup> ha maturato una community di due milioni di users; su questa scia, sono stati lanciati progetti significativi per favorire la catalogazione e la fruizione dei contenuti più disparati; la piattaforma "Visual Media Service"<sup>7</sup>, ad esempio, consente la visualizzazione multirisoluzione di modelli 3D, immagini gigapixels ed immagini RTI (*Reflectance Transformation Imaging*). Un impulso importante in questa direzione nasce dalla sfera del gaming e dalla velocissima evoluzione di tecnologie di produzione e condivisione di contenuti tridimensionali attraverso il web. Nell'ambito del *game design* e della computer grafica, assistiamo ad una evoluzione delle modalità di costruzione e di visualiz-

zazione di scenari digitali 3D attraverso tecniche di elaborazione sempre più sofisticate (Fig. 1.1).

Questi significativi sviluppi hanno favorito la diffusione di strumenti di indicizzazione ed archiviazione di modelli 3D finalizzati alla creazione di librerie virtuali tematiche. In ambito architettonico e, più in generale, nell'ambito dei beni culturali, lo scenario presentato definisce una nuova opportunità: gli strumenti della ricerca si ampliano grazie alla possibilità di accedere alla copia digitale di un numero sempre crescente di oggetti. Dalla scala del centimetro fino a quella territoriale, tutto può divenire dato digitale. Le prospettive di sviluppo fin qui presentate sottolineano la necessità di sistemi di archiviazione definibili, in un certo senso, orizzontali: i dati riguardano un numero indefinito di settori di indagine e per ognuno è possibile individuare un numero altrettanto vasto di categorie ontologiche (rispetto all'ambito individuato, potrebbe essere funzionale distinguere, ad esempio, i modelli 3D di una collezione di un certo museo archeologico rispetto a quelli prodotti per l'analisi agli elementi finiti di un'architettura del Novecento). Il passaggio successivo avviene grazie a strumenti di integrazione ed interoperabilità verticale: rispetto al singolo oggetto, diviene possibile raccogliere una quantità sempre maggiore di dati multidimensionali, l'oggetto può

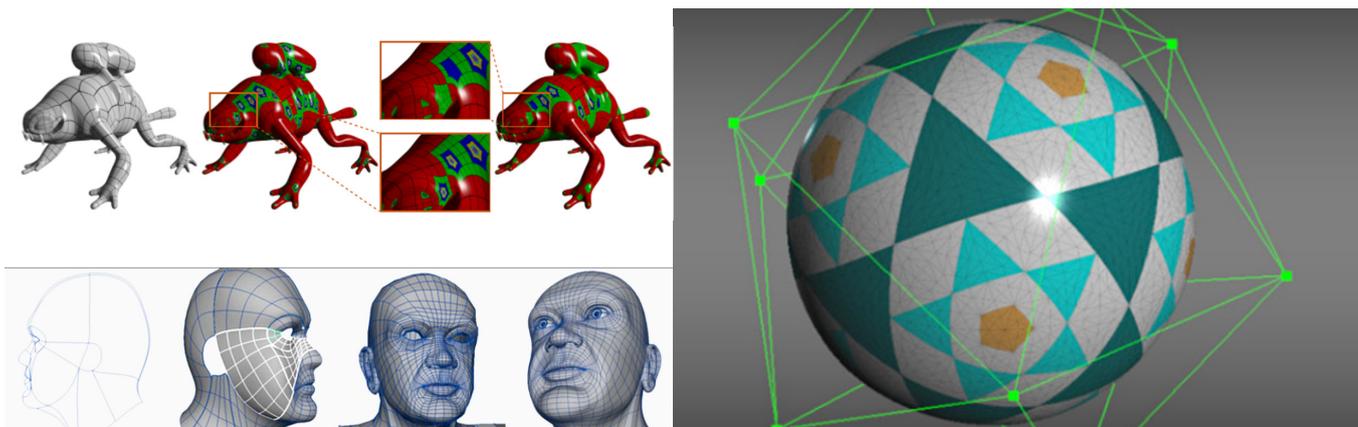


Fig. 1.1 Gestione della multirisoluzione interattiva mediante superfici di suddivisione. <http://www.cgchannel.com/2019/07/pixar-releases-opensubdiv-3-4/>.

essere indagato esplorando un numero sempre più ampio di proprietà che lo caratterizzano. Ciò è particolarmente significativo in relazione ai settori legati allo studio della forma, delle dimensioni e della consistenza materiale dell'oggetto, intesi come elementi di indagine imprescindibili. Su questa linea, la piattaforma collaborativa "Aïoli", ad esempio, consente di integrare dati 2D e 3D rispetto all'oggetto di studi e predispone degli strumenti di analisi e segmentazione multidimensionale (Fig.1.2). Diversi progetti europei ambiscono, invece, a predisporre dei canali di accesso e navigazione dell'intero apparato documentale ed informativo sfruttando modelli 3D di ricostruzione di fasi storiche di edifici o di intere città sulla base di consultazione di archivi specifici (Fig.1.3)<sup>8</sup>.

Il tema offre l'incipit per una riflessione su come l'opportunità di far convivere in un unico spazio virtuale molteplici proprietà dell'oggetto possa essere applicata alla conoscenza dell'architettura e del patrimonio costruito. Ogni spazio virtuale di ogni ambito di indagine viene abitato da dati, i quali si compongono tra loro in forme sempre più complesse diventando informazioni e poi modelli.

Questi modelli vengono costruiti selezionando e processando solo alcune delle qualità dell'oggetto. Dal modello statistico predittivo a quello diagnostico, strutturale e ge-

ometrico, ogni processo di conoscenza ha una propria autonomia metodologica e procedurale<sup>9</sup>. L'integrazione tra queste varie componenti può avvenire individuando uno spazio virtuale che si presti ad accogliere dati, informazioni e modelli tra loro diversi e che consenta di esplicitare il carattere proprio di ogni ambito di indagine (Fig. 1.4).

In termini generali, la distinzione tra dati, informazioni e conoscenza è trattata dalla *Information Science* per definire dei gradi di complessità e sviluppo che intervengono nei processi cognitivi. Sebbene in ogni settore specifico tali livelli abbiano assunto nomi e, talvolta, significati abbastanza specifici, è possibile descrivere delle caratteristiche, per ogni livello individuato, comuni ai vari ambiti.

I dati sono generalmente intesi come simboli rappresentativi di proprietà degli oggetti e degli eventi. Essi sono percepibili attraverso i sensi o misurabili attraverso sensori ma non hanno valore intrinseco poiché sono privi di un contesto di riferimento. Le informazioni derivano da un processo di trasformazione del dato atto ad accrescerne la propria utilità<sup>10</sup>, a fornire loro un contesto logico e fisico a cui associarli. Il livello successivo di complessità è quello della conoscenza, la quale deriva dall'organizzazione strutturata delle informazioni che avviene internamente al sistema cognitivo dell'individuo; in altri termi-

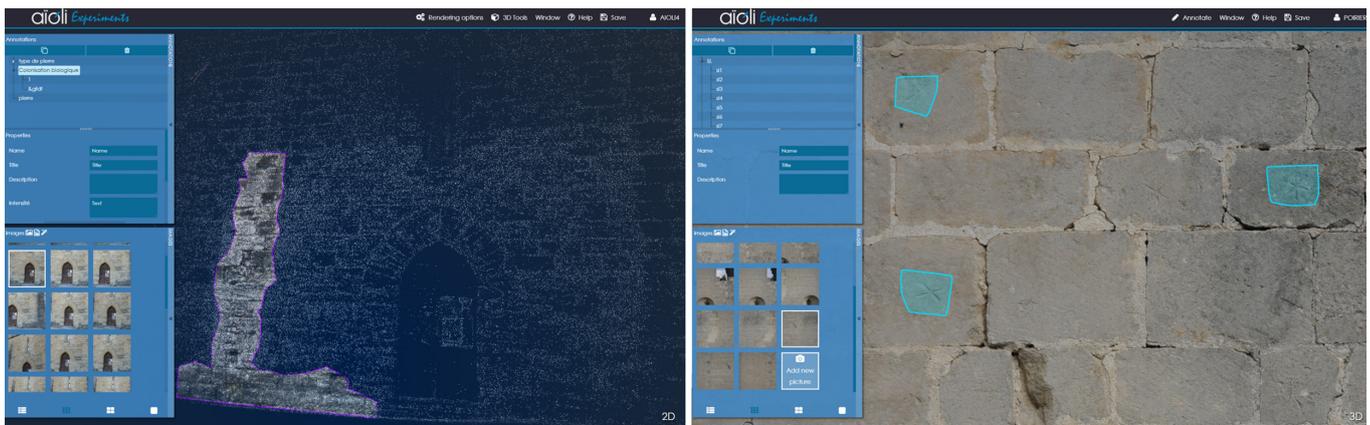


Fig. 1.2 Piattaforma aioli. Esempio di annotazione su nuvole di punti 3D ed immagini 2D. (<http://www.aioli.cloud/>) l'applicativo implementa funzioni di annotazione interattiva 2D/3D, mappatura e segmentazione, integrazione di modelli relativi a stati temporali diversi (passato, presente, futuro dell'oggetto). Il progetto è sviluppato dal MAP (Models and simulations for Architecture and Cultural Heritage) in collaborazione con il CNRS

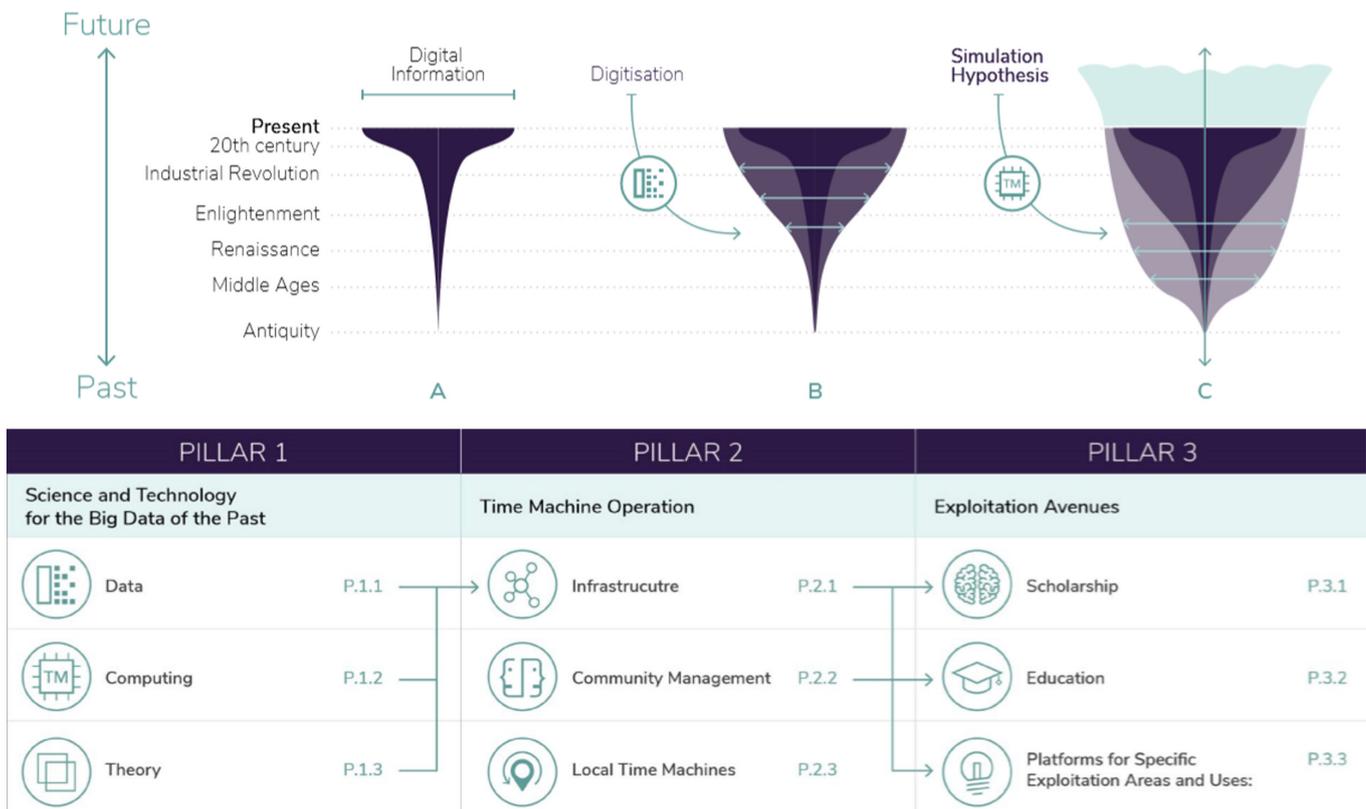


Fig. 1.3 Piano strategico ed obiettivi di ricerca del progetto "Time Machine" per l'ampliamento dell'accessibilità in rete di contenuti digitali. <https://www.timemachine.eu/>



Fig. 1.4 La piramide della conoscenza (the DIKW pyramid).

ni, questo passaggio deriva dal modo soggettivo con cui il soggetto recepisce ed assimila le informazioni. Questi livelli possono essere interpretati in due diverse direzioni: l'integrazione tra dati in riferimento al loro contesto genera informazioni, l'assimilazione di informazioni produce conoscenza; allo stesso modo, le rappresentazioni della conoscenza di un individuo sono informazioni, da queste è possibile estrarre dati semplici<sup>11</sup>.

L'organizzazione dei processi conoscitivi è applicabile all'ambito della documentazione e della trasmissione del patrimonio costruito ed assume un significato particolare in riferimento al tema dell'integrazione di dati eterogenei. Nello specifico, al dato è possibile assimilare tutto ciò che descrive le proprietà dell'opera architettonica senza connotazioni specifiche, è l'*input*, ovvero ciò che viene inserito nel sistema per attivarlo. Le informazioni sono invece riferibili all'interpretazione rispetto al contesto, il dato viene elaborato e trasformato per assumere un significato. Fino a questo punto, l'analogia terminologica e concettuale rispetto alle definizioni generali sopra espresse è sostanziale. In riferimento al livello successivo di sviluppo, quello della conoscenza, è possibile leggere una specificità in riferimento al contesto specifico trattato. In esso, la conoscenza trova la sua configurazione attraverso il modello. La conoscenza dell'oggetto è il modello che lo studioso produce di esso.

La rappresentazione, intesa come sistema complesso di regole e codici, è il mezzo attraverso il quale tali modelli vengono prodotti. Si parla, in tal senso, di modelli bidimensionali e tridimensionali contenenti, in prevalenza, informazioni di natura metrica e morfologica. Tali modelli raccontano l'oggetto nella sua configurazione spaziale descrivendo ciò che è visibile o astraendone la sua forma. Questo tipo di astrazione di alcune delle proprietà dell'oggetto è uno strumento di comprensione potentissimo, sebbene poco ci comunichi riguardo ciò che non è immediatamente tangibile né visibile. Tuttavia, seppure siano parziali, i modelli generati in questo ambito, in particolar modo quelli tridimensionali, instaurano un forte rapporto di corrispondenza esplicita con l'oggetto reale. Tra le innumerevoli proprietà di ogni oggetto fisico<sup>12</sup>, la sua morfologia, espressa attraverso i modelli della rappresentazione, è

tra quelle che meglio assicurano il controllo e la riconoscibilità. Il valore di *iconicità*<sup>13</sup>, insito nei modelli tridimensionali qui trattati, garantisce questa corrispondenza ed è fondante di uno specifico approccio metodologico volto alla conoscenza dell'opera. Questa premessa genera una considerazione: sebbene di per sé i modelli morfometrici<sup>14</sup> tridimensionali risultino rappresentativi solo di alcune delle proprietà, essi si configurano come potenziale fulcro per l'associazione di dati ed informazioni inerenti all'oggetto nella sua complessità<sup>15</sup>. I modelli così intesi vivono in uno spazio virtuale anch'esso tridimensionale, la sua esplorazione, svincolata dai limiti gravitazionali e prospettici, consente di ampliare i livelli di lettura e di aprire le strade a connessioni logiche e spaziali inedite (Fig.1.5).

Per rendere possibile questa esplorazione, occorre sin da subito inquadrare le caratteristiche specifiche dello spazio tridimensionale digitale a cui ci riferiamo. Esso è sintetizzabile come contenitore isotropo e omogeneo predisposto a priori per accogliere gli oggetti – i modelli – virtuali. In ambiente digitale, lo spazio ritrova e, in un certo senso, valida l'intera concezione kantiana di sostanza a sé, indispensabile alla rappresentazione dell'oggetto e indipendente rispetto ad esso<sup>16</sup>.

Se da una parte, quindi, i modelli tridimensionali definiscono un rapporto di immediata corrispondenza con l'oggetto reale, dall'altra consentono che questo rapporto venga implementato aggiungendo nuovi livelli di informazione integrativi rispetto a quelli morfologici<sup>17</sup>. A ciò si aggiunge la possibilità, offerta dallo spazio 3D virtuale, di fare esperienza dell'oggetto in maniera sempre reversibile. In questo spazio<sup>18</sup>, ogni operazione di selezione, rimozione o aggiunta può essere reiterata all'infinito senza alterare in alcun modo l'essenza del dato di partenza. Questo passaggio appare da un lato scontato quando si riferisce alla sfera della progettazione: la possibilità di visualizzare diverse soluzioni compositive nella loro articolazione spaziale è propedeutica alla costruzione mentale del progetto stesso; dall'altro lato, nell'ambito dell'analisi di ciò che è invece già costruito, ovvero del rilievo, questo approccio offre strumenti di indagine non meno consistenti: dall'individuazione e selezione della stratigrafia archeologica alla modellazione delle diverse ipotesi ricostruttive, i dati

possono essere composti e scomposti producendo di volta in volta modelli interpretativi della realtà.

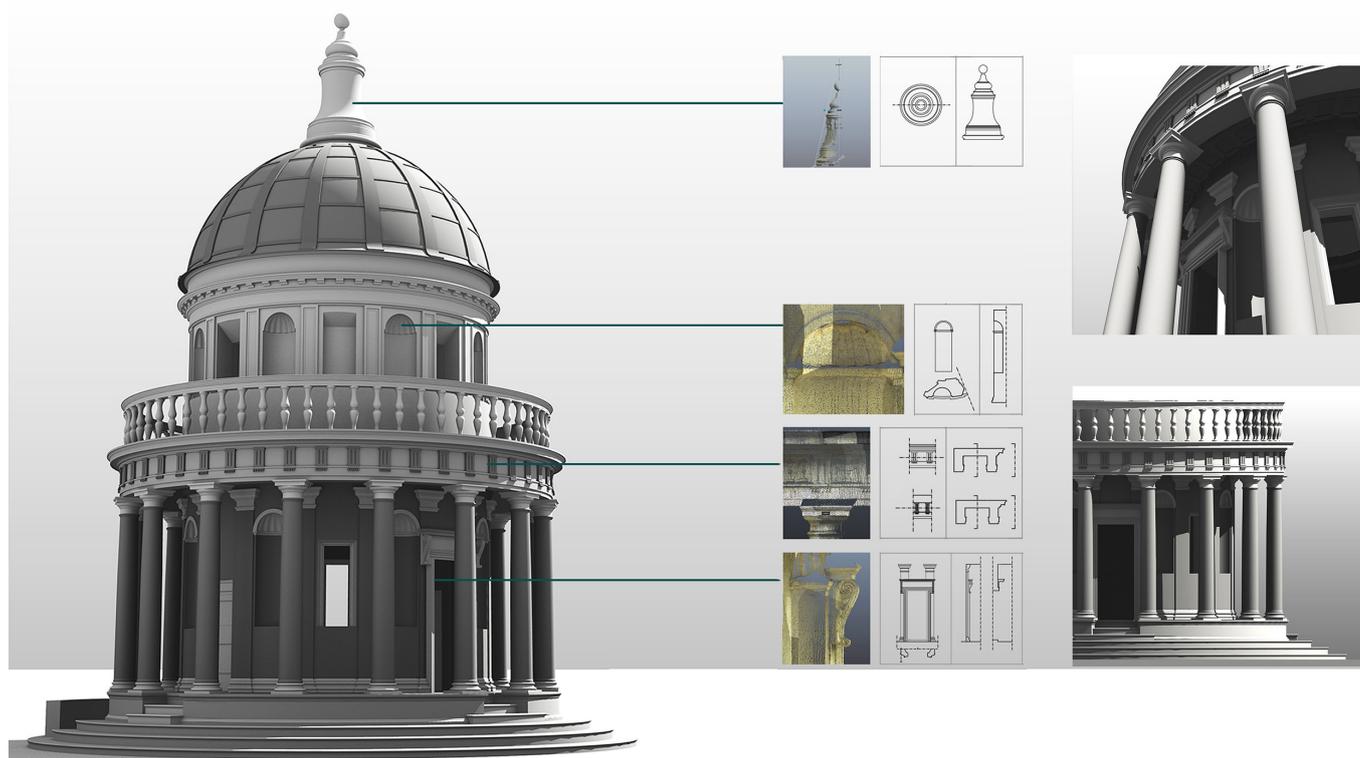


Fig. 1.5 Modello matematico del tempietto di San Pietro in Montorio. Genesis morfologica a partire dal rilievo laser scanner e interpretazione e selezione mediante modelli 2D degli elementi costruttivi.

## 1.2. Documentazione intrinseca e documentazione estrinseca

In riferimento alla documentazione di un'opera, nel Trattato del restauro architettonico<sup>19</sup>, Giovanni Carbonara, e prima di lui Guglielmo De Angelis D'Ossat<sup>20</sup>, distinguono un *corpus* documentale *intrinseco* ed uno *estrinseco*. Al primo gruppo ascrivono la documentazione di carattere oggettivo, derivabile dall'investigazione diretta della consistenza dell'opera: tracciati di cantiere, moduli geometrici utilizzati, schedatura dei materiali e delle tecniche costruttive impiegate unitamente ai dati reperiti riguardo le fasi

ed i tempi di progettazione e realizzazione, la committenza, le maestranze ecc. Questa tipologia di documentazione è di sintesi, lo studioso raccoglie e campiona i dati riferiti all'oggetto, da questi identifica nell'opera gli elementi che concorrono a comprenderla. Al secondo gruppo appartiene, invece, l'apparato documentale soggettivo o indiretto, non immediatamente intercettabile sul monumento stesso: fonti storiografiche, disegni, manoscritti e tutto il sostrato di idee, di civiltà e di cultura che ha prodotto l'opera. Si tratta di documentazione di analisi, riferisce una lettura a partire da un apparato documentale più o meno pertinente e specificamente connesso all'opera.

Questa distinzione epistemologica, proposta in un'epoca assai diversa per tecnologie impiegate e diffusione delle stesse, risulta quanto mai attuale se rapportata alle fonti documentarie attualmente utilizzate per lo studio del patrimonio costruito.

In tal senso, il dualismo metodologico proposto consentirebbe di approssicare una prima distinzione tra due diversi processi di conoscenza. Entrambi i processi si compongono grazie alla graduale trasformazione del dato in informazione e poi in modello. La caratterizzazione del dato di partenza in intrinseco ed estrinseco modifica le tappe successive del processo cognitivo ed arriva a generare modelli interpretativi di diversa natura.

Rispetto all'oggetto costruito ed al tema dell'integrazione di dati, informazioni e modelli, è possibile intendere, per documentazione intrinseca, quella prodotta registrando ciò che è immediatamente sperimentabile sull'oggetto stesso. Al livello dei dati, appartiene a questa categoria la documentazione in stretta dipendenza dall'esperienza diretta dell'oggetto. Rientrano quindi le epigrafi, i monogrammi, le incisioni di cantiere, fotografie, immagini termografiche, immagini multispettrali, modelli numerici derivati dal rilievo architettonico, ecc. Questo ampio apparato documentale è di tipo quantitativo, ad esso è assimilabile il carattere di oggettività<sup>21</sup>. In una fase successiva, il dato intrinseco così definito viene trasformato attraverso un processo di interpretazione. Il risultato di questa operazione è l'informazione. Sebbene sia palese che l'informazione abbia di per sé insito il concetto di elaborazione ed interpretazione soggettive, è possibile definire come *informazione intrinseca* quella dedotta da dati intrinseci. Da essa va dunque distinta l'*informazione estrinseca*, di seguito trattata. A questo genere appartengono le trascrizioni delle iscrizioni, le immagini elaborate e trasformate per consentire letture integrate e i modelli numerici segmentati e parzializzati tramite processi di analisi.

In riferimento alla documentazione di tipo estrinseco, è possibile rintracciare le categorie di dato derivate da un certo livello di astrazione rispetto all'oggetto reale. In tal caso ci riferiamo alla documentazione 1D, 2D e 3D di interpretazione (fonti storiografiche e letterarie, rappresentazioni grafiche derivate da operazioni di rilievo, disegni

acquisiti di progetto o di analisi ecc.). A questa categoria vanno dunque ascritte tutte le fonti relative ad una prima lettura interpretativa dell'oggetto ed acquisite come materiale di base per i processi di conoscenza successivi. Le informazioni elaborate a partire dai dati estrinseci sono invece relative a ciò che avviene interpretando tali fonti in una fase successiva a quella di raccolta. Possiamo considerare informazioni estrinseche l'integrazione dei dati in riferimento a sistemi di gestione ed archiviazione digitale e l'organizzazione semantica dei contenuti.

In questo contesto, un'epigrafe, una immagine termografica o una nuvola di punti tridimensionale (dati intrinseci) sono la base dati da cui provengono rispettivamente il documento di trascrizione e traduzione epigrafica, l'elaborazione dei parametri di temperatura dell'immagine o la segmentazione della nuvola di punti per l'individuazione di porzioni significative (informazioni intrinseche). Allo stesso modo, una fonte letteraria, un disegno o un plastico di studio costituiscono la base dati estrinseca per l'elaborazione delle informazioni da essi derivati.

In entrambi i casi, il processo di elaborazione ed interpretazione può alterare la natura dimensionale del dato di partenza, pertanto la distinzione tipologica evidenziata tra documentazione monodimensionale, bidimensionale e tridimensionale è funzionale in relazione al dato mentre si depotenzia se applicata alle informazioni.

Quest'approccio definisce un sistema complesso in cui dati ed informazioni sono caratterizzati e suddivisi a partire dal loro legame, più o meno diretto, con la fisicità dell'oggetto; in altri termini, questa suddivisione ricalca il tipo di valori che ciascuna delle due categorie intende prendere in esame. Da un lato, il processo di conoscenza si incardina sulle proprietà fisiche dell'oggetto, dall'altro, tale processo si sostanzia per mezzo dei valori storici, teorici e culturali che l'opera trasmette (Figg. 1.6, 1.7).

Tale distinzione diviene funzionale per inquadrare la fase successiva di sviluppo che genera modelli a partire da informazioni. Allo stesso modo infatti, seguendo lo stesso ordine concettuale appena presentato, il discorso si estende ai modelli.

Il *modello intrinseco* è il risultato olistico della serie di

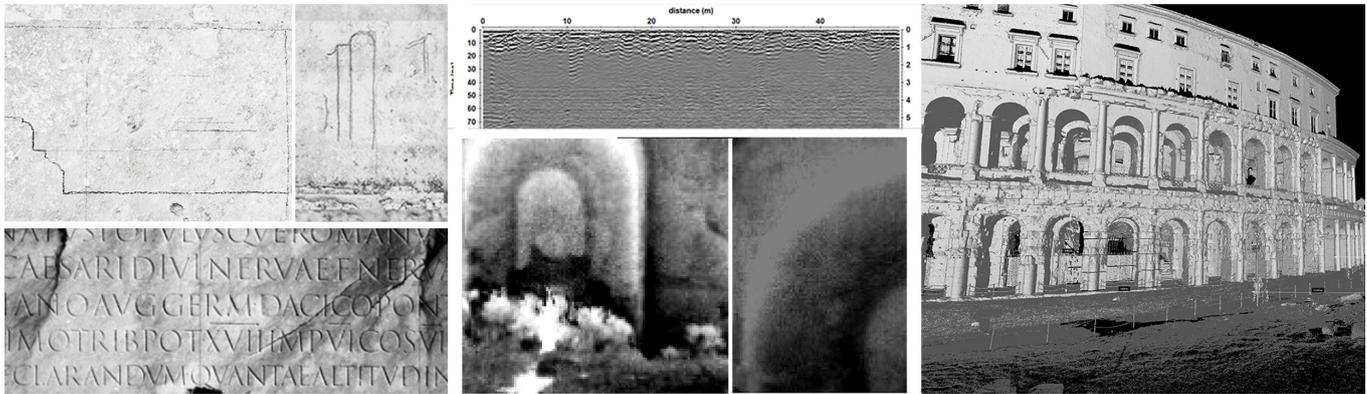


Fig. 1.6 Tipologie di documentazione intrinseca: iscrizioni, immagini termografiche, radargrams, nuvole di punti



Fig. 1.7 Tipologie di documentazione estrinseca: disegni d'archivio, modelli 2D di rilievo, modelli 3D interpretativi.

processi operati su dati ed informazioni intrinseche. Esso si configura come modello integrato di analisi, contiene tutti i dati quantitativi relativi alla consistenza materiale dell'oggetto e tutte le informazioni che da essi è possibile desumere. Il modello così inteso è, da una parte, strumento di analisi e, dall'altra, collettore e catalizzatore di una categoria specifica di informazioni. Dal punto di vista tipologico, questo modello può essere definito come discretizzazione controllata della realtà: in tal senso, ha una natura frammentaria. Specularmente, il *modello estrinseco* rappresenta un'interpretazione della realtà e porta in sé una serie di valori intangibili legati all'oggetto, è uno strumento di astrazione dell'istanza storica e di quella artistica insita nell'opera. Quest'ultimo è generato integrando le informazioni dedotte da una pluralità di dati e riformulate

per fornire l'interpretazione.

La distinzione concettuale tra queste due tipologie di modelli è evidente, tuttavia, i processi conoscitivi definiscono una serie di relazioni trasversali che superano tale dicotomia per generare conoscenza. In quest'ottica, la doppia essenza dell'oggetto viene colta appoggiandosi a questa distinzione ma deve essere superata per assicurarne la comprensione.

Il modello appare sin qui presentato come prodotto conclusivo della sistematizzazione delle informazioni dedotte; tale lettura cela diversi aspetti tanto simbolici quanto applicativi connessi a questo concetto. In altri termini, il modello, come prodotto primo della rappresentazione, si configura come risoluzione di un paradigma legato, da una parte, alla dimensione gnoseologica, ovvero relativa

al processo critico, all'elaborazione di dati ed idee inerenti all'oggetto, dall'altra, alla dimensione tecnica, derivata dal codice utilizzato per rendere il modello intellegibile, innanzitutto per autore stesso<sup>22</sup>. Su questo binomio si basa l'inquadramento del concetto di modello di seguito proposto (paragrafi 1.3 e 1.4).

### 1.3. La dimensione astratta del modello

La dimensione simbolica del modello trascende l'ambito specifico di applicazione e si connette al significato teorico; in questo contesto, il modello si configura come l'immagine mentale interpretativa del mondo fenomenico. Qualsiasi sua rappresentazione esterna è un'immagine selettiva del modello mentale e andrebbe ad ogni modo distinta rispetto all'idea della forma<sup>23</sup> che si costruisce nella mente. Il passo che segue può fornire una lettura interessante del tema affrontato:

*«Si', sono cieco, - gli disse. - Ma ho in mente tutte le meraviglie del libro che ho dipinto in questi ultimi undici anni, ricordo ogni tocco di penna e di pennello e la mia mano sa disegnare a memoria senza che io debba vedere. Mio Khan, io posso dipingere per te il più bel libro mai visto fino a oggi. Perché i miei occhi ormai non possono più soffermarsi sulle brutture di questo mondo ed esserne di-*

*stratti, posso disegnare a memoria e nel modo più puro tutte le meraviglie di Allah». Uzun Hasan credette subito al grande maestro e questi non venne meno alla parola data e disegnò a memoria il libro più meraviglioso mai esistito al mondo per il suo sultano del Montone Bianco. Il mio nome è rosso, Orhan Pamuk*

Ciò che ha in mente il grande maestro è nient'altro che un *modello* della realtà. Relativamente all'esempio proposto, nel passo, il modello viene inteso come il risultato di un'operazione di sintesi ed analisi, è l'astrazione della forma generatrice ed è comunicativo del carattere dell'oggetto. Seguendo questa traccia, il termine parrebbe riferirsi essenzialmente a ciò che nasce nello spazio virtuale della mente e che adopera lo spazio della carta o quello informatico per manifestarsi. A questa accezione di modello ci riferiamo generalmente per descrivere delle intenzioni progettuali (modello predittivo) o delle ipotesi di una realtà mai esistita o non più visibile (modello ricostruttivo)<sup>24</sup>. In adiacenza a queste due interpretazioni del concetto di modello, se ne potrebbe scorgere una terza: il grande maestro crea nella sua mente il modello della realtà a partire dall'osservazione attenta della stessa. In questo senso, la mente *rappresenta* (modello restitutivo) l'oggetto reale individuando degli specifici caratteri distintivi (Fig.1.8). Tra le diverse tipologie di modello si innesca un processo

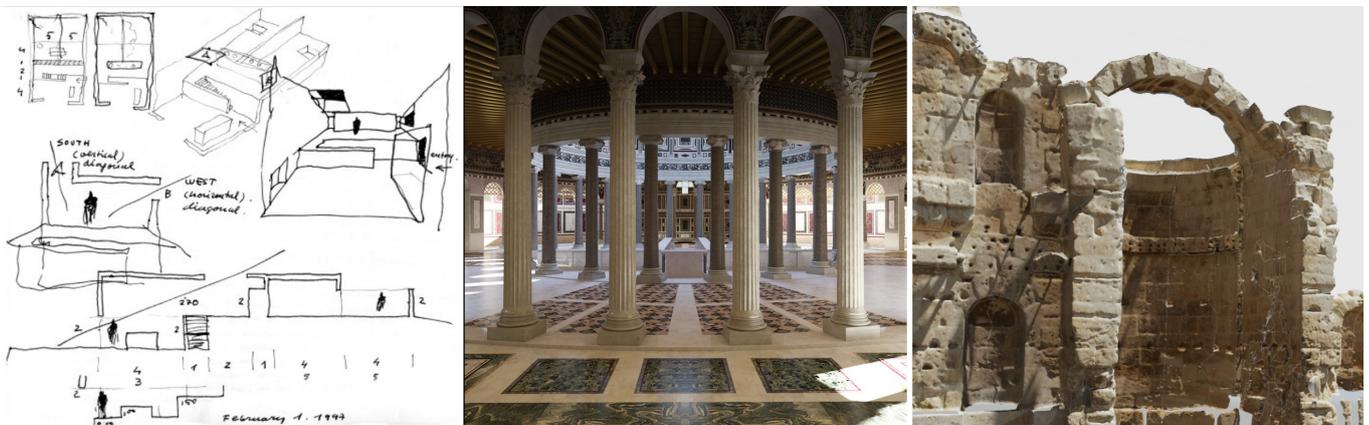


Fig. 1.8 Da sinistra: modello predittivo (disegno concettuale di Alberto Campo Baeza per stand di Pibamarmi), modello ricostruttivo (ricostruzione della basilica di Santo Stefano Rotondo, progetto Katatexilux), modello di rilievo (ninfeo di Amman in Giordania).

cognitivo in continua evoluzione. Applicando questo paradigma all'architettura, ci riesce semplice comprendere quanto l'architetto utilizzi in maniera organica e fluida questi strumenti per conoscere, plasmare e comunicare la realtà. Se quindi, da una parte, il modello sintetizza e riduce, in un certo senso, la realtà, dall'altra ne estende il valore. Questa estensione avviene nella misura in cui il modello è il manifesto di alcune delle proprietà dell'oggetto. Tali proprietà diventano confrontabili con le stesse ravvisate in altrettanti modelli. In altri termini, due fenomeni possono essere tra loro comparati solo se si riconosce in loro una o più proprietà comuni, il modello sintetizza ed assimila queste proprietà, individua dei parametri di confronto tra i due fenomeni e rende quantificabili le qualità riconosciute<sup>25</sup>.

#### 1.4. La dimensione applicativa del modello

Mentre da un punto di vista concettuale e teorico la trattazione del modello è affrontata cercando di coglierne le sue diverse sfaccettature, dal punto di vista applicativo, è opportuno restringere notevolmente il campo di trattazione ponendo l'attenzione sui modelli morfometrici tridimensionali informatici. Questa restrizione è funzionale a mettere a fuoco con più chiarezza le problematiche caratterizzanti dell'ambito di ricerca. I modelli informatici tridimensionali sono generalmente ricondotti a due note categorie: modelli discreti e modelli continui<sup>26</sup>. I primi sono spesso prodotti grazie ad una operazione di campionatura ed interpretazione della realtà. Le nuvole di punti sono gli esempi più rappresentativi della base dati da cui sono generati modelli discreti e numerici<sup>27</sup>. Questo percorso di conoscenza è quello prodotto tramite il rilievo. La componente fisica dell'oggetto, rispetto alla scala di approfondimento che qui si intende trattare, è assimilabile ad un continuo spaziale, su di esso interviene innanzitutto un'operazione di sintesi, poi di riduzione e, eventualmente, di proiezione<sup>28</sup>. Il passaggio di sintesi definisce una trasformazione necessaria tra la realtà continua ed il suo surrogato digitale, discreto. In riferimento a metodologie di acquisizione tradizionali (rilievo diretto, rilievo topografico), questo passaggio si serve dell'atto critico del

rilevatore. Al contrario, in riferimento alle metodologie di acquisizione massiva (rilievo laser scanner, *Structure from Motion*), la sintesi è controllata da parametri definiti non vincolati alla lettura dell'oggetto<sup>29</sup>. In riferimento all'acquisizione massiva tridimensionale dei dati, l'operazione di riduzione è potenzialmente applicata individuando, coerentemente con l'incertezza della misura, un livello di dettaglio di riferimento, rispetto ad esso la nuvola di punti può essere campionata per consentire un livello di lettura adeguato. Questa operazione è spesso automatica e, dal punto di vista cognitivo, poco interessante. La nuvola di punti viene indistintamente ridotta agendo esclusivamente sul parametro quantitativo. La stessa operazione può invece discendere da un processo di selezione critica. In questo caso, la nuvola di punti può potenzialmente accogliere indefinite scale di rappresentazione, ognuna scelta criticamente rispetto al riconoscimento degli elementi costitutivi dell'oggetto e diventare modello numerico. In tal modo, il processo di riduzione ha come unico limite di riferimento il parametro di incertezza definito rispetto alle metodologie di rilievo utilizzate ed alla loro integrazione (Fig. 1.9). L'operazione di proiezione e sezione consente, infine, di agire sulla natura dimensionale del modello per trasferire i caratteri spaziali rispetto ad un piano bidimensionale trasformandolo, difatti, in un modello 2D. Questo passaggio è significativo ed imprescindibile rispetto ai modelli prodotti a partire da metodologie di acquisizione tradizionali; invece, esso acquisisce un significato diverso rispetto al processo di conoscenza tutto interno ad uno spazio virtuale tridimensionale. In un simile contesto, tale fase va letta come solo una delle possibili operazioni sul modello, decisamente utile ad un certo tipo di comprensione di geometria e proporzioni, ma non vincolante alla conclusione dell'iter di conoscenza. Si pensi, ad esempio, a certi tipi di analisi quantitative sviluppate mediante algoritmi computazionali; in tal caso, il risultato può essere esso stesso visualizzato tridimensionalmente o venire sintetizzato in grafici e tabelle. In sostanza, la conclusione del processo di conoscenza dipende da un'operazione di riconoscimento necessaria a trasformare i dati in informazioni. Ciò avviene attraverso la scomposizione semantica e la segmentazione dei dati. Nel verso del rilievo, tali operazioni sono



Fig. 1.9 La multirisoluzione sui modelli numerici: confronto tra acquisizione integrata per la gestione di diversi livelli di dettaglio (Progetto Basilica Iulia, 2019 nota 3, pag.108) e le scale di rappresentazione grafica per i modelli 2D (elaborazione in scala 1:100, 1:50, 1:20 della Beach tower, Kyrenia, Cipro)

conducibili prevalentemente a posteriori.

In riferimento ai modelli continui, le elaborazioni necessarie sono di tipo analitico e riguardano il processo di conoscenza legato alla progettazione ed alla ricostruzione. Il modello, in questo caso, si compone per aggregazione progressiva delle singole parti riconosciute e studiate, la scomposizione semantica avviene prima della costruzione del modello<sup>30</sup>. I caratteri generativi della forma sono materializzati nello spazio virtuale agendo tramite punti e rapporti proporzionali di controllo, grafici o parametrici, e definendo il vincolo di continuità tra le parti. A questo ambito appartengono tanto i modelli di superficie costruiti tramite curve generatrici e direttrici, primitive NURBS, quanto i modelli solidi e, in un'accezione più estesa, tutti i modelli

costruiti imponendo vincoli di relazione tra gli elementi e controllati mediante parametri (modelli parametrici).

Così come per la costruzione di modelli discreti, anche in questo caso, le tre fasi di costruzione del modello (sintesi, riduzione e proiezione) assumono un carattere specifico in riferimento agli strumenti ed alle metodologie di indagine adottate. In tal senso, l'operazione di sintesi è quella fondante dell'intero processo, il modello mentale viene elaborato per individuare la genesi semantica degli elementi e delle loro relazioni. A questo punto, il processo di riduzione perde la sua connotazione relativa al fattore di scala e si vincola a dei livelli di sviluppo differenziati. Questa definizione non è casuale, i *Level of geometry* (LOG)<sup>31</sup> impostati in relazione alla metodologia di *Information Mo-*

*deling* costituiscono un riferimento del grado di dettaglio grafico del modello (Fig. 1.10).  
 Il rapporto intrinseco tra la scala di rappresentazione con

il relativo errore di graficismo e la scala del modello tridimensionale appare tanto evidente da aver suggerito un

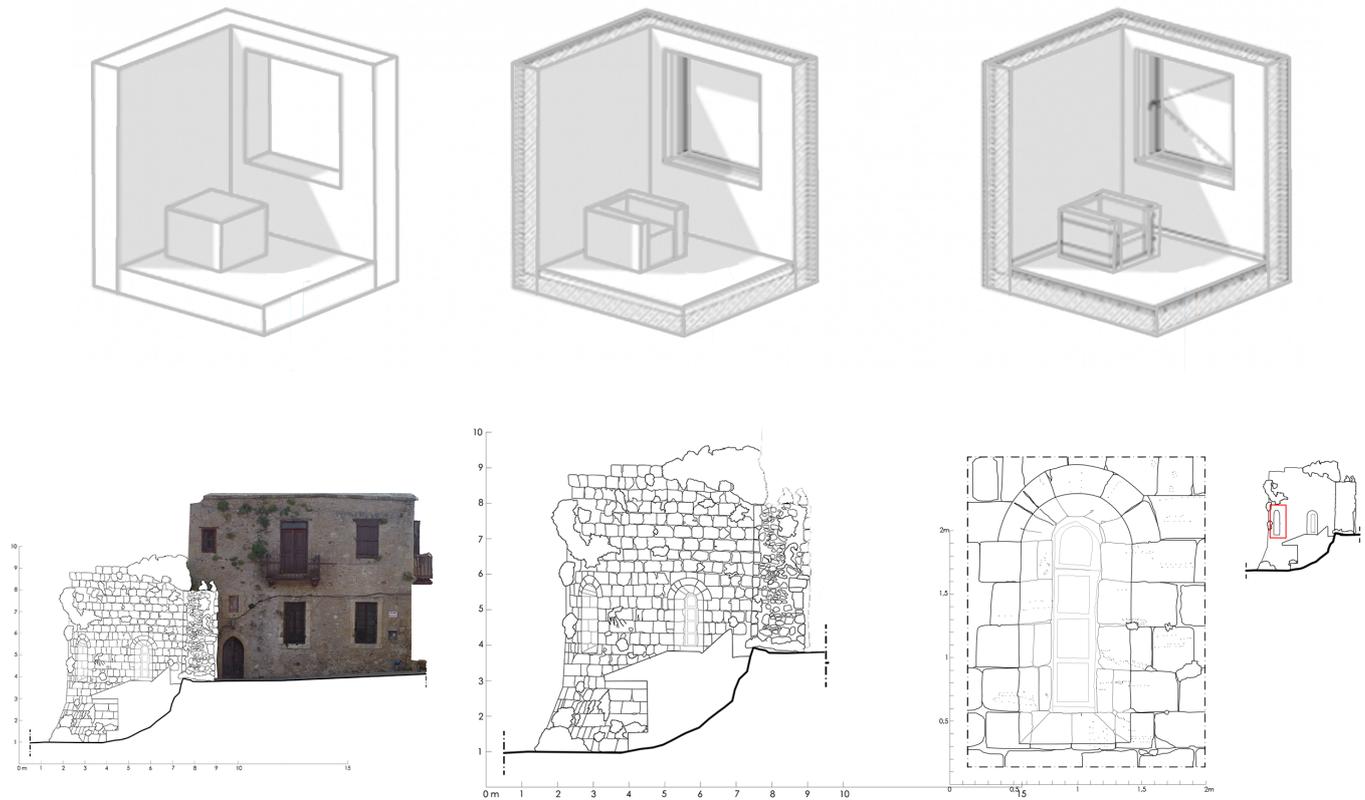


Fig. 1.10 La multirisoluzione sui modelli continui: confronto tra i diversi LOG normati dalla UNI:11337 (<https://www.bimperia.eu/node/1005>) e le scale di rappresentazione grafica per i modelli 2D (elaborazione in scala 1:100, 1:50, 1:20 della Beach tower, Kyrenia, Cipro).

nuovo acronimo; il *Grade of Accuracy* (GOA)<sup>32</sup> introdotto proprio in funzione dei processi *Scan-to-BIM*<sup>33</sup>. A questo parametro, si aggiunge quello pertinente il *Level of Information* (LOI)<sup>34</sup> nato per quantificare e codificare il potere informativo del modello. Questi aspetti sono un indice di quanto il controllo del dato input vada nella direzione di una codifica sempre più accurata ed estesa per consentire l'interoperabilità tra soggetti oltre che tra modelli. Su questa linea, rispetto alla modellizzazione del patrimonio costruito, nasce l'esigenza di gerarchizzare le informazioni rispetto all'affidabilità metrica tra gli elementi modellati e

quelli rilevati; gli studi condotti in tal senso hanno portato all'introduzione nel settore del *Level of Reliability* (LOR)<sup>35</sup>. In questo senso, si intercetta facilmente un parallelismo concettuale tra le scale di rappresentazione con cui siamo abituati a ragionare ed il più recente consolidamento dei LOD nell'ambito della modellazione. L'operazione di proiezione e sezione, così come in riferimento ai modelli discreti, consente di estrarre e leggere solo specifiche proprietà dell'oggetto; a partire dal modello, l'estrazione di tabelle, grafici e testi completano in maniera significativa il quadro conoscitivo.

### 1.5 Le ragioni dell'integrazione

L'immagine del modello come rappresentazione tematica della realtà si è fin qui delineata insistendo su un piano concettuale e, per certi versi, autonomo rispetto ai modi ed agli strumenti adoperabili. Il salto logico successivo porta a chiedersi se un certo livello di consapevolezza metodologica (modi) e tecnologica (strumenti) possa potenziare i ruoli del modello e conferirgliene di nuovi. Su questo fronte, si va consolidando un quesito: se ogni modello è rappresentazione di un qualche carattere dell'oggetto a cui si riferisce, cosa succede "sommando" i vari ed eterogenei modelli "parziali"?

L'interrogativo, apparentemente retorico, porta con sé una serie di problematiche ancora aperte legate al tema delle interazioni costruttive tra modelli nello spazio virtuale. Il primo ordine di questioni riguarda il "perché" delle integrazioni, il secondo riguarda invece il "come" queste integrazioni possano avvenire.

Il "perché" delle integrazioni trova la sua radice nella necessità programmatica di raggiungere la *conoscenza profonda*<sup>36</sup> dell'oggetto. I dati sono tra loro in un rapporto di complementarietà, riuscire ad individuare i legami significativi che intercorrono tra loro è necessario alla comprensione. L'integrazione di dati eterogenei investe un numero quanto mai disparato di settori di ricerca, dall'ambito biomedico a quello delle *digital humanities*, la possibilità di avere accesso in maniera sincronica a letture diverse dell'oggetto è significativa per diversi aspetti. Innanzitutto, l'oggetto di indagine acquisisce un valore di unicità: avendo la possibilità di accedere a disparati fattori descrittivi, l'oggetto assume una configurazione propria in ragione della quale ogni dato inserito modifica l'insieme e contribuisce alla comprensione globale. Ciascuna modalità di indagine riferisce una *diversità*, ossia un valore aggiunto complementare agli altri capace di creare dei vincoli logici e concettuali necessari ad inquadrare il tutto; in aggiunta a ciò, la presenza di una rete semantica di informazioni tra loro interoperabili garantisce la trasferibilità della conoscenza e favorisce l'interdisciplinarietà della ricerca. Il concetto di analisi integrata è per gli esseri umani innato, siamo abituati a fare esperienza del reale combinando con

disinvoltura i nostri *sensori*, ovvero i nostri sensi, e conoscendo il mondo esterno attraverso essi; è in questa chiave che lo sviluppo sempre crescente di studi relativi alla *data fusion*<sup>37</sup> assume un ruolo di prim'ordine indipendentemente dall'ambito di applicazione<sup>38</sup>. Sebbene lo sviluppo tecnologico nell'ambito del *decision making* sia ancora ben lontano da raggiungere livelli comparabili a quelli attuati dalla mente umana, il tema è di grande interesse in relazione alla *datafication*<sup>39</sup> a cui si sta assistendo.

Riguardo il "come", il tema dell'integrazione va declinato in relazione al patrimonio costruito ed alle tipologie di dati ed informazioni ad esso connesse. *Potere accedere a una grande mole di dati non significa necessariamente poter assurgere a un elevato livello di conoscenza*<sup>40</sup>, è per questa ragione che le procedure informatiche, da sole, non possono sopperire ad un'analisi più profonda capace di distinguere il segnale (dati significativi) dal rumore di fondo (insieme di dati). In quest'ottica, ed in riferimento a quanto sopra delineato rispetto alla documentazione intrinseca ed estrinseca, si configura un possibile approccio da percorrere. Questa strada ha l'obiettivo di offrire un criterio di demarcazione al quale potersi riferire per costruire modelli conoscitivi integrati. La distinzione tra un modello intrinseco che conservi, per certi versi, il carattere di "oggettività" ed uno estrinseco, interpretativo, può difatti fornire i presupposti concettuali e decisionali nell'individuazione dei processi di integrazione da perseguire. In altre parole, lo studio dei processi di integrazione si avvale delle seguenti premesse:

- Il processo conoscitivo si sviluppa seguendo tre livelli: dati, informazioni e modelli.
- Lo spazio virtuale tridimensionale è idoneo ad accogliere dati, informazioni e modelli eterogenei per consentire la loro fruizione e visualizzazione.
- Lo spazio virtuale tridimensionale di riferimento per i modelli discreti è numerico.
- Lo spazio virtuale tridimensionale di riferimento per i modelli continui è matematico o parametrico.
- Tra i due sistemi esiste un rapporto di continuità e di scambio, tale rapporto è tema di ricerca.

Ancora in relazione al "come" i principi di integrazione

vadano perseguiti, divengono significativi i temi relativi alla trasparenza delle procedure, all'accessibilità dei dati ed alla misura in cui tanto le procedure quanto i dati siano esplicitati all'interno del modello conoscitivo. Sulla questione è possibile intercettare diverse carte di intenti nate con l'obiettivo di individuare un approccio metodologico per rendere tracciabili le operazioni interpretative e soggettive e distinguere da esse quelle con un diverso livello di affidabilità<sup>41</sup>. Il problema della trasparenza dell'informazione in ambito informatico è oramai tanto pervasivo da aver richiesto una trattazione specifica anche in am-

biti apparentemente distanti come quelli della filosofia e dell'etica. In questo contesto, si parla di "qualità dell'informazione"<sup>42</sup> e della possibilità di individuare categorie specifiche in grado di valutarla. Aldilà dei contenuti di carattere più generale e della nomenclatura utilizzata, in tale contesto, si pone l'accento sul come l'utilizzo che si fa di un dato o di un'informazione condizioni la sua affidabilità. In altri termini, il potere informativo di qualsiasi elemento varia in relazione all'adeguatezza rispetto al contesto di indagine (Fig. 1.11).

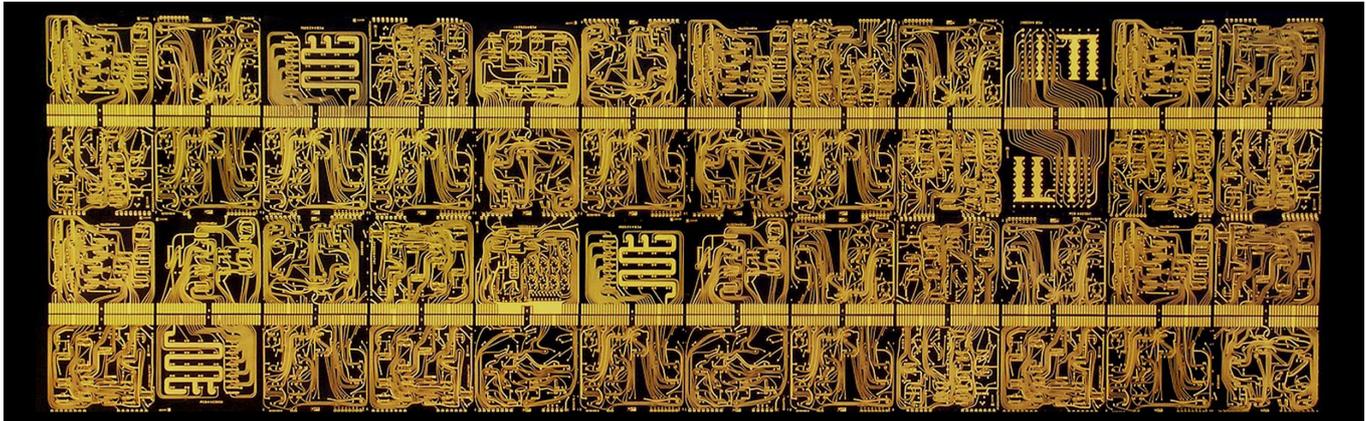


Fig. 1.11 Theo Kamecke, Az-Tech. Circuiti in oro 24 carati prodotti negli anni '60. Il depotenziamento dell'informazione: il circuito elettronico è uno dei simboli più iconici dell'informazione digitale, il suo uso decontestualizzato ne depotenzia il ruolo primario per conferirgliene un altro.

Questo concetto è facilmente trasferibile al tema delle trasformazioni dimensionali e morfologiche del dato di partenza, necessarie, talvolta, a garantire l'integrazione in sistemi più ampi; è ravvisabile in tal senso il rischio di voler applicare criteri di indagine assoluti che non tengano conto del carattere distintivo di ogni elemento.

La risposta applicativa a questa esigenza collettiva è avvenuta seguendo diversi approcci. La modellazione 3D parametrica basata sui *Visual Programming Language* (VPL), ad esempio, consente di mantenere traccia di tutte le operazioni condotte sulla forma, sui contenuti e sulle sorgenti dati utilizzate (Fig. 1.12). Ciò rende la navigazione del modello nel suo spazio tridimensionale solo uno dei possibili modi di visualizzarlo ed investigarlo, l'intera struttura del

flusso di lavoro è sempre ispezionabile e riconducibile ad una struttura logica e grafica esplicita<sup>43</sup>. Questo strumento offre un modo per poter accedere alle scelte operative del modellatore e per scomporre il modello in una serie finita di operazioni. Riguardo, invece, il tema dell'accessibilità alla banca dati da cui il modello viene prodotto, la questione interseca gli studi relativi alla strutturazione semantica dei contenuti in database. In tal senso, una possibile declinazione della problematica avviene utilizzando proficuamente i sistemi di *Building Information Modeling* (BIM). Tale metodologia si predispone ad integrare, nel processo costruttivo del modello, il sistema di relazioni concettuali tra i dati e consente di "predisporre un ambiente in cui la documentazione di ogni decisione valutativa, deduttiva,

interpretativa o creativa fatta nel corso della procedimento di visualizzazione digitale sia resa disponibile in maniera tale che le relazioni tra le fonti della ricerca, la conoscenza implicita, i ragionamenti espliciti e i risultati basati sulla visualizzazione possano essere compresi” (*London Charter*, 4.6). Per questa ragione, anche rispetto allo studio del patrimonio costruito, la modellazione solida parametrica ha conosciuto notevoli sviluppi mediante il BIM e va gradualmente imponendosi come standard operativo per la condivisione di dati multidimensionali tra tutti gli studiosi coinvolti nel processo conoscitivo. A questo scopo, il BIM trova un suo proficuo sviluppo nell’implementazione di una serie di funzioni di collegamento tra l’apparato ontologico interno sviluppato rispetto al modello e gli strumenti di codifica semantica standard (paragrafo 3.2.1). I due approcci appena introdotti sono tra loro operativamente interlacciati<sup>44</sup>, ciò definisce un potenziale flusso di

lavoro capace di mettere a sistema la possibilità di operare in uno spazio tridimensionale navigabile e parametrico, quella di impostare delle query rispetto ad un database di riferimento e quella di rendere esplicita l’intera procedura di costruzione tanto modello quando della banca dati a cui si connesso.

Con questi presupposti, si esplica “come” l’integrazione debba avvenire e, in aggiunta, cosa vada salvaguardato nell’intero processo di trasformazione. La metodologia BIM si presta ad integrare ed a rendere interoperabili tanto le proprietà intrinseche dell’oggetto quanto quelle estrinseche. Questo passaggio è determinante per la conclusione di un percorso continuativo che, partendo da una prima distinzione concettuale relativa a due approcci diversi alla conoscenza, trova il proprio epilogo nell’individuazione di un sistema espandibile e circolare.

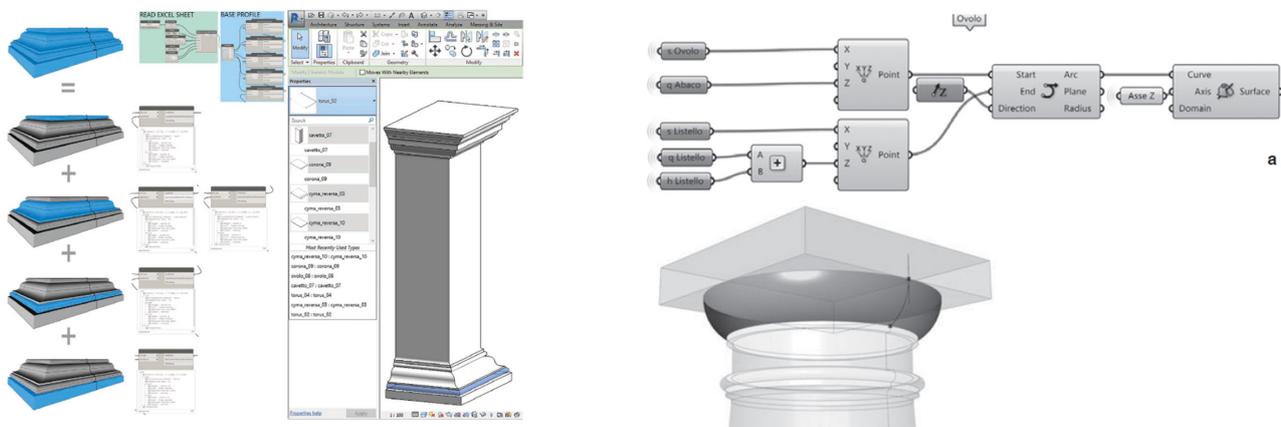


Fig. 1.12 Modellazione parametrica delle componenti architettoniche tramite VPL. Giovannini, 2017 (sinistra), Valenti, 2013 (destra)

## 1.6 Le fasi della ricerca

La ricerca presentata si sviluppa seguendo tre fasi di indagine progressive. Ogni fase del processo ha obiettivi specifici che consentono di strutturare lo studio secondo livelli di approfondimento crescenti.

- Fase compilativa: la prima fase di ricerca è di carattere esplorativo, lo studio porta in rassegna le tipologie di dato

diffuse nell’ambito dei beni culturali per l’individuazione delle qualità rappresentative di ogni tipologia. Questa fase è propedeutica alla costruzione di un quadro generale dello stato dell’arte in termini di dato input. L’operazione non ha pretesa di esaustività, le tipologie di dato pertinenti l’ambito di ricerca sono in continua evoluzione e mutazione, ciò è vincolato ad uno sviluppo tecnologico ed informatico che interessa l’intero sistema di procedure software e com-

ponenti hardware connesse all'acquisizione ed alla trasformazione dei dati. Sebbene sia noto che qualsiasi sistema rigido di catalogazione è metodologicamente fallimentare, l'approccio seguito pone l'accento su tipologie specifiche di dato selezionate, da una parte, in riferimento a quelle inquadrare nell'ambito della rappresentazione del patrimonio costruito e, dall'altra, rispetto ai settori di ricerca, dalla diagnostica al progetto di restauro, coinvolti nell'intero processo conoscitivo. Questa scelta è guidata dalla convinzione che l'integrazione di processi di elaborazione ed analisi sia strettamente correlata alla conoscenza profonda della tipologia specifica ed alla disamina puntuale dei caratteri del dato e del tipo di informazioni potenzialmente estraibili. La prima fase di studio si conclude con la messa a punto di un quadro sinottico relativo alle tipologie di dato di interesse nel settore individuato.

- Fase analitica: a partire dall'individuazione di alcune tipologie caratteristiche, si pone l'accento sulle modalità di connessione logica e spaziale tra dati eterogenei. In questa fase, riferendosi alla panoramica sviluppata precedentemente, saranno individuati gli aspetti processuali più significativi per condurre la loro integrazione all'interno di spazi tridimensionali discreti o continui. Il primo obiettivo di questa operazione è, quindi, lo studio delle possibili associazioni tra i dati, multidimensionali ed eterogenei, con le due tipologie di spazi e modelli virtuali individuate. L'analisi è condotta in funzione della determinante trasformazione del dato in informazione che avviene proprio fornendo un contesto virtuale tematico al dato di partenza.

- Fase di sviluppo: applicazione dei processi per l'integrazione sostanziale di dati ed informazioni precedentemente analizzati per la produzione di modelli digitali evoluti. Il modello digitale evoluto si configura come uno strumento d'indagine organico capace di predisporre a più letture specifiche e di fornire informazioni sistematiche; in questo modello ogni dato si rafforza grazie alla compresenza nel sistema di altri dati, ogni porzione sviluppa un rapporto di dipendenza semantica dal tutto. Questa fase si conclude con la messa in opera sistematica delle procedure di integrazione previste dagli standard esistenti, integrando diverse tipologie di dato e consentendone una lettura multilivello e multiscale. Il modello così configurato è inter-

rogabile e si predispose come banca dati implementabile di supporto per l'interdisciplinarietà della ricerca.

L'obiettivo della ricerca è quello di predisporre una metodologia di indagine capace di innescare una continuità di processo tra i prodotti della conoscenza derivati dalla discretizzazione della realtà e quelli generati da processi interpretativi.

## Note

- 1 In riferimento allo sviluppo di sistemi informativi legati ai beni culturali, si veda De Luca, 2011; Bentkowska-Kafel, 2012; Lorenzini, 2016; Soler et Al 2017
- 2 Questa metodologia di indagine si applica tanto a *dataset* già acquisiti individuando specifici *pattern* presenti quanto alla creazione di strutture semantiche pensate per accogliere e catalogare dati acquisiti in maniera continuativa. Nell'ambito del patrimonio culturale digitale, strumenti di *machine learning* e di text mining diventano sempre più diffusi per automatizzare o semi-automatizzare processi altrimenti estremamente dispendiosi.
- 3 In riferimento alla trattazione qui presentata, si intenderà per dato 1D, ossia il dato unidimensionale, quello di tipo testuale alfanumerico, questo dato non è di tipo iconico ma possiede un valore documentale necessario a completare ed integrare l'apparato informativo dell'oggetto. Ad esso si connette l'*ekphrasis*, un certo tipo di descrizione testuale dotata di una forza espressiva tale da evocare nel lettore un modello mentale chiaro dei caratteri figurativi dell'oggetto, una trasposizione dal visuale al verbale. Cfr Ippolito, Atteni, 2016; Centofanti, 2018
- 4 Un esempio di riferimento è il SITAR, (Sistema Informativo Territoriale Archeologico di Roma), il portale consente la fruizione di una banca dati tramite WebGIS e Web-DB relativa alle indagini archeologiche condotte sul territorio comunale ed ai beni rinvenuti. Il progetto è orientato verso i principi di trasparenza, interoperabilità e riutilizzabilità dei dati immessi in rete. Il Sistema ha il principale obiettivo di fornire un contesto storico-topografico più ampio per i beni archeologici costruendo un sistema gestionale di supporto alla ricerca scientifica. Per la presentazione del progetto, si veda Serlorenzi, 2012
- 5 Piattaforma di visualizzazione online di contenuti testuali e grafici inerenti prevalentemente il settore dell'arte, la piattaforma consente anche la fruizione virtuale di collezioni tematiche di oggetti digitali (<https://www.europeana.eu/portal/en>)
- 6 Piattaforma di visualizzazione di modelli tridimensionali filtrati per categorie di riferimento. La piattaforma ha recentemente aperto una sezione dedicata alla vendita di modelli 3D. I modelli sono resi accessibili grazie all'utilizzo dello standard Web GL per la loro configurazione e la loro visualizzazione avviene mediante l'intero caricamento del modello sul dispositivo dell'utente (non implementa una modalità multirisoluzione) (<https://sketchfab.com/>)
- 7 La piattaforma nasce come parte del FP7 EU-INFRA Ariadne project, sviluppa la possibilità di pubblicare via web contenuti specifici inerenti il patrimonio culturale e consente il caricamento progressivo dei dati, questo sistema è connesso ad una modalità multirisoluzione di visualizzazione che ottimizza la visualizzazione del modello ed i tempi di caricamento (<http://visual.ariadne-infrastructure.eu/browse>)
- 8 Ne è un esempio il progetto "TimeMachine" (<https://www.timemachine.eu/>) che mira a sviluppare una risorsa interattiva Open-Access partendo dalla digitalizzazione di fonti archivistiche ed arrivando a produrre modelli 3D ricostruttivi delle principali fasi storiche di regioni urbane dell'Europa. Una prima applicazione è stata realizzata su Venezia utilizzando e digitalizzando tutto il materiale d'archivio reperito.
- 9 Sul tema delle qualità geometriche dello spazio fisico e della loro rappresentazione, si veda Bianchini, 2012. Pp. 33-35.
- 10 Ackoff, 1989, *Data are symbols that represent the properties of objects and events. Information consists of processed data, the processing directed at increasing its usefulness*. L'autore identifica una piramide conoscitiva a quattro fasi: dato, informazione, conoscenza, saggezza (piramide DIKW)
- 11 Per una più ampia trattazione riguardo le diverse interpretazioni terminologiche, si veda Zins, 2007. L'articolo è un compendio di 130 definizioni di dato, informazione e conoscenza formulate da 45 studiosi della Information Science pubblicato a conclusione dello studio "Knowledge Map of Information Science" condotto dal 2003 al 2005.
- 12 In relazione alla molteplicità dei caratteri o delle proprietà degli oggetti, Vittorio Ugo propone un esempio. Egli tenta di descrivere la forma di una lente biconvessa astraendone alcune sue caratteristiche (l'immagine circolare prodotta osservandola frontalmente, l'immagine ellittica prodotta da un centro di proiezione inclinato rispetto alla superficie, la caratteristica sferoidica o paraboloidica della superficie ecc.). Ben presto, l'autore evidenzia la sostanziale impossibilità di rendere in maniera soddisfacente ciò che si vuole intendere per "forma della lente" (Ugo, 1994, p. 26). Questo esempio pone il problema sull'essenziale incomensurabilità delle proprietà di un oggetto.
- 13 Il concetto di icona viene introdotto ad inizio '900 da Charles S. Peirce (1906), per esso l'autore intende un tipo specifico di segno che partecipa ai caratteri dell'oggetto. Il termine è poi ripreso da Morris che definisce l'icona come il segno dotato delle stesse proprietà dell'oggetto. A Moles si deve il documento conclusivo a un seminario del 1965 che riporta un catalogo dei livelli di iconicità, suddiviso in 12 gradi. Le categorie usate da Moles per classificare le rappresentazioni schematiche erano categorie empiriche, nate cioè da un'operazione tassonomica (una popolazione di esemplari reali è stata in prima istanza suddivisa in sottogruppi secondo un generico criterio di somiglianza). Nel medesimo filone si colloca uno studio dello stesso Anceschi che si propone di applicare la categorizzazione empirica di Moles all'illustrazione di divulgazione scientifica prodotta a stampa. Dell'elenco delle 12 categorie, veniva impiegata la parte terminale, cioè le 7 classi di maggiore astrazione.
- 14 La morfometria è definita come *lo studio quantitativo delle for-*

- me del rilievo terrestre che si prefigge lo scopo di associare misure o indici numerici alle forme fisiche e ai fenomeni che si presentano sulla Terra, occupandosi non soltanto delle misurazioni di lunghezze, altitudini, aree, ecc. ma anche di ottenere, mediante opportune operazioni su tali dati, altri indici numerici (Dizionario delle scienze fisiche Treccani online s.v. "morfometria"). In anatomia, la morfometria basata sui voxel (VBM) è una tecnica di neuroimaging utilizzata per estrarre le dimensioni e l'estensione spaziale di aree del cervello. In maniera comparabile, nell'ambito della scienza della rappresentazione, il termine viene utilizzato per identificare l'insieme delle proprietà geometriche e formali (morfologiche) in riferimento alla loro natura quantitativa e commensurabile (metriche).
- 15 Sull'utilizzo del modello come matrice informativa si veda Brusaporci, 2013, p. 22 e Unali, 2009, p. 35. Maurizio Unali identifica tre dimensioni della rappresentazione digitale, una di queste è quella *mediatica-informativa* in cui lo spazio della rappresentazione è allestito per innescare processi informativi multidirezionali
  - 16 Il primato dello spazio tridimensionale come *conditio sine qua non* per la geometria viene espresso da Kant, di un qualunque oggetto, nella sua rappresentazione, noi possiamo prescindere dalla sostanza, dalla forza, dalla divisibilità, dal colore ecc. ma non possiamo prescindere né dall'*estensione* né dalla *forma* (Kant. I. ed. 1976. *Critica della ragion pura*. Milano, Adelphi edizioni. P. 76 )
  - 17 Sul tema del Modello Integrato (MI) e delle sue potenzialità rispetto a tutti gli altri modelli parziali, si veda Valenti 2004 pp. 59-62
  - 18 L'utilizzo di uno spazio virtuale tridimensionale di riferimento per l'interoperabilità è oramai assimilato nell'ambito del *Building Information Modeling*, in tale contesto, si parla *Common Data Environment* (CDE) per fare riferimento ad un unico ambiente di lavoro capace di accogliere tutti gli operatori coinvolti nel processo edilizio. Il concetto di CDE ben si presta ed essere utilizzato anche nell'ambito del Cultural Heritage con lo stesso obiettivo: garantire l'integrazione dei dati e l'interoperabilità tra gli attori del processo. Dal punto di vista normativo, il CDE è definito dalla norma britannica PAS 1192, Questo concetto è stato successivamente ripreso nelle norme italiane della serie UNI 11337, dove ha assunto il nome di *ambiente di condivisione dati*, sinteticamente indicato con ACDat.
  - 19 Carbonara, 1996, Vol II, pp. 419-422
  - 20 De Angelis D'Ossat, 1982, pp. 5-10
  - 21 Sul tema della distinzione tra oggettività e soggettività nelle operazioni di rilievo, si veda Bianchini, 2012
  - 22 La duplice istanza della Rappresentazione è trattato in Ugo, 1994, p.12. L'autore, a tal proposito, riporta la distinzione terminologica tra le due possibili traduzioni in tedesco del lemma "rappresentazione": *Vorstellung* (struttura eminentemente concettuale e formale) e *Darstellung* (immagine, disegno in senso grafico da percepire visivamente)
  - 23 Migliari, 2004, p. 8
  - 24 Cfr Centofanti, 2018. L'autore individua tre modelli di rappresentazione: quello restitutivo (da rilievo), quello "ricostruttivo" (di una realtà mai esistita e/o di intenzioni progettuali) e quello "predittivo" (restauro, progetto).
  - 25 Il concetto del valore del modello come estensione della realtà viene espresso da Giuseppe Fusco (1986, pp. 82). L'autore così definisce il rapporto tra rappresentazione e modelli: Rappresentare un oggetto non vuol dire duplicarlo né riprodurlo in un diverso contesto una indescrivibile "totalità", ma solo astrarne alcuni peculiari aspetti correlandoli in un modello; ciò che comporta per un verso una "riduzione", un impoverimento dell'oggetto rappresentato e, per l'altro, una sua "estensione", un "arricchimento" che consegue dal confronto con altri oggetti.
  - 26 Dal punto di vista concettuale, questo dualismo è propedeutico alla comprensione dei "modi" del modello, al contrario, da un punto di vista meramente operativo informatico, la visualizzazione di modelli tridimensionali informatici non può prescindere da una loro discretizzazione, questo passaggio è denominato tassellazione e genera modelli numerici processabili dalla GPU dei computer.
  - 27 Migliari distingue due diversi metodi di rappresentazione informatica: quella numerica e quella matematica. La prima descrive l'oggetto attraverso coordinate, in modo discontinuo per mezzo di un numero finito di punti. La seconda, invece, lo descrive con continuità per mezzo di equazioni. (Migliari, 2008)
  - 28 Migliari, 2001
  - 29 In riferimento al passaggio da un tipo di acquisizione dati "selettiva" ad una "massiva", il tema della trasposizione dell'atto critico dalla fase di acquisizione dei dati a quella di elaborazione è trattato in Bianchini, 2014; Docci & Bianchini, 2016
  - 30 Brusaporci, 2011.
  - 31 Cfr voce di glossario
  - 32 Brumana, 2019.
  - 33 Cfr voce di glossario
  - 34 Cfr voce di glossario
  - 35 Il LOR è stato codificato di seguito alla ricerca condotta come tesi di dottorato dall'arch. Saverio Nicastro (*L'integrazione dei sistemi di Building Information Modeling nei processi di conoscenza del Patrimonio Culturale*. Dottorato in Storia, disegno e restauro dell'architettura – Sapienza Università di Roma, ciclo XXX – 2014/2017, Tutor Prof. Carlo Bianchini).
  - 36 Intesa nell'accezione teorica formulata da Descartes (Descartes, 1641) e riproposta, rispetto al tema del rilievo dell'architettura, in Docci et Al. 2011.
  - 37 Per una trattazione estensiva delle diverse definizioni ed accezioni relative alla *data fusion*, *information fusion* e *data integration*, si veda Boström et Al., 2007 e Khaleghi et Al, 2011
  - 38 Lahat, Adali, Yutten, 2015
  - 39 Il termine si riferisce alla crescita sempre più pervasiva del nu-

mero di dati che condiziona la nostra vita quotidiana, dall'utilizzo di dispositivi *ad hoc* per il monitoraggio delle nostre attività fisiche fino al proliferare di app specifiche per la quantificazione in forma di dato di qualsiasi aspetto fenomenologico.

40 Inzerillo et Al. 2016

41 Da questo punto di vista, la "London Charter" (<http://www.londoncharter.org/>), riassume una serie di obiettivi programmatici che favoriscano i principi di trasparenza e riutilizzabilità dei dati e che permettano di monitorare l'affidabilità delle ricostruzioni virtuali. A partire dal 2006, la carta è stata implementata a livello europeo sulle tematiche relative ai beni culturali ed agli strumenti di diffusione delle ricerche portate avanti in tal contesto. Nel 2010. La "Seville Charter" porta avanti il dibattito sul tema specifico della *virtual archaeology*.

42 Dall'inglese, Information quality, IQ, un settore di recente sviluppo che indaga l'etica dell'informazione e le sue implicazioni di carattere filosofico, procedurale e sociale. Per l'inquadramento di tale ambito di ricerca, si fa riferimento a Floridi, 2013.

43 Il VPL come metodo di modellazione esplicita è trattato in Calvano, 2019, pp.15-18

44 Per una panoramica relativa all'utilizzo integrato di procedure VPL, BIM e semantic web, si veda Giovannini, 2017, Emler, 2018, Quattrini et Al.,2018 e Yang, 2019



## 2. Input: i dati

Rispetto alla costruzione di sistemi conoscitivi complessi, il capitolo intende analizzare la cellula di base: il dato. In ambiente digitale questa materia prima è fluida, viaggia codificandosi e decodificandosi numerose volte, cambia attributi, forma ed aspetto in maniera non sempre esplicita. Questa fluidità ci consente, in una certa misura, di operare su di esso e di plasmarlo per renderlo eloquente ed intellegibile. Un'immagine fotografica è codificabile attraverso una sequenza lunghissima di numeri capaci di descrivere il colore e la posizione di ogni pixel, eppure, non è di certo questa l'immagine mentale che abbiamo quando si parla di fotografia; un codice a barre o un *QR code* contengono e trasmettono una serie di dati, eppure, non utilizzando il nostro stesso linguaggio, non possono essere decodificati in maniera diretta dal nostro cervello. Questa premessa non è casuale: la possibilità di visualizzare ed immaginare i dati in una configurazione spaziale e temporale coerente con la loro natura e con il nostro vocabolario sensoriale, influenza i processi interpretativi del reale e ne favorisce la comprensione.

A questo scopo, le determinanti trasformazione dei dati, necessarie alla produzione di informazioni, devono fornire un loro potenziamento dell'intellegibilità rispetto ad un contesto. A questo fenomeno sono legati due aspetti caratterizzanti. Il primo riguarda la possibilità procedurale di creare connessioni logiche e spaziali tra dati. Nell'ambito della rappresentazione digitale tale possibilità dipende dalla capacità di trasformare in maniera controllata il dato e dall'esistenza di una struttura informatica che sia compatibile coi prodotti di tale trasformazione. Il secondo, invece, riguarda l'atto interpretativo stesso e dipende dalla capacità di leggere e decodificare l'insieme di dati seguendo associazioni cognitive soggettive.

Il capitolo analizza le diverse tipologie di dati impostando dei criteri di classificazione basati essenzialmente sulla

qualità dimensionale. Questa proprietà di ogni tipologia diviene significativa per l'individuazione delle procedure logiche e informatiche più idonee a salvaguardare il carattere del dato stesso.

### 2.1 Tipologie per l'associazione ai modelli

All'interno dello spazio tridimensionale a cui ci riferiamo, è possibile attivare una connessione diretta tra il dato semplice ed il modello morfometrico di riferimento. Questa connessione avviene mediante la spazializzazione. L'operazione dipende dal carattere morfologico del dato, quindi, dalle sue dimensioni: dal dato testuale (1D) si passa per quello bidimensionale sviluppato su un piano XY di riferimento (2D) fino ad arrivare a quello rappresentativo di fenomeni tridimensionali e per questo legato ad uno spazio 3D.

Questo parametro influenza la tipologia di associazione dato-modello 3D da adoperare e da questo parametro, dipende, a sua volta, il livello di predisposizione all'interazione con modelli discreti numerici e/o con modelli continui, matematici e parametrici. Alle tre dimensioni canoniche ascrivibili alle caratteristiche geometriche dell'oggetto, si aggiunge la dimensione temporale: in questo ambito conferiscono dati descrittivi di fenomeni dinamici della realtà ed elaborati in funzione del cambiamento. Si pensi ad esempio alla lettura incrociata dello stato di degrado a distanza di una certa unità di tempo o ai fenomeni di assetamento strutturale, comprensibili solo attraverso un'analisi diacronica.

Nell'ambito del patrimonio costruito, la conoscenza dell'oggetto trascende la sfera di ciò che è immediatamente visibile. La natura tridimensionale dell'architettura è legata ad una certa consistenza fisica. Tale fisicità è sperimentabile solo in relazione alle superfici degli oggetti: il

principio di impenetrabilità dei corpi limita la nostra esperienza del reale al solo involucro esterno. Questo limite è costantemente messo in discussione grazie al sistema di indagini che assottigliano il confine rendendo visibile ciò che non lo è. In questo contesto, la copia virtuale dell'oggetto fisico si arricchisce ed implementa le informazioni di carattere metrico e geometrico con quelle riferite a ciò che c'è sotto la superficie.

In aggiunta ai dati testuali (1D), espliciti nella loro forma, un primo quadro di riferimento può essere tracciato distinguendo i dati relativi alle proprietà pertinenti la superficie degli oggetti, quelli riferiti a ciò che è al di là di essa e, infine, quelli che indagano l'oggetto nella sua volumetria. La prima categoria, quella dei dati "di superficie", si riferisce a quanto comunemente prodotto nell'ambito del rilievo, rientrano le metodologie di acquisizione 2D e 3D che sfruttano tanto i sensori attivi quanto quelli passivi per produrre dati relativi alla geometria, alle proprietà cromatiche ed alla risposta alla luce delle superfici. Alla seconda ed alla terza categoria appartengono, invece, le principali tecniche di *imaging*. Ciò comprende, quindi, tutto il panorama di indagini che, a partire da un'acquisizione strumentale, lavorano producendo immagini. Il termine è coniato dall'ambito medico e definisce una serie di metodologie avanzate, di supporto alla diagnostica, utilizzate per intercettare ciò che avviene oltre lo strato epidermico.

Con un parallelismo abbastanza evidente, questo complesso di analisi viene applicato, su diverse scale, in contesti molto eterogenei: dall'ambito dell'analisi strutturale degli edifici a quello archeologico fino ad offrire interessanti strumenti di indagine anche nel campo della storia dell'arte<sup>1</sup>. Specifiche tecniche di *imaging*, contrariamente a quanto il termine lascerebbe supporre, forniscono dati dal carattere tridimensionale seppure, generalmente, la loro visualizzazione avvenga attraverso immagini bidimensionali. Ciò evidenzia, ancora una volta, la forte potenzialità di uno spazio tridimensionale di fruizione che connetta tutti i dati concorrenti alla conoscenza profonda dell'oggetto.

## 2.2 Il testo come dato 1D

Questa tipologia comprende il complesso sistema di strut-

ture logiche che denotano le proprietà degli elementi, le procedure di acquisizione dei dati e quelle relative alla loro trasformazione. Fanno parte di questa tipologia il peso di un elemento costruttivo, il volume totale, l'orario di inizio della procedura di acquisizione, il report delle attività di rilievo, la descrizione delle procedure di campionatura e discretizzazione del dato così come il vocabolario lessicale utilizzato. Parliamo in tal senso di paradatai, metadati, *thesauri* e ontologie<sup>2</sup>. Ciascuno di questi termini fa riferimento ad una complessità strutturale diversa che, nell'ambito dello spazio dei modelli, assume un carattere del tutto distintivo. Nel nuovo secolo, la vecchia scienza dell'Essere, l'Ontologia, sta proliferando in nuova veste, ovunque si sente forte la necessità di organizzare le conoscenze in una forma concettualmente efficace, e di orientarsi in una società dell'informazione sempre più complessa, decisamente trasformata dall'avvento della cultura digitale<sup>3</sup>.

Nei paragrafi successivi (3.1.1 e 3.2.1) sarà approfondito il modo con cui queste peculiari tipologie di dato esplicano la propria funzione sia rispetto ai modelli discreti che rispetto a quelli continui. Nel contesto dello spazio 3D, queste tipologie risultano svincolate dal carattere testuale 1D poiché si accompagnano a tutti i dati costruendo l'infrastruttura logica che guida la lettura e la strutturazione dei modelli.

I paradatai sono definiti nella Carta di Londra come *le informazioni riguardanti i procedimenti umani del capire ed interpretare i dati stessi (...). Esempi di paradatai includono metodi di registrazione di note in un rapporto di laboratorio, descrizioni immagazzinate all'interno di un archivio strutturato che dimostra come l'evidenza è stata usata per interpretare un manufatto, oppure un commento sulle premesse metodologiche all'interno di una ricerca pubblicata*<sup>4</sup>. Più in generale, i paradatai raccontano il processo di acquisizione dei dati, essi vanno intesi come una sorta di diario di bordo, la loro condivisione assicura la ripetibilità dei processi, poiché fornisce all'interlocutore le condizioni di contesto per poter ripetere l'acquisizione usando la stessa procedura, o valutare se il dato abbia le caratteristiche necessarie per essere riutilizzato.

I metadati descrivono le caratteristiche del dato. In un'accezione più ampia, per "metadati" si intendono le proprietà

basilari relative al dato singolo, non includendo, quindi, il dato stesso. In ambito informatico, i metadati possono essere espressi mediante *tags* o mediante attributi. I *tags* sono elementi di annotazione semplice generalmente espressi mediante una sola parola o sequenza di caratteri. Gli attributi sono espressi tramite una coppia di elementi che definiscono la proprietà dell'oggetto ed il suo valore<sup>5</sup>. La scelta di rendere disponibili tali proprietà presuppone che esse siano connesse ad un database e che siano accessibili mediante una ricerca per parole chiave<sup>6</sup>.

Passando ad un livello di complessità superiore, la fruizione dei paradati e metadati può esplicarsi mediante un database terminologico. In tal senso, è possibile associare un lemma, una parola chiave, ad un elemento di altra natura. Questa ricerca, la *query*, avviene costruendo un *thesaurus* di riferimento, un vocabolario condiviso in cui dati, metadati e paradati sono rintracciabili e richiamabili in maniera univoca. L'architettura del *thesaurus* condiziona fortemente l'efficacia delle *query*. L'organizzazione semantica dei contenuti permette di ricavare informazioni tra loro gerarchicamente strutturate proponendo nel database connessioni logiche invece che puramente lessicali. Questa organizzazione si basa sullo studio dell'ontologia del dato, ovvero, del suo significato esplicito rispetto al contesto e del suo rapporto gerarchico rispetto agli altri dati. La possibilità di avere una struttura semantica comune a diversi ambiti di ricerca è determinante, in questa direzione è stato sviluppato, ad esempio, il *thesaurus Hassett (Humanities and Social Science Electronic Thesaurus)*, che, seppure sviluppata nel campo delle discipline umanistiche e delle scienze sociali, mira a definire una struttura comune per ambiti anche molto diversi. Il *Dublin-Core*, in questo senso, ha rappresentato una delle prime esperienze nell'ambito della standardizzazione fino ad essere recepito come norma ISO 15836:2003 poi revisionata in ISO 15836:2009.

L'altra natura del dato 1D è relativa alla connotazione dell'oggetto, rientra in questa categoria l'intero apparato documentale di carattere qualitativo che si lega alla lettura ed all'interpretazione, nonché, alla valutazione soggettiva dei dati quantitativi. Questo corredo testuale è di primaria importanza per conservare traccia della storia dell'oggetto,

degli studi ad esso connessi e delle diverse letture che di esso sono state date.

### 2.3 L'immagine come dato 2D

Appartengono al campo del 2D tutti i dati che rappresentano l'oggetto impiegando un codice visuale ed utilizzando un supporto bidimensionale. Questi dati possono essere un'immagine della superficie dell'oggetto e del suo aspetto, oppure evidenziare caratteri non percettivamente acquisibili mediante la vista. La prima tipologia coincide essenzialmente con l'immagine fotografica: una proiezione dell'apparenza visiva di un oggetto nello spazio da un centro, il punto nodale della fotocamera, su di un piano discreto<sup>7</sup>. Le fotografie sono un valido supporto allo studio grazie alla trasmissione dei caratteri cromatici e di quelli relativi alla forma. Questi ultimi non sono immediatamente registrati nell'immagine ma sono dedotti grazie alla possibilità di riconoscere le relazioni spaziali tra le parti e dall'individuazione del contorno apparente delle superfici proiettate. Nel contesto del rilievo, lo studio della fotografia ha da sempre interessato molti filoni di ricerca approfondendo, da diversi punti di vista, questo dato. In merito alla ricerca condotta, vanno solo ricordati gli elementi che sono alla base della manipolazione di fotogrammi e che risultano propedeutici alla fase successiva di integrazione dei dati nell'ambiente tridimensionale.

La tipologia di ripresa delle immagini fotografiche può generare prodotti ampiamente diversificati: riprese sferiche, cilindriche, piramidali, a campo esteso, ad assi convergenti, divergenti ecc. Questa distinzione influenza la gestione del dato nell'ambito di uno spazio tridimensionale condizionando le procedure informatiche di individuazione dei parametri intrinseci ed estrinseci del fotogramma<sup>8</sup>. Mentre la tipologia di presa determina il sistema proiettivo da utilizzare per elaborare l'immagine rispetto al piano, i parametri intrinseci ed estrinseci, calcolati risolvendo le rispettive equazioni, sono propedeutici al controllo dell'accuratezza geometrica del dato ed all'individuazione nello spazio del punto di presa.

Nell'ambito dei processi fotogrammetrici, l'immagine fotografica, sia essa analogica o digitale, costituisce la base

per la costruzione della tridimensionalità di un oggetto a partire da dati 2D. A questo principio si riferiscono tutte le tecniche di *Structure from Motion* e di *Image Based Modeling*. In adiacenza a questo tipo di applicazioni, la registrazione delle condizioni di illuminazione dell'oggetto, ossia di luci e ombre, rende possibile l'acquisizione qualitativa di dati relativi alla profondità. L'ombreggiatura di un oggetto, infatti, dipende dal rapporto tra la luce ed i caratteri morfologici della superficie. È questo il caso delle immagini RTI (*Reflectance Transformation Image*),

immagini re-illuminabili, prodotte registrando una serie di scatti in cui l'oggetto inquadrato e la posizione della camera sono fissi mentre la sorgente di illuminazione varia ad ogni scatto occupando postazioni note. In fase di elaborazione dei dati, viene calcolata la normale per ogni punto a partire dalla sequenza di scatti. Ciò consente di generare un modello virtuale continuo dell'illuminazione<sup>9</sup>. Con questo sistema, l'illuminazione dell'immagine è gestita interattivamente e la sorgente può acquisire qualsiasi posizione nello spazio (Fig. 2.1).

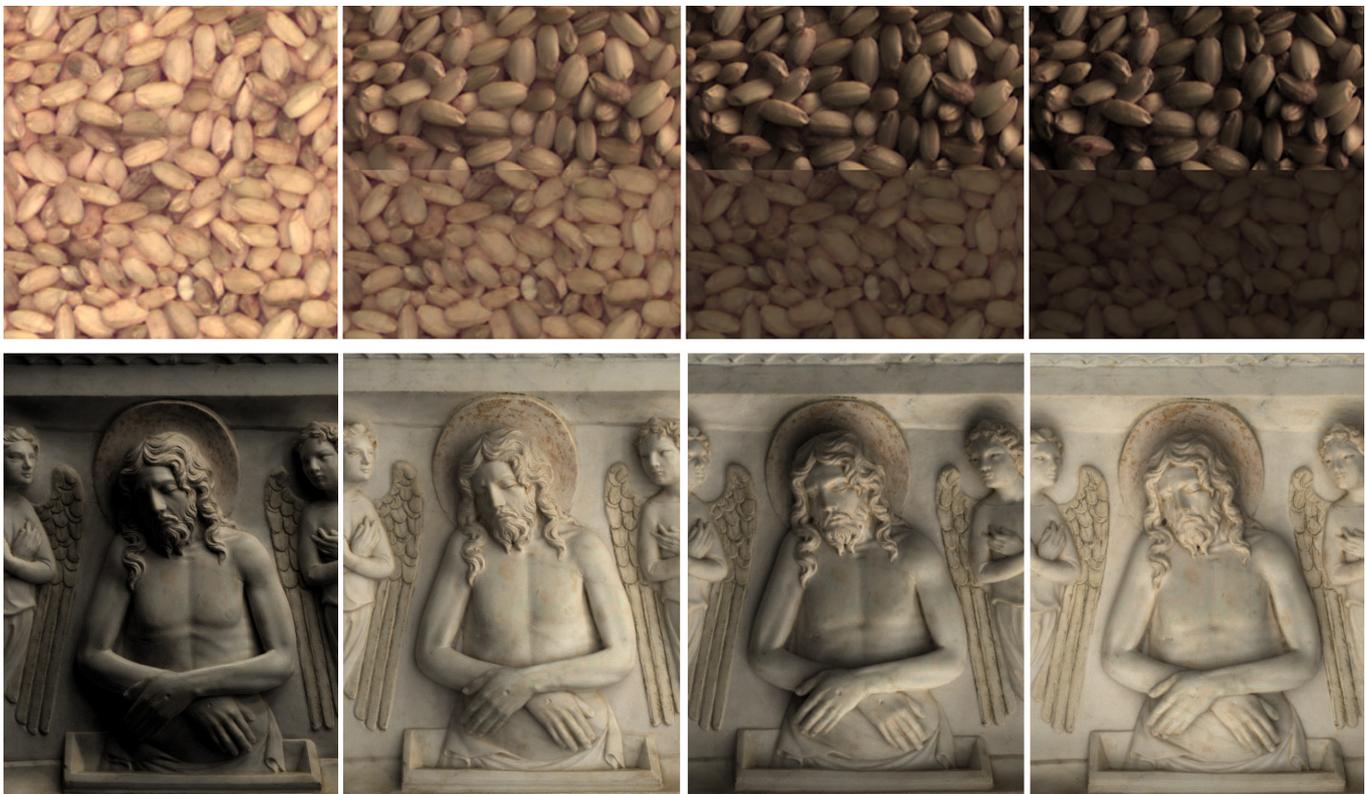


Fig. 2.1 Esempi di immagini re-illuminabili. In alto: Maxbender, 2001; in basso: piattaforma webRTIviewer, visualizzatore web sviluppato da ISTI-CNR, <http://vcg.isti.cnr.it/~palma/webrtiviewer/viewercoin.html>.

L'altra tipologia di dati 2D riguarda, essenzialmente, la sfera della diagnostica e dell'archeometria. Rientrano in quest'ambito le immagini prodotte utilizzando un'ampia gamma di sensori ognuno finalizzato a registrare alcune proprietà dell'oggetto. Le immagini multispettrali (Tech-

nical Photography, TP), ad esempio, forniscono fotogrammi realizzati isolando diversi segmenti dello spettro elettromagnetico mediante specifici filtri applicati alle lenti. L'analisi comparata delle diverse immagini fotografiche consente di rivelare informazioni aggiuntive riguardo la

natura dei materiali. Questa tecnica combina sistemi attivi e passivi di acquisizione; il sensore fotografico viene impiegato per registrare le radiazioni elettromagnetiche, debitamente filtrate dalle lenti, emesse naturalmente dai vari oggetti o da sorgenti esterne che inquadrano l'oggetto. Generalmente, gli scatti acquisiti sono: immagini nello spettro del visibile (VIS), non utilizzano alcun filtro alla lente e registra il dato RGB nello spettro del visibile; immagini a luce radente (Raking-light, RAK), acquisite predisponendo una sorgente luminosa quasi parallelamente all'oggetto, consente di sottolineare le rugosità del materiale e rileva tutte scabrosità, le tracce di lavorazione, le incisioni, le pennellate; immagini ultraviolette indotte da fluorescenza (UVf), prodotte tramite l'induzione di radiazioni UV sulla superficie e l'applicazione di un filtro alla lente che agisce nello spettro del visibile; immagini ultraviolette riflesse (UVr), utilizzano lo stesso sistema di sollecitazione

mediante raggi ultravioletti ma acquisiscono lunghezze d'onda UV non visibili, pertanto, oltre al filtro fotografico, richiedono una modifica al sensore; immagini infrarosse (IR), ottenute sollecitando la superficie con lampade ad incandescenza e bloccando lo spettro del visibile tramite apposito filtro, le immagini registrano così i dati relativi al vicino infrarosso (NIR), per l'acquisizione è necessario un sensore modificato; immagini infrarosse a fluorescenza (IRf), impiegano un filtro per bloccare alcune lunghezze d'onda fluorescenti all'infrarosso<sup>10</sup>.

Le immagini multispettrali vengono generalmente impiegate per lo studio di dipinti e, più in generale, di superfici essenzialmente piane. Ciò avviene poiché il complesso di sensori attivi e passivi impiegati consente di indagare la superficie degli oggetti individuandone numerosi tratti distintivi ma comunque, non fornisce indicazioni di tipo tridimensionale/volumetrico (Fig. 2.2).

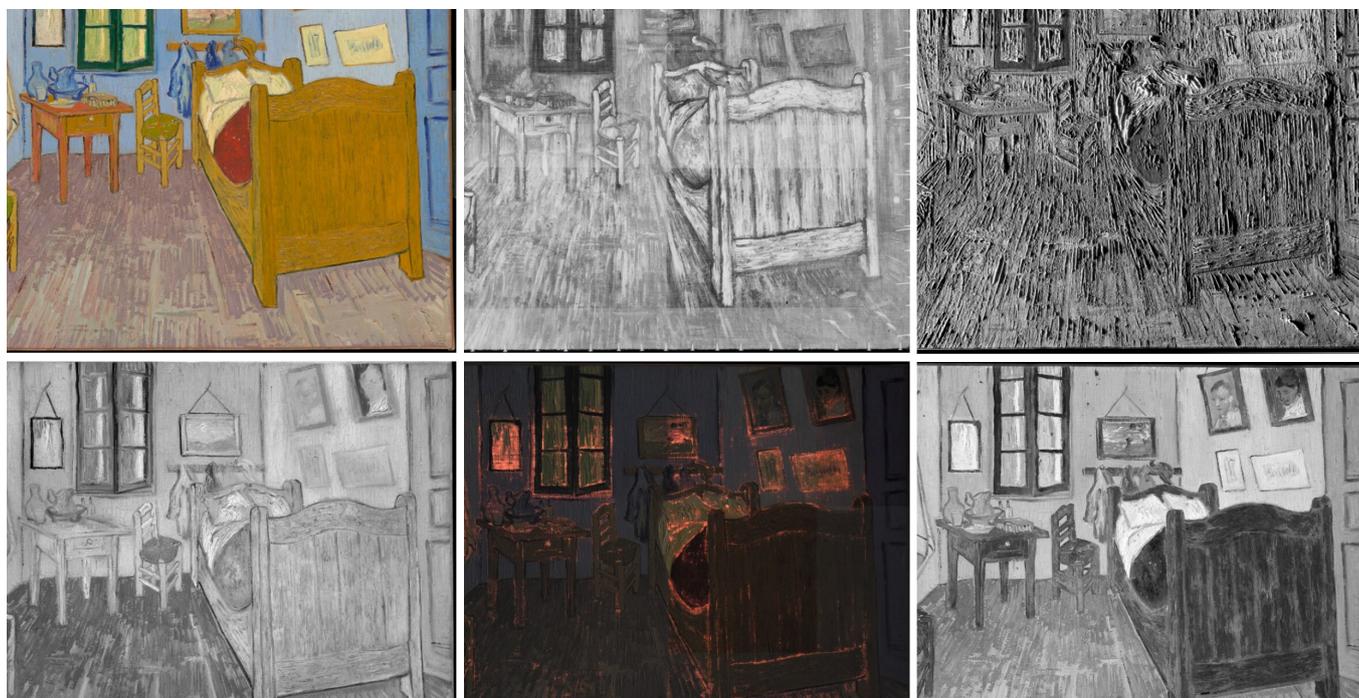


Fig. 2.2 Immagini multi-spettrali, ricerca condotta dal C2RMF. Dall'alto da sinistra: immagine RGB, raggi X, Raking-light; in basso da sinistra: immagine agli infrarossi, 900-1200nm, trasmittanza, immagine infrarossa a fluorescenza <http://merovingio.c2rmf.cnrs.fr/iipimage/iipmooviewer/vangogh.html>

In riferimento all'architettura ed al patrimonio costruito, la termografia è sicuramente una delle tipologie di indagine più utilizzata. L'indagine termografica sul patrimonio costruito viene generalmente condotta per individuare aree di difformità di materiale e/o struttura legate al cambiamento repentino di temperatura ed aree di vuoto interne allo spessore murario o al piano di calpestio.

La termografia ad infrarossi è una tipologia di indagine non distruttiva, essa sfrutta la proprietà di emissione di radiazioni che tutti i corpi con temperatura superiore allo zero assoluto hanno. Tali radiazioni sono misurate da un sensore e registrate su un'immagine 2D termica. In essa ad ogni pixel corrisponde un valore numerico rappresentativo della radiazione, i valori sono visualizzati attraverso una scala di intensità ed estraibili attraverso l'interrogazione del singolo pixel. La misurazione può avvenire mediante termografia attiva o termografia passiva. Nel primo caso, l'area in oggetto viene sottoposta ad un ciclo di riscaldamento o raffreddamento controllato, tale operazione consente di amplificare le differenze, in termini di rilascio di

radiazioni termiche, tra materiali. La termografia passiva sfrutta invece la naturale capacità dei materiali di emettere radiazioni e la sua misurazione avviene in condizioni ambientali neutre<sup>11</sup>.

Sebbene la misurazione del dato corrisponda alla radiazione individuata sulla superficie dell'oggetto, la sua lettura dà indicazioni su ciò che avviene al di là di essa, nella struttura non visibile. Questa peculiarità consente da una parte di controllare e gestire l'immagine come una mappatura tematica della superficie visibile e dall'altra parte di interpretare fenomeni tridimensionali a partire da indizi bidimensionali.

Il dato termico restituisce un'immagine dell'oggetto in valori di intensità, tale immagine è spesso difficilmente riconducibile all'immagine che il nostro occhio acquisisce nello spettro del visibile. Per tale ragione, l'associazione tra i valori di intensità termica ed i loro corrispondenti nello spettro visibile avviene generalmente affiancando al sensore infrarossi della termocamera una camera RGB con sensore standard (Fig. 2.3).

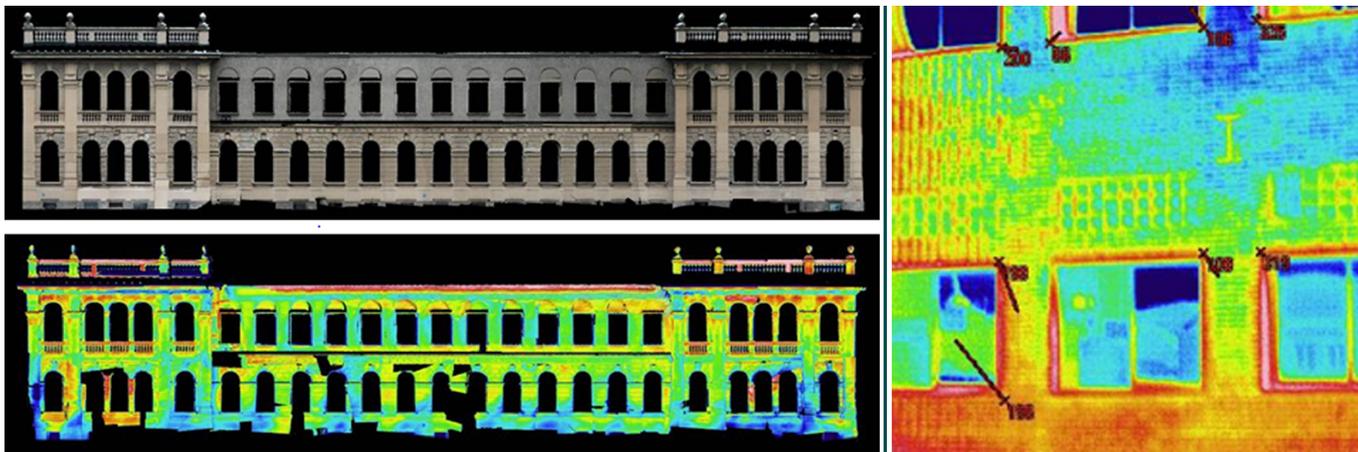


Fig. 2.3 Sinistra: ortoimmagine da ortomosaico in RGB (in alto) e IR (in basso). Destra: termogramma singolo. Previtali, 2013

Se l'immagine RGB e quella termica sono acquisite da uno stesso centro di proiezione, il tema principale da affrontare riguarda la corretta calibrazione dei due strumenti ed il calcolo della distorsione delle immagini da essi prodotte. Questo passaggio è propedeutico alla sovrapposizione ge-

ometrica di coppie di immagini corrispondenti per l'individuazione di punti omologhi.

La calibrazione dell'immagine RGB avviene generalmente mediante l'utilizzo di una *checkboard* di dimensioni e proporzioni note. Il supporto viene fotografato da più pun-

ti di vista utilizzando la camera da calibrare, nelle immagini ottenute vengono confrontate le geometrie e le misure note di riferimento con quelle riprodotte nell'immagine, ciò consente di individuare e quantificare i fenomeni di distorsione presenti nell'immagine e funzione di una specifica combinazione lente-camera. La stessa procedura può essere applicata alle termocamera, per tale operazione la *checkboard* di riferimento deve consentire la lettura di proporzioni e geometrie sull'immagine termica, a tale scopo vengono generalmente impiegate tavole di riferi-

mento in cui gli elementi di misura e geometria nota sono individuati mediante l'utilizzo di materiale diverso con diversa risposta termica rispetto all'ambiente (Fig. 2.4)<sup>12</sup>. Le immagini così calibrate sono sovrapponibili, ciò consente la loro lettura ed analisi integrata<sup>13</sup>. A partire da tale procedura è possibile costruire orto-mosaici combinando singoli scatti termici, ciò permette di compensare la limitata risoluzione del singolo fotogramma con una percentuale di sovrapposizione tale da arricchire su scala globale il contenuto informativo del prodotto.

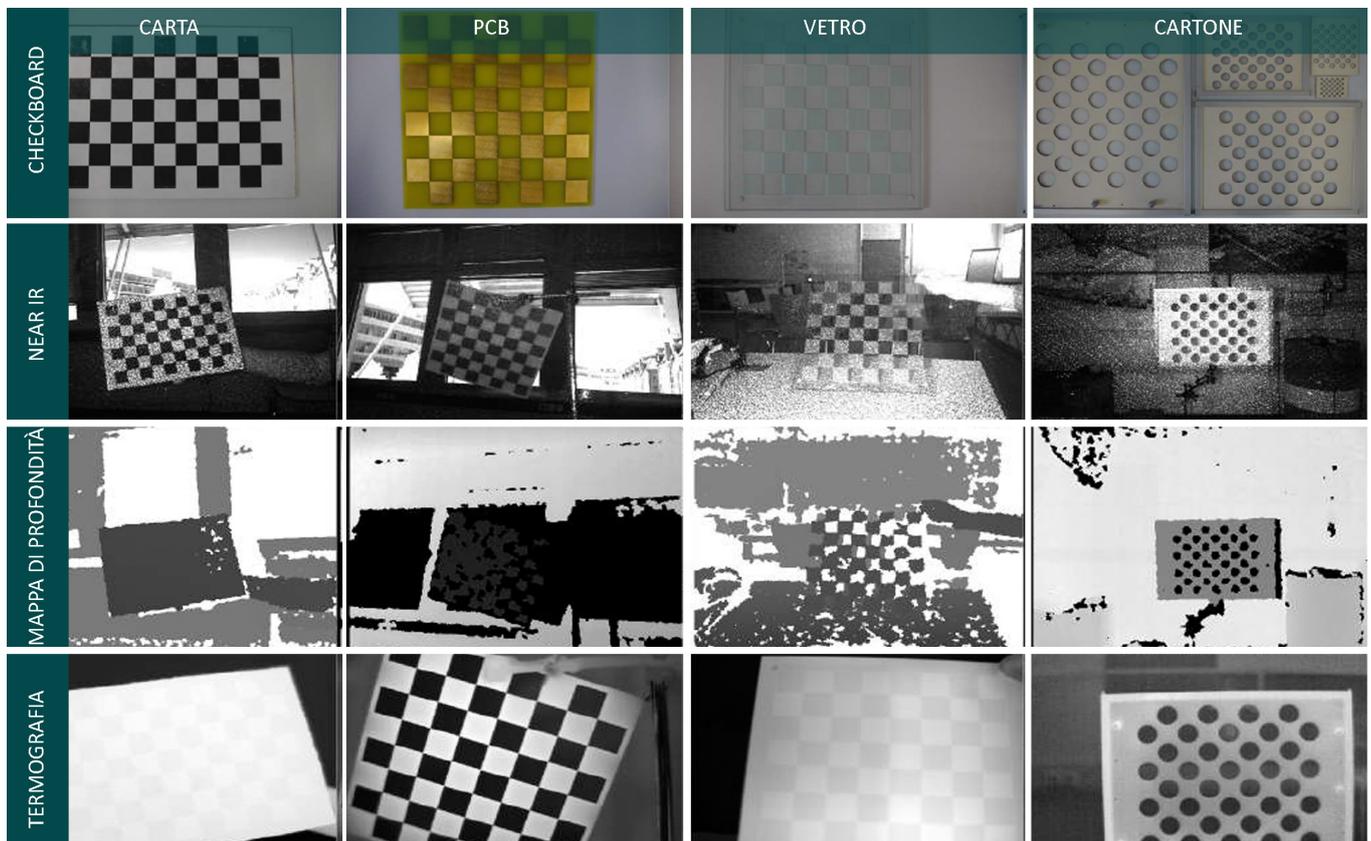


Fig. 2.4 Sperimentazione su diverse tipologie di checkboard per la calibrazione di sensori near IR, di profondità e termografico. Rangel et Al. 2015

## 2.4 La forma come dato 3D

I dati 3D relativi allo studio della pelle dell'oggetto sono,

come già detto, quelli connessi alle attività di rilievo. In tale ambito di ricerca, i processi di integrazione e gestione di nuvole di punti nello spazio tridimensionale numerico

sono consolidati<sup>14</sup>. Tuttavia, per inquadrare in un contesto più ampio i caratteri dei dati 3D, è opportuno richiamare alcuni concetti relativi alla nuvola di punti tridimensionale intesa come prodotto del rilevamento. Questo dato 3D esprime le proprietà morfologiche, dimensionali e, generalmente, cromatiche. La nuvola di punti fa riferimento ad una terna di assi cartesiani, ogni sua unità minima, il punto, è collocato tridimensionalmente relativamente ad essa. La percezione della tridimensionalità dell'oggetto dipende dalla condivisione dei punti di un unico sistema di riferimento, se ciò avviene tra due o più nuvole di punti, esse si definiscono allineate.

In aggiunta ai tre indicatori di posizione, al punto può essere associato il dato colore mediante un'altra terna di valori esplicativi del dato RGB. Il dato RGB è sempre presente in modelli numerici derivati da processi *Structure from Motion* (SfM) mentre per le acquisizioni mediante Laser scanner 3D, se presente, è applicato al punto in fase di processamento. L'acquisizione mediante Laser scanner 3D associa ad ogni punto anche un valore di intensità: la riflettanza. Tale valore è indicativo della risposta del materiale alla sollecitazione del laser ed è il derivato di una serie di fattori quali il materiale dell'oggetto, l'umidità della sua superficie e il suo stato di conservazione. Per quanto non sia possibile identificare una corrispondenza biunivoca tra il valore di intensità ed il fenomeno che esso rappresenta, la lettura del dato di riflettanza può diventare significativa in associazione ad altri parametri. In aggiunta, le nuvole di punti provenienti da acquisizione dati laser scanner e SfM contengono informazioni legate alla topologia dell'oggetto e relative al rapporto interno/esterno espresse mediante il valore della normale al punto. Questo parametro determina in ambiente digitale il comportamento dell'oggetto rispetto all'illuminazione della scena e permette di controllare la trasformazione da nuvola di punti a superficie mantenendo invariate le caratteristiche topologiche. Queste informazioni sono contenute nella nuvola di punti in sé e sono il primo prodotto derivato dalla fase di acquisizione dati. Nel momento in cui la nuvola di punti viene letta come strumento di analisi ed interpretazione, diviene modello, il significato che l'osservatore e lo specialista dà ai punti ed alla loro collocazione spaziale è

sufficiente a definire questo passaggio fondamentale nel processo di conoscenza.

La seconda categoria di dati 3D, ovvero quelli relativi alla componente solida dell'oggetto, si riferisce alle tipologie prodotte nell'ambito della diagnostica e sono finalizzate a studiare ciò che è sotto la superficie esterna dell'oggetto e che riguarda la sua matericità. Il panorama di indagini applicate in questi settori è molto ampio ed investe un numero eterogeneo di sensori di acquisizione (radiazioni elettromagnetiche, raggi X, raggi infrarossi ecc.) nonché di componenti hardware e software.

Oltre la componente puramente tecnica, per l'indagine del non visibile, la geofisica applicata studia il complesso di metodologie non distruttive e non invasive. Queste due caratteristiche hanno reso tale disciplina largamente utilizzabile nel settore archeologico e dei beni culturali per documentare la presenza di resti archeologici di strutture murarie sottosuolo così come anomalie strutturali in beni architettonici. Se ciò costituisce un interessante evoluzione dello studio del bene, il principale limite è legato al grado di incertezza del dato finale. Per questa ragione, l'integrazione di diverse metodologie, comprese quelle più invasive e distruttive, si rende talvolta necessaria per raggiungere un livello di affidabilità superiore<sup>15</sup>.

Le due tipologie presentate in questo paragrafo sono state selezionate con l'obiettivo di indagare approcci processuali eterogenei in funzione del dato di partenza, ciò mira a rendere la procedura ripetibile su tipologie di indagine simili. I dati analizzati di sono quelli derivanti da analisi georadar ed analisi tomografica elettrica.

Il georadar (*Ground penetrating radar*, GPR) è uno strumento di indagine elettromagnetica. Il sistema è definito da un'antenna, con un trasmettitore ed un ricevitore, un'unità di controllo del tempo, ed un computer. Il principio di funzionamento sfrutta la differenza di conducibilità e permittività elettrica dei materiali per localizzare, nel sottosuolo, la loro presenza. Le onde emesse penetrano il suolo fino a colpire strati composti da materiale diverso, a questo punto, parte delle onde viene assorbita e prosegue la propagazione verso strati successivi di terreno, un'altra parte viene invece riflessa, quest'ultima ritorna in superficie dove viene registrata dall'antenna. La procedura si

esaurisce quando l'onda viene completamente assorbita dal suolo. L'impostazione della frequenza dell'antenna condiziona sensibilmente la profondità raggiunta dall'impulso e, pertanto, va regolata in base alla profondità ed alla risoluzione che si vuole ottenere: frequenze centrali più alte restituiscono un dato ad una risoluzione maggiore ma sono più superficiali. Il tempo impiegato dall'onda per arrivare allo strato e ritornare in superficie viene tramutato in distanza definendo così, a che profondità si colloca l'anomalia.

In ambito archeologico, le indagini GPR permettono di individuare strati lapidei, legno, metalli e strutture murarie sottosuolo. L'acquisizione avviene impostando una maglia composta da tracce parallele (direzione Y) poste ad una distanza fissa ( $\Delta y$ ). L'antenna percorre il suolo lungo gli assi e raccoglie le risposte agli impulsi, questi impulsi vengono visualizzati in tempo reale e concorrono a formare un'immagine. Con questo principio, rispetto ad ogni asse percorso, la prima visualizzazione del dato è bidimensionale e raccoglie ciò che è acquisito in profondità, lungo un piano verticale materializzato dalla traccia a terra. Le immagini, i *radargram* (Fig.2.5), riportano, sull'asse delle ascisse, la distanza (in metri) percorsa dall'antenna lun-

go il profilo e, sull'asse delle ordinate, il tempo doppio di viaggio dell'onda elettromagnetica nel sottosuolo, cioè il tempo che l'onda elettromagnetica impiega per andare dall'antenna trasmittente alla superficie di contatto tra due mezzi con caratteristiche elettromagnetiche distinte, essere riflessa e tornare indietro all'antenna ricevente.

Ogni asse percorso contribuisce a coprire uno spazio tridimensionale che dal piano di calpestio arriva a qualche metro di profondità, da questo parallelepipedo più o meno fitto è possibile estrarre le *time slices*, immagini parallele al piano di campagna. Ogni slice di questo tipo è ricavata isolando i segnali acquisiti dal ricevitore con una costante temporale rispetto all'istante di emissione. La fase successiva, di processamento del dato, è finalizzata a correggere il segnale, individuare e filtrare il rumore, ed applicare correzioni alle immagini per amplificare la risposta<sup>16</sup>. Ai suoi esordi, il dato GPR veniva processato esclusivamente per esportare *cross sections* (immagini 2D verticali), in una fase successiva, le capacità computazionali dei processori e lo sviluppo di applicativi di presentazione dei dati hanno reso disponibili, ed oramai consolidate, tecniche per la produzione di *time slice* (immagini 2D orizzontali) e volumi tridimensionali espressi in voxel<sup>17</sup> (Fig. 2.6).

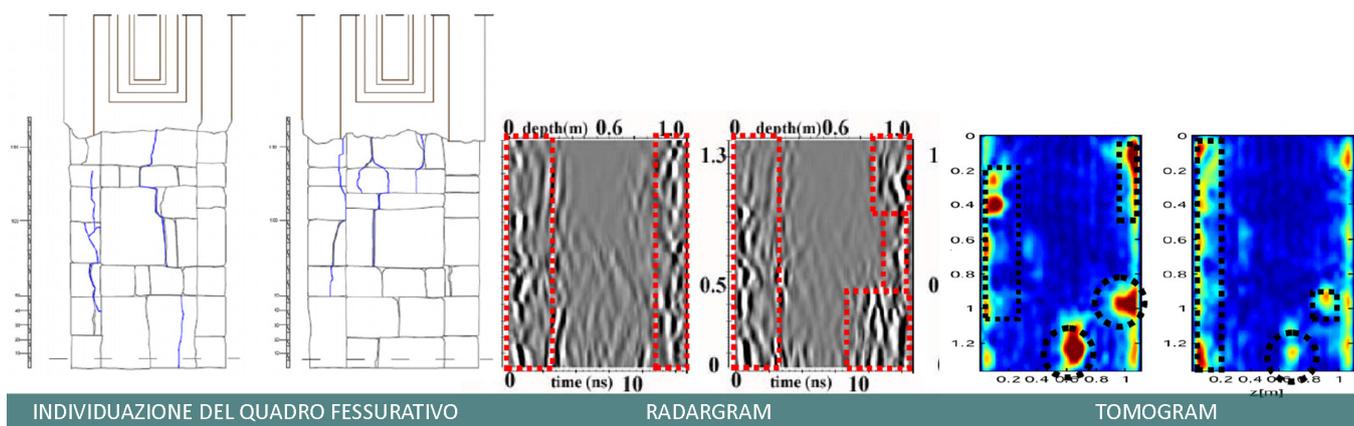


Fig. 2.5 Campagna diagnostica sulla cattedrale di Tricarico. Da sinistra: quadro fessurativo, radargram da indagine GPR e tomogram da indagine tomografica. Leucci, 2011

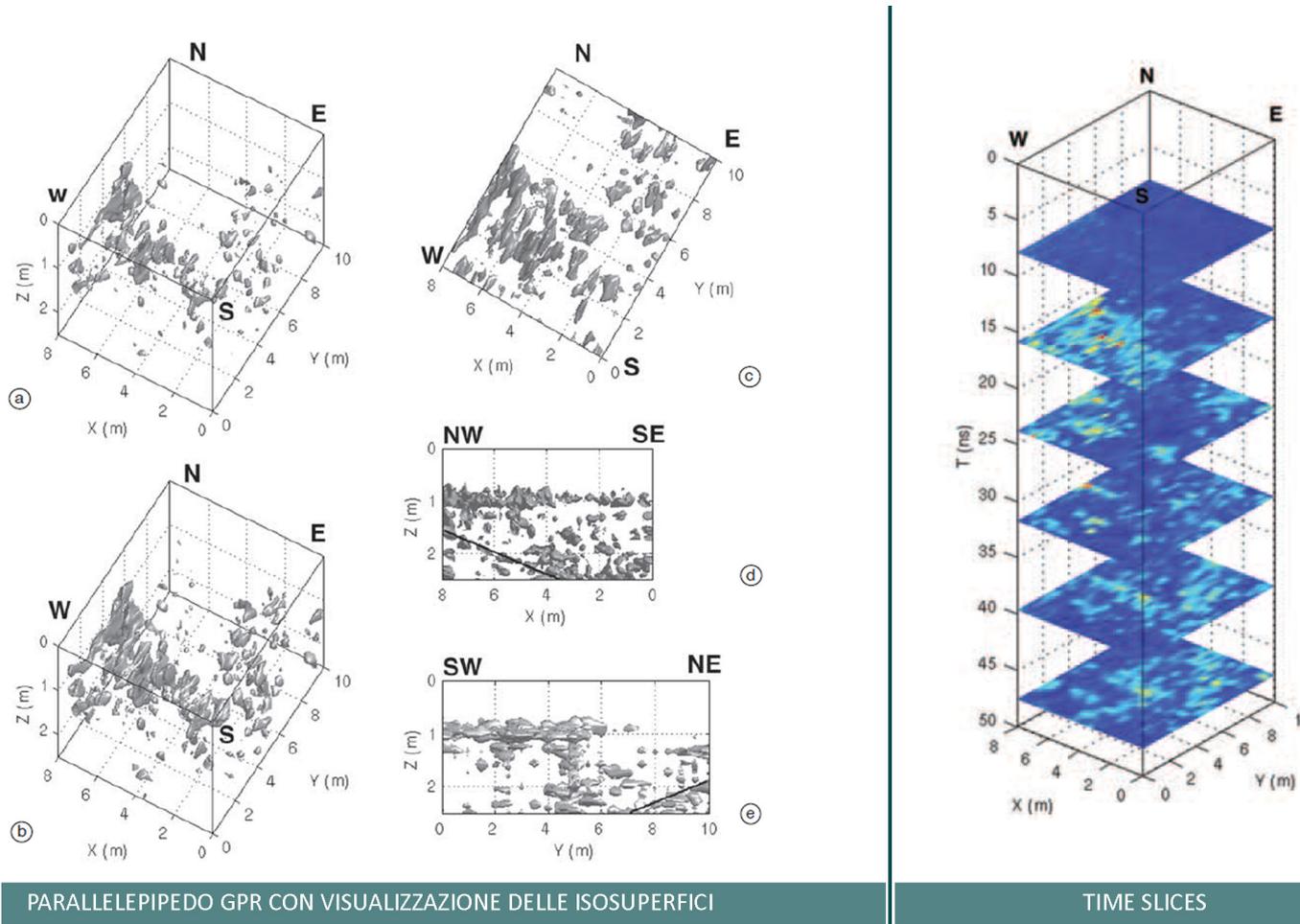


Fig. 2.6 Gestione nello spazio tridimensionale del dato GPR. Nuzzo et Al. 2002

Il parallelepipedo di voxel viene gestito in uno spazio in cui ogni elemento rappresenta una misurazione o una discretizzazione di più misurazioni. I parametri di riferimento per individuare le dimensioni del volume acquisito e le sue proporzioni sono le lunghezze totali sugli assi XY e Z. Il parametro della risoluzione viene gestito impostando le dimensioni di ogni cubo voxel. Da questi fattori deriva il numero complessivo di misurazioni rappresentate e la loro disposizione nello spazio. I dati GPR 3D vengono generalmente visualizzati interpolando i voxel con valori di permittività analoghi e generando delle isosuperfici<sup>18</sup>. Tali

superfici sono definite spazialmente rispetto ad un parallelepipedo di riferimento, in esso il piano di campagna è assimilato ad un piano ideale XY. In aree caratterizzate da una certa complessità topografica, questa approssimazione può avere conseguenze significative per l'interpretazione dei fenomeni. A tale scopo, è possibile integrare, sia in fase di acquisizione che in fase di elaborazione, dati relativi all'andamento del suolo acquisiti mediante GPS, stazione totale o laser scanner. La correzione topografica, applicata mediante una *time-shift correction*, restituisce un dato effettivamente tridimensionale integrabile ed interpretabile

anche dal punto di vista morfologico<sup>19</sup>.

In riferimento all'accuratezza metrica del dato GPR, è opportuno prendere in considerazione due parametri. Il primo riguarda sia l'accuratezza strumentale, che interviene in fase di acquisizione, l'altro riguarda invece l'operazione di discretizzazione dei dati in fase di processamento. Questi parametri sono di carattere quantitativo e definiscono il massimo valore di densità e precisione a cui il segnale singolo, trasmesso al ricevitore dell'antenna, può arrivare. In fase di acquisizione è possibile impostare, quindi, la frequenza delle onde emesse, così da ottenere una risoluzione calcolabile raggiungendo la profondità ritenuta opportuna. Il fattore quantitativo è fortemente vincolato da uno di carattere qualitativo: la leggibilità del dato finale dipende dall'applicazione di algoritmi di ottimizzazione parzialmente non standardizzati e quindi, non riconducibili ad una quantità né, tantomeno, ad una scala di dettaglio di riferimento.

Le indagini di tipo tomografico sono basate su tecniche di estrazione dei dati rispetto ad un piano, ovvero uno strato, selezionato ed analizzato. L'isolamento dello strato e la proiezione su un supporto bidimensionale di una certa tipologia di dati, può avvenire utilizzando diversi metodi e

strumenti. Nell'ambito della diagnostica anatomica, la tecnica di tomografia computerizzata (CT), sfrutta l'emissione di raggi X per raccogliere valori relativi alla densità dei tessuti interni e registrarli sotto forma di voxel. I dati sono raccolti per più strati e forniscono così, informazioni tridimensionali sulla composizione dei materiali. In quest'ambito, lo standard DICOM<sup>20</sup> trova un utilizzo consolidato per la visualizzazione, la gestione e l'archiviazione dei dati relativi alla diagnostica anatomica 2D e 3D (Fig. 2.7). La possibilità di ispezionare tridimensionalmente un corpo mediante raggi X trova numerose applicazioni anche nell'ambito dei beni culturali<sup>21</sup> (Fig. 2.8), da oggetti delle dimensioni di qualche micron fino a quelli dell'ordine del metro, la CT contribuisce alla produzione della memoria digitale dei beni e favorisce i loro studio.

Sulla scala architettonica e territoriale, lo stesso principio di discretizzazione dell'oggetto in sezioni viene applicata attraverso la tomografia elettrica (*Electrical Resistivity Tomography*, ERT). Le componenti essenziali per l'acquisizione sono un trasmettitore di sorgente elettrica, un ricevitore, un multiplexer per il collegamento con gli elettrodi ed un sistema di controllo computerizzato (Fig. 2.9).



Fig. 2.7 Visualizzatori 3D di indagini CT data codificati mediante lo standard DICOM. <https://www.radiantviewer.com/dicom-viewer-manual/3d-volume-rendering.htm>.



Fig. 2.8 Utilizzo della tomografia computerizzata in ambito archeologico: modello solido della mummia Sherit, gestione del dato tramite l'applicativo VGGraphics <https://www.volumegraphics.com/en/news/mummy-in-color.html>.



Fig. 2.9 Da sinistra: strumentazione 3D, elettrodo e schema di stendimento degli elettrodi. Progetto Basilica Iulia, 2019 (nota 3, pag.108).

Questa tecnica sfrutta gli impulsi elettrici trasmessi attraverso una serie di elettrodi per misurare la resistività dei materiali. La risposta viene registrata e poi normalizzata rispetto ad un piano di proiezione verticale. Il piano verticale ideale passa per un cavo multipolare che viene disteso lungo il piano di campagna e che collega gli elettrodi<sup>22</sup>. La possibilità di effettuare una seconda misurazione invertendo gli elettrodi di corrente con quelli di potenziale, consente di isolare una prima tipologia di errore del dato e filtrare, in fase di processamento, le coppie con valori di affidabilità inferiori ad una certa soglia. In fase di elaborazione dei dati, questa superficie viene idealmente suddivisa in celle, la prima fase è quella di risolvere il problema di inversione collocando spazialmente il dato di resistività rispetto alle celle del piano ideale. Mediante l'utilizzo di metodi matematici, il processo di inversione permette di estrarre informazioni su un sistema fisico a partire da un insieme di dati. Le dimensioni della cella dipendono dalla distanza tra gli elettrodi e dal metodo di discretizzazione utilizzato. La risoluzione di riferimento per le immagini ERT dipende da una molteplicità di fattori. Idealmente, come si è già detto, ad ogni cella corrisponde un valore di resistività, rappresentato nell'immagine bidimensionale attraverso un pixel; tuttavia la serie di procedure applicate per trasformare il dato e registrarlo rispetto al piano di riferimento, determinano una consistente variazione, in termini di risoluzione, tra la misurazione acquisita e quella visualizzabile. Tra variabili che concorrono alla definizione della risoluzione si citano la distribuzione della resistività del suolo, lo schema di misurazione, il rapporto segnale-rumore, la geometria di stendimento, lo schema algoritmico di regolarizzazione del dato ecc. Dal punto di vista dimensionale, la geometria di stendimento determina la tipologia di dato acquisito: lo stendimento non standard consente di ottenere misurazioni relative ad uno spazio tridimensionale XYZ, questa tecnica permette di acquisire diversi strati verticali del sottosuolo e costruire un grafico tridimensionale dei valori di resistività. All'interno dello spazio 3D, l'estrazione di superfici isoresistive favorisce l'analisi e l'interpretazione delle misurazioni permettendo la visualizzazione delle anomalie<sup>23</sup>.

Oltre alla possibilità di manipolare tridimensionalmente

il dato, questo metodo consente l'estrazione di *time slice* orizzontali a profondità diverse. Come per le applicazioni georadar, anche la tomografia elettrica trova grandi vantaggi nell'integrazione dei dati con quelli relativi alla morfologia del piano di campagna. Nello specifico, la possibilità di definire numericamente le coordinate degli elettrodi produce un modello distributivo dei valori più coerente con la realtà.

Note

- 1 Per una panoramica delle tipologie di tecniche di imaging applicate ai beni culturali, si veda Payne, 2012.
- 2 Francesco Gabellone, commentando il principio n°7 della Carta di Siviglia, fornisce un quadro dell'utilizzo di questa terminologia nell'ambito dell'archeologia virtuale ed offre una panoramica di esempi relativi a come questi concetti possano essere applicati. Gabellone, 2012.
- 3 Solodovnik, 2010. L'autrice, nel suo contributo, ravvisa la necessità di istituire un nuovo modo di "fare filosofia" che da teorico si faccia applicativo (ad esempio, applicando gli studi filosofici all'ontologia nella sua accezione moderna per la realizzazione di sistemi informativi evoluti indispensabili dell'innovazione tecnologica), creando nuovi ambienti comunicativi in cui filosofi e altri studiosi possono dibattere ed elaborare strategie di classificazione e organizzazione dei dati che siano il più possibile condivise ed efficienti nel descrivere la realtà dell'informazione digitale che esponga, sfrutta e potenzia le risorse e i processi nei sistemi informativi. Ancora una volta, è evidente quanto, in tutti gli ambiti di ricerca, si senta l'esigenza di includere e metabolizzare i processi informatici.
- 4 ([http://www.londoncharter.org/fileadmin/templates/main/docs/london\\_charter\\_1\\_1\\_it.pdf](http://www.londoncharter.org/fileadmin/templates/main/docs/london_charter_1_1_it.pdf)).
- 5 Andrews et Al. 2011. Nell'articolo, gli autori classificano i sistemi di annotazione semantica individuando quattro categorie: tags, attributi, relazioni ed ontologie. Con livelli di complessità e gerarchizzazione crescenti, questi strumenti sono il mezzo attraverso cui è possibile accedere ed interagire con risorse eterogenee nell'ambito del web 2.0.
- 6 Gabellone, 2012.
- 7 Riguardo la fotografia digitale, il piano dell'immagine è discreto poiché il sensore conta un numero finito di fotodiodi, quindi, l'immagine che ne deriva è composta da un numero finito di pixel. Rispetto all'immagine analogica, il sensore, ovvero la pellicola, è discreto poiché composto da un numero finito di cristalli di alogenuro di argento.
- 8 I parametri intrinseci esprimono le proprietà proiettive della macchina fotografica: distanza principale, punto principale, distorsione. I parametri estrinseci rappresentano la posizione e l'orientamento della macchina fotografica nello spazio cartesiano rispetto all'oggetto inquadrato. (LIVIO DE LUCA, 2011. La fotomodellazione architettonica. Rilievo, modellazione, rappresentazione di edifici a partire da fotografie. Palermo, Dario Flaccovio Editore. Pp. 72-74).
- 9 Questo algoritmo è stato proposto da Tom Malzbender, Dan Gelb e Hans Wolters all'interno del laboratorio Hewlett-Packard, la tecnica prese il nome di Polynomial Texture Map (PTM). Una panoramica sugli algoritmi sviluppati di seguito è presentata in Mudge et Al.2008.
- 10 Per una panoramica più ampia sull'utilizzo di questa tecnica e sulla fase di elaborazione delle immagini, si rimanda a Pamart et Al.2017.
- 11 Hess et Al., 2014.
- 12 Rangel et al. 2015 confronta vari sistemi di calibrazione e varie tipologie di *checkerboard*.
- 13 Per una più ampia trattazione sul tema della calibrazione delle fotocamere RGB e termiche, si rimanda alla voce di glossario.
- 14 Per una bibliografia di riferimento sul tema delle metodologie integrate di rilievo, si veda Bianchini, Inglese, Ippolito, 2016.
- 15 Carrozzo 2006. L'introduzione metodologica dell'autrice approfondisce il tema del rapporto tra geofisica applicata e beni culturali.
- 16 Per un approfondimento si veda Jol, 2009; Manataki, 2015.
- 17 Cfr voce di glossario.
- 18 Superficie luogo dei punti dello spazio, oppure di una rappresentazione tridimensionale, nei quali una determinata grandezza ha un medesimo valore o un certo fenomeno si presenta con certe modalità (Dizionario delle scienze fisiche Treccani online s.v. "isosuperficie").
- 19 Per una trattazione più ampia delle diverse procedure di correzione del dato GPR tramite inserimento di informazioni topografiche, si veda Goodman, D. & Piro, S. 2013, pp. 120-127.
- 20 È l'acronimo di Digital Imaging and Communications in Medicine. Lo standard è codificato per consentire l'interoperabilità in tutti i settori connessi all'imaging in ambito medico ed è riconosciuto dalla norma ISO 12052. <https://www.dicomstandard.org/>
- 21 Per la presentazione di alcuni casi studio applicativi, si veda Morigi, 2010.
- 22 Daily, 2005, Zhou, 2019.
- 23 Una delle prime applicazioni nell'ambito archeologico della gestione tridimensionale del dato GPR è in Nuzzo et Al. 2002.





### 3. Elaborazione: l'informazione

In questo capitolo si intende affrontare il ruolo dell'informazione all'interno del processo di conoscenza. Prima di passare alla trattazione specifica dell'argomento, è bene ripercorrere le fasi di questo processo e le modalità con cui avvengono i passaggi da una fase all'altra. Il dato è stato trattato, fin qui, come elemento di base, evidenziandone i caratteri intrinseci ed il potenziale informativo (capitolo 2); la trasformazione del dato in informazione avviene fornendo un contesto di riferimento. Nell'ambito del patrimonio costruito, l'analogia rintracciabile è con i sistemi informativi (*information system*) impiegati per costruire database grafici relazionali. Questi sistemi sono legati alla sfera della rappresentazione tridimensionale e, in questa trattazione, sono gli strumenti attraverso cui il dato ha la possibilità di essere compreso e sistematizzato in uno schema più ampio, in altre parole, di divenire informazione.

Se fino ad ora, quindi, il dato è stato studiato per il suo valore assoluto e per le sue caratteristiche proprie, nei paragrafi successivi si fa riferimento esplicito all'ambito della rappresentazione ed a come, in questo ambito, il dato viene trasformato e gestito. La tematica è declinata affrontando i sistemi informativi utilizzati per i modelli discreti e quelli caratteristici dei modelli continui. Se dal punto di vista applicativo, i due sistemi informativi concorrono a delineare due strategie di trasformazione e manipolazione del dato diversa; da quello teorico, la loro funzione di contestualizzazione si avvale di una struttura alla base pressoché identica. In entrambi i casi, infatti, il sistema si costruisce grazie ad un apparato semantico, a cui viene dato il compito di organizzare i dati in maniera adeguata e di definirne i rapporti logici, ed un apparato connettivo applicativo che garantisca l'integrazione del dato nel sistema. Questi due elementi verranno trattati singolarmente rispetto ad entrambi i sistemi per evidenziarne affinità e singolarità. L'impostazione è pensata per sottolineare un parallelismo, la struttura semantica, impostata per organizzare il modello numerico (*semantic aware*), consente l'integrazione corretta e gerarchizzata di dati eterogenei, contemporaneamente,

la stessa struttura semantica definisce i principi e le regole per la segmentazione, manuale o semi-automatica che sia, dei modelli numerici. Allo stesso modo, la struttura semantica che sostiene le piattaforme di *BIM authoring* consente l'integrazione e l'interoperabilità tra dati mediante la condivisione di uno standard e trova la sua attuazione attraverso le ontologie riconosciute ed applicate nell'ambito dell'HBIM.

#### 3.1 I sistemi informativi sui modelli discreti

##### 3.1.1 Semantica

Le nuvole di punti generate nell'ambito del rilievo e processate tramite le fasi di allineamento, filtraggio, mappatura cromatica e così via, approdano nello spazio virtuale tridimensionale sottoforma di oggetto indistinto, la sua incomunicabilità, per così dire, è legata all'assenza di una struttura ontologica. Un primo livello di organizzazione del tutto in elementi distinti viene prodotto quando, all'occorrenza, lavoriamo per elaborare modelli bidimensionali, componiamo il disegno indagandone la forma e tracciamo i limiti che, ad esempio, separano il toro inferiore di una base di colonna dal listello ad esso sovrapposto. L'organizzazione della scomposizione e l'interconnessione gerarchica delle parti definisce un livello di lettura diverso. A questo punto, infatti, interviene la semantica, essa offre una struttura che permette di specificare l'ontologia di ogni elemento ed il sistema di relazioni, fa riferimento ad una gerarchia assoluta non vincolata ad uno specifico ambito di riferimento. Rispetto a questa infrastruttura, l'ontologia descrive ciò che l'entità rappresenta, ciò che *significa*, nel contesto di un dominio specifico<sup>1</sup>.

Nell'ambito dei beni culturali, sono diverse le esperienze condotte finalizzate a definire un'ontologia condivisa nel settore. Il modello relazionale CIDOC CRM (*International Council of Documentation – Conceptual Reference Model*), ad esempio, definisce uno strumento di codifica semantica di riferimento. Il

progetto ARIADNE<sup>2</sup>, infrastruttura di ricerca per l'archeologia, utilizza il CIDOC CRM per l'archiviazione di infrastrutture di dati con l'obiettivo di divulgare e rendere disponibili tutti la documentazione disponibile in rete su una tematica specifica. Il sistema informativo "MONDIS" invece, concerne un ambito ancora più ristretto riguardo l'architettura storica ed il suo stato di

conservazione<sup>3</sup>. Nell'ambito del patrimonio costruito, la piattaforma NUBES individua uno spazio virtuale tridimensionale di coesistenza di informazioni eterogenee con l'obiettivo di fornire un modello organizzato semanticamente ed accessibile per più settori disciplinari, la piattaforma è implementata come applicativo web<sup>4</sup>(Fig. 3.1).

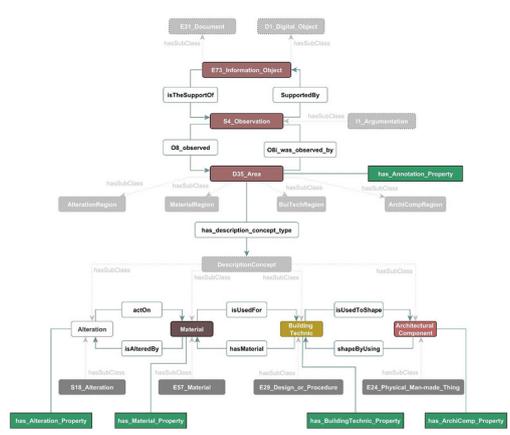
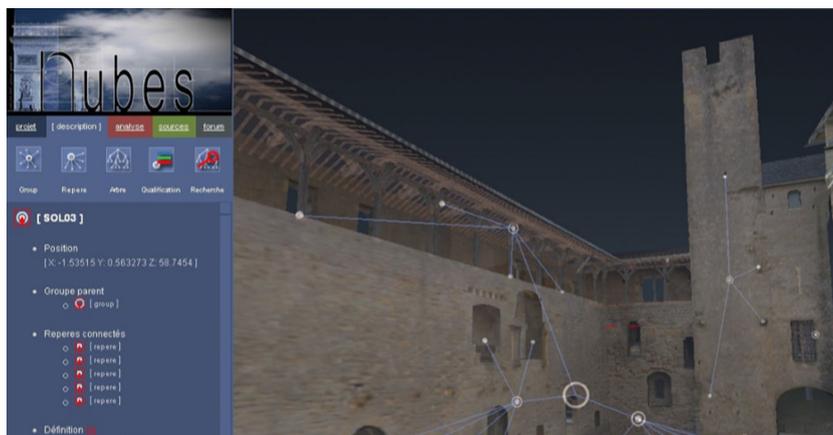


Fig. 3.1 Sinistra: piattaforma NUBES, De Luca et Al. 2010. Destra: applicazione del codice CIDOC CRM come ontologia per la segmentazione dei modelli. De Luca et Al. 2011.

Il tentativo di far assorbire la semantica di settore all'interno di sistemi informativi più ampi e versatili è oggi di forte interesse, sebbene il CIDOC CRM sia riconosciuto come standard attraverso l'ISO 21127:2006, l'ostacolo ancora oggi tangibile risulta essere l'assenza di uno standard univoco di settore capace di contenere e gestire informazioni a diversa scala.

i software di gestione di nuvole di punti non dispongono generalmente di un'infrastruttura già codificata interna, ciò accade perché la struttura semantica viene aggiunta *ex post* su un oggetto non ancora scomposto. Questa specificità rende il sistema semantico da una parte, estremamente flessibile, poiché costruito rispetto a delle esigenze dettate dall'oggetto ma, d'altro canto, l'eccessiva specificità genera limiti nell'interoperabilità con altri sistemi informativi.

L'applicazione di strutture semantiche a modelli numerici discreti è di grande interesse rispetto al tema dell'integrazione di dati, informazioni e modelli nello spazio tridimensionale. Su questo tema, ad esempio, la ricerca multidisciplinare condotta da Apollonio et Al. (2019) si pone l'obiettivo di definire un sistema informativo tridimensionale funzionale all'archiviazione delle informazioni ed alla loro fruizione per il restauro. In esso, il modello numerico diviene interfaccia grafica per l'accesso all'informazione. Tale accesso viene regolato mediante una struttura semantica pensata per contenere l'intero panorama informativo acquisito sul caso studio. La nuvola di punti è stata segmentata in maniera gerarchica per consentire una fruizione multi-risoluzione dell'oggetto basata su ontologie condivise tra le varie professionalità coinvolte (Fig. 3.2). In questo filone specifico,

### 3.1.2 Integrazione di dati nello spazio discreto

Una volta chiarita la natura della struttura semantica in uno spazio virtuale discreto, occorre definire il modo con cui questo sistema di organizzazione complesso interagisca con oggetti indistinti tridimensionali come, ad esempio, nuvole di punti. In altre parole, le modalità con cui è possibile introdurre e disporre di dati eterogenei in un certo ambiente tridimensionale. I risvolti applicativi di questi concetti hanno acquisito grande interesse negli ultimi anni tanto da definire un vero e proprio campo di ricerca, il *data fusion*. Con questo termine si fa riferimento a tutte

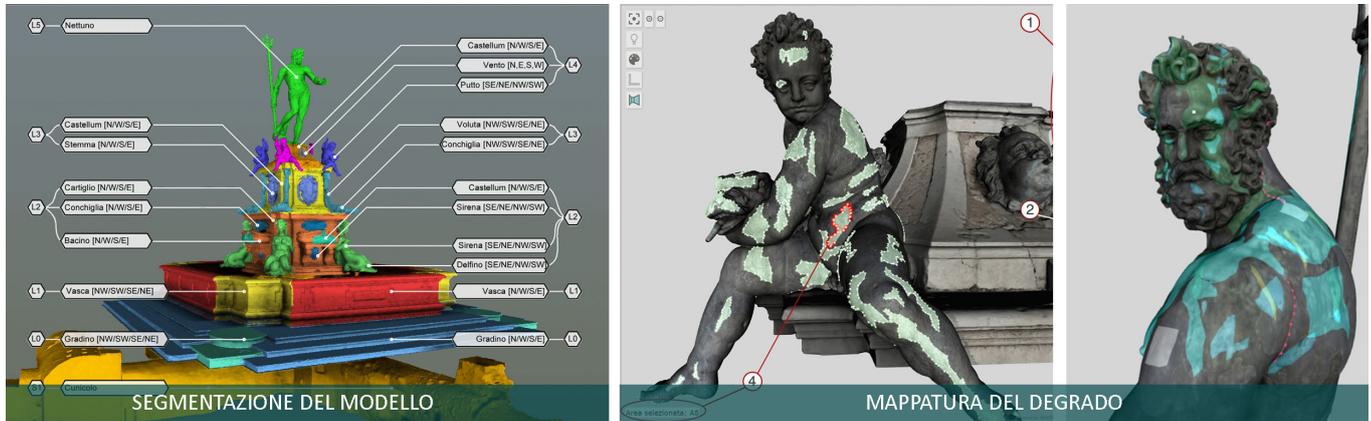


Fig. 3.2 Scomposizione del modello numerico per la gestione multirisoluzione dei dati. Fontana di Nettuno, Bologna (Apollonio, 2019).

le procedure informatiche finalizzate a far coesistere in un unico spazio entità tra loro differenti.

Si parla generalmente di *livelli di fusione* per indicare il grado di complessità esistente tra i dati input e l'output ottenuto. Il *low level of data fusion* combina dati grezzi, derivati da differenti sorgenti, per ottenere un nuovo dato, più rappresentativo di quelli originali, il *medium level* unisce solo specifici caratteri provenienti dai diversi dati grezzi, l'*high level fusion*, invece, fa riferimento a dei modelli statistici complessi basati sulla logica *fuzzy*<sup>5</sup>. Nel campo della documentazione dell'esistente, i tre livelli sono assimilabili, rispettivamente, alla fusione di due tipologie di dato grezzo provenienti da due differenti sensori, al *feature matching*, quindi alle procedure che selezionano specifiche caratteristiche del dato prima di procedere all'unione, ed alla fusione *model-based* basata sull'associazione multidimensionale di oggetti complessi, quindi, di modelli<sup>6</sup>.

Per affrontare l'argomento nel campo della visualizzazione e rappresentazione degli oggetti riferiti al patrimonio, è necessario restringere l'indagine alle operazioni che consentono tale fusione tra le tipologie di dato chiamate in causa nel settore specifico. Tali operazioni sono quelle di annotazione, proiezione e unione spaziale. L'associazione del dato nello spazio tridimensionale dei modelli discreti si esplica mediante annotazioni, quando il vincolo tra dato e modello 3D avviene mediante un'etichetta, un *tag* che rimanda all'ontologia del sistema, mediante proiezione, impiegata generalmente per associare oggetti 2D al modello 3D ed attraverso l'unione spaziale, quando la connessione avviene

tra due entità tridimensionali. Con questa premessa, il carattere morfologico-dimensionale diviene significativo per guidare le procedure di integrazione e controllare ogni trasformazione in termini di accuratezza metrica, geometrica e semantica.

Tramite annotazione è possibile chiarire la natura ontologica dell'oggetto, l'annotazione fornisce la classificazione delle parti e consente di introdurre nel sistema entità ed attributi esterni, la connessione non è spazializzata bensì, avviene per associazione ad un punto, ad una superficie o ad un oggetto intero (Fig. 3.3).

Le procedure sviluppate sulla base di principi proiettivi consentono, invece, di connettere biunivocamente ad un oggetto tridimensionale le immagini bidimensionali. Questo principio è alla base di certa parte delle operazioni di texturizzazione di oggetto 3D tra cui, ovviamente, quelli basati su processi fotogrammetrici. Le potenzialità offerte in tale ambito derivano dall'utilizzo dell'immagine 2D come supporto per la mappatura tematica, impostando un vincolo di tipo spaziale anziché di corrispondenza UV ad esempio<sup>7</sup>; l'immagine diventa così il supporto idoneo a contenere un ampio panorama di informazioni. Su questa base, ad esempio è possibile mappare i termogrammi, derivati dall'indagine termografica e soprattutto, utilizzare il supporto 2D come vera e propria interfaccia di classificazione e segmentazione del 3D (Fig. 3.4).

L'ultima tipologia di associazione definisce un vincolo sviluppato sulle tre dimensioni. In questo caso, le entità condivido-



Fig. 3.3 L'associazione di dati mediante la connessione ad un punto.

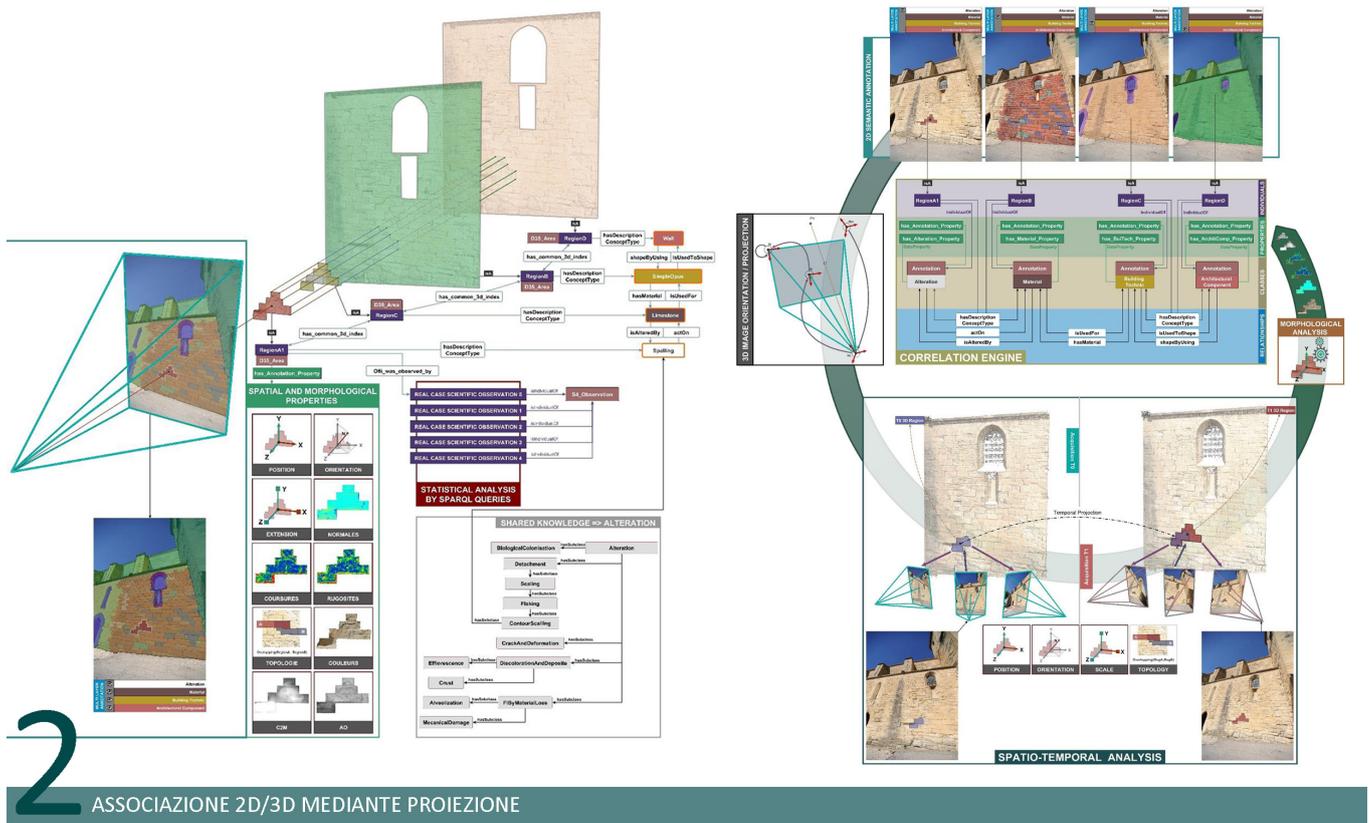


Fig. 3.4 L'associazione di dati mediante proiezione spaziale. Messaoudi et Al. 2018.

no la stessa natura dimensionale e quindi la loro integrazione avviene predisponendo un sistema di riferimento condiviso. Se dal punto di vista teorico questa operazione risulta facilmente comprensibile, il principale elemento di complessità è legato alla trasformazione dei dati per renderli adeguati e correttamente interpretati rispetto al sistema di riferimento selezionato. Questa operazione passa per trasformazioni specifiche caratteristiche per ogni dato. Riguardo le indagini georadar, ad esempio, la ricerca condotta da Neubauer et Al. (2019) (Fig. 3.5) offre un

esempio di spazializzazione delle isosuperfici GPR rispetto ad un modello ricostruttivo 3D. Un'esperienza analoga è fornita da Leucci et Al. (2019) per offrire un modello integrato in cui la lettura dell'oggetto risulta semplificata dalla visualizzazione integrata di dati diagnostici rispetto al loro contesto territoriale. Questa tipologia di integrazione va interpretata nella sua valenza come strumento di indagine scientifica in cui il flusso di integrazione sia dichiarato e condiviso.



Fig. 3.5 L'integrazione spaziale del modello per isosuperfici derivato da GPR e modello ricostruttivo. Neubauer et Al., 2019.

### 3.1.3 Segmentazione e machine learning

La lettura della nuvola di punti prodotta nell'ambito del rilievo, se da una parte interessa gli aspetti geometrici e proporzionali dedotti attraverso analisi quantitative sull'oggetto, dall'altro riguarda invece la sua composizione architettonica. In riferimento alla prima sfera di analisi, l'interrogazione della nuvola di punti consente di misurare e valutare quantitativamente la deviazione tra la copia digitale dell'oggetto costruito e la sua configurazione geometrica e strutturale di riferimento, i rapporti proporzionali tra le parti, la metrologia impiegata. A tale scopo, le mappe di elevazione, ad esempio, consentono di visualizzare le aree di depressione di un solaio, il rigonfiamento di una parete o la sua inclinazione rispetto alle altre mentre la possibilità di accedere agevolmente alla misura dell'oggetto e di ogni sua parte acquisita agevola l'analisi metrologica e proporzionale.

La scomposizione dell'oggetto avviene, invece, attuando un

processo di riconoscimento e di associazione tra un fenomeno individuato su di esso ed uno presente nel nostro archivio mentale. Questo riconoscimento trova la sua concretizzazione nella divisione del modello secondo criteri noti ed un linguaggio codificato condiviso tra gli operatori del settore. In riferimento alle nuvole di punti, sono proprio i processi di segmentazione e classificazione che, sulla base di una struttura logica selezionata a priori, attuano la trasformazione da dato in informazione.

La scomposizione consente lo studio delle singole parti e l'associazione ad ognuna di esse di informazioni 1D, 2D e 3D aggiuntive, la fase successiva di classificazione delle parti consente una gerarchizzazione del modello funzionale al suo studio.

La segmentazione, e quindi la parcellizzazione del modello numerico in gruppi omogenei per una o più caratteristiche, avviene mediante procedure informatiche con gradi diversi di automazione; dalla segmentazione manuale a quella assistita mediante metodologie di *machine learning*. La segmentazione ma-

nuale costituisce un valido strumento in ambito archeologico, ad esempio, per l'individuazione delle fasi stratigrafiche (paragrafo 4.1.3) o per la selezione di porzioni significative ai fini dello studio dei restauri<sup>8</sup>. Più in generale, questo approccio si rivela altamente strategico in tutti i contesti in cui la configurazione semantica si imposta sulla base della lettura critica dell'oggetto. In queste condizioni, infatti, non è possibile individuare *features* 2D o 3D riconoscibili su un campione, computabili e reiterabili su un intero dataset.

La segmentazione del modello numerico avviene secondo criteri definiti dall'utente in funzione delle finalità del processo di ricerca. Prendiamo, ad esempio, la mappatura del degrado su una nuvola di punti; appare evidente quanto l'interpretazione del dato visivo giochi un ruolo di primaria importanza nella scomposizione dell'oggetto. La compresenza di più risposte ad uno stesso fenomeno o di più fenomeni a cui è associabile un'unica

risposta del materiale rendono quest'analisi difficilmente deman- dabile a processi automatizzati. Un approccio distinto al tema è invece ipotizzabile nei casi in cui la scomposizione segua criteri di selezione svincolati dall'interpretazione critica del fenomeno. Su questo secondo filone, un approccio alla scomposizione di nuvole di punti è quello della segmentazione interattiva. Questo tipo di classificazione si appoggia a funzioni di analisi e selezione dinamica di nuvole di punti. Il software non commerciale *VisCore*, ad esempio, consente, attraverso lo sviluppo interattivo di linee di codice Java, la personalizzazione *real-time* di un set di "pennelli". I pennelli agiscono in maniera selettiva per segmentare la nuvola di punti in base a criteri definiti dall'utente mediante il codice agendo sulle proprietà espresse da ogni punto (valore di normale, coordinate relative rispetto ad un piano di riferimento etc.) (Fig. 3.6).



Fig. 3.6 Segmentazione interattiva applicata tramite il software *VisCore*, Hess, 2017.

Questo approccio richiede una fase critica preventiva in cui i criteri di segmentazione devono essere tradotti in caratteristiche morfologiche e geometriche intrinseche alla nuvola di punti<sup>9</sup>. Grilli et Al. (2017) fornisce una panoramica estesa sulle tipologie di *features* generalmente impiegate per le operazioni di segmentazione, gli ambiti di applicazione riguardano prevalentemente nuvole di punti LIDAR dalla scala territoriale a quella del dettaglio degli elementi architettonici. Gli algoritmi impiegati in tal senso automatizzano il riconoscimento di contorni (*edge-based*), di regioni con proprietà analoghe (*region-based*) o di porzioni con caratteristiche morfologiche simili a quelle di un modello geometrico di riferimento (*model fitting*). Nell'ambito delle metodologie assistite, l'approccio *machine learning* impiegato generalmente è invece definito da una fase

di *training*, in cui una regione isolata del dataset è segmentata e classificata manualmente, ed una fase di *validation*, in cui la regola per la segmentazione e classificazione è applicata sull'intero dataset. L'ottimizzazione e la validazione dell'operazione di segmentazione avviene sviluppando una matrice di confusione che metta in evidenza i punti correttamente segmentati, i falsi positivi (punti non appartenenti a quella regione ma erroneamente attribuiti ad essa) ed i falsi negativi (punti appartenenti alla regione ma non attribuiti ad essa dall'algoritmo)<sup>10</sup>. I recenti sviluppi di algoritmi di *deep learning* e *neural networks* rendono il tema della generazione di informazioni sempre più automatizzabile ponendo interrogativi di natura teorica e metodologica sull'entità e l'effettiva necessità dell'apporto critico-interpretativo in queste procedure (Fig. 3.7).



Fig. 3.7 Da sinistra: segmentazione *region-based* (Grilli, 2017), *model fitting* (Grilli, 2017) e segmentazione 2D sulla texture (Grilli, 2018).

Tra i diversi approcci qui brevemente accennati, le procedure di *model fitting* e gli algoritmi di *shape detection*<sup>11</sup>, facendo discendere la segmentazione della nuvola di punti dal confronto con un modello continuo di riferimento, portano in evidenza il rapporto tra modello numerico/modelo continuo, automatizzazione della segmentazione/processo interpretativo, unicità morfologica dell'oggetto costruito/genesi della forma archetipa. Queste coppie di istanze evidenziano una innegabile tensione, potenziata dallo sviluppo computazionale raggiunto nel settore IT, tra l'individuazione di procedure scientificamente valide e, quindi, ripetibili, e l'aspetto critico-interpretativo che lo specifico ambito di applicazione richiede. Questo continuo rimando

dall'uno all'altro modello favorisce la comprensione, il modello continuo diventa lo strumento per verificare un'ipotesi di una certa genesi formale dell'oggetto, il risultato di questo confronto fornisce gli strumenti per intervenire sulla teoria, validarla o confutarla.

### 3.2 I sistemi informativi sui modelli continui

#### 3.2.1 La semantica

In ambiente BIM, la definizione del codice semantico avviene tramite una successione gerarchica. Questa successione ricon-

duce ogni elemento modellato al suo contesto. Si fa notare come appaia nuovamente il concetto di “contestualizzazione”, trattato nell’introduzione al capitolo, per definire l’operazione essenziale alla trasformazione del dato in informazione. In ambiente BIM, la contestualizzazione avviene proprio attraverso la struttura semantica. Ogni oggetto digitale costruisce rapporti di sussunzione o di equivalenza con gli altri elementi ontologicamente definiti. La struttura semantica costituisce così una precondizione per la modellazione e la connessione delle informazioni. Questa logica è assimilabile ad una sequenza con livelli di astrazione concettuale crescente, ogni livello risponde a specifiche domande e fornisce un certo contenuto informativo. Il livello massimo di astrazione corrisponde all’individuazione della categoria di

appartenenza. Le categorie rispondono al “che cosa è” dell’oggetto, assimilabile, in buona sostanza, alla funzione che assolve nel contesto del manufatto. Ogni categoria contiene diverse soluzioni, ognuna generata da diverse combinazioni di elementi costruttivi simili, tali soluzioni costituiscono delle configurazioni specifiche della categoria e forniscono informazioni relative agli elementi costituenti ed al loro rapporto reciproco. Ogni configurazione così espressa si trasmette mediante parametri, vincoli geometrici e costruttivi che, sostanzialmente, rendono singolare l’oggetto, ne definiscono una specifica identità. I parametri garantiscono la personalizzazione di una certa configurazione in funzione del manufatto specifico, sono gli strumenti mediante cui l’elemento acquisisce la propria singolarità (Fig. 3.8).

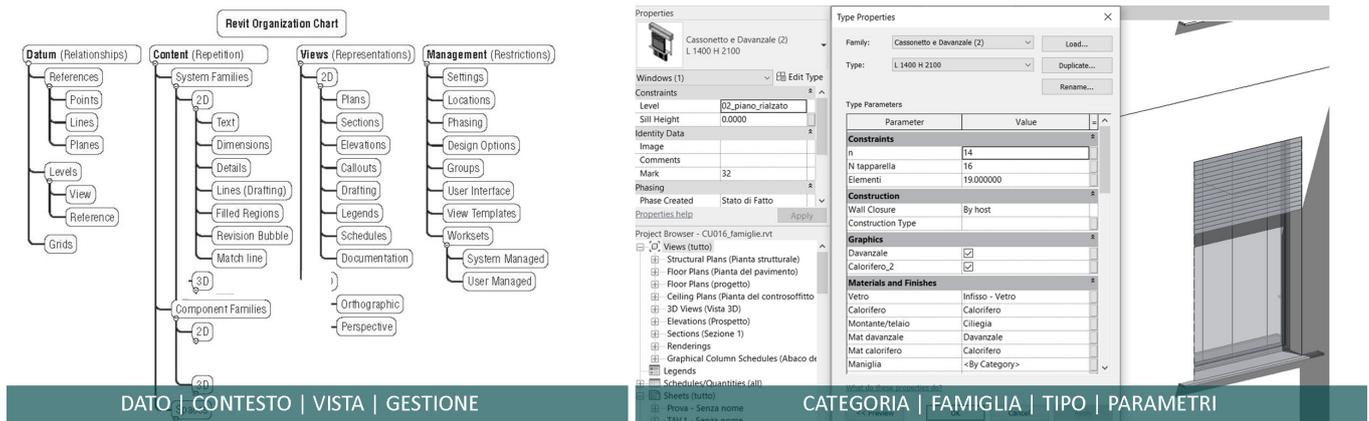


Fig. 3.8 Sinistra: Autodesk Revit Organisation Chart ([https://revitarchitecturetrainingguide.blogspot.com/2011/07/project-organization\\_29.html](https://revitarchitecturetrainingguide.blogspot.com/2011/07/project-organization_29.html)), graficizzazione della struttura semantica del software. Destra: schermata dello stesso software, è possibile identificare l’interfaccia di personalizzazione di famiglie, tipi e parametri ed il corrispondente grafico.

Questo codice è una base neutrale rispetto ai campi di applicazione specifici ed assicura che la descrizione di oggetti tridimensionali, tra loro afferenti ad ambiti diversi, possano risultare confrontabili e mutualmente intellegibili. L’interfaccia di connessione di questi differenti ambiti trova il suo riscontro applicativo tramite l’utilizzo degli standard (paragrafo 3.2.2). Rispetto ad una struttura semantica di base, fornita da tutti i software di BIM authoring, ogni classe di manufatti riconducibili ad un certo tipo di schematizzazione, definisce una propria ontologia. In questo senso, l’ontologia utilizzata in riferimento al processo costruttivo di progetto predisporrà una codifica ontologica propria, diversa da quella sviluppata rispetto alla proget-

tazione di un’infrastruttura, ad esempio. Su questa linea, rispetto al patrimonio costruito, l’ontologia risente della complessità di interconnessioni necessarie a schematizzare un oggetto. Per questa ragione i diversi criteri ontologici sperimentati, con molta difficoltà riescono ad imporsi in maniera assoluta, concorrono, piuttosto, a favorire la trasmissione di alcune informazioni rispetto ad altre in virtù dell’obiettivo conoscitivo da perseguire<sup>12</sup>.

### 3.2.2 Lo standard

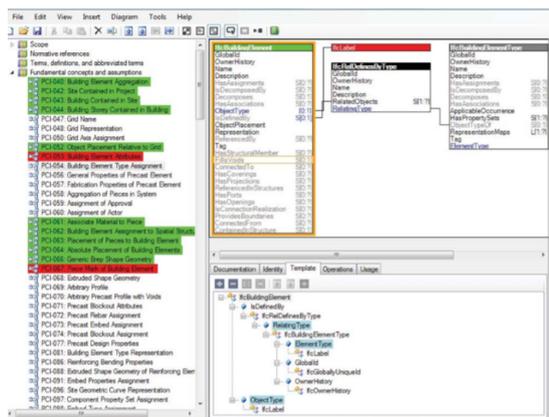
Nell’ambito della produzione e gestione di dati riferiti al settore delle costruzioni, lo standard di riferimento è l’IFC (Industry

Foundation Classes). Introdotto in relazione alla metodologia BIM di gestione del dato, questo standard si è sviluppato per consentire interscambio tra vari utenti senza perdita di informazioni.

L'IFC si configura come una piattaforma neutrale, non proprietaria, nata per garantire l'interoperabilità tra settori disciplinari, software di modellazione e tra utenti, per mezzo di un sistema di codifica e decodifica dei dati (Fig. 3.9). La necessità di predisporre una piattaforma di questo genere è testimonianza evidente di una tendenza al *networking* tra diversi tipi di utenza per favorire un approccio globale alla comprensione dell'oggetto.

L'iniziativa è stata lanciata dalla fondazione *Building Smart International* per promuovere un sistema aperto, *open BIM* è

proprio il nome della certificazione, che vada oltre il modello specialistico, prodotto riferendosi ad applicativi specifici, e che approcci l'idea di modello unico e condiviso, contenente le differenti specificità del processo costruttivo. L'*open BIM* richiede, quindi, la trasposizione in un unico ambiente di condivisione dei dati (ACDat secondo la UNI 11337) dell'intero flusso di lavoro che governa il processo, dalla fase di progettazione avanzata a quello di manutenzione. Il modello unico è trattato non solo come dispositivo conoscitivo olistico ma, consente la verifica di tutte le interferenze presenti tra i vari modelli specialistici<sup>13</sup>. Le *software house* aderenti all'iniziativa<sup>14</sup> ricoprono, per buona parte, gli ambiti della modellazione architettonica, dell'analisi strutturale, dell'impiantistica e della gestione del cantiere.



GlobalId	OwnerHistory	Name
4847	IfcCovering	IfcCovering
5167	IfcColumn	IfcColumn
5894	IfcCovering	IfcCovering
6214	IfcColumn	IfcColumn
6869	IfcCovering	IfcCovering
7189	IfcColumn	IfcColumn
7844	IfcCovering	IfcCovering
8164	IfcColumn	IfcColumn
8819	IfcCovering	IfcCovering
9139	IfcColumn	IfcColumn
9794	IfcCovering	IfcCovering
10115	IfcColumn	IfcColumn
10770	IfcCovering	IfcCovering
11091	IfcColumn	IfcColumn

Fig. 3.9 Interfaccia dell'IFCDoc, lo strumento di personalizzazione delle definizioni IFC (<http://cicilab.com/research.html>).

Sebbene sul piano teorico la logica alla base di questo processo sia ampiamente consolidata e condivisa, le logiche procedurali di integrazione sperimentano ancora limiti di traduzione tra la ricezione del dato sorgente e la sua condivisione<sup>15</sup>.

In questo panorama molto variegato, che unisce settori di ricerca differenziati ed applicativi specialistici, è facile intuire quanto la codifica del costruito legato al patrimonio architettonico debba superare una serie di criticità aggiuntive. Allo stato attuale, il processo di standardizzazione definisce un certo livello di integrazione con modelli numerici discreti prevalentemente dal punto di vista di compatibilità di formato. Tuttavia, tale livello di compatibilità con la conseguente possibilità di muoversi con agevolezza tra diverse piattaforme è solo il primo passaggio, in-

dispensabile ma affatto esaustivo, dell'effettiva interoperabilità tra sistemi eterogenei. In questo settore, il modello condiviso aperto, concepito come prodotto finale di tutte le indagini conoscitive sviluppate intorno all'oggetto, riesce solo a convogliare in sé il panorama informativo, mentre l'aspetto di automatizzazione dei processi di verifica delle interferenze e di gestione efficace di oggetti tridimensionali fortemente diversificati è ancora molto limitato. Ciò accade perché nuvole di punti, modelli di superficie mesh e modelli parametrici semanticamente divisi non dispongono di una struttura di codifica confrontabile, quindi, sebbene possano abitare uno stesso spazio virtuale, non per questo la loro integrazione può dirsi pienamente efficace. In questi termini, è possibile pensare al processo di integrazione come

a quel processo in cui oggetti tra loro tipologicamente diversi condividano un grado di maturità semantica tale da permettere il loro confronto.

Allo stato attuale, gli algoritmi di verifica utilizzati nel settore consentono, in maniera automatizzata, di riportare le aree di compresenza tra superfici o tra superfici e punti. Questo strumento agisce su un piano meramente morfologico-spaziale e, dal punto di vista concettuale, poco ha di diverso rispetto agli algoritmi di calcolo iterativo implementati da numerosi software di visualizzazione e gestione di modelli discreti (Fig. 3.10)<sup>16</sup>. Ciò

significa che anche applicativi nati ed utilizzati per promuovere e validare un certo standard di interoperabilità, hanno un livello di sviluppo diverso quando rapportato alla sfera del patrimonio costruito.

In questo contesto, una strada perseguibile riguarda proprio il processo di configurazione semantica da applicare ai modelli numerici (paragrafo 3.1.1). Questa linea di ricerca ha l'obiettivo di progettare, dal punto di vista degli standard, e realizzare, dal punto di vista degli applicativi, l'interoperabilità effettiva nell'ambito dell'HBIM.

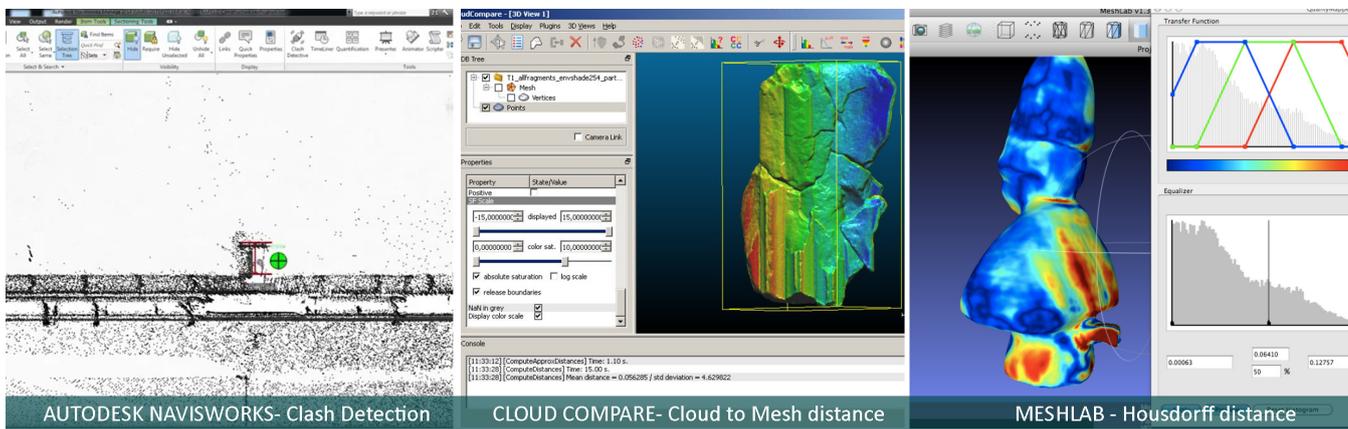


Fig. 3.10 Strumenti di controllo delle interferenze tra nuvole di punti e modelli continui. Da sinistra: Navisworks (<https://knowledge.autodesk.com/support/navisworks-products>), Cloud Compare ([https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php?title=How\\_to\\_compare\\_two\\_3D\\_entities](https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php?title=How_to_compare_two_3D_entities)) e MeshLab (<http://www.stefanocostanzo.net/g3d/comparison/>).

### 3.2.3 Le applicazioni HBIM

La corretta gestione dell'informazione, nella sua accezione di dato contestualizzato, si sostiene attraverso un apparato semantico strutturato (paragrafo 3.2.1). Rispetto alla modellazione parametrica, questo apparato trova una sua espressione congeniale tramite i sistemi BIM; in essi l'utente costruisce il modello aggiungendo informazioni sulla base di una struttura già codificata. Questo database grafico di riferimento è pensato e validato per una semantizzazione *ex-ante*<sup>17</sup>. Il processo di conoscenza relativo al patrimonio costruito presuppone un'inversione di prospettiva necessario per l'effettivo sviluppo e validazione dell'HBIM<sup>18</sup>. Questa inversione passa necessariamente per una rimodulazione ontologica della struttura informativa, funzionale ad una narrazione coerente ed efficace dell'oggetto architettonico o arche-

ologico analizzato. Le sperimentazioni nell'ambito dell'HBIM vanno proprio in questa direzione, tramite la definizione di un lessico adeguato che serva da supporto per la composizione del modello. Tuttavia, la costruzione di tale lessico appare tutt'altro che scontata, il problema risiede essenzialmente nella concezione dell'architettura costruita come *unicum* a cui si contrappone l'esigenza di riferirsi a codici standardizzati. Andando più nel dettaglio però, questa contrapposizione diviene meno incisiva, l'analogia *sui generis* tra il linguaggio dell'architettura e quello testuale può offrire un'interpretazione del tema attinente. Seppure l'oggetto architettonico in sé non ammette copie costruite che ne imitino tutti gli innumerevoli caratteri, ad esso sarà possibile ugualmente riferirsi tramite il riconoscimento di uno specifico carattere denotativo. La denotazione dell'oggetto architettonico ricorre tramite elementi tettonici e costruttivi a cui vengono as-

sociate funzioni codificabili. Sulla base di questo codice, è possibile, quindi, ampliare il lessico di base necessario alla costruzione del modello. In riferimento all'architettura storica, questo codice si trasmette tramite i trattati, a partire dalla loro decodifica, per l'appunto, è possibile procedere riproponendone quegli stessi parametri in ambiente virtuale. Apollonio et Al. (2012), ad esempio, focalizzano la ricerca sull'analogia tra il ruolo centrale del trattato come genesi del modello ideale, delle variazioni al modello ideale e del modello costruito. Allo stesso modo, l'approccio *BIM-based* imposta la parametrizzazione come base per la produzione tanto del modello ideale quanto delle sue variazioni reali. Sullo stesso tema, Giovannini (2017), proseguendo un approccio alla scomposizione impostato già da De Luca et Al. (2007), propone la parametrizzazione dell'ordine scomponendolo per partizioni successive; Bianconi et Al. (2018) propongono la parametrizzazione dei cinque ordini dell'architettura per indagare le variazioni sul tema proposte dai principali trattatisti; Rossi (2019), invece, individua una sequenza progressiva che, partendo dall'archetipo, espressione del grado maggiore di standardizzazione e desunto dai trattati, passa per il prototipo, il geometrico ed arriva all'*as-built*.

Un ulteriore ambito di indagine riguarda la peculiare applicazione della metodologia BIM in merito all'architettura archeologica. Con questo termine si fa riferimento al sistema di evidenze archeologiche riferibili ad una architettura costruita non più presente nella sua consistenza fisica. In questo settore il baricentro del ruolo del modello si sposta verso il suo utilizzo come dispositivo per convogliare la documentazione riguardo l'oggetto e, soprattutto, restituire una forma costruttiva alle tracce archeologiche. In questa direzione, ad esempio, si muove il progetto *ArchaeoBIM*<sup>19</sup> in cui la costruzione del modello si serve di una libreria personalizzata per riconfigurare uno spazio architettonico e valutarne le capacità costruttive e strutturali.

Nell'ambito dell'architettura costruita, invece, la questione interessa la versatilità dei processi HBIM nell'esprimere i caratteri non più astratti ma concreti rispetto ad un riferimento tangibile dell'oggetto. Su questa linea, le sperimentazioni condotte da Verdiani et Al. (2018), trovano la strada per un connubio tra nuvola di punti e parametri strutturali per l'analisi del costruito, Bruno et Al. (2018), invece, validano diversi approcci procedurali per la modellazione e parametrizzazione dell'oggetto *as is*, ovvero, nella sua configurazione fisica e meccanica dedotta dal rilievo. In

questo ultimo contesto si inseriscono, più in generale, una serie di ricerche legate al processo manutentivo dell'oggetto costruito, al restauro ed alla corretta documentazione.

Per sintetizzare, all'HBIM è possibile ricondurre tre principali prerogative, la prima è la costruzione del modello sulla base della codifica dell'architettura trasmessa mediante i trattati. In tal senso, l'affinità concettuale tra modello parametrico digitale e modello "analogico", codificato su precisi rapporti sintattici, favorisce una certa continuità logica ed operativa; in entrambi i casi, il tipo architettonico è codificato mediante una serie di parametri che ne definiscono le regole, su questa base, è possibile costruire un numero indefinito di soluzioni, di istanze singolari, che denotano quell'*unicum* a cui si è fatto riferimento pocanzi (Figg. 3.11, 3.12). La seconda via è quella della modellazione di una possibile soluzione architettonica non più esistente ma ipotizzabile a partire da tracce (Fig. 3.13). Anche in questo caso, la parametrizzazione serve ad astrarre gli elementi significanti ed a codificarli sintatticamente rinunciando a dare risoluzione univoca al problema. La terza strada riguarda l'utilizzo della parametrizzazione come processo logico per connettere in maniera esplicita il criterio generale al caso specifico (Fig. 3.14). Questa declinazione è quella che più da vicino riguarda il rapporto tra l'oggetto fisico e la sua copia digitale ponendo l'attenzione sui temi di sintesi, di riconoscibilità e di accuratezza.

In definitiva, l'HBIM riesce ad integrare il processo ideativo applicabile a tutta l'architettura pensata e costruita mediante regole compositive. La composizione architettonica si stanza su un piano teorico in cui vengono definite le "categorie" e le "famiglie"<sup>20</sup> declinate, sul piano applicativo, tramite parametri di "tipo", per i caratteri costruttivi, ed istanza per quelli legati alla scelta compositiva studiata per l'elemento specifico.

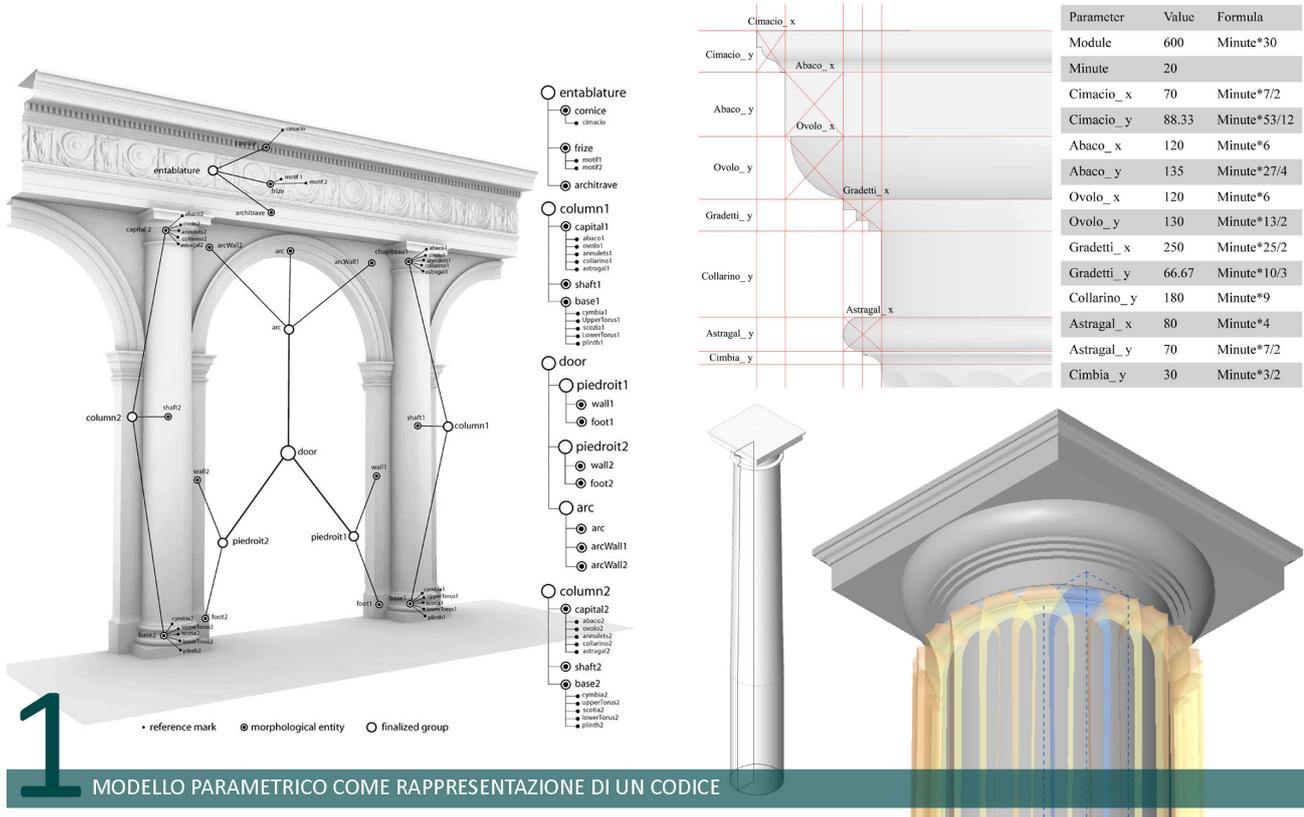
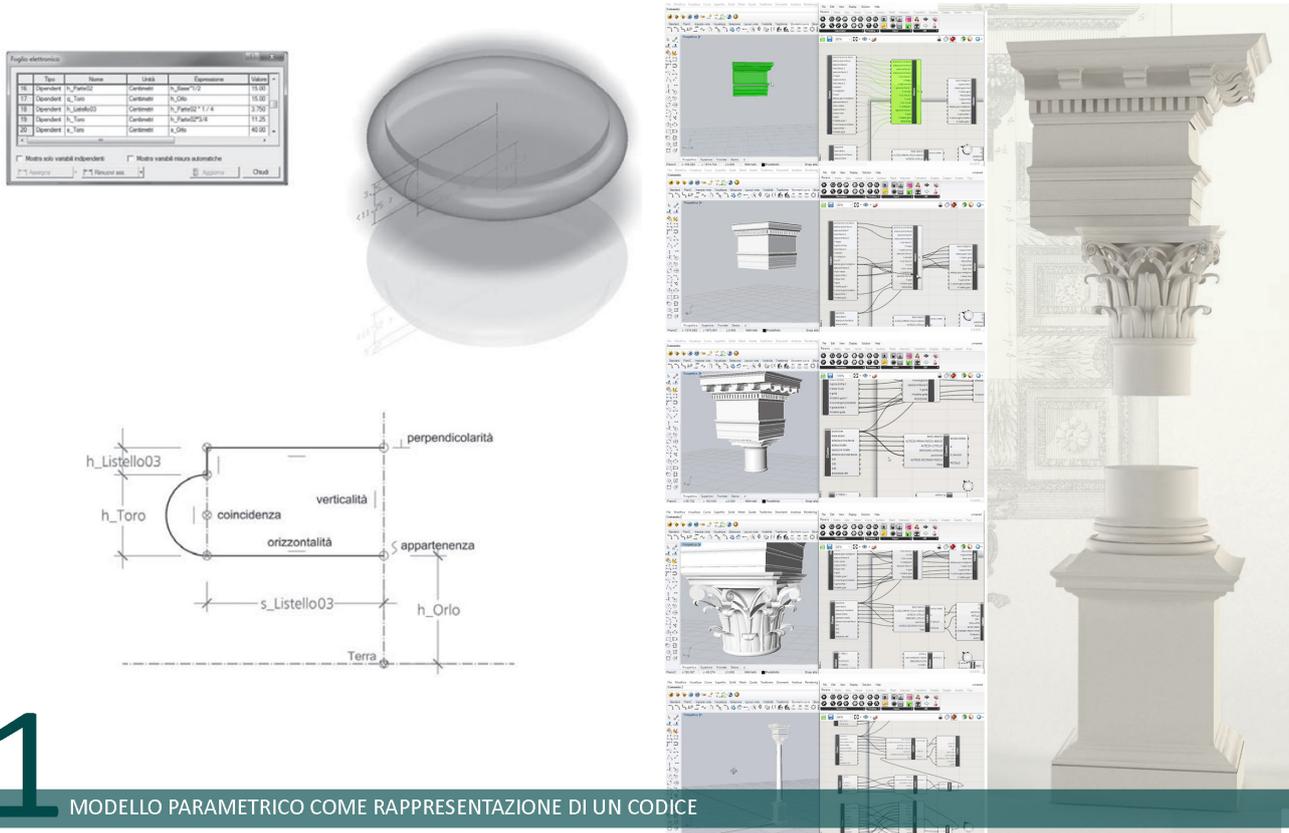


Fig. 3.11 La parametrizzazione del modello come trasferimento dei canoni compositivi espressi mediante i trattati. (Sinistra: De Luca et Al., 2007, destra: Apollonio et Al., 2012)



1

MODELLO PARAMETRICO COME RAPPRESENTAZIONE DI UN CODICE

Fig. 3.12 La parametrizzazione del modello come trasferimento dei canoni compositivi espressi mediante i trattati. (Sinistra: Valenti, 2013, destra: Bianconi et Al., 2019)

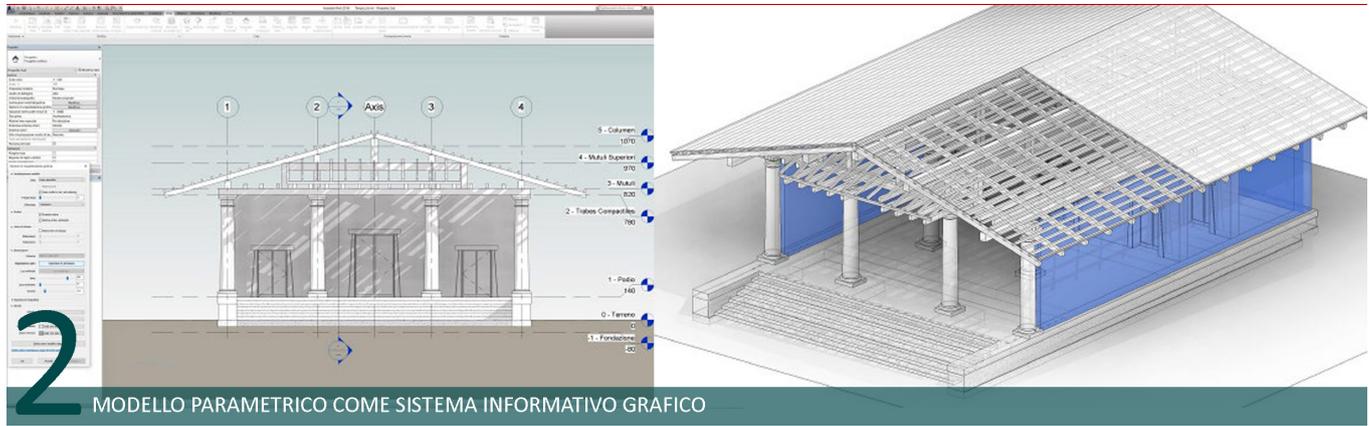


Fig. 3.13 La parametrizzazione del modello come database informativo per la modellazione ricostruttiva (Garagnani, 2016)

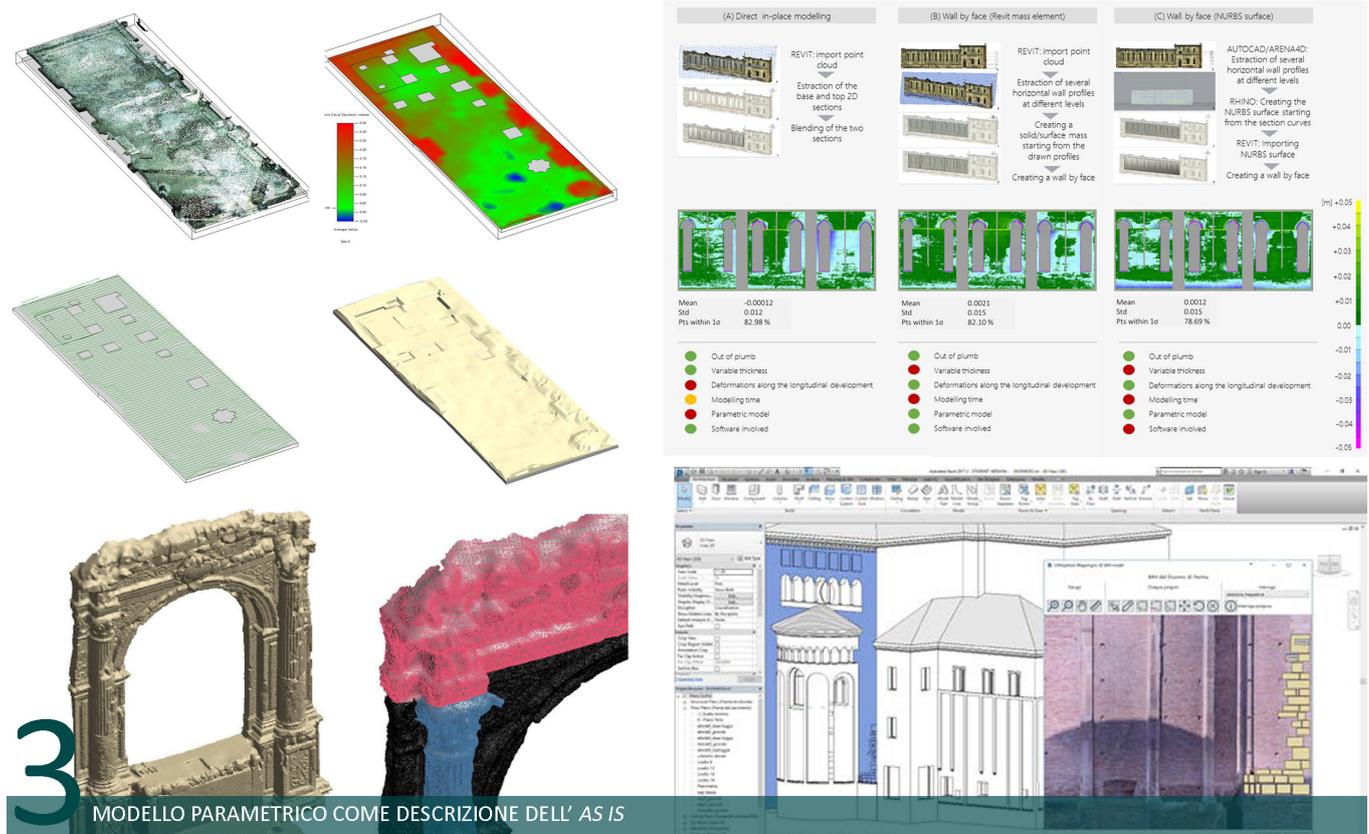


Fig. 3.14 La parametrizzazione del modello come restituzione dei caratteri morfologici del costruito per l'analisi dello stato di fatto (Sinistra: Santagati, 2018, destra: Bruno, 2018)

**Note**

- 1 Messaoudi et Al, 2017 definisce l'ontologia, nell'ambito dell'informatica, come ad una specificazione esplicita e formale di una concettualizzazione condivisa.
- 2 Niccolucci, 2017.
- 3 R. Cacciotti et Al. 2015.
- 4 De Luca et Al. 2010.
- 5 Ramos et Al. 2015. La ricerca fa riferimento all'ambito del rilievo ed alla fusione di procedure range-based, come quelle adottate dai TLS, e quelle image-based applicate dai processi fotogrammetrici. Sebbene quindi, si parli in tal senso di due tipologie di dato contenenti proprietà confrontabili, il discorso è estensibile alle varie tipologie di indagine condotte sul patrimonio.
- 6 Forkuo, 2004.
- 7 La mappatura UV (UV map) è una tecnica di texture mapping basata sull'associazione biunivoca dell'oggetto 3D a coordinate planari (UV) dell'immagine di texture. La tecnica si basa sullo sviluppo piano del solido.
- 8 Sul tema, si cita la ricerca condotta da Cipriani et Al.2017. In essa, la segmentazione semantica è funzionale all'individuazione e distinzione degli interventi di restauro successivi rispetto alla configurazione originaria dello spazio architettonico. Questo tipo di approccio si basa totalmente sulla capacità critica dei ricercatori coinvolti e pertanto, è difficile pensare ad un'automatizzazione di tale processo.
- 9 Hess et Al.2017.
- 10 Applicazioni di questo tipo sono sviluppate tanto sulla base di features 2D, riconosciute su immagini ed applicate su datasets 3D (Grilli et Al.2018) che su features 3D relative alle caratteristiche morfologiche di un aggregato di punti (Hess et Al. 2017, Grilli et Al. 2019). La combinazione di queste due tipologie (2D e 3D) garantisce un'ottimizzazione del risultato. In tal senso, ad esempio, è possibile combinare il dato del valore di riflettanza del punto con il dato RGB corrispondente e la sua posizione relativa rispetto ad un determinato piano (Del Pozo et Al., 2015).
- 11 L'applicativo Cloud Compare, ad esempio, implementa l'algoritmo RANSAC per automatizzare la segmentazione dell'oggetto rispetto in riferimento ad enti geometrici semplici (piano, sfera, cilindro, cono, toro).
- 12 Acierno et Al. 2017, ad esempio, individua quattro principali domini ontologici: l'edificio, la sua storia, la documentazione e le testimonianze raccolte intorno ad esso ed i personaggi coinvolti nell'evoluzione storica ed architettonica. Sebbene costruita per controllare l'intero panorama conservativo dell'architettura, l'ontologia costruita è specificatamente orientata per governare il processo investigativo dell'oggetto.
- 13 Il software Naviswork, acquisito da Autodesk nel 2007, predispone, ad esempio, una serie di strumenti di revisione e di verifica automatica delle interferenze di progetto. L'applicativo gestisce un'ampia gamma di formati di scambio riferiti tanto al CAD quanto a software gestionali e formati di visualizzazione di nuvole di punti. Nello specifico, il software predispone la visualizzazione combinata di modelli parametrici solidi con modelli discreti ed un toolkit per la codifica della tipologia di interferenza e individuazione dei prodotti coinvolti.
- 14 <https://technical.buildingsmart.org/certification/certification-participants/>. Il sito building smart international riporta l'elenco delle case software aderenti e dei software certificati aggiornandolo rispetto alla versione di schema IFC rilasciato.
- 15 Quattrini et Al. 2016.
- 16 L'applicativo CloudCompare, ad esempio, fornisce il calcolo iterativo di "Cloud to mesh distance", "Mesh Lab" utilizza lo strumento "Hausdorff Distance" per rispondere al compito di individuare la distanza geometrica tra superfici poligonali o punti.
- 17 Brusaporci et Al. 2019. La ricerca condotta dagli autori evidenzia una distinzione processuale tra il BIM e l'HBIM. Nel primo caso, la semantizzazione del modello precede la modellazione, è quindi ex ante, nel secondo caso, in riferimento al processo di conoscenza che parte dal rilievo e termina con un modello, la semantizzazione è ex post, avviene tramite un processo sintetico induttivo che è alla base della composizione del modello restitutivo.
- 18 Il termine HBIM (Historic/Heritage Building Information Modeling) è coniato da Murphy et Al., 2013. In Dore & Murphy, 2013, con questo acronimo gli autori si riferiscono ad un plug-in per il BIM in cui oggetti parametrici interattivi sono modellati a partire da nuvole di punti.
- 19 Garagnani et Al., 2016.
- 20 Questa terminologia è si riferisce ad una codifica gerarchica utilizzata dai BIM-authoring softwares. Nello specifico, il software proprietario Autodesk Revit compone la struttura ideale degli oggetti individuando dei macro-contenitori, le "categorie"; ogni "categoria" contiene diverse configurazioni, le "famiglie"; queste famiglie diverse sono caratterizzate mediante "parametri di tipo" e "parametri di istanza". I parametri di tipo contribuiscono a fornire informazioni di natura costruttiva, insieme definiscono il "tipo", per l'appunto, i parametri di istanza, invece, riguardano le informazioni relative alla contestualizzazione dell'oggetto rispetto all'intera costruzione. Una struttura simile è intercettabile in tutti i software BIM-authoring. Per comodità, La nomenclatura proposta nell'ambito della ricerca presente è riferita al software Autodesk Revit.



## 4. Output: variazioni sul tema del modello digitale

In questo capitolo si applicheranno i principi teorici e procedurali precedentemente espressi rispetto a dei casi studio selezionati. La ricerca porta alla produzione di modelli integrati riferiti tanto ad uno spazio virtuale con un'impostazione BIM, che ad uno spazio di elaborazione di modelli numerici. I due sistemi adottati saranno tra loro confrontati con l'obiettivo di individuare specificità, limiti e potenzialità di ognuno di essi e definire un processo che riesca ad ottimizzare la sistematizzazione delle informazioni in un ambiente tridimensionale unico. Gli episodi di seguito presentati, mettono in evidenza l'insita permeabilità di questi due mondi che, più che concorrenti, appaiono infine, complementari e convergenti.

Le sperimentazioni sono state condotte nel settore dell'architettura archeologica. Questa scelta trae le sue motivazioni rispetto a due elementi. La prima considerazione riguarda l'effettiva disponibilità di dati fortemente eterogenei in ambito archeologico. In tal senso, rispetto al patrimonio costruito inteso nella sua ampia accezione, questo settore utilizza in maniera relativamente diffusa, metodologie di indagine multidisciplinari: la necessità di indagare ciò che non è visibile risulta indispensabile, nonché funzionale, sia alla programmazione di operazioni di scavo archeologico che al completamento del panorama esplorativo su porzioni di territorio in cui lo scavo tradizionale non risulti perseguibile. Ciò produce una condizione particolarmente feconda in cui l'obiettivo della comprensione di un luogo viene perseguito proprio sulla base dell'interpretazione trasversale dei dati. Questo approccio è decisamente più mitigato nella sfera di quella architettura costruita in cui, a diversi livelli, risulti ancora evidente una certa corrispondenza tra le questioni compositive e formali rintracciate sull'oggetto rispetto a quelle dedotte da altre fonti documentarie. In questo contesto, le indagini collaterali rispetto allo studio ed alla analisi dell'oggetto,

costituiscono generalmente un elemento aggiuntivo, non sempre sostanziale né imprescindibile, rispetto al processo di conoscenza. Proprio sulla base di questa mancanza di corrispondenza tra la fisicità dell'oggetto ed i caratteri architettonici e funzionali originari, si apre la seconda argomentazione in merito alla scelta della casistica trattata. Lo studio dell'architettura archeologica pone necessariamente al centro del percorso metodologico il tema della rappresentazione: il problema della corretta integrazione dei dati si lega a quello della corretta interpretazione e rappresentazione di caratteristiche formali e spaziali dell'oggetto non più intercettabili sull'oggetto stesso. Questo tema diviene una situazione limite in cui la ricostruzione della forma è in un rapporto di forte dipendenza dal processo di analisi dei dati e dalle indagini condotte.

Da una parte, quindi, il modello dell'oggetto si trova a dover affrontare un ulteriore elemento di criticità, deve risolvere e superare l'assenza di un dato fisico di per sé riconoscibile in maniera assoluta e deve provvedere a dare una soluzione formale e costruttiva a ciò che non c'è più. Dall'altra parte però, questa complessità ulteriore trova nello spazio virtuale e nelle metodologie di *Information Modeling* una possibile risoluzione in termini di organizzazione e trasmissibilità dell'apparato documentale in base al quale viene ideata e modellata una certa soluzione costruttiva. Sul tema dell'architettura archeologica, le considerazioni sull'effettiva disponibilità di dati eterogenei e sulla costruzione di un dispositivo tridimensionale che integri la forma dell'oggetto, si pongono in continuità rispetto ai due modi di concepire il modello<sup>1</sup> per disporne come strumento di studio. La riflessione porta l'attenzione sulla necessità di sviluppare di pari passo gli strumenti di organizzazione semantica, quelli di integrazione di entità eterogenee e, infine, quelli di interazione tra l'utente ed il modello. In questa direzione, ad esempio, si muove la

ricerca condotta da Messaoudi et Al. (2017) per la definizione di un dominio ontologico finalizzato all'annotazione semantica 3D. Ancora in risposta alle tre esigenze espresse pocanzi, lo studio qui presentato intende combinare la base semantica standardizzata di approccio BIM per garantire l'interoperabilità del modello con le possibilità di integrazione ed annotazione dei dati offerti dagli strumenti di gestione e visualizzazione di modelli discreti.

Negli esempi di seguito presentati, il modello è prodotto ed utilizzato proprio con questa duplice finalità: integrare la documentazione esistente e, su questa base, proporre interpretazioni. Il caso studio della Basilica Iulia è stato selezionato per indagare la prima finalità, ossia, per accedere e documentare la complessa stratigrafia del luogo, tanto mediante gli strumenti del rilievo quanto attraverso l'integrazione con la geofisica. Rispetto al tema, l'assoluta cesura tra il significante (evidenze archeologiche) e significato (l'interpretazione delle fasi storiche ed architettoniche di un luogo) focalizza l'attenzione sulla comprensione dell'oggetto mediata dal modello. In questo contesto, il modello prodotto in ambiente virtuale conserva il principio di *mimesis*<sup>2</sup> con l'oggetto, questo rapporto di corrispondenza è necessario alla lettura critica integrata nello spazio virtuale.

Al contrario, riguardo il caso del ninfeo di Egeria, è rintracciabile una certa riconoscibilità geometrica e formale tra l'oggetto edificato oggi visibile e la sua composizione originaria. Su questo caso studio, oltre all'acquisizione massiva degli aspetti morfometrici, la prima fase di integrazione di dati relativi si è servita di indagini termografiche per intercettare ciò che avviene oltre la superficie; la seconda fase, invece, ha indagato i processi di costruzione del modello in ambito BIM. In tal caso, la consistenza materiale del luogo è stata utilizzata come base per la ricostruzione della sua immagine, il rapporto di *mimesis* tra oggetto e sua rappresentazione lascia spazio ad un altro valore, quello della conoscenza filologica definito dall'opportunità di visualizzare virtualmente una possibilità, un'interpretazione di ciò che è ora parziale e frammentato nella realtà.

L'ultimo caso studio individuato riguarda l'aula IX delle Terme di Diocleziano. In questo contesto, l'approccio

all'integrazione è funzionale a trasporre informazioni bidimensionale su un modello tridimensionale. Rispetto a questo utilizzo, viene conservata la *mimesis* tra oggetto e modello e, allo stesso modo, tanto l'oggetto quanto il modello conservano il carattere di riconoscibilità rispetto all'architettura ed allo spazio architettonico nella sua funzione iniziale.

Riassumendo, i casi studio di architettura archeologica sono investigati rispetto a diverse possibili declinazioni dei concetti di *mimesis*, tra oggetto ed il suo modello di rappresentazione, e riconoscibilità, tra oggetto ed il suo carattere geometrico e formale originario.

#### 4.1 La Basilica Iulia<sup>3</sup>

Lo studio della Basilica Iulia al Foro Romano ha posto in rilievo una serie di complessità legate all'accessibilità degli spazi, alla selezione preventiva dei caratteri significativi del luogo ed ai processi di elaborazione funzionali a generare un sistema informativo complesso.

Il lato meridionale del Foro Romano costituisce a tutt'oggi una parte lacunosa dell'intera area. Infatti, sebbene se ne conosca piuttosto bene la fase di monumentalizzazione relativa al periodo augusteo, si sa ancora poco dei periodi precedenti. Nel corso del XIX secolo, Luigi Canina (1848-1852) e Pietro Rosa (1871-1872) ebbero modo di lavorare proprio su questo lato del Foro, mettendo in luce e poi restaurando la *Basilica Iulia*, opera realizzata da Cesare e successivamente ricostruita da Augusto, il quale l'aveva destinata ad ospitare transazioni economiche e attività giudiziarie. All'inizio del XX secolo, gli interventi di Giacomo Boni hanno permesso una maggiore conoscenza dell'area, ritrovando una fila di botteghe e i cosiddetti "pozzetti rituali" lungo la fronte della Basilica stessa. Le strutture del complesso basilicale e gli ampi lacerti dei pavimenti marmorei hanno reso difficile indagare le fasi più antiche dell'area. Solo nel corso degli anni 1960-1964, Laura Fabbrini, sotto la direzione del Sovrintendente di Roma Gianfilippo Carettoni, poté realizzare due ampi saggi all'interno della navata mediana della Basilica, i cui risultati sono rimasti sostanzialmente inediti (Fig. 4.1). Grazie a quegli interventi, per la prima volta vennero alla

luce alcune tracce della basilica precedente, fatta costruire da Tiberio Sempronio Gracco nel 169 a.C. Queste indagini interessarono soprattutto due settori, definiti “orientale” e “centrale”<sup>4</sup>. Mentre il saggio centrale è stato nuovamente interrato, quello orientale (ca. 13×17 m) è stato preservato al di sotto di una copertura sostenuta da travi metalliche su plinti in cemento.

Dal 2015 il Progetto Basilica Iulia sta procedendo alla ricomposizione delle sequenze stratigrafiche e alla ricostruzione architettonica degli edifici privati e pubblici succedutesi nell’area; si sono così individuate varie fasi:

- Fase di iniziale IV sec. a.C.: costruzione di una grande dimora con atrio;
  - Fase di costruzione della Basilica Sempronia da parte del censore Tiberio Sempronio Gracco;
  - Fase cesariana: realizzazione di un più ampio sistema di fondazioni;
  - Fase augustea: ricostruzione dell’edificio basilicale secondo un progetto di maggiore monumentalità<sup>5</sup>
- Fase di V sec. a.C.: realizzazione di un primo edificio monumentale, probabilmente a destinazione privata;

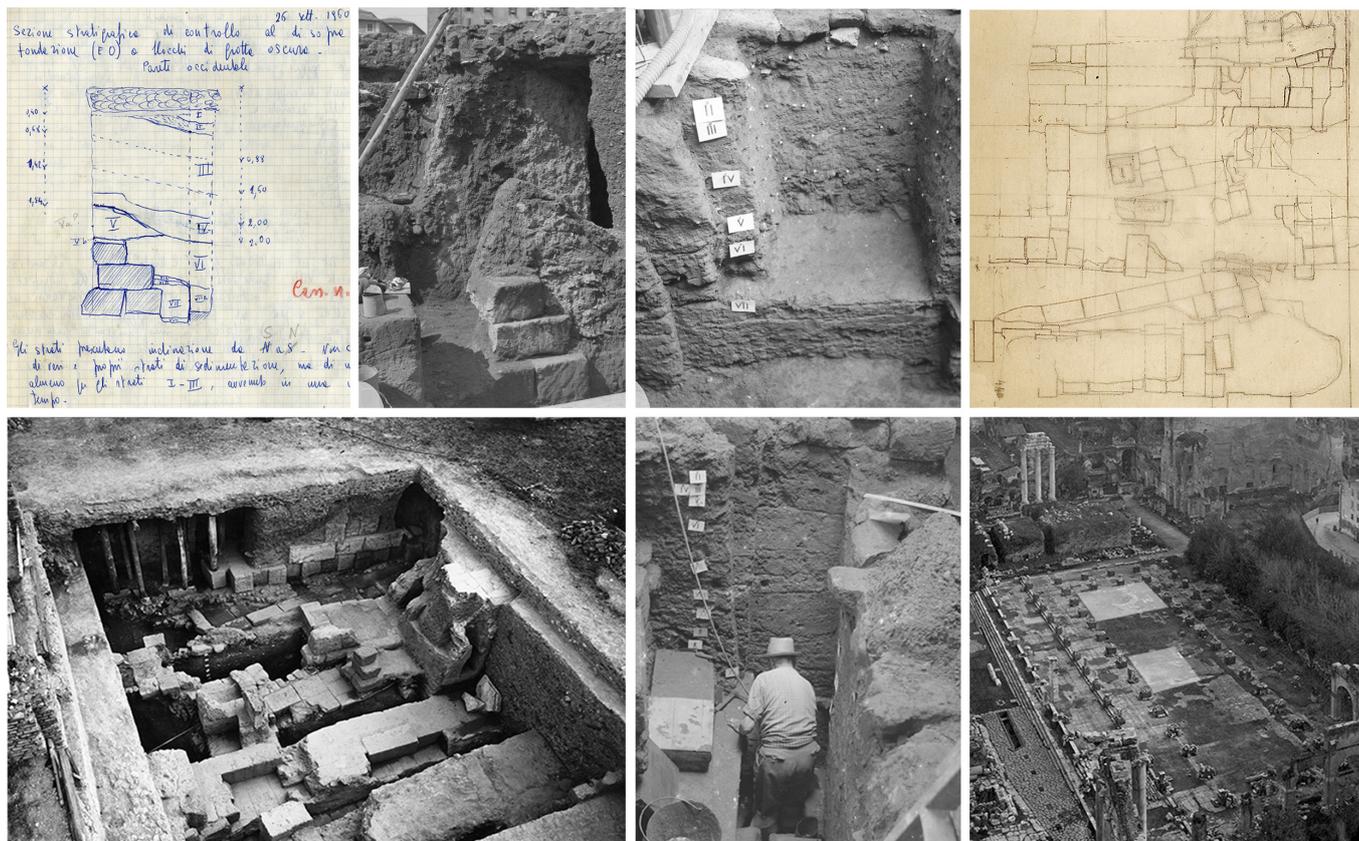


Fig. 4.1 Immagini fotografiche degli scavi eseguiti tra gli anni 1960 e 1964 e appunti grafici della sequenza stratigrafica (in alto a sinistra) e della planimetria del saggio (in alto a destra), archivio Carettoni-Fabbrini.

#### 4.1.1 Il rilievo integrato e le indagini geofisiche<sup>6</sup>

L'acquisizione dei dati ha interessato l'area della Basilica Iulia nella sua interezza, con particolare riguardo però al saggio orientale. Questa porzione è posta ad una quota media di circa 2,7 m inferiore rispetto al piano di calpestio della Basilica e si sviluppa su una superficie quadrangolare di circa 150 m<sup>2</sup>, l'area riceve illuminazione naturale mediante due lucernai, l'accesso è invece garantito mediante una scala metallica. Al suo interno, il saggio conserva livelli di umidità mediamente alti e i valori termo-igrometrici sono fortemente condizionati dalla presenza di acqua di falda. Dal piano generale di calpestio, lo spazio si articola su diversi livelli fino ad arrivare ad una quota di circa 5,20 m inferiore rispetto al piano pavimentale della basilica augustea.

Le operazioni di rilevamento sono state sviluppate integrando in tutte le fasi la metodologia di rilievo topografico con quella di acquisizione massiva. Il posizionamento di targets<sup>7</sup> sull'intera area da rilevare ha reso possibile l'integrazione delle diverse metodologie, i targets, inclusi in tutte le acquisizioni, hanno costruito una rete di punti utili a collegare tra loro dati di origine diversa. La campagna topografica ha avuto l'obiettivo principale di allineare il sistema di coordinate locale di rilievo alla rete topografica esistente del Foro Romano. Il collegamento è stato assicurato attraverso l'acquisizione di due capisaldi traguardabili dalla basilica e disposti ad est (vertice: V46) ed a nord (vertice: V49) di essa<sup>8</sup>. Oltre i due vertici di collegamento ed i targets disposti nell'intera area rilevata, l'acquisizione ha interessato alcuni punti caratteristici del saggio est, in particolare i limiti delle unità stratigrafiche e i vertici dei blocchi. I punti caratteristici del saggio sono stati materializzati direttamente sulla superficie, questo passaggio ha permesso che gli stessi fossero visibili e identificabili anche nelle immagini fotografiche utilizzate per il processo fotogrammetrico. La nuvola di punti topografica così impostata è servita come riferimento spaziale per l'orientamento e l'allineamento delle nuvole di punti acquisite mediante sistemi massivi.

L'acquisizione massiva del dato è avvenuta attraverso l'utilizzo di un laser scanner 3D<sup>9</sup> e di processi di *Structure*

*from Motion*. Le scansioni laser hanno riguardato sia la Basilica Iulia che il saggio est, l'area del saggio è stata acquisita integrando solo in alcune stazioni il dato RGB, in ragione delle difficili condizioni di illuminazione del sito. La nuvola di punti acquisita mediante laser scanner permette una lettura diffusa e accurata dei dati metrici e geometrici in funzione della scala di rappresentazione delineata; d'altra parte, non consente una lettura del trattamento delle superfici e rende particolarmente difficile il riconoscimento dei materiali costruttivi, che costituiscono invece aspetti fondamentali nella fase di restituzione del rilievo. Riguardo il saggio est, la lettura del valore cromatico delle superfici e la compensazione dei coni d'ombra dell'acquisizione laser scanner è stata pertanto demandata all'elaborazione mediante *SfM/IM*.

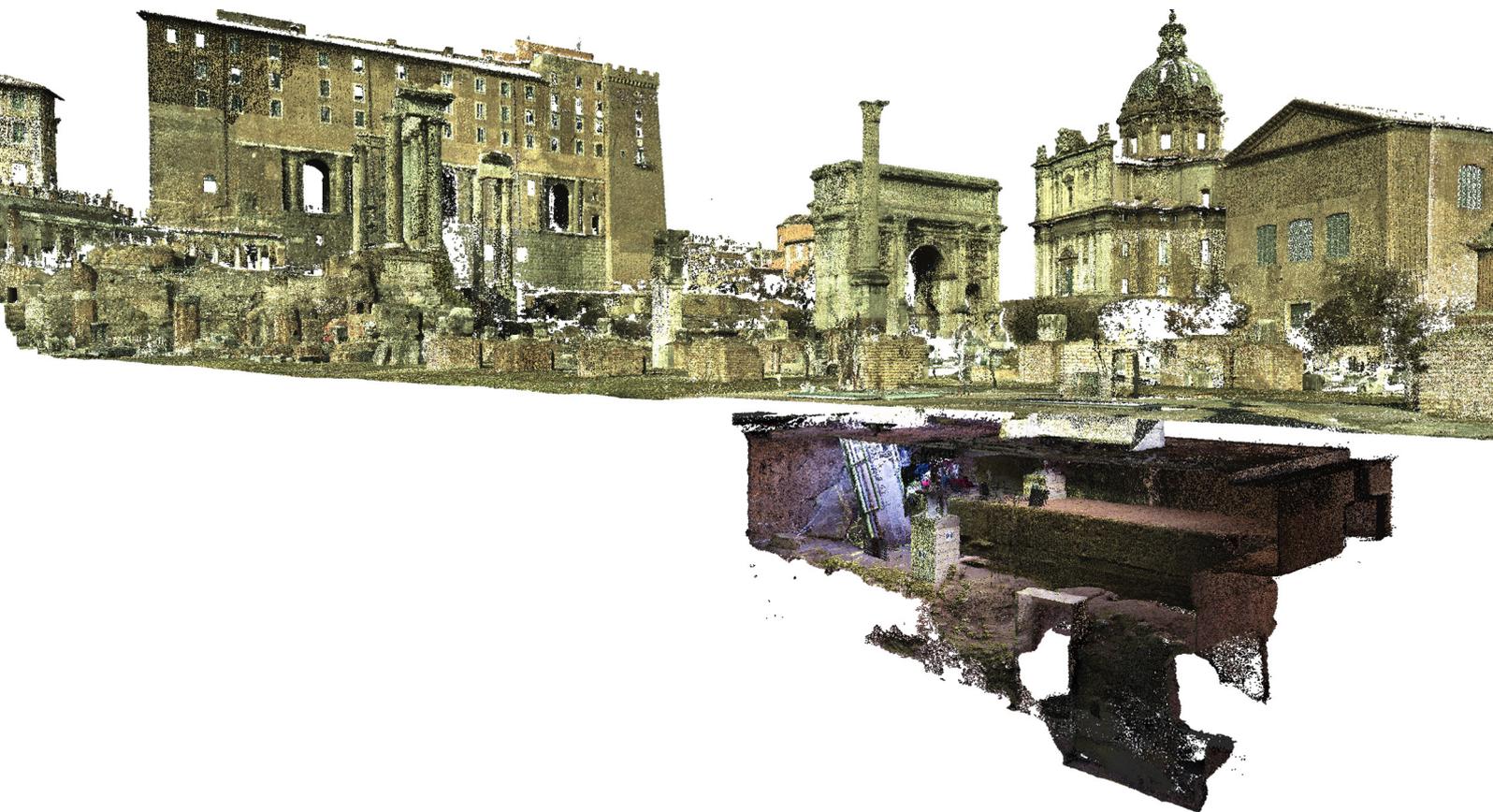
L'acquisizione fotografica è stata programmata per garantire un'illuminazione artificiale della scena che fosse mobile, omogenea e regolabile. A tal scopo, attraverso il montaggio di una *camera cage*, la fotocamera è stata dotata di due illuminatori led a temperatura ed intensità regolabile. Questa configurazione del dispositivo ha superato il problema dell'ingombro fisico di illuminatori statici e quello relativo alle occlusioni caratteristiche di ambienti con una configurazione spaziale articolata (Figg. 4.2a, 4.2b). Per assicurare un'illuminazione omogenea tra le prese, si è mantenuta una distanza costante tra fotocamera ed oggetto acquisito.

Per accedere a modalità di indagine più estensive e per leggere l'oggetto di studi con approcci trasversali, successivamente alla fase di rilievo, una nuova campagna di acquisizioni ha riguardato indagini geofisiche di approfondimento tramite georadar (GPR) e tomografia elettrica (ERT), tali indagini hanno interessato gran parte della superficie calpestabile della basilica augustea e sono state condotte rispetto al piano di campagna della stessa.

L'apporto di studi geofisici mirati ha difatti ampliato la documentazione disponibile sull'area e, soprattutto, ha aperto un varco nell'interpretazione del non visibile. Dal punto di vista metodologico, l'impostazione del progetto di acquisizione dati ha permesso la localizzazione spaziale delle aree di indagine nel contesto della Basilica Iulia (Fig. 4.3).



*Fig. 4.2a In alto: viste prospettive del modello numerico. In basso da sinistra: condizioni di illuminazione del saggio e configurazione spaziale, acquisizione con camera cage, configurazione della strumentazione.*



*Fig. 4.2b Modello numerico generale da rilievo.*



Fig. 4.3 Posizionamento della strumentazione per l'acquisizione ERT (sinistra) e tracciato di acquisizione (destra).

Il dato tomografico è stato rilevato impostando una maglia di elettrodi disposti con geometria non standard, questo setting specifico ha permesso di ottenere una griglia pseudo 3D di valori di resistività elettrica. La disposizione lungo un tracciato rettilineo degli elettrodi consente di investigare esclusivamente l'area sottesa al tracciato stesso ed ha come output un dato essenzialmente bidimensionale. In riferimento al caso studio trattato, l'impostazione di una griglia non convenzionale ha reso l'acquisizione tridimensionale ed ha consentito di interrogare e segmentare il dato tomografico rispetto alle esigenze interpretative.

Il tracciato di acquisizione è stato impostato mantenendo gli elettrodi ad una distanza costante di quattro metri. I picchetti sono stati acquisiti tramite topografia e quindi predisposti per la connessione alla nuvola di punti derivata dal rilievo<sup>10</sup>. L'acquisizione georadar ha invece tenuto conto dei riferimenti spaziali individuati sulla superficie della basilica ed acquisiti mediante laser scanner. Per questa tipologia di indagine, la scelta della frequenza dell'antenna è strettamente legata allo scopo specifico dell'indagine. Le ricerche indirette, basate sull'individuazione di elementi legati a strutture di interesse archeologico, hanno come obiettivo anomalie di medie dimensioni (0.2-2.0m) poste a profondità variabile da qualche decina di centimetri a qualche metro, su questi dati è stata progettata la campagna di acquisizione<sup>11</sup>.

L'acquisizione mediante laser scanner consente l'impostazione di una maglia di scansione regolare (nuvola di punti strutturata), i processi di *Structure from Motion* generano, invece, una nuvola di punti di densità variabile in dipendenza dalla quantità di *features* individuate in ogni fotogramma (nuvola di punti non strutturata)<sup>12</sup>. Seppure con sostanziali differenze, gli outputs generati dai due sistemi di acquisizione massiva sono, in ogni caso, punti virtuali riferiti a spazi virtuali con sistemi di coordinate noti e, a partire da quest'assunto, risulta evidente la loro predisposizione ad essere integrati e confrontati. L'approccio proposto consente la produzione di un modello multiscalarare in cui la densità spaziale del dato di partenza e le sue qualità sono programmate in fase di progetto di rilievo in funzione degli obiettivi perseguiti<sup>13</sup>.

Sfruttando questa potenzialità, al fine di evitare l'isolamento dei diversi outputs del rilievo, si è proceduto alla produzione di un unico modello a partire da diversi processi di elaborazione. Riguardo all'oggetto di studio della Basilica Iulia, il *workflow* adottato ha consentito la produzione di un modello tridimensionale integrato in cui convivessero elementi diversi facilmente consultabili. La maglia topografica è stata utilizzata come riferimento sia per la produzione della nuvola di punti densa, elaborata mediante SfM/IM, che per l'allineamento delle nuvole di punti strutturate. Nel primo caso, i targets e i punti caratteristici acquisiti mediante stazione totale sono stati utilizzati come *Ground Control Point* (GCP): tali punti sono stati individuati nei fotogrammi impiegati e ad essi sono state assegnate le coordinate topografiche; quindi, i GCP sono stati utilizzati per il *bundle adjustment* della nuvola di punti rada e per la consecutiva costruzione della nuvola di punti densa. Nel secondo caso, mediante il riconoscimento automatico dei targets acquisiti, le nuvole di punti generate dal laser scanner sono state roto-traslate rispetto al sistema di riferimento topografico del Foro Romano. Grazie a questo procedimento, le nuvole di punti strutturate e non strutturate sono state riferite ad un sistema di coordinate univoco definito dall'orientamento topografico. La capacità di integrazione tra i due sistemi di acquisizione massiva è stata valutata calcolando la deviazione standard ed il valore modale della nuvola SfM/IM rispetto a quella da laser scanner<sup>14</sup> per definire un range di accuratezza entro il quale lavorare. La configurazione dell'oggetto reale unitamente alla tipologia di indagine effettuata hanno determinato la scelta della scala 1:50 come riferimento; questo rapporto di riduzione consente un margine di incertezza di 1 cm sull'oggetto reale<sup>15</sup>. Seguendo tale principio, la nuvola di punti strutturata è stata utilizzata per valutare rispetto ad essa la distanza metrica dalla nuvola di punti non strutturata. Quest'analisi ha consentito di isolare i punti della nuvola SfM/IM con un margine di sovrapposizione definito. La comparazione iterativa tra le due nuvole ha evidenziato una sostanziale aderenza. La prima operazione di selezione è servita a prendere in esame un campione rappresentativo di punti: sono stati filtrati i punti della nuvola SfM/IM con una distanza inferiore ai 10 cm rispetto alla nuvola

prodotta dal laser scanner, mentre i punti di distanza superiore a questo valore corrispondevano a porzioni di superfici non acquisite dalla nuvola di punti di riferimento o fortemente aberrate nella nuvola di punti SfM (la porzione di nuvola corrispondente ai lucernai, ad esempio, presentava consistenti errori di proiezione dovuti alla forte riflettanza delle superfici trasparenti). Su questo campione di punti la deviazione standard apprezzata è di 0,01 m ed il valore modale è di 0,005 m (Fig. 4.4). Il passaggio successivo

è stato l'esportazione dei punti della nuvola SfM/IM con una distanza rispetto alla nuvola laser scanner inferiore ad 1 cm. Questa fase ha preso in considerazione i soli punti che avessero l'accuratezza richiesta rispetto alla scala di rappresentazione designata. Le nuvole di punti così generate e integrate hanno in sé le informazioni necessarie allo sviluppo della fase di restituzione dei modelli 2D/3D, indispensabili per l'interpretazione delle strutture architettoniche e delle unità stratigrafiche.

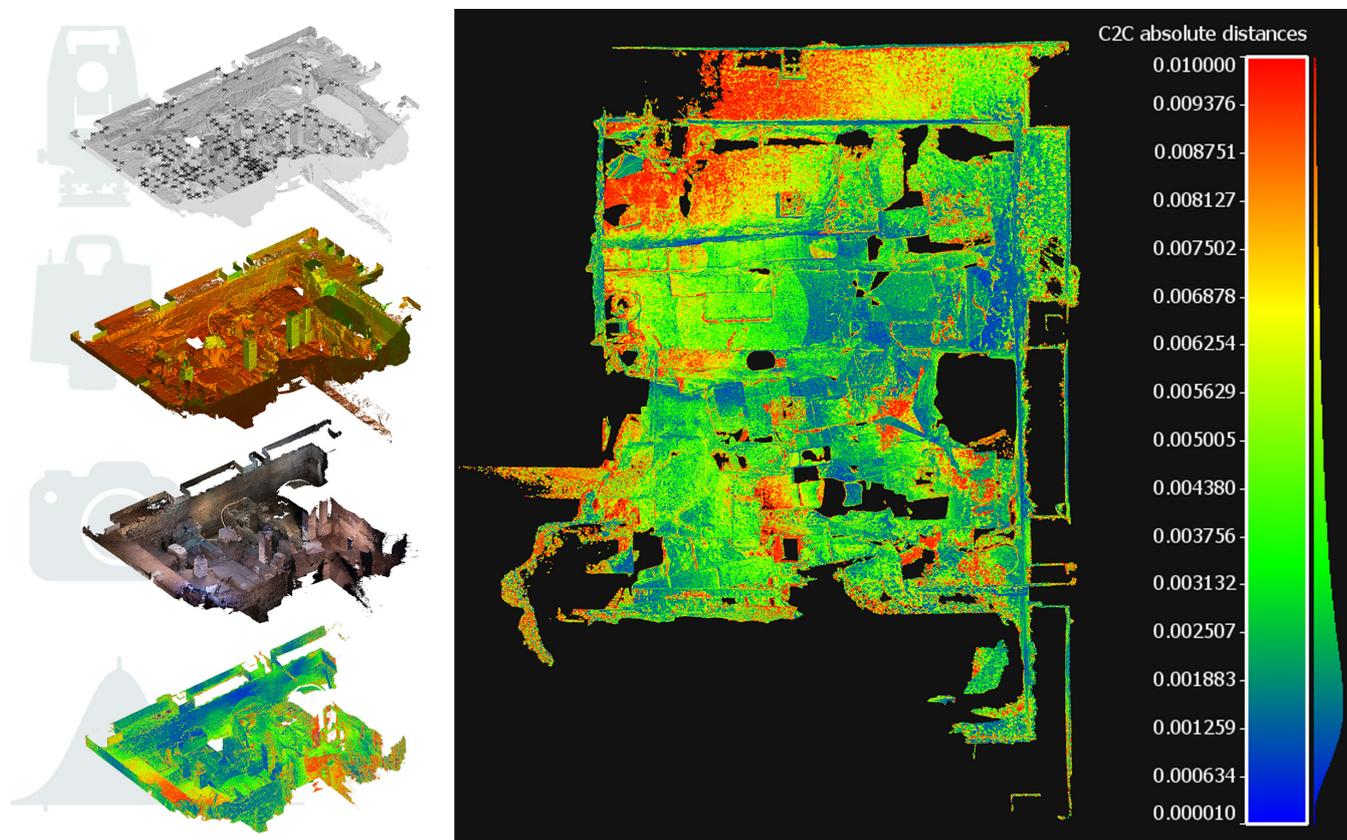


Fig. 4.4 Valutazione della distanza metrica tra la nuvola di punti laser scanner e la nuvola di punti SfM, filtraggio dei punti contenuti nel range da 0 a 1cm di distanza.

Lo studio di una stratigrafia archeologica comprende l'indagine dei suoi aspetti materici, mediante le operazioni di rilievo, e si amplia investigando un sistema variegato di informazioni di natura diversificata (materiali ceramici, fonti letterarie, ecc.). Le relazioni prima mentali poi informatiche, costruite a partire da questa materia prima, determinano conoscenza.

Relativamente all'elaborazione dei dati acquisiti mediante indagine ERT, la connessione con la nuvola di punti topografica consente di elaborare un modello interpolativo della resistività. Questo modello tiene conto dell'orografia del suolo e, quindi, proietta i valori di resistività secondo un andamento non lineare lungo l'asse z bensì ottimizzato rispetto alle quote note. Questa procedura inserisce nel calcolo della resistività, il *fattore geometrico*, derivato, per l'appunto, dalla geometria di stendimento rispetto allo spazio tridimensionale.

Nella prima fase di elaborazione, la griglia di valori è composta da un numero finito di voxel disposti all'interno di uno spazio tridimensionale. Questa griglia non è omogenea, i valori di resistività acquisiti decrescono con l'aumentare della profondità; di conseguenza, anche le dimensioni di ogni cubo voxel non rimangono costanti per l'intero dataset. Questo fattore diviene rappresentativo nella fase di validazione dell'accuratezza dei modelli. Se nell'ambito del rilievo architettonico tale accuratezza

può definirsi costante e misurabile, entro un certo *range*, il modello tomografico risente in maniera consistente, di una serie di fattori ambientali riportati come incognite rispetto al modello elaborato. Ne è un esempio l'eterogeneità dei materiali presenti nel sottosuolo; già da solo, questo parametro non quantificabile condiziona il valore di resistività e costituisce un rumore di fondo non facilmente distinguibile dal segnale. Questa premessa serve a contestualizzare i dati derivati dalle indagini geofisiche al fine di non trasferire in maniera automatica i concetti di misura, precisione ed accuratezza consolidati invece, nel campo del rilievo.

Aldilà di tale premessa, appare evidente il legame di affinità che lega un ambiente 3D basato su unità di volume tra loro diversamente combinate, i voxel per l'appunto, ed un ambiente 3D concepito per punti adimensionali disposti mediante coordinate cartesiane. L'affinità dei due modelli investigativi rende possibile e controllabile la trasformazione del dato necessaria a combinarli ed integrarli.

Il dato tomografico pseudo tridimensionale è stato discretizzato attraverso sezioni 2D caratteristiche sia verticali sul piano XZ (Tomografie Geoelettriche Verticali, TGV) che Orizzontali sul piano XY (Tomografie Geoelettriche Orizzontali, TGO) a varie profondità (rintracciando il paleosuolo ad una profondità di 8-9 m). Questa scelta è legata alla possibilità di rintracciare dei valori rappresentativi di resistività a profondità specifiche (Figg. 4.5 e 4.6).

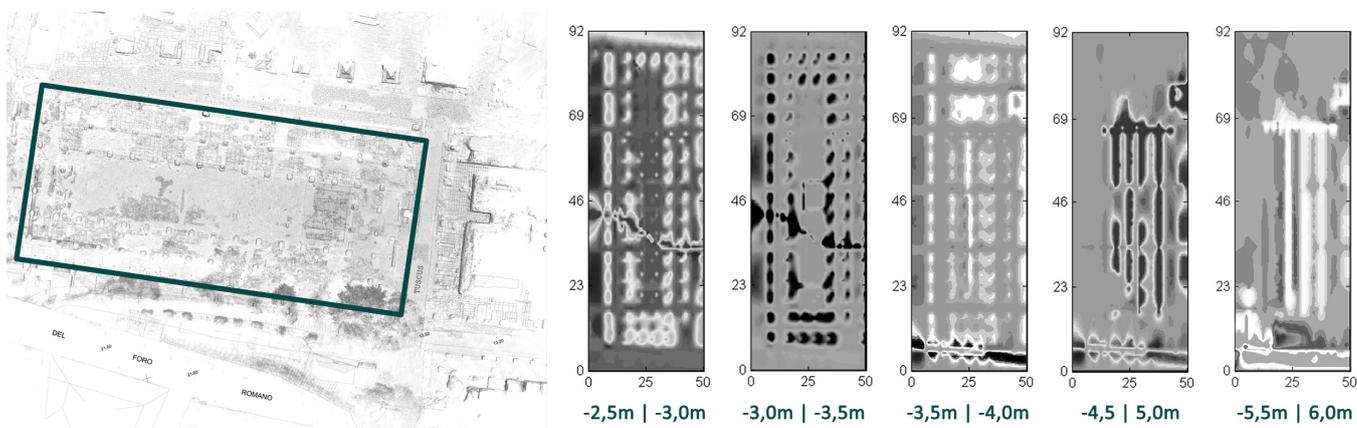


Fig. 4.5 Sinistra: superficie di acquisizione mediante tomografia elettrica, destra: time slice a diverse profondità dal piano di campagna, immagini 2D

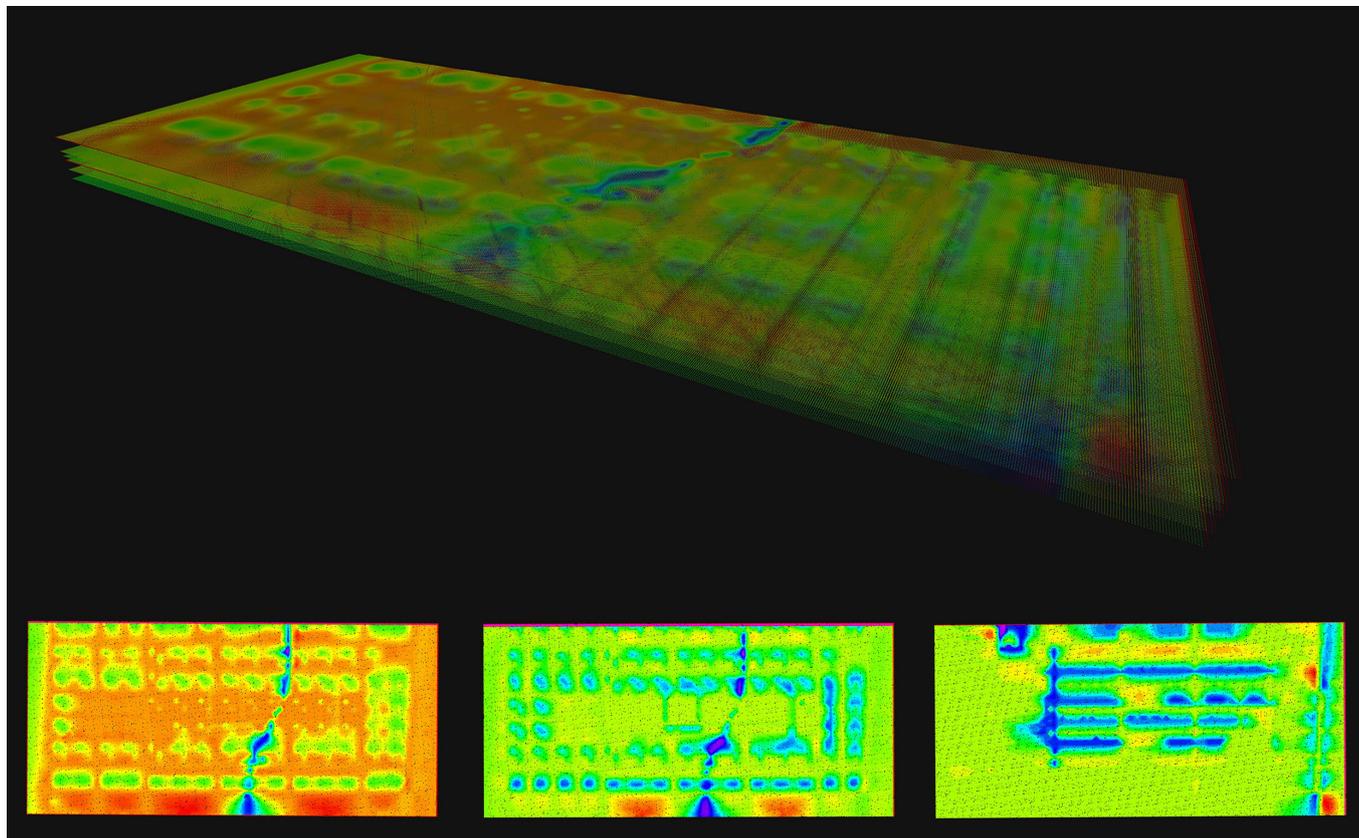


Fig. 4.6 Inserimento nello spazio tridimensionale delle time slice e cross section 2D acquisite mediante tomografia elettrica.

Le *slice* prodotte sono riferite ad un sistema locale di coordinate cartesiane XYZ impostato rispetto alle direzioni principali di acquisizione. L'operazione successiva è stata condotta selezionando le slice ritenute rappresentative ed ha riguardato la trasformazione da voxel a punti. Questo passaggio ha generato modelli numerici tomografici assimilabili a quelli prodotti nell'ambito del rilievo architettonico. In essi, i punti di misurazione sono visualizzati come punti nello spazio, a loro è associato il dato relativo alla resistività del terreno espressi tramite una scala di valori uniaxiale visualizzata mediante il colore del punto.

Il processo di elaborazione del dato georadar ha seguito un percorso piuttosto simile a quello relativo alla tomografia elettrica. A partire dai *radargrams* prodotti in fase di acquisizione, la planimetria dei profili ha consentito di

correlare in uno spazio tridimensionale, le anomalie presenti su ciascuna sezione, utilizzando l'analisi dell'ampiezza degli eventi riflessi entro assegnati intervalli di tempo (time slice).

Il dato, espresso mediante un parallelepipedo voxel, è stato infine convertito in file ASCII. Questo tipo di file standard permette di trasmettere le coordinate spaziali di ogni voxel unitamente al valore di normale al punto. La codifica ASCII consente di archiviare un'ampia gamma di tipologie di dato, se da una parte questa funzione facilita la trasmissione di qualsiasi tipologia di dato inquadrabile in uno schema riga/colonna; dall'altro l'applicativo di lettura del formato deve permettere l'associazione controllata tra valore numerico e parametro a cui esso si riferisce. Nell'esportazione ASCII, riguardo il dato georadar, i valori rela-

tivi alla x ed alla y vengono codificati correttamente come coordinate cartesiane; il valore di profondità z, invece, è espresso come tempo intercorso tra l'emanazione del segnale e la sua ricezione. Ciò rende necessaria una prima trasformazione che, nota la velocità di propagazione, trasformi in spazio, e quindi profondità z, un valore legato al tempo (t)<sup>16</sup>(Fig. 4.7).

Da questo corretto *matching* deriva la ricodifica del dato

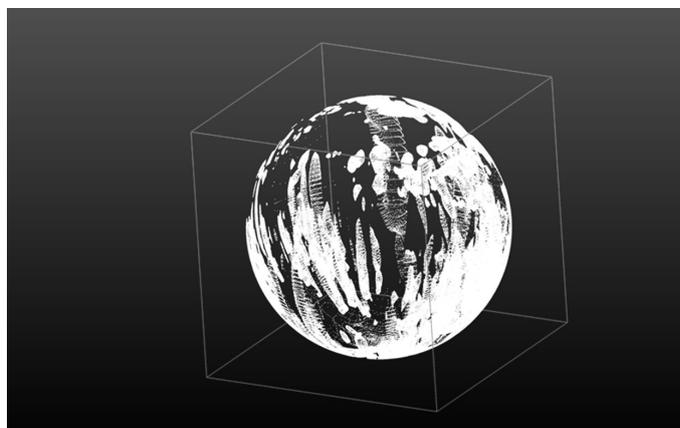
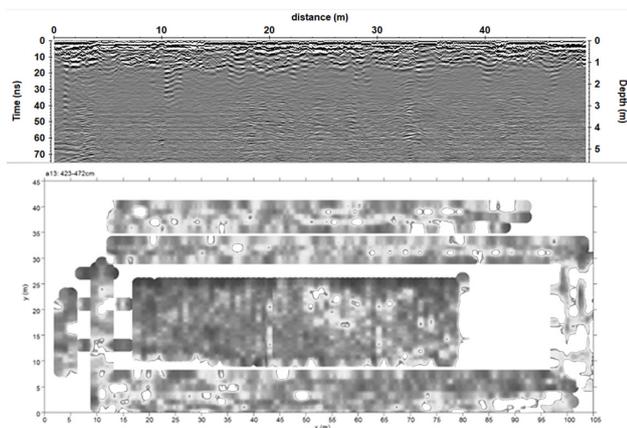


Fig. 4.7 Sinistra: radargram e time slice 2D dell'acquisizione GPR. Destra: importazione dei valori caratteristici delle isosuperfici ed assegnazione erronca dei parametri riferiti alle coordinate XYZ.

#### 4.1.2 L'associazione spaziale dei dati

L'associazione spaziale tra le nuvole di punti ottenute dalle indagini geofisiche e quella relativa al rilievo architettonico è avvenuta grazie alla mappatura delle porzioni acquisite rispetto alla base topografica<sup>17</sup>. L'allineamento tra dato GPR e topografia è avvenuto a partire dalle indicazioni planimetriche relative al posizionamento dei sensori e delle sezioni indagate. Utilizzando questo riferimento spaziale, è stata utilizzata una funzione dell'applicativo *CloudCompare* per assegnare ai vertici dell'oggetto 3D delle coordinate note. Tali coordinate sono state lette importando in ambiente CAD sia la nuvola di punti derivata da laser scanner che i vertici del parallelepipedo GPR. In questo modo, le nuvole di punti relative all'indagine georadar sono state roto-traslate per consentire il corretto allineamento rispetto ai riferimenti misurati in superficie. Il

controllo estensivo tra le diverse nuvole di punti ed il modello 2D vettoriale è avvenuto sfruttando software CAD per visualizzare in maniera integrata i diversi modelli (Fig. 4.8).

Riguardo l'integrazione tra dato tomografico, espresso tramite modelli numerici bidimensionali, e la nuvola di punti del rilievo, la procedura si è basata sull'utilizzo dei punti topografici e quindi, di uno stesso sistema di riferimento spaziale. Ciò ha permesso di importare le *time slice* e le *cross section* sotto forma di nuvole di punti e di poterle visualizzare direttamente nella corretta corrispondenza con la Basilica Iulia. In questo caso, la possibilità di intercettare anche la posizione dei singoli elettrodi e delle loro coordinate, fornisce un ulteriore elemento di controllo tra dato tomografico input e visualizzazione mediante nuvola di punti output (Fig.4.9).

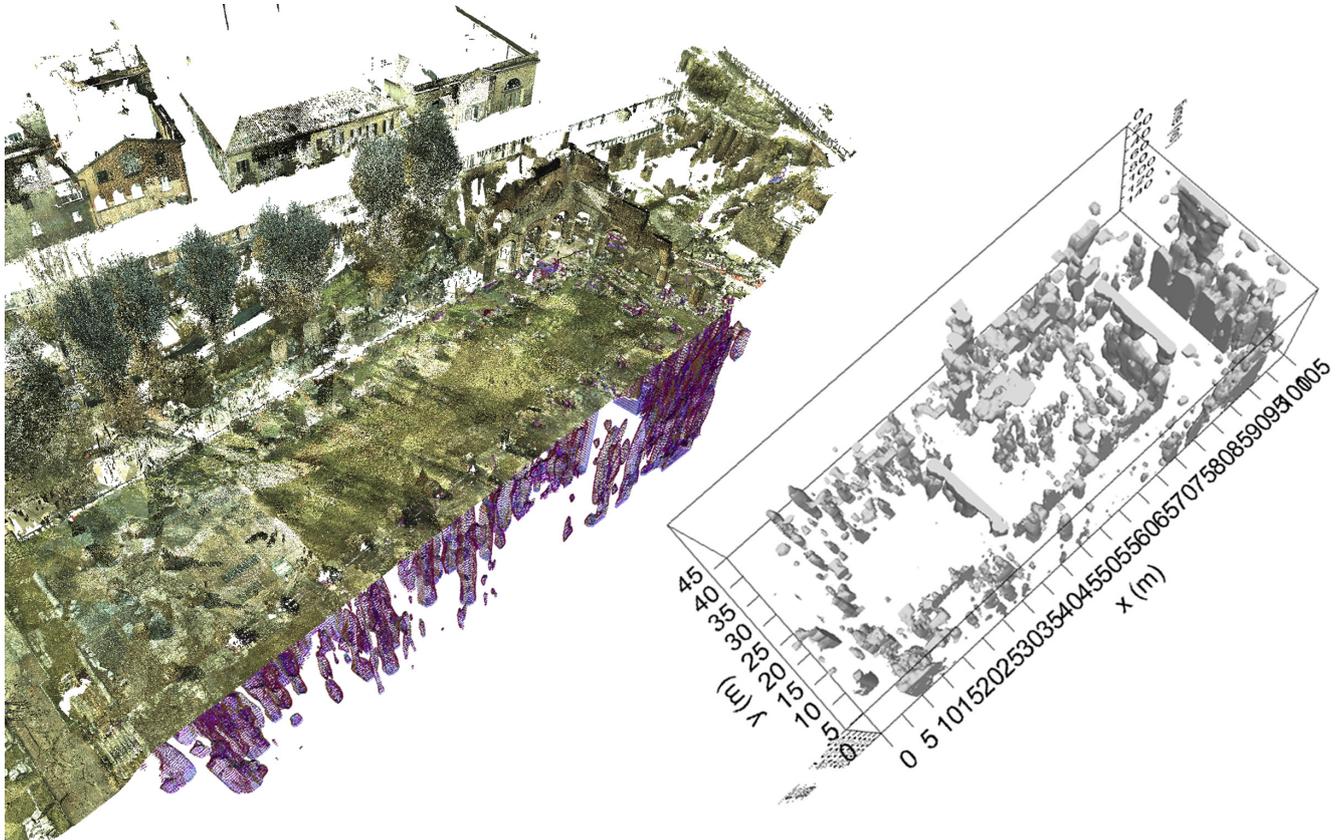


Fig. 4.8 Integrazione della nuvola di punti GPR correttamente importata con quella proveniente dal rilievo. Destra: parallelepipedo GPR con la visualizzazione delle isosuperfici contenute in un range significativo.

La possibilità di indagare il modello numerico in ogni suo punto rende efficace l'integrazione spaziale di dati eterogenei in cui i livelli globali di precisione ed accuratezza del modello risultino dichiarati. Ogni azione operata sul dato grezzo, sia essa spaziale, formale o relativa al contenuto informativo, determina una sua trasformazione, il controllo quantitativo e qualitativo di tali trasformazioni permette di palesare l'affidabilità globale e locale del modello rendendo l'intera procedura non solo riproducibile ma anche riutilizzabile<sup>18</sup>. A tale scopo, per ogni trasformazione condotta, sono stati individuati dei parametri di controllo riferiti all'accuratezza del dato sorgente ed a quella del dato nella sua forma finale. Per quanto tali parametri risultino applicabili, in linea di principio, a dati eterogenei, va precisato che ogni tipologia di dato utilizzata per que-

sta sperimentazione verifica e comunica la propria validità tramite criteri di valutazione caratteristici. Ciò evidenzia un limite metodologico nel voler ricondurre la correttezza dell'operazione di integrazione alla sola componente di accuratezza metrica. Questo limite, tuttavia, non inficia l'operazione ma inquadra il problema in un panorama più ampio in cui tutti i diversi ambiti di ricerca coinvolti sono chiamati a trasferire in maniera esplicita i criteri caratteristici di validazione del dato.

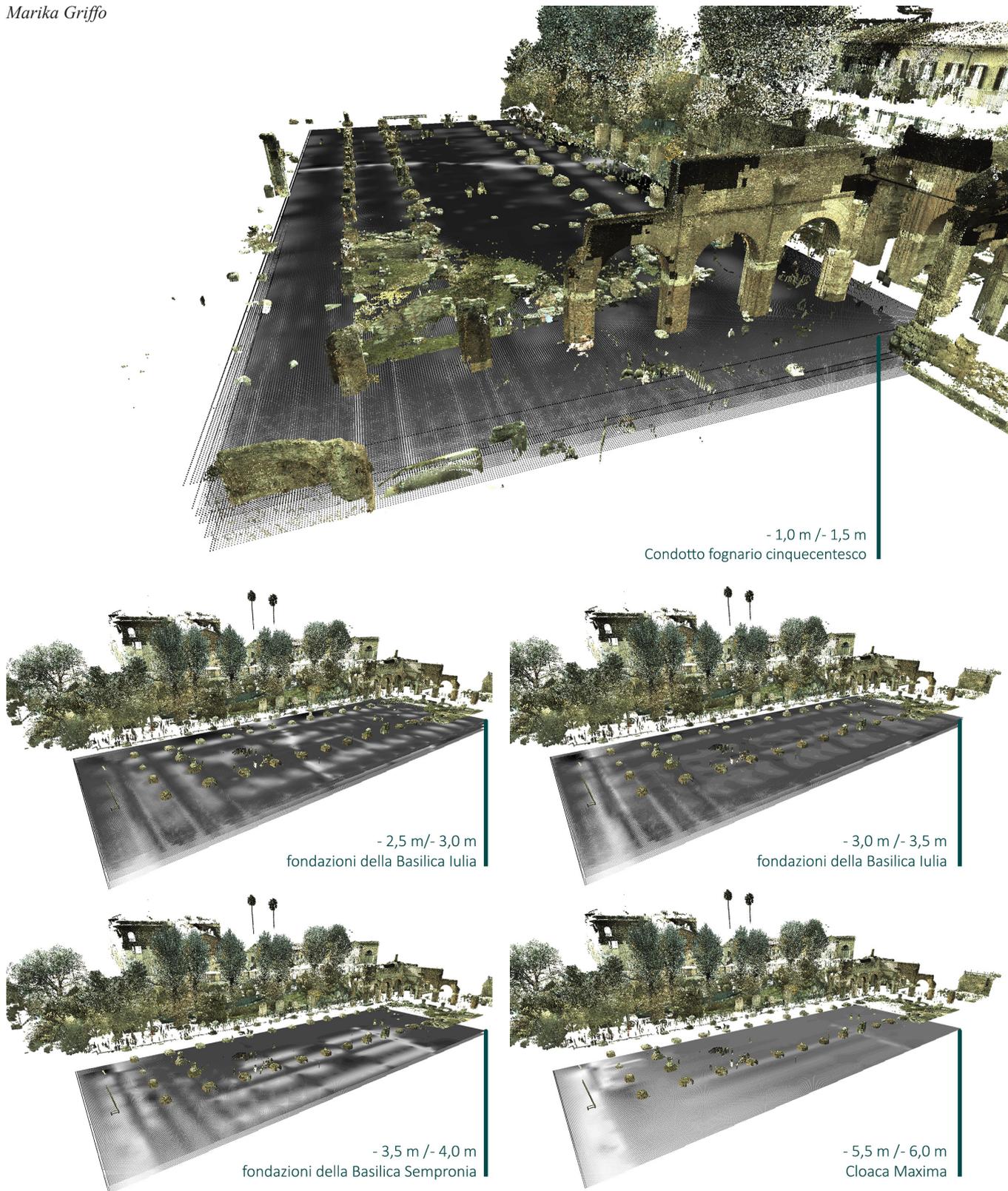


Fig. 4.9 Integrazione della nuvola di punti tomografica con quella proveniente dal rilievo. Isolamento delle diverse time slice per mettere in risalto l'analisi comparativa tra la superficie (rilevata mediante laser scanner) ed il sottosuolo (rilevato mediante tomografia elettrica).

#### 4.1.3 La segmentazione per fasi stratigrafiche

I diversi processi fin qui esposti generano un modello numerico integrato, tale modello è la base di lettura ed interpretazione di tutte le personalità coinvolte nel processo di studio del manufatto. La fase successiva di sperimentazione ha riguardato la trasformazione cruciale da dato ad informazione, questo sviluppo del modello ha fatto leva su una segmentazione della nuvola di punti che fornisse una chiave di lettura specifica ed aiutasse a trasmettere contenuti. A questo punto, è inevitabile sottolineare il passaggio tra il dato oggettivo che è riferito a criteri di affidabilità condivisi e standardizzati, seppure in settori disciplinari molteplici, e quello interpretativo che, a partire dal primo, elabora contenuti. Rispetto al caso studio, l'operazione di interpretazione ha riguardato il saggio orientale ed è avvenuta individuando e distinguendo i livelli stratigrafici sulla base dello studio delle relazioni tra murature e strati archeologici, a loro volta datati grazie ai materiali ceramici. Il modello numerico integrato è stato segmentato manualmente per estrarre regioni rappresentative. Questa modalità operativa innesca un processo di interpretazione continuo ed organico: il modello viene scomposto leggendo il dato, al contempo, la stessa operazione di scomposizione suggerisce nuovi spunti di lettura e, quindi, nuovi criteri di scomposizione. Questo processo di conoscenza mediante la segmentazione evidenzia una certa analogia con quanto riferibile rispetto alla pratica del disegno archeologico ed architettonico, disegnando ci si interroga su questioni di natura costruttiva, stilistica, proporzionale e formale, la risposta a tali interrogativi viene facilmente ritrovata nel disegno stesso che, per costruirsi, ha bisogno della risoluzione soggettiva agli interrogativi che pone<sup>19</sup>. Questa fase di studio genera un modello numerico informato e, a sua volta, processato per comunicare informazioni<sup>20</sup>. Con questa metodologia, le fasi stratigrafiche individuate *a-priori* tramite la ricerca archeologica sono state materializzate e validate nel modello digitale, in esso, hanno assunto un'estensione spaziale specifica e, quindi, sono state classificate con l'obiettivo di trasmettere l'informazione (Figg. 4.10a, 4.10b, 4.10c).

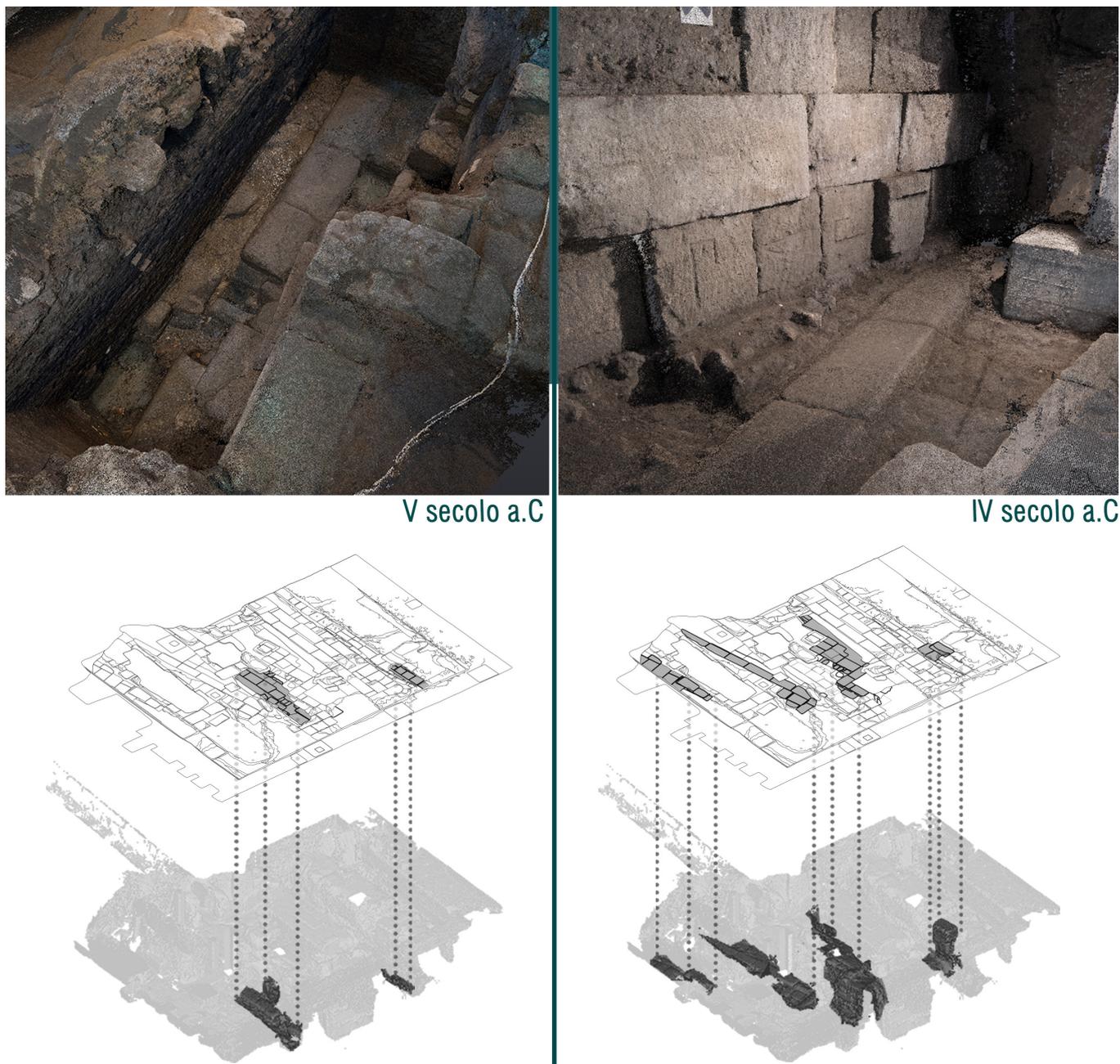
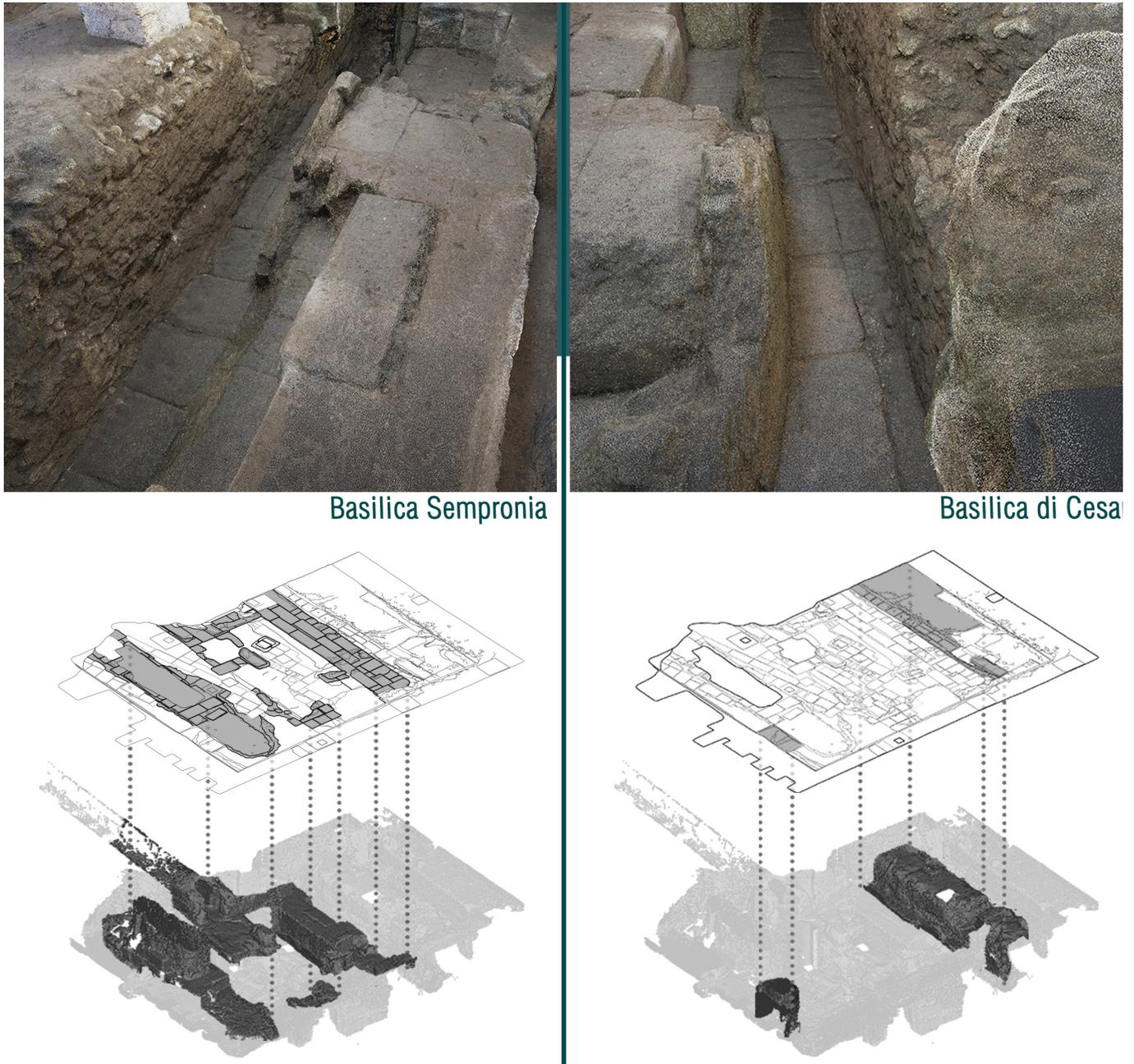
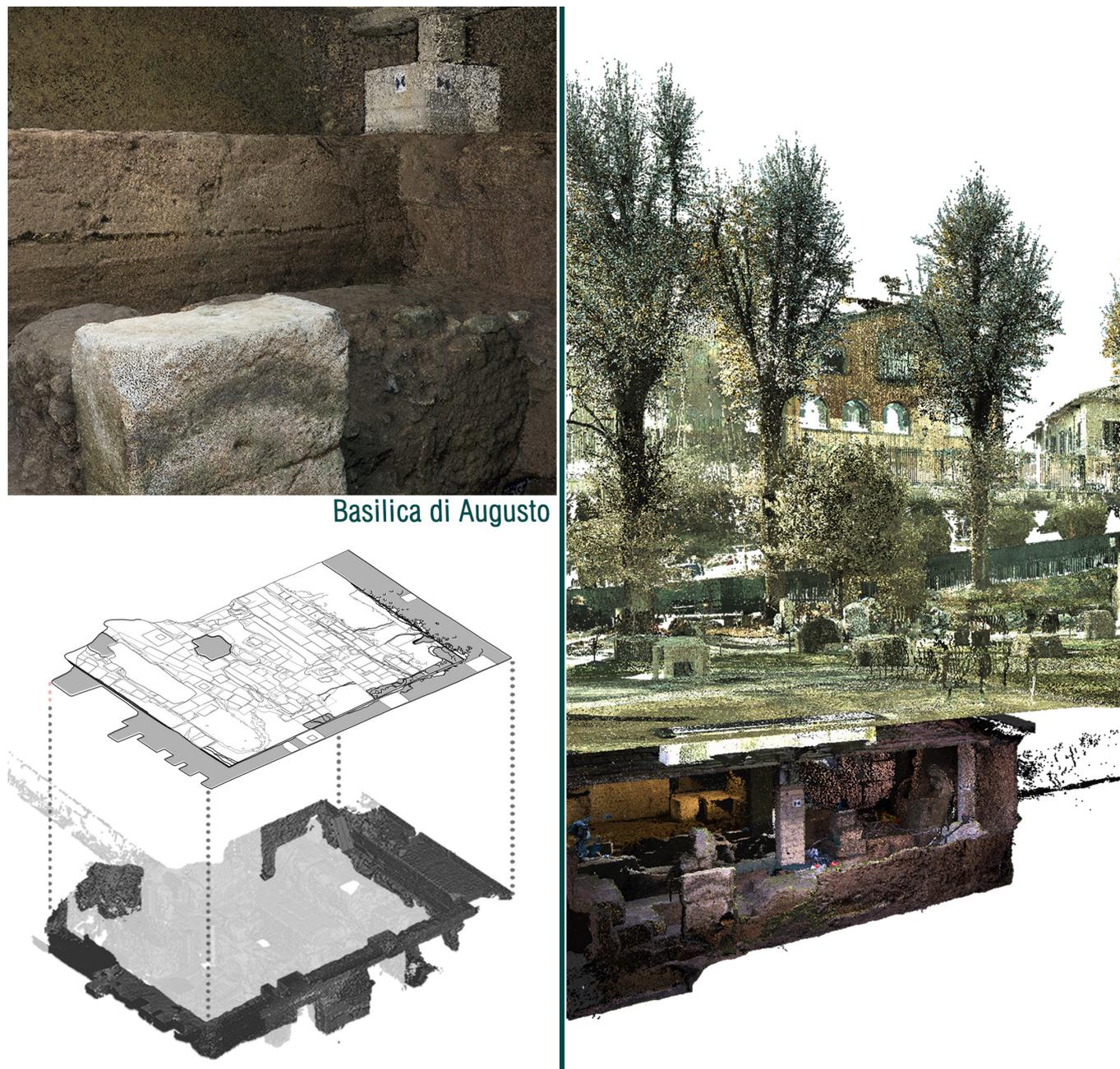


Fig. 4.10a Individuazione delle diverse fasi stratigrafiche e segmentazione del modello numerico, riproposizione della segmentazione rispetto ai modelli 2D. Fase di V secolo a.C e IV secolo a.C. Restituzine dei modelli 2D a cura del dott. Tommaso Ismaelli.



*Fig. 4.10b Individuazione delle diverse fasi stratigrafiche e segmentazione del modello numerico, riproposizione della segmentazione rispetto ai modelli 2D. Basilica Sempronia e Basilica di Cesare. Restituzioni dei modelli 2D a cura del dott. Tommaso Ismaelli.*



*Fig. 4.10c Individuazione delle diverse fasi stratigrafiche e segmentazione del modello numerico, riproposizione della segmentazione rispetto ai modelli 2D. Basilica di Augusto e vista prospettica della nuvola di punti. Restituzine dei modelli 2D a cura del dott. Tommaso Ismaelli.*

#### 4.2 Le terme di Diocleziano

La ricerca presentata in questo paragrafo concerne lo studio del complesso termale costruito a partire dall'autunno del 298 e terminato nel 306. Le terme di Diocleziano rappresentarono indubbiamente il più grosso edificio termale mai costruito prima, coprendo circa 130000 mq di superficie e potendo ospitare 3000 persone contemporaneamente secondo Olimpiodoro (si pensi che le maestose terme di Caracalla arrivavano ad ospitare “solo” 1600 persone). Secondo Sidonio Apollinare (*Carm. XXIII, v. 495 ss.*), l'ultimo restauro delle Terme fu effettuato dopo le distruzioni di Alarico durante il sacco di Roma del 410. Senza dubbio, esse persero la loro funzione primaria durante le guerre greco-gotiche (535-553), poiché divennero un luogo di passaggio e sepoltura (Candilio 1992, 144). Vitige infatti assediò la città bloccando gli acquedotti che portavano l'acqua all'interno delle mura. Finito l'assedio, il complesso non venne riparato e venne abbandonato. Ovviamente, un ruolo importante nell'abbandono del complesso fu giocato anche dalla ormai preponderante cultura cristiana, che vedeva nelle Terme un luogo di promiscuità legato a rituali delle società pagane. Nell'XI secolo, ad esempio, in seguito alla costruzione del monastero di S. Ciriaco, Urbano II ritenne opportuno compiere una vera e propria purificazione del luogo per cancellare ogni traccia di questo passato demoniaco. Tra l'altro, si sa della presenza di una chiesa dedicata a S. Ciriaco almeno dal V secolo (nel 499 nel sinodo tenutosi a Roma era registrata la presenza di presbiteri il cui *titulus* di appartenenza era appunto la chiesa di S. Ciriaco), ma non ne conosciamo la precisa collocazione. Una modesta opera di spoliazione iniziò col Medioevo: essa però non dovette intaccare troppo il monumento, dato che studiosi e artisti del Rinascimento continuavano a menzionare e ammirare le Terme, simbolo della perduta grandezza di Roma, come fecero Francesco Petrarca (*Le Familiari* 6,2), il Brunelleschi e Donatello. Il disegno più antico della pianta e dell'alzato è datato al 1470 (Uffizi Sant. 1863; Bartoli 1914-1922, I, tav. I, figg. 1-2), che ricostruisce in maniera fantasiosa il complesso, partendo dagli elementi esistenti *in situ*.

Antonio da Sangallo il Vecchio lavorò molto alle Terme:

ci sono rinvenuti suoi disegni della pianta e di alcuni ambienti in alzato (Firenze, Uffizi Arch. 1546 e Arch. 2134). Restano poi numerosi disegni del monumento, di autori che restano però anonimi: peculiare è il fatto che esistano copie identiche che fanno pensare ad una riproduzione destinata alla vendita. In particolare, la *natatio* viene riprodotta spesso.

La pianta del complesso è piuttosto canonica: è formata da un grande recinto con esedra, al centro del quale sorge il vero e proprio complesso termale con gli ambienti principali, ovvero *calidarium*, *tepidarium*, *frigidarium*, *natatio* (piscina). Sulle ali del complesso si dispongono in maniera simmetrica vani per gli altri servizi, come gli spogliatoi (*apodyteria*) o le palestre. Delle stanze absidate e rettangolari all'interno del complesso dei bagni veri e propri erano invece riservate a biblioteche o esposizioni, in modo da formare un centro polivalente. In mezzo, vi erano splendidi giardini con statue e fontane.

Ancora oggi è difficile individuare l'esatta funzione di tutti gli ambienti, poiché la documentazione resta esigua e soprattutto perché il complesso ha subito numerose modifiche che lo hanno reso di difficile comprensione nella sua primaria organizzazione. In particolare, la costruzione della Certosa di Santa Maria degli Angeli ne ha modificato l'aspetto primigenio, dividendo ad esempio in due parti la *natatio*.

Ad ogni modo, è possibile ricostruirne per sommi capi la struttura: l'accesso al corpo centrale avveniva attraverso quattro ingressi principali, posti sui lati della *natatio* (9), che era una piscina scoperta di circa 2500 metri quadrati con un'ampia vasca centrale pavimentata con lastre marmoree, cinta sui lati minori da portici e sui lati lunghi da facciate monumentali. I due ingressi più vicini alla piscina immettevano alle aule 26-31, adiacenti all'area del *frigidarium*, mentre gli altri due ingressi conducevano ad una sala rettangolare che portava agli spogliatoi riscaldati dai quali si arrivava da un lato alla piscina (9), dall'altro alle palestre (24), caratterizzate da ampi portici con pilastri sotto i quali si poteva passeggiare. Dalle palestre era possibile arrivare alle sale ottagonali (7) che si presume avessero funzione di *frigidarium*. Delle due aule resta solo quella occidentale, definita “il planetario”, con volta ad ombrello.

Tornando alla *natatio* (9), essa era seguita dall'ambiente più importante e grandioso delle Terme, ovvero il *frigidarium* (10), definito anche basilica, poiché al suo interno il Michelangelo realizzò la chiesa di S. Maria degli Angeli. L'aula era illuminata da otto grandi finestre di 12 metri di altezza. Agli angoli della sala vi erano quattro ambienti minori con vasche per i bagni freddi, con un pavimento più basso rispetto alle altre sale. La copertura dell'intero *frigidarium* era costituita da tre possenti volte a crociera rette da otto colonne di granito rosa: le quattro colonne centrali sorreggevano capitelli compositi, quelle laterali capitelli corinzi. Accanto alla basilica, si trovavano due file di tre sale dedicate probabilmente a massaggi e cura estetica. Sono gli ambienti meglio conservati, probabilmente perché adiacenti alla chiesa.

Alla sala 10 seguiva il piccolo *tepidarium* (11), che aveva una forma emisferica, con quattro nicchie rettangolari, delle quali due regolavano il passaggio agli altri ambienti, mentre le altre due costituivano delle vere e proprie esedre dove trovavano posto gruppi statuari. Anche questo ambiente si è conservato poiché è stato rifunzionalizzato e tutt'oggi costituisce il vestibolo della chiesa.

Da qui, infine, si accedeva al *calidarium* (12), composto essenzialmente da un'aula rettangolare (21x47 m) e con quattro absidi di diversa dimensione per ogni lato. Esso era caratterizzato dalla presenza di sette vasche per i bagni caldi. Rispetto agli ambienti limitrofi, il *calidarium* fuoriusciva dal muro di limite per sfruttare al massimo i raggi solari, essendo posto a sud. Il *calidarium* è mal conservato, poiché resta solo l'abside settentrionale. Ai lati della sala

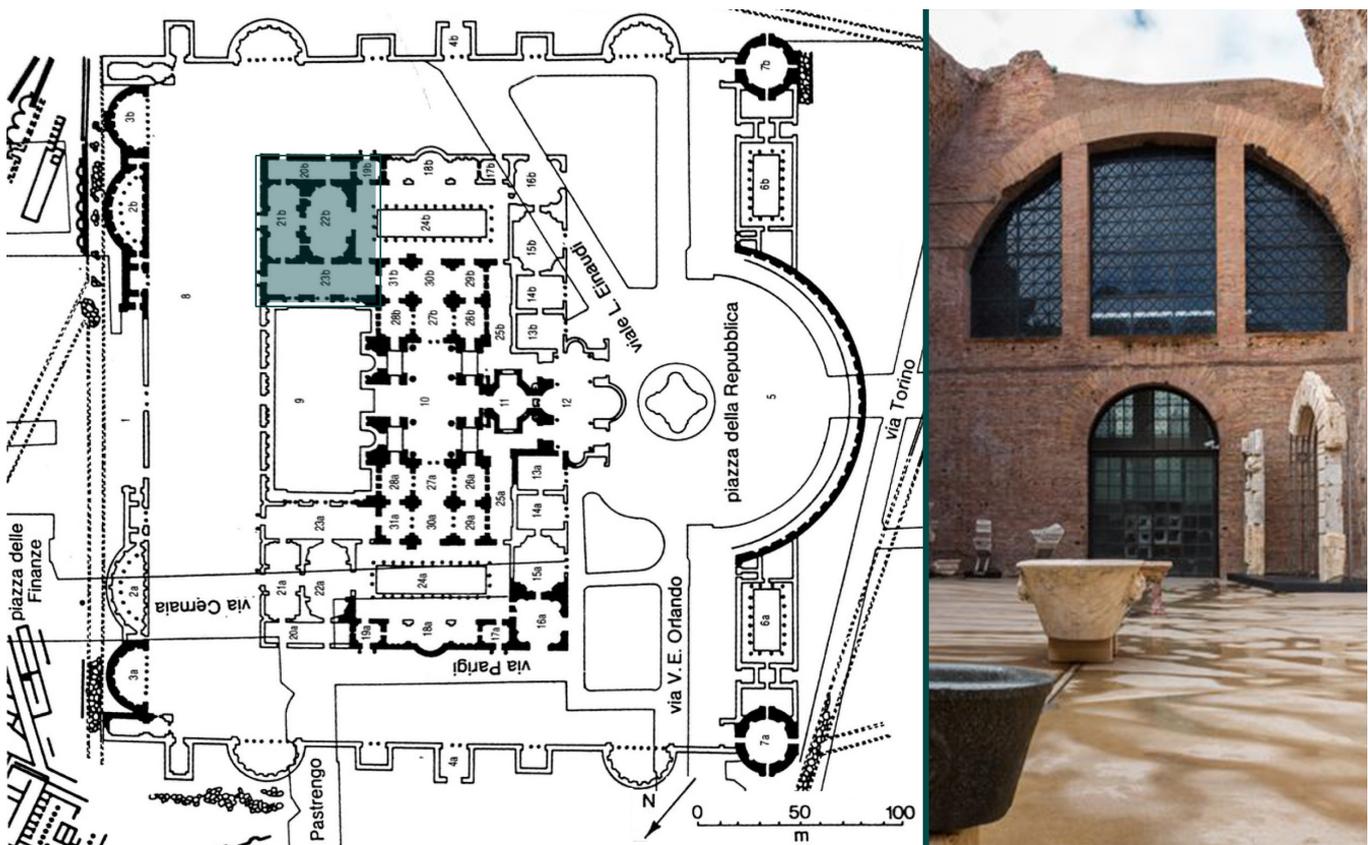


Fig. 4.11 Planimetria di riferimento del complesso termale, in evidenza, l'area di interesse delle operazioni di acquisizione dati. (Serlorenzi e Laurenti, 2002, p. 59, figura 71).

maggiore, vi erano gli ambienti 8-14 di pianta rettangolare (probabilmente *laconicum* e *sudatorium*), che riuscivano a sfruttare il calore della stanza centrale. Seguiva poi il vano 15, un secondo *tepidarium* che immetteva nell'aula ottagonale non riscaldata<sup>21</sup> (Fig. 4.11).

#### 4.2.1 La segmentazione per mappe tematiche

La prima fase di studio del monumento è avvenuta tramite il rilievo degli ambienti 20b-23b del complesso termale. Questa operazione è avvenuta utilizzando la metodologia di acquisizione massiva mediante laser scanner. Questa fase è funzionale alla produzione di una base dati tridimensionale da utilizzare come supporto informativo per le operazioni di lettura morfometrica dell'edificio ed analisi dello stato di conservazione delle superfici murarie<sup>22</sup>. Successivamente alla fase di elaborazione della nuvola di punti, sono stati prodotti modelli 2D di rilievo utilizzati come mezzo di lettura e di interpretazione dell'oggetto.

L'interrogativo proposto in merito al caso studio delle terme riguarda le potenzialità offerte dalla connessione spaziale tra la nuvola di punti tridimensionale, derivata dalla fase di rilevamento, ed i modelli bidimensionali di analisi ed interpretazione del manufatto. A partire da questa interconnessione, l'obiettivo è quello di segmentare la nuvola di punti sfruttando le mappature analitiche predisposte sul modello 2D e poi proiettate in uno spazio 3D.

Questo tipo di applicazione nasce da due presupposti. Il primo, riguarda l'inquadramento teorico della sperimentazione. L'interpretazione e la comprensione architettonica di un manufatto passano inderogabilmente attraverso il disegno. Proprio per questa sua funzione, nell'ambito della rappresentazione, il disegno è il modello 2D per eccellenza. In quest'ottica, esso seleziona e trasmette i caratteri dell'architettura, quindi, ben si presta ad essere utilizzato come base informativa per l'annotazione del sistema complesso di analisi riguardo l'oggetto, sia nella sua componente materica che architettonica. In questo senso, la prima operazione di "segmentazione", tutt'altro che stocastica, viene realizzata proprio in questa fase, essa passa per l'individuazione di un piano XY di riferimento, questo piano è demandato ad accogliere il disegno e ad orientare

la nuvola di punti per la sua corretta visualizzazione. Il secondo presupposto, invece, interessa l'aspetto applicativo, operando su modelli 2D ortografici anziché su immagini prospettiche, essenzialmente fotografiche, è possibile cogliere con maggiore immediatezza non solo la relazione tra le parti che compongono il manufatto ma anche l'eventuale connessione tra diversi fenomeni individuati e mappati sul modello 2D. L'iter conoscitivo proposto si sviluppa per mezzo di continui rimandi tra modello 3D e modelli 2D, in questo caso la nuvola di punti diviene modello grazie ad una trasposizione di informazioni.

Nell'esempio proposto, la mappatura racconta lo stato di conservazione delle superfici, la stessa procedura è applicabile rispetto a diversi criteri classificatori, si pensi alla scomposizione semantica dell'oggetto, ad esempio, individuando sul modello 2D la partitura architettonica e riproponendola su un supporto tridimensionale. L'identificazione della natura fisiologica o patologica di un quadro fessurativo o dello stato di conservazione delle superfici architettoniche è il risultato tangibile di un processo di riflessione che porta dall'analisi quantitativa dei dati ad una prospettiva di lettura del fabbricato. Tale processo arriva a compimento solo grazie ad una comprensione profonda della storia dell'oggetto e si predispone come base per le ulteriori fasi di ricerca di natura tecnico-scientifica.

Nel settore del restauro architettonico ed in generale dello studio del patrimonio costruito, il riferimento di partenza per la categorizzazione dei fenomeni di degrado delle superfici è espresso dalle raccomandazioni Nor.ma.1 1/88. Il documento fu redatto dall'omonima commissione per definire e descrivere le alterazioni e le patologie di degrado dei materiali costruttivi lapidei, comprendendo sia le pietre naturali che i materiali artificiali utilizzati in architettura da essi ottenuti, con la corrispondente rappresentazione grafica dei fenomeni.

I fenomeni di alterazione delle superfici e, in maniera ancora più evidente, quelli di fessurazione sono la manifestazione superficiale e visibile di meccanismi tridimensionali che coinvolgono la struttura dell'oggetto nella sua interezza. Ciò lascia intendere quanto la corretta identificazione di tali fenomeni avvenga a patto che si abbia una consapevolezza spaziale globale dell'oggetto.

Nel tradizionale approccio alla materia, il riconoscimento delle patologie avviene sulla base di elaborati grafici, preminentemente bidimensionali, descrittori dei caratteri architettonici delle superfici nella loro reciproca configurazione spaziale. Gli elaborati grafici di base sono il risultato di un primo passaggio interpretativo che guida dai dati quantitativi acquisiti ed espressi attraverso la fase di rilevamento alla produzione di un modello bidimensionale. Se il processo viene condotto a partire da acquisizione massiva, la metodologia di analisi del manufatto conduce dal modello numerico tridimensionale al modello grafico bidimensionale e da quest'ultimo al modello tematico relativo al degrado delle superfici.

Lo studio proposto si inserisce nella struttura metodologica che dall'acquisizione del dato arriva alla sua interpretazione ed aggiunge ai passaggi descritti una trasformazione ulteriore: la proiezione degli elementi connessi al degrado delle superfici e mappati su modelli bidimensionali nello spazio tridimensionale. Questa operazione consentirebbe di informare un modello numerico attraverso criteri di lettura ed interpretazione propri del settore indagato e condiziati attraverso una classificazione sistematica codificata.

La procedura è implementabile a condizione che la morfologia prevalente della porzione individuata non presenti sottosquadri significativi. Ciò renderebbe necessario l'utilizzo di numerosi piani di sezione per poter mappare in maniera efficace l'oggetto. In aggiunta, per assicurare una corrispondenza efficace tra 2D e 3D, la mappatura si è concentrata sulle superfici con una giacitura prevalentemente parallela rispetto al piano di sezione. Questa modalità esclude dalla proiezione le aree eccessivamente scorciate. La procedura favorisce, allo stesso modo, l'integrazione con altri elaborati bidimensionali connessi al rilievo come, ad esempio, le ortoimmagini, generate tramite la proiezione sul piano della *texture* di un oggetto tridimensionale. Questa tipologia di elaborato è un valido supporto alle operazioni di mappatura per la caratterizzazione superficiale dell'oggetto. In questa direzione, l'oggetto viene rilevato ed elaborato per produrre diverse tipologie di elaborati 2D, su questa base è possibile avviare le operazioni di analisi e segmentazione.

Le consolidate metodologie di associazione e proiezione

2D/nuvola di punti fanno generalmente riferimento a delle immagini, dei dati 2D, acquisiti rispetto ad un centro di proiezione. In tal senso, al netto delle deformazioni introdotte per mezzo del sistema di acquisizione, il sistema di proiezione adottato è di tipo piramidale. Questa operazione consente di texturizzare la nuvola di punti con le componenti cromatiche derivate dai pixel dell'immagine. La procedura proposta, diversamente, mira ad utilizzare non tanto dati, quanto modelli 2D come interfaccia di collegamento tra la nuvola di punti e l'ampio apparato documentale prodotto dalle operazioni di analisi ed interpretazione del manufatto. Questa interfaccia consente di generare modelli 3D numerici tematici mediante la segmentazione diversificata della nuvola. La realizzazione della procedura è stata progettata all'interno dell'applicativo *VisCore*<sup>23</sup>, implementando un algoritmo dedicato per la proiezione cilindrica di mappature a campitura omogenea<sup>24</sup>.

I modelli 2D sono stati elaborati in un ambiente virtuale CAD<sup>25</sup>. In esso, la compresenza della nuvola di punti 3D ha definito un primo vincolo spaziale. Impostando un UCS personalizzato rispetto a dei piani di sezione significativi, si è definita la loro posizione reciproca.

La sperimentazione è condotta rispetto alla parete Nord-Est dell'aula X. Sulla base dei disegni 2D prodotti, per ogni tipologia di degrado individuata in superficie è stato generato uno *shapefile*<sup>26</sup>. Ogni *shapefile* contiene quindi, una base vettoriale disegnata ed una campitura indicativa di una specifica tipologia di degrado. In *VisCore* la nuvola di punti è stata importata congiuntamente agli *shapefile* per l'operazione di proiezione (Figg. 4.12, 4.13). La nuvola di punti texturizzata con campiture omogenee riferite alle tipologie di degrado è segmentabile mediante una funzione di selezione per colore presente nell'applicativo *CloudCompare*. Questa procedura di segmentazione si allontana dagli algoritmi più o meno automatizzati generalmente impiegati (paragrafo 3.1.3). La scelta deriva dalla volontà di riportare il baricentro sul tema della rappresentazione come modellazione e sulla componente interpretativa e soggettiva della scomposizione dell'architettura. In quest'ottica i modelli 2D e 3D si trovano a condividere un unico spazio virtuale ed a consolidare il processo di conoscenza.

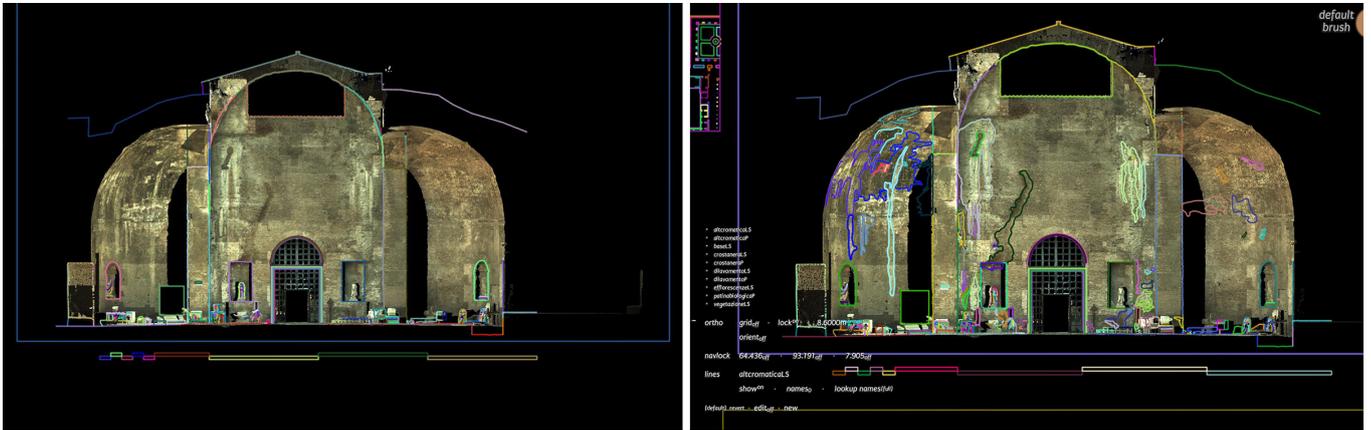


Fig. 4.12 Importazione in VisCore della nuvola di punti derivata dal rilievo e degli shapefile contenenti le informazioni relative allo stato di conservazione delle superfici.



Fig. 4.13 Schema proiettivo degli elaborati 2D sulla nuvola di punti 3D per la segmentazione.

### 4.3 Il ninfeo di Egeria

Lo studio qui presentato sul ninfeo di Egeria ha tracciato un processo di conoscenza sviluppato in più fasi. Le prime operazioni condotte hanno riguardato l'acquisizione del materiale iconografico, bibliografico ed archivistico. L'ampia produzione di disegni e incisioni sul tema del ninfeo ha offerto numerosi spunti interpretativi e ricostruttivi oltre a costituire un primo apparato documentale, una base dati, per le fasi successive. Da Antonio da Sangallo il giovane a Piranesi, il palinsesto disegnato, costruito ad opera di artisti ed architetti, dimostra un interesse costante nel tempo sia verso la suggestività di un luogo che verso

il carattere dell'architettura che li è ospitata (Fig. 4.14). Il ninfeo è studiato, tramite le letture grafiche, nella sua componente espressiva, attraverso il suo inquadramento territoriale e rispetto alla sua valenza architettonica. Il disegno a penna di Antonio da Sangallo il giovane è probabilmente la prima testimonianza grafica del ninfeo, collocato all'incirca al secondo decennio del cinquecento (De Cristofaro, 2013), la rappresentazione in pianta è ascrivibile all'ambito del rilievo, questo modello restitutivo è per l'architetto uno strumento di comprensione dell'antico, grazie ad esso ci vengono fornite indicazioni preziose rispetto ai caratteri architettonici della struttura rintracciabili o dedotti in quel periodo. I disegni attribuiti a Sallustio Peruzzi (Bartoli,

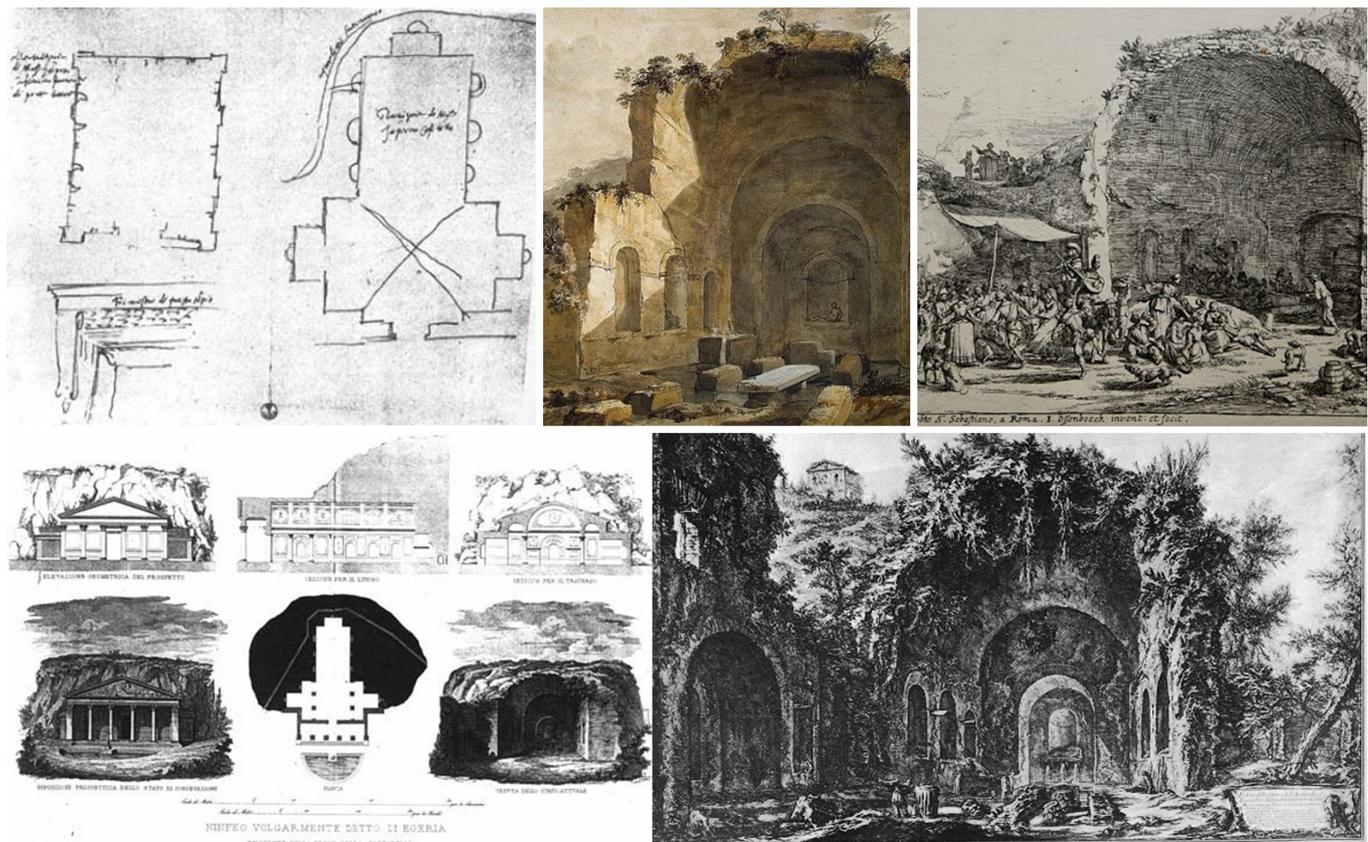


Fig. 4.14 Disegni e schizzi prodotti sul tema del ninfeo di Egeria. Da in alto a sinistra: Antonio da Sangallo il giovane (1484), Charle Louis Clerisseau (1721-1820), Jan Van Ossenbeeck (1623-1674), Luigi Canina (1853), Giovan Battista Piranesi (1720-1778).

1914, Tav. CCCLXXV, fig.655-13; Tav. CCCLXXXVIII fig.680-7-8) seguono la stessa linea del modello restitutivo, essi trasmettono informazioni preziose rispetto alla fase cinquecentesca di ristrutturazione del monumento. Di tutt'altra natura sono le incisioni di Giovan Battista Piranesi, aldilà della loro forte carica espressiva, in essi è possibile rintracciare un certo rapporto tra architettura e contesto ambientale esasperato dalla rappresentazione del verde nella sua valenza pervasività rispetto al costruito. Oltre a tale chiave di lettura, questa incisione si inquadra nell'insieme delle rappresentazioni prospettiche elaborate all'epoca dei *grand tour* da diversi artisti francesi, in esse è rintracciabile, a diversi livelli, una commistione tra dati rilevati *in situ*, elementi ricostruiti ed altri riprogettati. La fase di modellazione 3D illustrata nel paragrafo 4.4.1 si è servita nello specifico di questi elaborati per dare una risposta grafica alle interpretazioni storiografiche.

Relativamente allo sviluppo storico dell'oggetto, la struttura è stata identificata tradizionalmente con la grotta della ninfa Egeria già dalla prima metà del Cinquecento. Carlo Fea all'inizio del XIX secolo, si era già reso conto dell'errore di identificazione, proponendo di correggerlo, poiché la fonte di Egeria va individuata nei pressi della Porta Capena (Fea 1816). Il Lanciani (1892, 287) è stato il primo a riconoscere che la struttura come appartenente alla villa di Annia Regilla e, quindi, di Erode Attico. Si conserva tuttavia ancora il suo nome originale per convenzione. Scavi scientifici furono anzitutto intrapresi tra gli anni '20 e '30 del XIX secolo, sotto la direzione di Carlo Fea (De Cristofaro 2002). Dopo quei lavori, indagini archeologiche e restauri sono stati effettuati solo alla fine degli anni '90 del secolo scorso, in occasione del Giubileo del 2000. Questi ultimi hanno permesso di acquisire numerosi dati nuovi che hanno dato l'opportunità di conoscere meglio la storia del monumento.

La struttura pare fin dalla sua ideazione finalizzata a dissimulare la morfologia di una grotta naturale. Essa si caratterizza per una pianta a T, frutto della composizione di due ambienti rettangolari perpendicolari tra loro. L'ambiente meglio conservato è sicuramente quello che gli archeologi hanno definito *ambiente I* (De Cristofaro 2005, 667): esso

è orientato su un asse NE-SO ed è coperto interamente da una volta a botte. Del pavimento non sopravvivono purtroppo tracce, mentre molto di più si può desumere dalle murature. Il lato breve meridionale è costituito da una scarsella voltata a botte a base rettangolare, sul lato maggiore della scarsella è visibile una nicchia a pianta semicircolare con copertura a calotta emisferica, mentre il lato breve settentrionale è aperto verso l'altro ambiente rettangolare (cosiddetto *ambiente II*). I lati lunghi dell'ambiente I sono speculari: essi presentano tre nicchie: di queste, la nicchia centrale è simile a quella presente sul fondo del lato meridionale, con una pianta semicircolare con volta a calotta emisferica, le nicchie laterali sono invece a pianta rettangolare e voltate a botte. Le murature sono in conglomerato cementizio, ricoperto da *opus mixtum* in un'esecuzione che risulta piuttosto accurata. Sono visibili in vari punti tracce di almeno due tipi di laterizi, uno di colore rosso, l'altro giallo, dovuti probabilmente a due diverse forniture di materiale anziché a differenti cronologie (De Cristofaro 2014, 34). Le murature nascondono varie tracce di rivestimenti, soprattutto dovute alla persistenza di strati dell'intonaco di preparazione che hanno aiutato a ricostruire almeno parzialmente lo schema decorativo che doveva caratterizzare le pareti, in uno schema divisibile in tra fasce decorative, delle quali la più bassa copriva le pareti fino alla base delle nicchie e doveva essere composta da lastre marmoree rettangolari. Di essa comunque ci resta davvero poco e quasi ogni traccia dei marmi è sparita. La fascia intermedia parte invece dalla base delle nicchie per arrivare alla linea di imposta delle volte: anche in questo caso i rivestimenti erano costituiti da lastre marmoree in uno schema piuttosto semplice. L'ultima fascia decorativa comprende lo spazio tra le linee di imposta delle nicchie e la linea di imposta della copertura voltata. Di essa ci rimane ben poco, ma gli studi effettuati hanno concesso agli archeologi di ipotizzare la presenza di un tappeto musivo che rivestiva anche i catini e le volte delle nicchie nella parete (Fig. 4.15).

Di questo tappeto musivo si conserva però davvero poco: si può presumere che fosse costituito da tessere vitree colorate e motivi a racemi vegetali policromi con uno sfondo forse dorato, poiché sulla malta preparatoria ci sono trac-

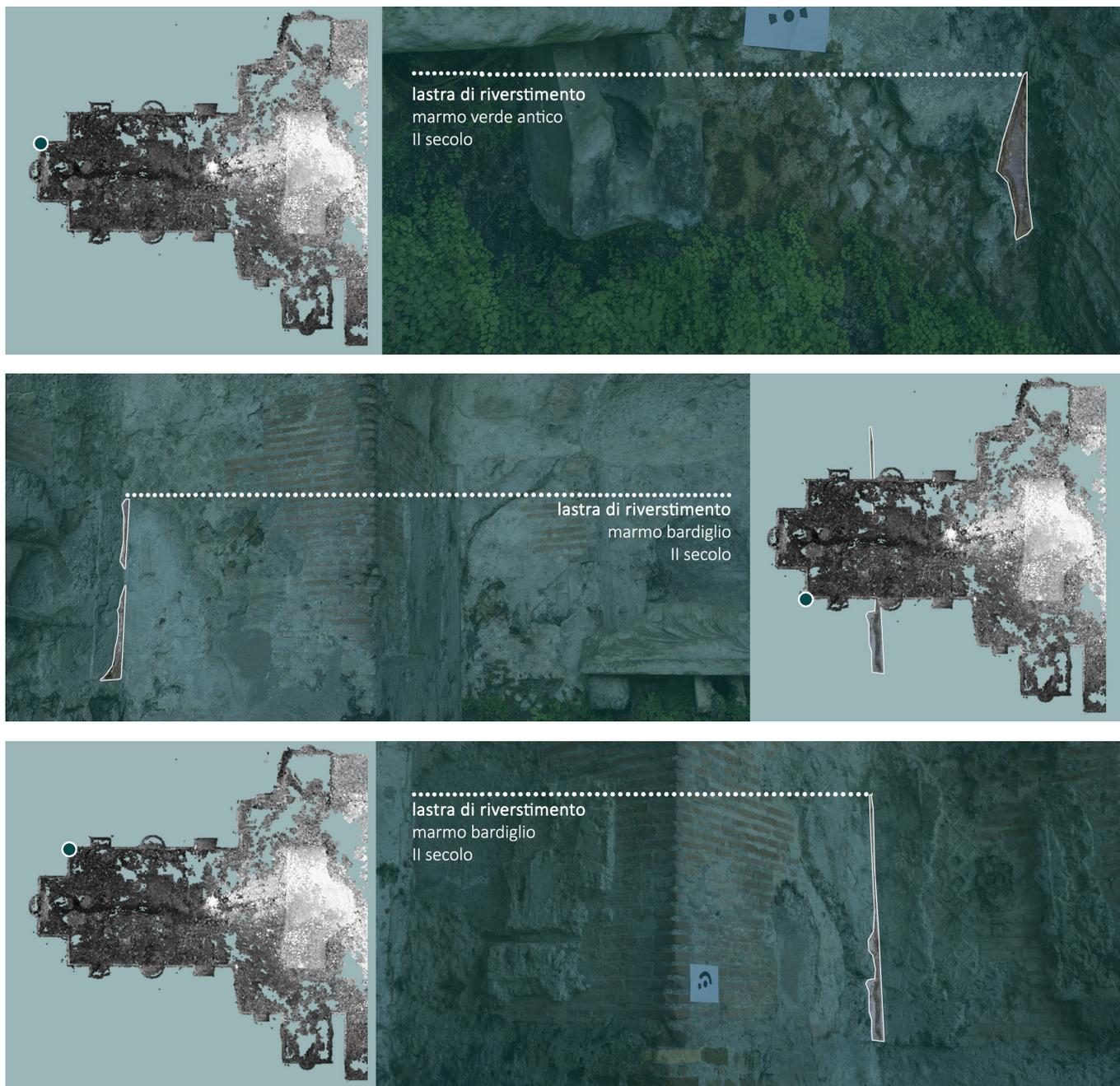


Fig. 4.15 lacerti rintracciabili in situ dell'apparato marmoreo parietale

ce di una patina giallo avorio (De Cristofaro 2014, nota 31). La volta di copertura, sebbene ancora abbia evidenti tracce della stessa malta di preparazione vista per gli altri rivestimenti, doveva invece essere composta da pomici vulcaniche, scaglie di calcari e travertini, nonché conchiglie e paste vitree blu (De Cristofaro 2014, 37). Lo schema decorativo non è ovviamente ricostruibile.

L'ambiente II è conservato peggio: manca completamente la copertura e non è da escludere che mancasse anche in antico. Verso nord, esso è parzialmente aperto sulla valle del fiume Almona essendo costituito da due brevi ante murarie in *opus mixtum* e conservate per un'altezza media di circa 25 cm. Dei due lati brevi a est e a ovest, quello orientale è il meglio conservato, mentre la parte occidentale è conservata solo a tratti e doveva essere in parte distrutta già nel XVIII secolo, dato che alcuni disegni dell'epoca ne testimoniano lo stato di rudere. Della parte orientale sappiamo che è rimasta sempre in piedi, sebbene abbia subito delle trasformazioni nel corso dei secoli: divenuta osteria nel corso del XVII secolo per servire le feste e i pranzi che si tenevano nel ninfeo, è stato poi modificato da un restauro mimetico che intendeva eliminare la superfetazione moderna ma che ha finito per compromettere la stratigrafia delle murature. Sembra comunque che sia stato possibile ricostruire la forma originaria dell'ambiente. Essendo i lati brevi probabilmente speculari, pare plausibile la ricostruzione degli stessi analizzando il lato orientale: grazie al ritrovamento dei resti di una lastra marmorea in giacitura primaria, si presume che la pavimentazione fosse costituita da lastre di marmo in verde antico, poi completamente coperte nelle fasi costruttive successive. La parte orientale è coperta da una volta a botte, sulla parete di fondo si nota la presenza di una nicchia semicircolare, con volta a calotta, simile a quelle già analizzate per l'altro ambiente. Un arco a tutto sesto, rivestito da laterizi che solo in parte possono considerarsi antichi, si apre sull'ambiente due. Poste lateralmente ad esso, due nicchie rettangolari ne delimitano lo spazio. Di queste, è pienamente conservata solo la nicchia meridionale, che ha comunque subito forti interventi di restauro che probabilmente ne hanno inficiato l'aspetto originale. Le murature sembrano omogenee a quelle dell'ambiente I, con un rivestimento in opera mista

ma con pochissime, se non nulle, tracce delle decorazioni e della malta preparatoria. Si può quindi solamente supporre che i rivestimenti parietali fossero simili a quelli notati per l'ambiente I.

A nord di questo secondo ambiente, infine, sono stati ritrovati cospicui resti di una struttura in conglomerato cementizio che parrebbe essere un podio o un gradone digradante verso l'Almona, con un rivestimento sul lato settentrionale in opera mista e perfettamente coerente con le murature del ninfeo (De Cristofaro 2014, nota 44). In origine, dunque, il ninfeo doveva essere più ampio di quello che vediamo oggi: l'impatto scenografico, che tuttora suscita nel visitatore un senso di maestosità, doveva pertanto risultare molto forte (De Cristofaro 2002, 234). Tuttavia, le indagini più recenti hanno provato che durante la prima fase di vita dell'edificio non fossero presenti strutture idriche, che paiono ascrivere ad un rifacimento avvenuto in età più tarda, all'inizio del IV secolo, quando Massenzio acquisì il complesso della villa di Erode e lo ristrutturò per trasformarlo nella sua residenza suburbana. È dunque in questo periodo che compare al centro dell'ambiente II la vasca a pianta rettangolare con il lato settentrionale absidato. La vasca è alimentata da una condotta fatta di *tubuli* in terracotta ancora parzialmente visibili sulla parete occidentale dell'ambiente I. Tale condotta capta l'acqua proveniente da un acquedotto verosimilmente costruito nello stesso periodo e probabilmente eretto per approvvigionare gli edifici nella valle della Caffarella (De Cristofaro 2005, 670). La struttura nel complesso non risulta stravolta, ma soltanto abbellita con la vasca e con il rifacimento del pavimento, del quale si conserva la struttura preparatoria costituita da uno strato di pozzolana sul quale venivano allestiti elementi circolari o rettangolari in peperino, probabilmente recuperati da un altro monumento, sui quali si poggiava un piano fatto di laterizi conservati in maniera piuttosto frammentaria in pochi punti lungo le pareti. Del pavimento vero e proprio non abbiamo tracce facilmente leggibili: esso era probabilmente costituito da un mosaico a grandi tessere irregolari di marmo serpentino, forse poste per filari paralleli (Fig. 4.16).



Fig. 4.16 Le fasi costruttive del ninfeo. II secolo (in alto): impianto costruttivo e dettagli delle tracce di rivestimento marmoreo. IV secolo (al centro): vasca centrale e sistema di canalizzazione delle acque. XVI secolo (in basso): statuaria e canale d'acqua centrale

#### 4.2.1 Il rilievo integrato e l'acquisizione termografica

Le operazioni di rilievo integrato del ninfeo sono state programmate ed eseguite combinando un'acquisizione di tipo massivo, attraverso processi di *Structure from Motion*, ad acquisizioni di tipo selettivo, mediante topografia<sup>27</sup>. Per ottimizzare l'integrazione tra le due metodologie, sono stati inseriti nella scena dei *marker* di controllo inquadrati nelle immagini fotografiche ed acquisiti topograficamente (Fig. 4.17).

In una seconda fase, l'area compresa tra l'abside e le nicchie è stata rilevata mediante termo-camera<sup>28</sup>. L'ac-

quisizione è stata programmata per fornire informazioni aggiuntive relative ad una porzione di un canale idrico in terracotta parzialmente visibile sul lato inferiore delle nicchie. È ipotizzabile che il canal potesse connettere la sorgente principale collocata nell'abside con le nicchie laterali, ciò risulterebbe funzionale all'eventuale presenza di giochi d'acqua all'interno delle nicchie o potrebbe dare indizi sull'esistenza di ulteriori fontane collocate ai lati del ninfeo. Le immagini termografiche sono state acquisite con l'obiettivo di intercettare il percorso interno alla muratura del canale che avrebbe dovuto connettere la fontana di fondo alle nicchie stesse<sup>29</sup>.



Fig. 4.17 Viste prospettiche della nuvola di punti

#### 4.3.2 L'associazione spaziale dei dati

Il principale obiettivo della sperimentazione proposta è quello di ottenere un modello numerico integrato contenente le informazioni RGB e quelle termiche in sovrapposizione. Tale sistema consente una lettura tridimensionale del dato termico ed una associazione istantanea rispetto al dato RGB corrispondente ed al suo contesto, ciò agevola la lettura dell'oggetto ampliando i livelli di interpretazione e suggerendone di nuovi.

Il tema è stato affrontato in letteratura in maniera trasversale attraverso diverse sperimentazioni condotte sulle varie fasi del processo. A partire da applicazioni puntuali finalizzate a verificare l'accuratezza e la calibrazione dei sensori<sup>30</sup>, l'obiettivo generale degli studi elaborati è quello di sviluppare strategie di integrazione dei dati termografici con nuvole di punti tridimensionali.

Se la superficie dell'oggetto è assimilabile ad un piano, il problema può essere approssiato proiettando il fotogramma singolo sul *fitting plane*, questa operazione agisce su due dimensioni e non prende in considerazione il carattere tridimensionale dell'oggetto, dal punto di vista metodologico, questa procedura può essere considerata come un primo livello di integrazione, utile a certe specifiche condizioni<sup>31</sup>.

Nell'ambito dell'integrazione del dato su tre dimensioni,

le sperimentazioni condotte sul tema si basano principalmente sulla ricostruzione spaziale di punti caratteristici individuabili sia su immagini RGB che su quelle ad infrarossi, su questa base è possibile costruire separatamente modelli numerici da immagini RGB e da immagini termografiche, avendo noti i valori di deviazione dell'uno rispetto all'altro, è possibile interpretare e studiare il modello rispetto alla scala di rappresentazione proposta dal livello di sovrapposizione geometrica tra le due nuvole<sup>32</sup>. Un altro approccio è quello di combinare nuvole di punti strutturate ed immagini bidimensionali attraverso l'estrazione di geometrie caratteristiche per computare i parametri di orientamento<sup>33</sup> (Fig. 4.18).

L'integrazione di mappe 2D tematiche con nuvole di punti da laser scanner può essere investigata anche risolvendo le equazioni di collinearità utilizzando *Ground Control Points* (GCP) per l'individuazione di punti corrispondenti<sup>34</sup>. Il problema principale legato all'individuazione di punti caratteristici su immagini termografiche è legato alla bassa risoluzione del fotogramma ed alla variazione graduale dei valori di temperatura registrati sulla superficie dell'oggetto. Tale variazione influenza la nitidezza dell'immagine e rende graduale la transizione tra materiali o stati di conservazioni diversi; queste condizioni possono compromettere la riconoscibilità morfologica sulle immagini IR. In questo contesto, una valida alternativa è quella di calcolare la po-

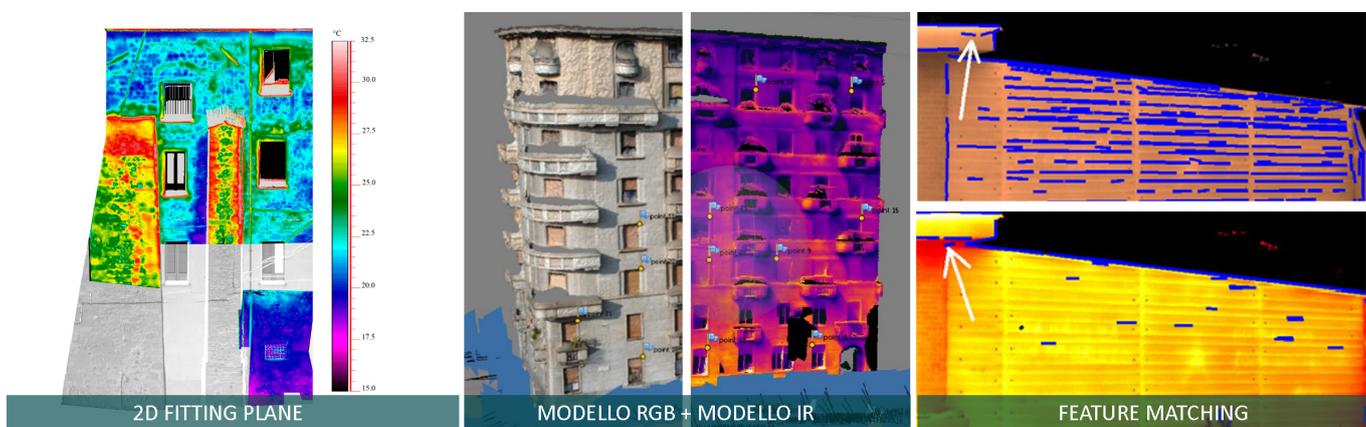


Fig. 4.18 tipologie di integrazione tra nuvola di punti derivata da acquisizione massiva e dato termografico, da sinistra: *fitting plane* (Costanzo et Al. 2015), *processamento individuale del set GB e di quello IR ed unione mediante GCP* (Scaioni et Al. 2017) e *procedura di feature detection tra nuvola di punti ed immagine termografica* (Laguela et Al. 2013).

sizione delle camere IR considerando riferimenti geometrici e spaziali rapportati al sistema di coordinate cartesiane 3D della nuvola di punti. Seguendo questa linea, alcuni studi condotti hanno portato alla costruzione di dispositivi personalizzati con un rapporto spaziale fisso e misurato tra i sensori RGB e IR<sup>35</sup>. Questo sistema, definito bi-camera, permette di ricostruire i parametri di orientamento esterno e di orientamento relativo della camera a infrarossi a partire dai corrispondenti parametri RGB ed imponendo una distanza fissa tra i due centri di proiezione. In altri casi, l'individuazione della geometria fissa ed il conseguente calcolo dei parametri di orientamento sono avvenuti a partire da dispositivi commerciali con coppia di sensori RGB e IR integrata<sup>36</sup>.

Le procedure basate su vincoli spaziali tra sensori definiscono un flusso di lavoro riproducibile e risultano largamente applicabili nelle condizioni in cui la riconoscibilità dei punti di controllo sulle immagini IR è fortemente compromessa.

Rispetto al caso studio, il dato termografico è fornito attraverso un'immagine di 160x120 pixel interrogabile, ad ogni immagine termica è associata un'immagine RGB di 640x480 pixel. La termocamera utilizzata integra un sensore infrarosso posto in basso rispetto ad un sensore RGB. I due sensori sono allineati lungo l'asse verticale ad una distanza fissa di 4cm.

Considerando le dimensioni ridotte dell'immagine termografica, si è ritenuto opportuno calcolare preventivamente la Ground Sample Distance e di impostare la distanza dell'oggetto in funzione della scala di rappresentazione del modello finale. La GSD è di 7mm/pixel, con un angolo di presa di 32° a 2metri di distanza (Fig. 4.19).

Questo valore approssimativo risulta adeguato rispetto alle operazioni proiettive condotte. Per le immagini termografiche la GSD non riesce a fornire un quadro esaustivo del controllo metrico ed informativo dell'immagine; tale controllo è fortemente influenzato da fattori endogeni all'acquisizione termografica come l'attivazione automatica dell'autofocus, la graduale variazione di colore dell'immagine e l'ampio diametro del *disco di Airy*<sup>37</sup> rispetto a quello di un sensore standard. Questi elementi rendono difficilmente quantificabile l'accuratezza metrica dello scatto lasciando questa valutazione ad un'analisi di tipo qualitativo.

La procedura individuata consiste nella riproiezione della componente cromatica del dato termografico sulla nuvola di punti. Questa procedura sfrutta il vincolo geometrico tra i due sensori (RGB e IR) ed ammette delle semplificazioni compatibili con la risoluzione del sensore infrarosso. L'impostazione di base prevede il calcolo dei parametri di orientamento interni ed esterni delle immagini RGB della termocamera, la seconda fase del processo è quella di

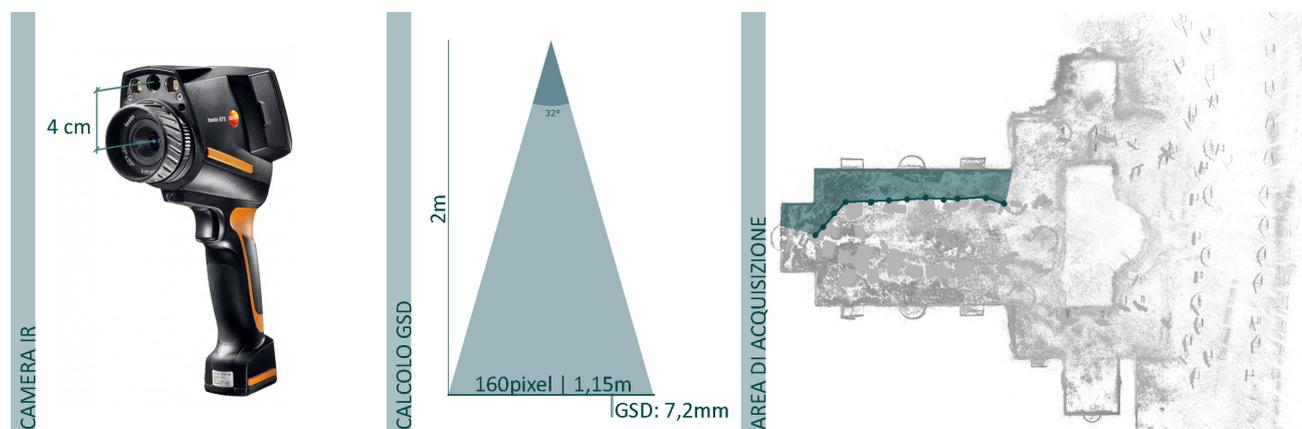


Fig. 4.19 Da sinistra: termocamera Testo – 875 2i con l'individuazione dei due sensori, calcolo del GSD e mappatura planimetrica della superficie interessata da acquisizione termografica.

traslazione del centro di proiezione lungo l'asse verticale, l'ultimo passaggio è quello di proiezione dell'immagine IR dalla nuova posizione calcolata sulla nuvola di punti RGB. A partire dalle fasi individuate, l'acquisizione del dato termografico è avvenuta verificando che la termocamera fosse in posizione verticale per ogni scatto. Questo vincolo si è reso necessario per consentire, in fase di elaborazione dati, la traslazione verticale dei fotogrammi. Successivamente alla fase di acquisizione, la validità delle immagini è stata verificata sovrapponendo coppie di immagini corrispondenti e verificando l'effettiva assenza di slittamenti sul piano orizzontale.

La prima operazione condotta sulle immagini è stata di calibrazione, ciò ha consentito l'eliminazione delle distorsioni proprie di ciascun sensore rendendo, difatti, il sistema proiettivo della camera uniforme ed omogeneo sull'intera scena riprodotta. Le immagini RGB sono state post-prodotte per rimuovere le distorsioni della lente e poi riesportate. Questo passaggio preliminare consente di disabilitare la calibrazione automatica delle immagini operata in fase di allineamento nei software fotogrammetrici. Le corrispondenti immagini infrarosse sono state esportate senza distorsioni direttamente dal software proprietario della termocamera (Fig. 4.20).

Per i sensori termografici, la fase di calibrazione è cruciale per tutti i casi applicativi in ambito fotogrammetrico. La distorsione della lente, per i sensori IR, è consistente, oltre a ciò, la bassa risoluzione delle immagini ed il sistema di auto-focus contribuiscono a rendere difficile il calcolo dei parametri di orientamento. Questa fase si è conclusa con l'ottenimento di coppie di immagini IR/RGB prive di distorsioni.

La fase successiva alla preparazione delle immagini è quella relativa all'elaborazione dei dati. In tal senso, le immagini RGB acquisite tramite termo-camera sono state processate congiuntamente a quelle acquisite durante la campagna fotografica<sup>38</sup>. La metodologia applicata ha consentito di posizionare nello spazio tridimensionale del modello numerico del ninfeo anche le acquisizioni da termo-camera. Processando congiuntamente le immagini RGB ad alta risoluzione con quelle ad una risoluzione nettamente inferiore, è possibile minimizzare l'errore di

riproiezione di queste ultime e renderlo omogeneo rispetto all'intero set fotografico.

Per la produzione della nuvola di punti *SfM/IM* sono state processate con l'applicativo *Agisoft Photoscan*<sup>39</sup>, 740 immagini fotografiche di cui 50 derivate da termo-camera. Il posizionamento degli scatti fotografici e la fase di *dense matching* sono stati ottimizzati inserendo le coordinate topografiche dei target inseriti nella scena<sup>40</sup>.

La nuvola di punti densa è stata esportata in formato *bundle.out*, il file contiene la matrice di rototraslazione per l'orientamento interno ed esterno, in associazione a questo file, è stato esportato il file *list.txt* contenente il listato di nomenclatura delle camere. I file così predisposti sono stati importati nell'applicativo *MeshLab*<sup>41</sup> per effettuare l'operazione di traslazione delle immagini RGB acquisite con termocamera. In questa fase, le immagini IR sono state rinominate per essere associate a quelle corrispondenti RGB catalogate nel file *list.txt*; a questo punto, grazie alla traslazione, è stato possibile individuare nello spazio 3D la posizione ipotizzata del sensore IR.

La porzione di nuvola di punti interessata anche dall'acquisizione termografica è stata trasformata in modello di superficie mesh mediante interpolazione dei punti; la superficie è stata successivamente mappata con il dato termografico sfruttando la distanza fissa e nota tra i sensori RGB e IR interni al dispositivo. Questa fase si è conclusa con l'ottenimento di un modello numerico nuvola di punti ad alta risoluzione con dato RGB ottenuto attraverso processi fotogrammetrici ed un modello numerico di superficie mappato con dato termico. La fase successiva ha consentito la discretizzazione del modello di superficie in nuvola di punti, questo passaggio ha avuto l'obiettivo di rendere omogenei per tipologia i due modelli.

La procedura esposta ammette due tipologie di approssimazioni; la prima è di carattere strutturale: l'allineamento dei due sensori lungo l'asse verticale della termocamera è ipotizzato, a supporto di questa ipotesi, è stata esaminata una coppia RGB/IR di fotogrammi acquisiti in posizione perfettamente verticale, sulla coppia è stata verificata l'assenza di fenomeni di parallasse sul piano orizzontale. La seconda approssimazione è di carattere procedurale: la traslazione della camera IR è avvenuta lungo l'asse Z

del sistema di riferimento globale. Questa operazione non prende in considerazione la presenza eventuale di rollii del dispositivo; per minimizzare l'effetto, le immagini termografiche sono state acquisite verificando la posizione verticale del dispositivo per l'intero set, ciò ha consentito una sostanziale coincidenza dell'asse Z globale con l'asse Z locale. Dal punto di vista spaziale, ogni camera è assimilabile ad un versore, le coordinate X, Y e Z identificano la posizione del centro di proiezione rispetto al sistema cartesiano mentre i parametri di *Yaw*, *Pitch* e *Roll* definiscono l'orientamento locale della camera rispetto a quello globale. La sperimentazione proposta agisce solo sui primi tre parametri imponendo, in fase di acquisizione, la convergenza tra i due sistemi (Fig. 4.21).

Al termine del processo proposto, il modello numerico è informato con il dato termografico, la nuvola di punti cor-

rispondente è interpretabile mediante il valore di intensità associato ad ogni punto.

Allo stato attuale, il valore di temperatura è stimato grazie al colore attribuito al punto, ciò consente una lettura di tipo qualitativo, un'implementazione della procedura potrebbe essere la possibilità di leggere il valore numerico della temperatura associato al dato termografico di partenza direttamente sul modello numerico, ciò consentirebbe l'interoperabilità tra il dato termico ed i modelli numerici tridimensionali (Fig. 4.22).

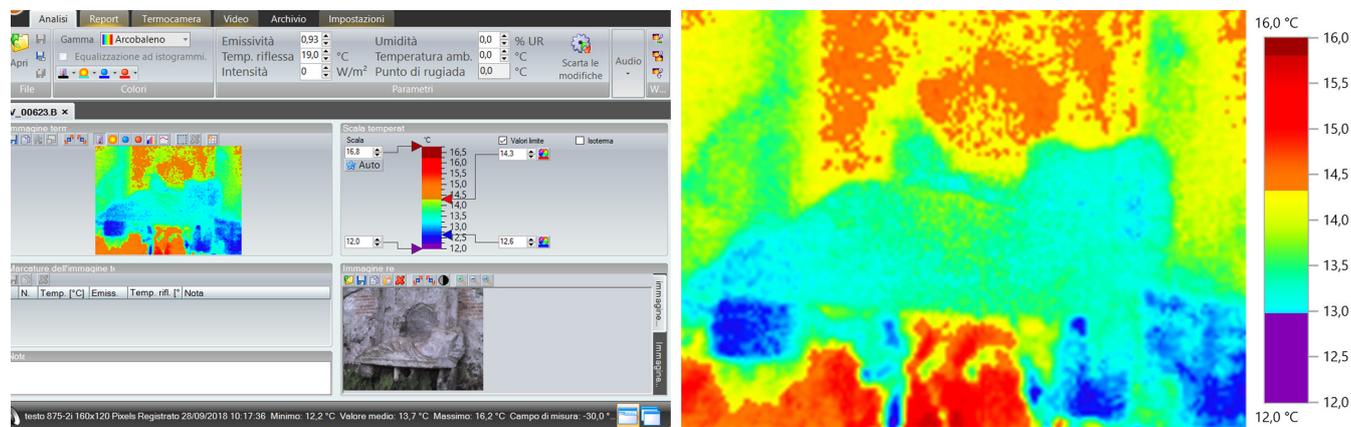


Fig. 4.20 Sinistra: interfaccia del software proprietario per la gestione del dato termografico, destra: termogramma privo di distorsioni.

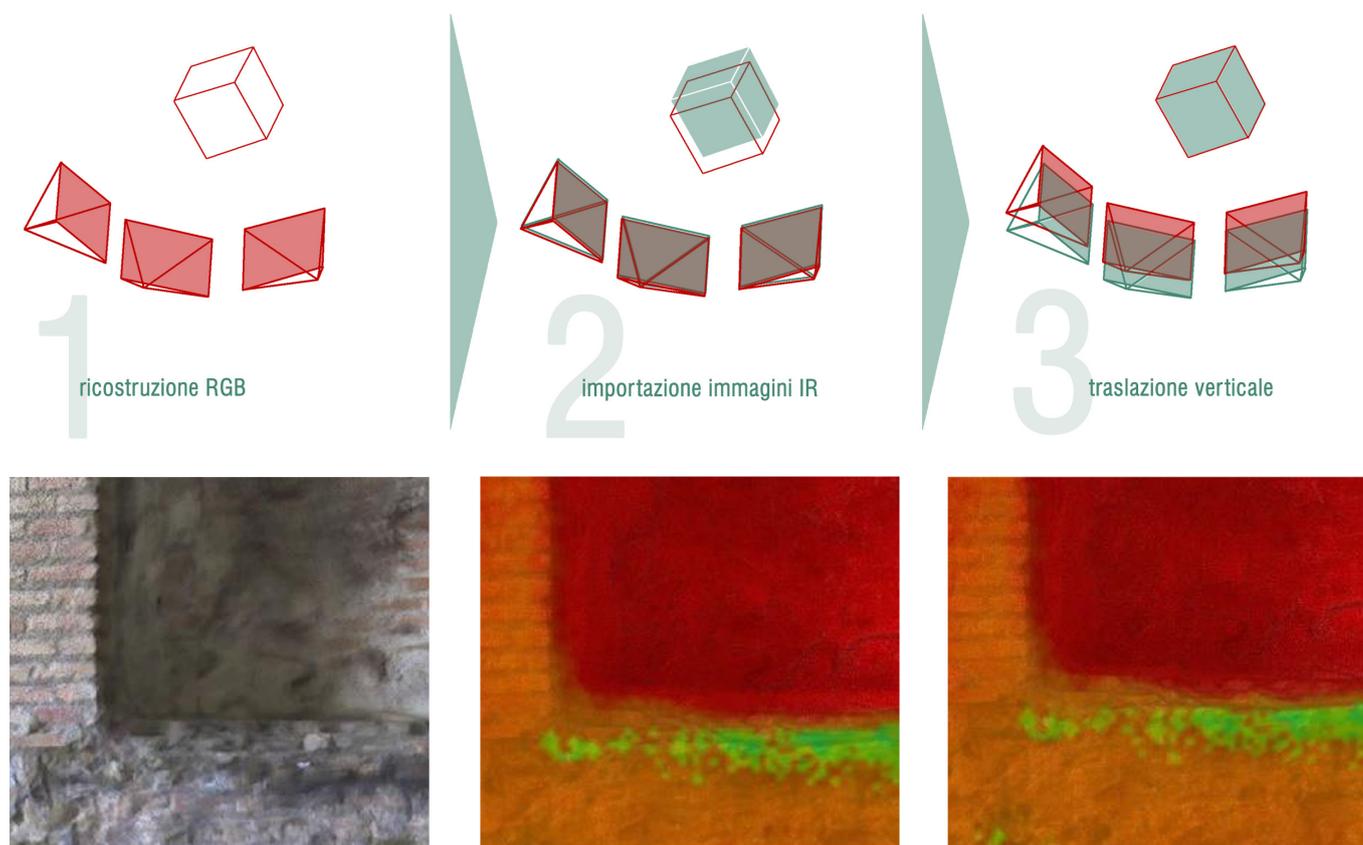


Fig. 4.21 In alto: schema di traslazione della posizione del sensore termografico, in basso: visualizzazione sul singolo fotogramma dell'operazione di traslazione.



Fig. 4.22 Modello numerico integrato.

#### **4.4 Il modello parametrico nel processo HBIM: il ninfeo di Egeria**

Alle procedure di *data fusion* e segmentazione operate nel paragrafo precedente, ha fatto seguito una sperimentazione condotta utilizzando sistemi BIM. Questa fase della ricerca ha l'obiettivo di investigare ulteriori declinazioni del modello digitale rispetto all'architettura archeologica. A questa necessità si affianca quella di costruire un modello continuo capace di predisporre come base per le operazioni di integrazione ed organizzazione dei dati contenuti nei modelli discreti. La metodologia HBIM adopera un sostanziale cambio di prospettiva rispetto a quella messa in gioco dai processi BIM. Il modello che ne deriva nel primo caso, racconta e si fa manifesto del passato e del presente dell'oggetto; nel secondo caso, il "doppio" digitale si focalizza sul presente e sul futuro del suo corrispondente fisico. Questa variazione di paradigma porta con sé una serie di complessità legata ai criteri di modellazione, la risoluzione relativa al "cosa" modellare ed al "come" modellarlo, non può essere univoca e, pertanto, è oggetto di un'analisi critica riferita agli obiettivi del modello ed alla sua valenza teorica e tecnica.

In questo quadro, la scelta di avvalersi di una metodologia di tipo BIM per rispondere a tali quesiti è risultata piuttosto spontanea. La modellazione solida parametrica offre la possibilità di costruire oggetti tridimensionali dotati di caratteristiche specifiche. Queste caratteristiche sono espresse tramite parametri a partire da dati 1D, 2D o 3D. La multidimensionalità del dato collegabile all'oggetto modellato rende la parametrizzazione una operazione predisposta a raccontare l'oggetto indipendentemente dalla natura morfologica della sorgente informativa. Su questa linea, il modello proposto coniuga due componenti essenziali; la prima riguarda la costruzione del modello e prende in considerazione le problematiche legate alla forma, ai criteri di modellazione ed al rapporto di *mimesis* tra modello e oggetto (paragrafo 4.4.1), la seconda, invece, riguarda il potenziale informativo degli oggetti, in tal senso, le problematiche affrontate riguardano le tipologie di collegamento con dati esterni, il loro sistema di visualizzazione, la propensione del sistema ad essere interrogabi-

le nonché l'individuazione di modalità di comunicazione delle scelte adoperate per la costruzione del modello (paragrafo 4.4.2)<sup>42</sup>.

##### *4.4.1 I criteri di modellazione: la costruzione del modello*

Per la modellazione del ninfeo di Egeria, il primo ordine di problemi ha interessato le modalità di costruzione e trasmissione delle informazioni relative alle fasi storiche di utilizzo della struttura. Infatti, l'aspetto ritenuto forse più rappresentativo nel campo dell'architettura archeologica è legato all'interpretazione dell'evoluzione temporale del costruito. In questo senso, l'inclusione di tale aspetto arricchisce il panorama conoscitivo inerente all'oggetto includendo la funzione del tempo. A tale scopo, per ogni fase costruttiva, sono state individuate le trasformazioni caratteristiche in termini di struttura, funzione e aspetto. La triade Vitruviana di *firmitas, utilitas e venustas* ben si presta a questo approccio. Così sintetizzando, i caratteri dell'architettura, nonché le chiavi di lettura dell'edificio, è possibile approcciare la sua scomposizione per ricomporre l'identità in ambiente virtuale. Tale lettura permette di procedere modellando tramite il metodo delle partizioni successive, proposto dallo stesso Vitruvio per il proporzionamento dell'ordine architettonico<sup>43</sup>. Le fasi storiche così intese sono state schematizzate e parametrizzate per estrarre informazioni relative alle modifiche diacroniche che il ninfeo ha subito. Questo primo approccio conoscitivo ha permesso la formalizzazione di un modello stratificato che risponda, in buona sostanza, alla domanda relativa al "cosa" modellare. La scelta di utilizzare la modellazione parametrica per ricostruire virtualmente le fasi del ninfeo è funzionale ad instaurare un legame di continuità con la fase precedente di produzione del modello discreto (paragrafo 4.3). Rispetto alla conoscenza dell'oggetto, i caratteri di corrispondenza metrica e morfologica, insieme a quelli relativi alle indagini di tipo diagnostico, sono stati affidati al modello numerico, quelli invece rappresentativi di una certa lettura, ovvero quelli che costituiscono e definiscono un certo *Vorstellung*, il modello concettuale, sono stati elaborati mediante l'approccio parametrico. Partendo da questa prerogativa, gli oggetti modellati sono stati clas-

sificati in base alla fase storica, o alle fasi storiche, a cui sono appartenuti.

L'impostazione di un sistema di assi di riferimento ha consentito l'analisi delle proporzioni dell'oggetto, questa fase ha rivelato una precisa modularità dell'impalcato architettonico basata su rapporti dimensionali ben identificabili. La trascrizione in ambiente virtuale di questo carattere, mediante l'impostazione di un sistema di griglie interpendenti, è stata necessaria ad impostare la modellazione sulla base di un riferimento ritmico espresso chiaramente attraverso l'edificio. Lo schema delle due pareti laterali dell'ambiente I del ninfeo (sull'asse NE-SO) segue un'articolazione tra pieno della muratura e vuoto delle nicchie con ritmo A-B-C-B-A; a questo schema corrispondono, rispettivamente, misure di quattro piedi (A), sei piedi (B)

e cinque piedi (C); riguardo la parete di fondo, la grande scarsella centrale, di dodici piedi, ha una lunghezza pari alla metà dell'intera parete ed una profondità pari alla metà della lunghezza; su di essa, la nicchia centrale ha proporzioni e dimensioni simili a quelle absidate presenti sui lati maggiori. Lo schema proporzionale è stato impostato sia per l'ambiente I che per il II (Fig. 4.23). Sulla base di questa prima operazione analitica, la modellazione della stratigrafia muraria ha tenuto conto degli elementi visibili e misurabili sulla struttura stessa ed è stata completata fornendo un'ipotesi relativa alla composizione degli strati non visibili in termini di materiale, tecnica di posa in opera e spessore. L'approccio alla modellazione ha dovuto tener conto delle logiche di costruzione e parametrizzazione degli elementi architettonici proprie del *Common Data En-*

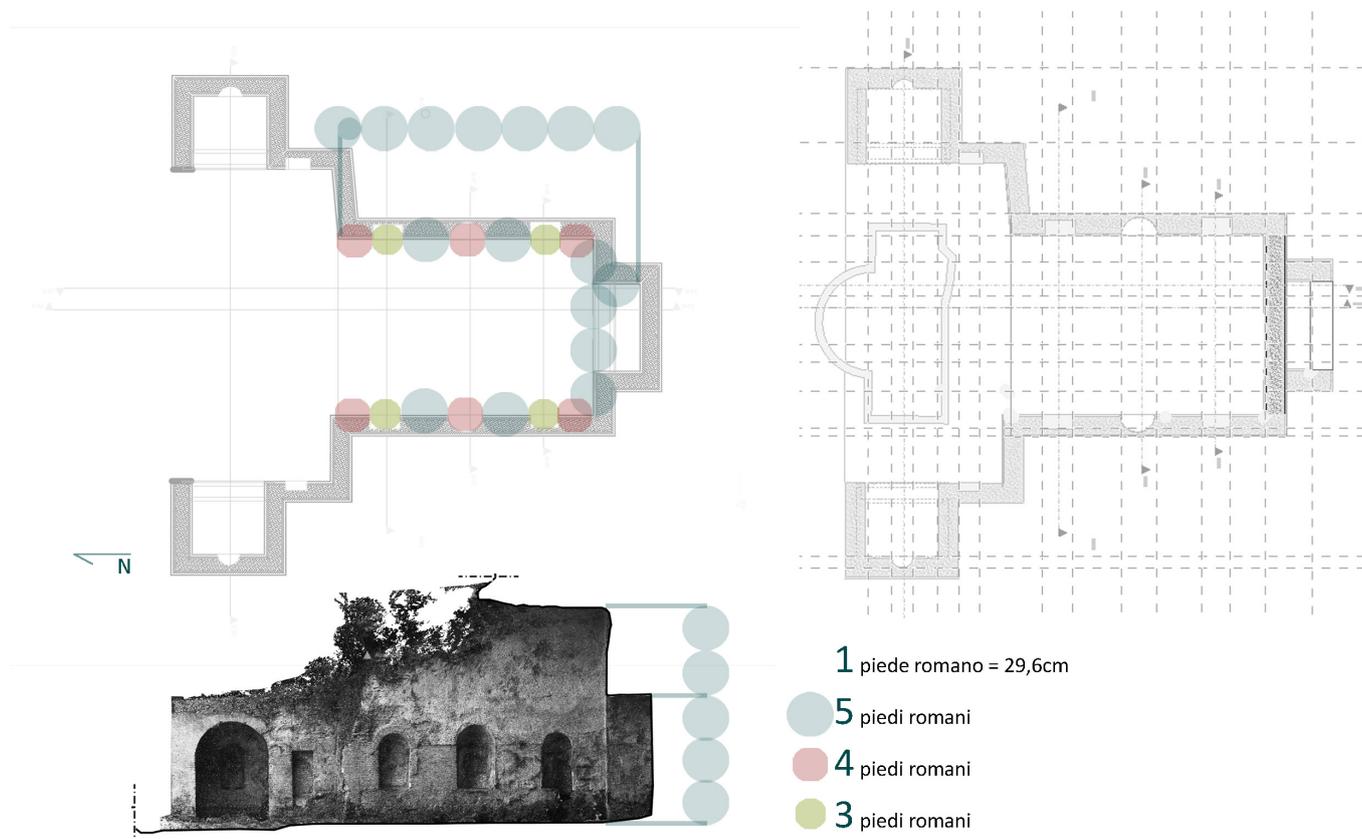


Fig. 4.23 Analisi metrologica e proporzionale del ninfeo con l'individuazione degli assi principali.

*vironment* (CDE) utilizzato. In questo senso, ad esempio, per la modellazione della decorazione parietale è risultato efficace sfruttare l'analogia costruttiva con le facciate continue. Questa famiglia (o classe) si predispone con una configurazione standardizzata di parametri relativi tanto ai pannelli quanto al sistema di giuntatura e fissaggio alla parete. In questo senso, i parametri proposti sono stati personalizzati ulteriormente per descrivere compiutamente l'oggetto. Il tentativo di declinare oggetti parametrici già disponibili nelle librerie ed individuare analogie con gli elementi dell'architettura archeologica mette alla prova la flessibilità degli strumenti e ne testa, quindi, l'adattabilità.

#### 4.2.2 Associazione spaziale: l'information modeling

Se fino a questo punto si è tenuto conto delle problematiche legate alla modellazione in ambito BIM, il passaggio successivo riguarda la modellazione dell'informazione, intesa come sviluppo di un sistema di connessioni riferite all'oggetto. Il primo interrogativo di carattere metodologico e procedurale ha riguardato l'interazione tra modello numerico e modello parametrico. Le procedure *Scan to BIM* sono consolidate nell'ambito dell'HBIM e costituiscono una base operativa di gestione dei prodotti del rilievo in un ambiente di modellazione parametrica. La principale problematica riferibile a tale approccio riguarda l'utilizzo della nuvola di punti come una istanza, un oggetto 3D non parametrico e non interrogabile, ad esso ci si riferisce prevalentemente per indagare gli aspetti dimensionali. Questo approccio, in un certo senso, confina il potenziale informativo del modello numerico e lo disconnette rispetto al modello parametrico. La sperimentazione condotta propone un'interazione tra i due modelli basata sull'operazione di semantizzazione applicata al modello numerico. La segmentazione in regioni significative ha, da una parte, aggiunto contenuti informativi già sul modello discreto e, dall'altra, ha reso possibile la parametrizzazione delle regioni prodotte in ambiente BIM. Con tale presupposto, sono state individuate regioni tridimensionali specifiche relative ai lacerti marmorei rinvenuti in loco, alle tracce di intonaco ed a tutti gli elementi rappresentativi per la ricostruzione virtuale dell'oggetto. Il criterio di segmentazio-

ne adoperato è stato selezionato proprio per *informare* il modello parametrico grazie ai dati provenienti dal rilievo. In ambiente BIM, gli elementi architettonici modellati e ricostruiti si avvalgono di una connessione logica e spaziale che sostanzia e descrive la scelta formale. Questo processo è stato applicato, ad esempio, all'apparato decorativo murale della fascia orizzontale tra la base delle nicchie e la loro quota d'imposta. La documentazione bibliografica di riferimento sembra ricondurre ad una composizione formata da una lastra maggiore, di forma rettangolare o quadrangolare, posta al centro dell'interstizio tra le due nicchie o tra la nicchia e il termine della parete. La lastra era racchiusa su tutti e quattro i lati da lastre di minori proporzioni, di forma rettangolare, piuttosto allungate, e realizzate in marmo verde antico e cipollino (De Cristofaro 2014, 36). Le nicchie, sia quelle rettangolari che quelle absidali, dovevano essere foderate principalmente da marmi bianchi oppure bianchi con venature grigie. In particolare, le pareti delle nicchie semicircolari erano coperte da listelli accostati tra loro. Questi dati sono stati un riferimento utile all'individuazione *in situ* dei lacerti di marmo verde antico; i lacerti sono stati documentati tramite il rilievo, individuati sul modello numerico, selezionati e segmentati rispetto al resto della nuvola di punti. La regione così prodotta è stata importata in ambiente parametrico e connessa all'elemento modellato corrispondente. L'elemento parametrico della pannellatura marmorea descrive la forma, le dimensioni e la consistenza materica secondo l'ipotesi ricostruttiva, le fonti di supporto all'ipotesi sono tutte rese esplicite ed interrogabili sotto la forma di parametri dell'elemento (Fig. 4.24).

Questo stesso approccio è stato utilizzato per l'intero apparato decorativo, il modello proposto racconta l'edificio considerando il suo presente, tramite i modelli numerici, ed i suoi passati.

In dipendenza dalla quantità e dalla tipologia di documentazione di partenza disponibile per ogni elemento, è stato possibile individuare tre classi di affidabilità per la ricostruzione di ogni elemento: il livello più alto di affidabilità corrisponde alla condizione in cui l'elemento è ancora visibile *in situ* in maniera significativa, la sua consistenza è acquisita mediante il rilievo e documentata da fonti

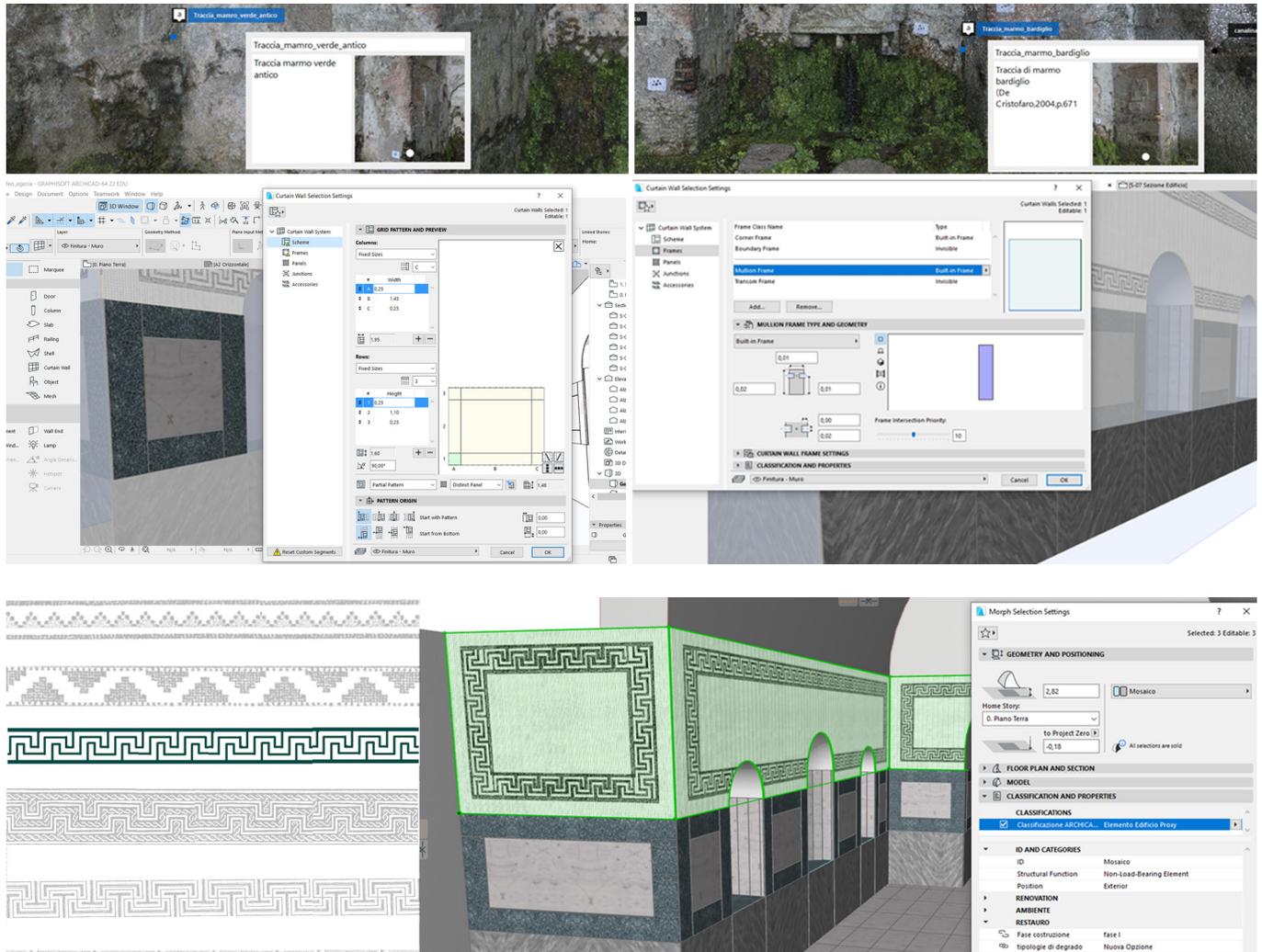


Fig. 4.24 Modellazione del rivestimento parietale attraverso la parametrizzazione dello schema di disposizione dei pannelli. Associazione delle componenti modellate ai lacerti rintracciabili *in situ*.

iconografiche; il livello medio comprende i componenti modellati prevalentemente a partire da descrizioni presenti nelle fonti e la cui consistenza è solo parzialmente ancora visibile *in situ*; il livello basso di affidabilità corrisponde ad una ipotesi di modellazione basata su confronti rispetto a componenti analoghe per periodo ed area territoriale<sup>44</sup> (Figg. 4.25, 4.26 e 4.27).

L'impostazione proposta ben si presta a ripercorrere graficamente la ricerca sul manufatto, il tema dell'affidabilità

del modello (paragrafo 1.4) è ripostulato rispetto allo studio storico e archeologico<sup>45</sup>.

La ricostruzione tridimensionale proposta percorre, in realtà, solo una delle ipotesi storiografiche formulate sul ninfeo, la possibilità di riferirsi a dei livelli di affidabilità, unita a quella di poter interagire con le differenti fasi di costruzione dell'oggetto, apre uno scenario in cui, potenzialmente, ogni ipotesi ricostruttiva trova spazio in una versione del modello visualizzabile ed interrogabile me-



Fig. 4.25 Dal modello numerico al modello parametrico

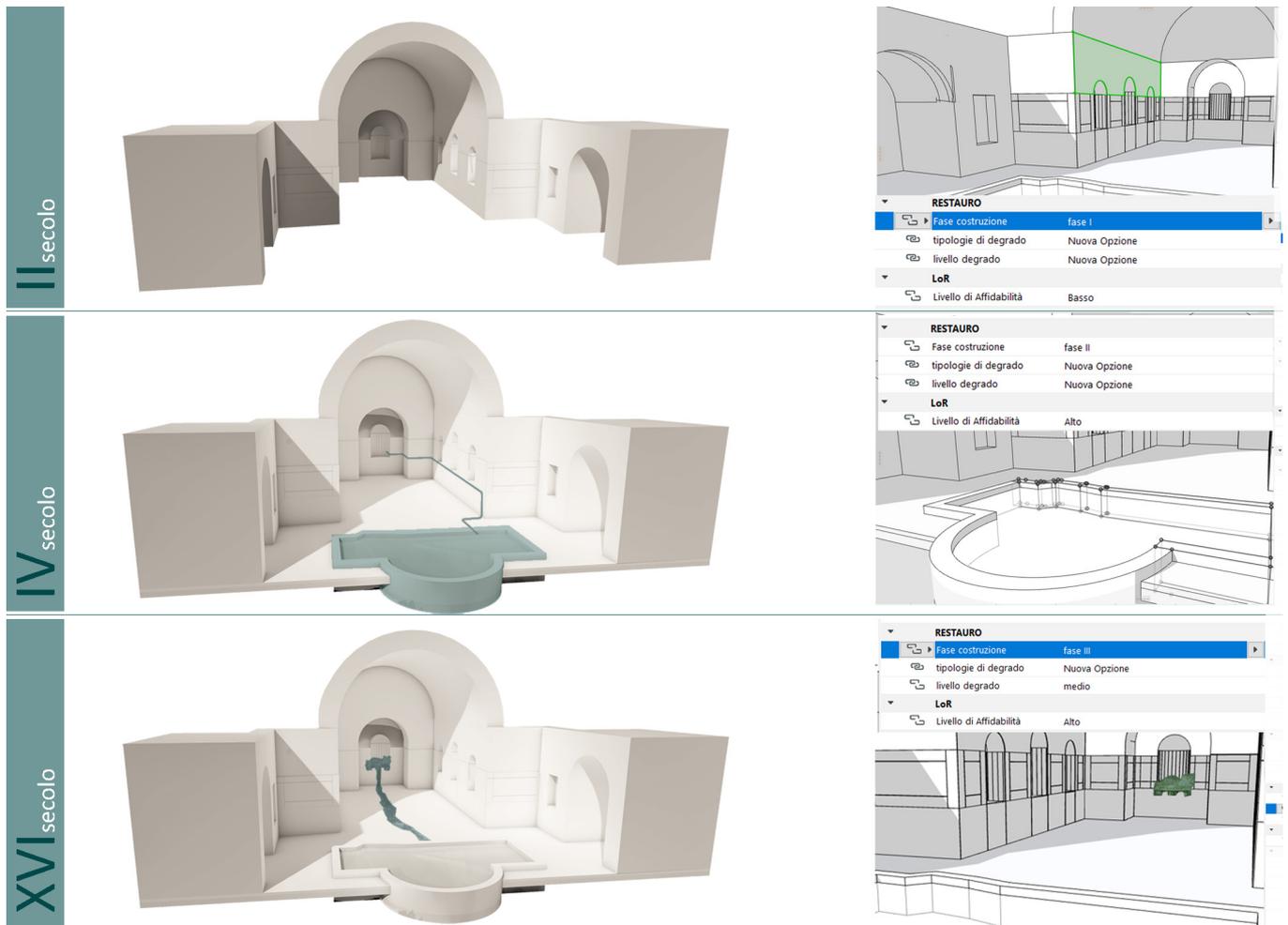


Fig. 4.26 Modellazione delle fasi storiche e costruttive del ninfeo. Sulla destra, la parametrizzazione della fase costruttiva, del livello di degrado dell'oggetto e del livello di affidabilità



- LIVELLO ALTO**  
L'elemento è ipotizzato a partire da fonti
- LIVELLO MEDIO**  
L'elemento è parzialmente rintracciato *in situ*
- LIVELLO BASSO**  
L'elemento è rintracciato *in situ* nella sua interezza o in maniera sostanziale

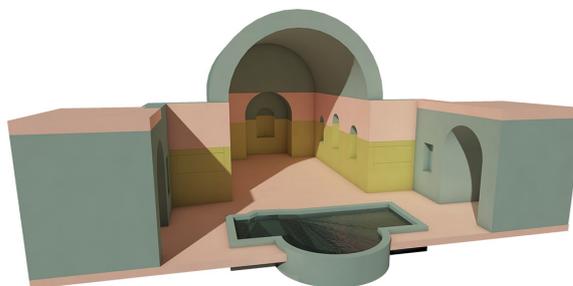


Fig. 4.27 Visualizzazione dei livelli di affidabilità della ricostruzione.

dante il filtraggio delle informazioni, a ciascuna versione è connesso l'apparato documentale che l'ha generata, non si tratterà, dunque, di tanti modelli ricostruttivi bensì di un unico modello strutturato in cui convivono, dialogando, le diverse ricerche condotte sul tema.

#### **4.5 La lettura integrata di dati tra HBIM e modelli numerici**

Le sperimentazioni proposte in questo capitolo focalizzano l'attenzione sul tema della distinzione tra processi di integrazione e funzioni di interoperabilità. Le esperienze condotte relativamente ai modelli numerici dimostrano alcune possibilità procedurali adoperate per ricondurre diverse tipologie di dato input a nuvole di punti riferite ad uno spazio tridimensionale cartesiano. Questa trasformazione, in alcuni casi, si basa sull'esplicitazione del carattere intrinsecamente tridimensionale del dato (in tal senso, le indagini ERT, tanto quanto quelle GPR, ne sono una dimostrazione); in altri casi, il dato, essenzialmente bidimensionale, viene trasformato in oggetto tridimensionale tramite processi fotogrammetrici e proiettivi (sfruttando la corrispondenza con immagini fotografiche RGB, nel caso della termografia, o impostando la proiezione a partire dalla localizzazione spaziale dell'immagine, nel caso della proiezione di modelli bidimensionali). Tali operazioni sono riconducibili ad un processo sintetizzabile in tre fasi principali. La prima fase è di elaborazione del dato di partenza nel proprio ecosistema virtuale, la seconda è di riconoscimento di uno spazio condiviso virtuale (CDE) destinato ad accogliere diverse categorie di dato e la terza, invece, consiste nella trasformazione del dato per consentire l'integrazione nel CDE. L'approccio presentato deve necessariamente tener conto delle limitazioni che un'integrazione spaziale e posizionale di questo tipo produce. Si pensi al caso dell'integrazione della nuvola di punti derivata da LIDAR o SfM e quella generata manipolando il dato termografico, il modello numerico finale corrisponde ai criteri di integrazione geometrica ma, ad esempio, si rinuncia alla possibilità di interrogare ogni pixel dell'immagine per leggerne il valore di temperatura; un discorso

analogo è applicabile anche a dati tridimensionali per loro natura, l'integrazione spaziale introduce delle limitazioni, tanto nel caso della tomografia elettrica che nel caso delle indagini georadar, si perde, ad esempio, la possibilità di interrogare le misurazioni acquisite dal singolo elettrodo e di valutarne le implicazioni in un contesto più ampio. Questo controllo viene interamente affidato alla fase precedente di elaborazione del dato grezzo. Da una parte, quindi, le procedure di integrazione consentono di interfacciarsi con dati resi tipologicamente omogenei, con un livello di affidabilità basato su criteri di valutazione verificabili per l'intero *dataset*; dall'altra, questa integrazione può portare a sacrificare alcuni caratteri propri del dato input. A partire da questa considerazione, il tema acquisisce nuova connotazione in relazione all'interoperabilità proposta in ambito BIM, in questo contesto, la presenza di un database grafico relazionale, basato su una struttura parametrica, non presuppone, potenzialmente, la trasformazione del dato ai fini dell'associazione spaziale. Ciò significa che il vincolo di connessione non risiede più nello spazio cartesiano tridimensionale, esso si sposta nell'ambito delle connessioni logiche impostate rispetto agli elementi del modello. In questi termini, i paradati e metadati relazionali vengono introdotti sottoforma di vincoli tra parametri o sottoforma di istanza relativa all'identità di un elemento specifico. Questo sviluppo consente di interagire in maniera strutturata con le informazioni derivate dall'integrazione tra dati e, al contempo, di colmare quel gap informativo generato dalla "compressione" di dati eterogenei in un unico spazio di condivisione. Nel caso specifico, l'elemento parametrico modellato si trova così ad esser connesso tanto al segmento di modello numerico integrato quanto ai dati sorgente da cui esso deriva.

Note

- 1 Si rimanda ai paragrafi 1.3 e 1.4.
- 2 Il concetto di mimesis viene espresso in Ugo, 1994. P.18. L'autore ne parla riferendosi al rapporto di corrispondenza fra classi diverse e non omogenee di elementi, una delle quali sia l'esautistica "rappresentazione" dell'altra.
- 3 Le operazioni di rilievo e di produzione dei modelli sono state condotte nell'ambito di un progetto di ricerca interdisciplinare, finanziato da Sapienza Awards - Grandi Progetti di Ateneo 2015, che coinvolge, assieme al Parco Archeologico per il Colosseo, l'Istituto per i Beni Archeologici e Monumentali del Consiglio Nazionale delle Ricerche, i Dipartimenti di Scienze dell'Antichità e di Storia, Disegno e Restauro dell'Architettura, Sapienza Università di Roma. Coordinamento del progetto è diretto da prof. Marco Galli, dott. Tommaso Ismaelli, prof. Carlo Inglese. Il coordinamento scientifico della fase di rilievo è stato condotto dal Prof. Carlo Inglese.
- 4 Si veda Galli et Al.2019 (1 e 2) per un approfondimento sul tema e bibliografia precedente.
- 5 Per l'individuazione delle fasi costruttive si veda Galli et Al. 2019 (1)
- 6 Le indagini geofisiche sono state condotte dall'Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale (ISPC), le attività sono state coordinate dal dott. Giuseppe Scardozi ed il dott. Giovanni Leucci in collaborazione con il progetto Basilica Iulia
- 7 I targets utilizzati sono quelli dati in dotazione con il laser scanner 3D e sono automaticamente riconosciuti in fase di allineamento delle nuvole di punti.
- 8 Si ringrazia Elisabetta Boschi dell'Ufficio Cartografia del Parco Archeologico del Colosseo per il supporto.
- 9 Il laser scanner 3D utilizzato è il Leica C10, sono state effettuate nove scansioni esterne con acquisizione del dato cromatico e venti scansioni del saggio acquisite in parte senza valore cromatico. Il sample spacing ed il probe di acquisizione sono stati impostati in dipendenza dalla struttura spaziale da acquisire.
- 10 L'acquisizione del dato tomografico e di quello georadar, nonché la prima fase della loro elaborazione è stata condotta in collaborazione con l'IBAM-CNR Istituto per i Beni Archeologici e Monumentali – Consiglio Nazionale delle Ricerche. Gruppo di lavoro: Giovanni Leucci, Giuseppe Scardozi, Immacolata Ditaranto, Lara De Giorgi.
- 11 In questo caso la configurazione strumentale impiegata è stata costituita da: i) antenna dual band 200-600 MHz; ii) tempo di fondo scala pari a 80 ns (nanosecondi) per l'antenna da 600MHz e 160 ns per l'antenna da 200 MHz.
- 12 Barsanti, Remondino, Visintini, 2013, 145-150.
- 13 Manferdini, Russo, 2013, 153-160.
- 14 La distanza tra le due nuvole di punti è calcolata considerando sulla nuvola di riferimento (la nuvola strutturata acquisita mediante laser scanner), la normale di una serie di "core point" e trovando i corrispondenti punti sulla nuvola di punti comparata (la nuvola processata attraverso Structure from Motion), mediante un'operazione di proiezione cilindrica applicata attraverso l'algoritmo Iterative closest point (ICP). L'operazione è stata condotta utilizzando il software Cloud Compare.
- 15 Ippolito, Attenni, Bartolomei, 2017, 507-519.
- 16 La trasformazione è applicabile all'intero dataset assumendo un valore medio di velocità di propagazione acquisito dallo strumento. Nota quindi, la velocità ed il tempo doppio (andata e ritorno del segnale) è possibile calcolare la profondità (z).
- 17 Il software utilizzato per l'integrazione e la visualizzazione delle diverse nuvole di punti è Autodesk ReCap PRO.
- 18 Brusaporci,2017.
- 19 Puche, 2015, p. 194.
- 20 Galli et Al.2019 (2).
- 21 Per l'inquadramento storico-archeologico delle terme si è fatto riferimento a CANDILIO, 1992; SERLORENZI, M. & LAURENTI, S., 2002. e FRIGGERI, R. & MAGNANI CIANNETTI, M., 2014. Si rimanda ai suddetti testi per approfondimenti.
- 22 Le operazioni di rilevamento architettonico sono state condotte dall'autore in collaborazione con Giorgia Potestà e Giulia Ciriotto. Le mappe di degrado sono state realizzate da Giulia Ciriotto.
- 23 Il software non commerciale è sviluppato dalla University of California, San Diego. L'applicativo nasce per la visualizzazione e la navigazione di ampi dataset 3D oltre a supportare funzioni gestione di immagini alta risoluzione e gigapixel 2D e, più in generale, integrazione di dati eterogenei. (Petrovic, 2014).
- 24 Questa fase della ricerca è avvenuta presso la UC San Diego, a seguito di un accordo con il DSDRA "Sapienza". Il periodo di mobilità, in qualità di Visiting graduate student, ha permesso di collaborare con il team di sviluppo del software per testarne le potenzialità ed ampliarne gli ambiti di applicazione.
- 25 L'applicativo utilizzato per l'allineamento delle scansioni singole e per la gestione e visualizzazione delle nuvole di punti è Autodesk ReCap PRO. Il formato associato a questo software (.rcp) è importabile in Autodesk AutoCAD come riferimento esterno. In tale ambiente CAD è possibile gestire un'ampia gamma di parametri per il controllo della visualizzazione della nuvola di punti e l'impostazione di piani di sezione.
- 26 Cfr voce di glossario.
- 27 Le operazioni di rilievo sono state condotte utilizzando una stazione totale Leica TS02-517/1067 per la maglia topografica e una camera reflex full-frame Nikon D800 per l'acquisizione fotografica con obiettivo zoom 16-35mm impostato per l'intero set di acquisizione a 35mm.
- 28 Lo strumento di acquisizione del dato termografico è una termo-camera Testo 875-2i.

- 29 Le operazioni di rilievo ed elaborazione sul ninfeo sono state condotte in collaborazione con Sofia Menconero e Paolo Cima-domo. Cfr Griffo et Al. 2019.
- 30 Sul tema, Hess et Al., 2014 propone un approccio sperimentale alla calibrazione di un sistema RGB-IR personalizzato per ottenere ortomosaici IR ad alta risoluzione, Rangel et Al., 2014 fornisce una panoramica ad ampio raggio delle tipologie di calibrazione utilizzabili fornendo criteri per la loro valutazione.
- 31 Costanzo et Al. 2015 applica la procedura basata sulla proiezione dell'immagine 2D sulla nuvola di punti a partire dall'individuazione di 11 punti corrispondenti tra 2D e 3D.
- 32 Scaioni et Al. 2017 e Clarkson et Al. 2017 testano questo tipo di procedura su diverse scale, la prima ricerca si estende ad un'intera facciata di un edificio mentre la seconda è applicata ad un modello fisico di 75x45cm.
- 33 Lagueta et Al. 2013.
- 34 Previtali et Al. 2013.
- 35 Alba et Al. 2011. La ricerca propone l'integrazione di diverse metodologie di acquisizione: le scansioni acquisite mediante Laser Scanner sono state utilizzate come base per orientare la camera RGB del sistema bi-camera.
- 36 Ham et Al. 2013 e Macher, 2019.
- 37 Il disco di Airy è la rappresentazione sull'immagine del fenomeno di diffrazione della luce sulla lente. Questo fenomeno interviene sull'immagine riducendone la nitidezza in maniera proporzionale al suo diametro. I parametri che influenzano il diametro sono la frequenza del raggio luminoso entrante e le dimensioni del foro d'ingresso del raggio luminoso.
- 38 Le immagini RGB da termocamera sono state processate disabilitando la funzione di calibrazione automatica. Al contrario, le immagini RGB ad alta risoluzione sono state calibrate in automatico durante la fase di allineamento delle camere.
- 39 Versione Pro 1.4.1 (<https://www.agisoft.com/>).
- 40 L'errore medio di riproiezione sull'intero set fotografico è di 7mm.
- 41 Ranzuglia et Al., 2013.
- 42 Queste due componenti sono codificate e descritte tramite la norma UNI:11337: 2017, in questo contesto si fa riferimento, rispettivamente, al Level of Geometry (LoG) ed al Level of Information (LOI), si rimanda al testo della norma per l'approfondimento degli aspetti legati alle definizioni normative ed alla loro descrizione.
- 43 Migliari, 1991. In riferimento al disegno dell'ordine architettonico, l'autore sottolinea l'efficacia di questo metodo per la produzione di un disegno che consideri sempre l'insieme, e prima le grandi masse e poi quelle minori.
- 44 Sul tema della classificazione del modello rispetto all'affidabilità delle fonti documentarie si veda Apollonio 2013. L'autore propone una scala di otto livelli di affidabilità, dalla ricostruzione congetturale, modellata in assenza di riferimenti a quella basata su reperti architettonici o archeologici. A questa scala di valori l'autore associa i livelli di iconicità proposti da Abraham Moles, più aumenta l'affidabilità della fonte documentaria e più diminuisce il livello di iconicità, un oggetto modellato sulla base di un reperto archeologico arriva al livello maggiore di affidabilità delle fonti ed al livello minore di iconicità, poiché altamente illustrativo. Sullo stesso tema, Giovannini, 2017, propone una suddivisione delle informazioni morfologiche basate su quattro gradi di esaustività della fonte, dal G0 corrispondente ad un'assenza di informazioni, a G3 relativa alla definizione geometrica degli elementi di dettaglio.
- 45 Un approccio metodologico simile è stato adottato da Borghini & Carlini, 2011. In quello studio, il modello virtuale è inteso come contenitore di tutte le informazioni fino a quel momento disponibili sull'argomento, classificate e sintetizzate per fornire dei gradienti di attendibilità per ogni elemento modellato. Sebbene dal punto di vista applicativo questo riferimento sia distinto rispetto ad un ambiente parametrico BIM ed alla tipologia di connessione tra le informazioni, la logica sottesa alle scelte applicative è del tutto analoga nel trattare i temi di interrogabilità del modello, trasparenza del dato ed integrazione delle informazioni.



## 5. Conclusioni

A distanza di anni dalle prime sperimentazioni BIM sul patrimonio costruito ed a distanza di qualche decennio dalle prime sperimentazioni sulle possibili integrazioni di nuvole di punti, il tema del connubio tra questi due insiemi è ancora lontano dall'essersi esaurito. Al contrario, il dibattito ha oggi trovato nuovo vigore proprio a causa dell'estrema facilità con cui dati e informazioni vengono generati ed immessi nel mondo digitale. È proprio in ragione di tale sovrabbondanza che studi relativi alla semantica, alle ontologie e, più in generale, all'epistemologia, hanno sperimentato un'estensione della loro sfera d'azione includendo in maniera consistente, i campi di indagine relativi alle tecnologie per l'informazione. Sebbene gli spunti teorici e procedurali siano ancora numerosi, forse oggi, rispetto al passato, è possibile segnare qualche elemento in più ed approcciare con una consapevolezza diversa alcune questioni fondanti.

Lo studio non si è proposto di dare una soluzione al tema ma ha voluto percorrere ed offrire un modo diverso di porre il problema. Ciò passa per l'identificazione di qualche riferimento che orienti la navigazione nel mondo virtuale e che possa permetterci di comprendere la realtà provando a suggerire dei criteri di classificazione. Questo tentativo, ben lontano dal voler definire una tassonomia nel campo della modellazione digitale per l'architettura, si propone come dispositivo logico per inquadrare il rapporto tra oggetto, documentazione e rappresentazione. Su questa scia, la distinzione presentata nel primo capitolo tra documentazione intrinseca ed estrinseca, tra le proprietà "oggettive" e quelle "soggettive", applicata indistintamente a tutti i campi d'indagine del patrimonio costruito, è da leggersi non tanto come il tentativo di schematizzare un insieme quanto mai variegato di elementi, ma come strumento per porsi delle domande prima di approcciare il complesso compito della costruzione di un modello integrato. Dopo aver esaminato questa prima questione di natura ontologica (questa volta, il termine è utilizzato nella sua prima accezione, indipendentemente da quella informatica), il problema successivo ha riguardato il carattere morfologico, questo passaggio tematico si è posto come *trait d'union* tra un piano teorico generale e quello relativo alle questioni più specifiche della Rappresentazione. Il concetto di dimensione del dato e, quindi, del modo di rappresentare una o più proprietà dell'oggetto, viene ripensato e riproposto in funzione di un'estensione del campo di indagine. Ciò diviene necessario quando il modello tridimensionale si trasforma nel luogo di raccolta di tutto quel che riguarda l'oggetto reale, trascendendo la sfera delle questioni di geometria ed aspetto, ed investendo un panorama sconfinato di ambiti. In tal senso, la rappresentazione, intesa come strumento che l'architetto ha di capire e comunicare il mondo, ha il difficile compito di dover mediare tra tutte queste sorgenti dati, astrarre i principi comuni ed operare fornendo nuove visioni. Osservando però, più da vicino, tutti questi ambiti, scopriamo che, allo stesso modo, in ognuno di essi si parla di modelli, di dati e di integrazione. Anche in settori molto diversi, capiamo soprattutto che bisogna trovare il sistema per renderli compatibili e connessi, trovando, in definitiva, uno stesso linguaggio. Il tema interessa ed ha interessato il BIM fin dal suo esordio, questa metodologia ha avuto il merito di porre la questione fondamentale relativa all'integrazione di informazioni eterogenee, come più volte ribadito, il concetto è ampiamente affrontato rispetto ai settori chiamati in causa nell'iter della nuova progettazione. Nel contesto dell'architettura e del patrimonio costruito, il tema del ruolo della rappresentazione è dovuto passare, in un certo senso, per una decentralizzazione apparente, inserendola in un alveo più ampio di strumenti e metodi per la conoscenza dell'oggetto. In realtà, essa non ha fatto altro che acquisire una nuova centralità, un ruolo identico ma rinnovato nella forma e, soprattutto, nei contenuti. Se infatti, da

una parte è stato necessario confrontarsi con l'assolutezza del concetto di modello, inteso nelle sue declinazioni teoriche e formali più disparate; dall'altro, ci si è ben presto resi conto di quanto i modelli della rappresentazione siano l'insostituibile strumento di connessione tra concetto ed oggetto. Parafrasando Vittorio Ugo, la rappresentazione consente di unire le cose (ovvero l'oggetto nella sua consistenza fisica), il discorso sulle cose (ovvero le interpretazioni dell'oggetto mediante la costruzione di modelli), il mondo e il linguaggio che lo ordina (la struttura semantica che supporta il modello e la sua composizione)<sup>1</sup>. Con questa premessa, è stato possibile approcciare l'ambito della diagnostica, della geotecnica e della semantica utilizzando quegli stessi arnesi teorici che già avevamo a disposizione.

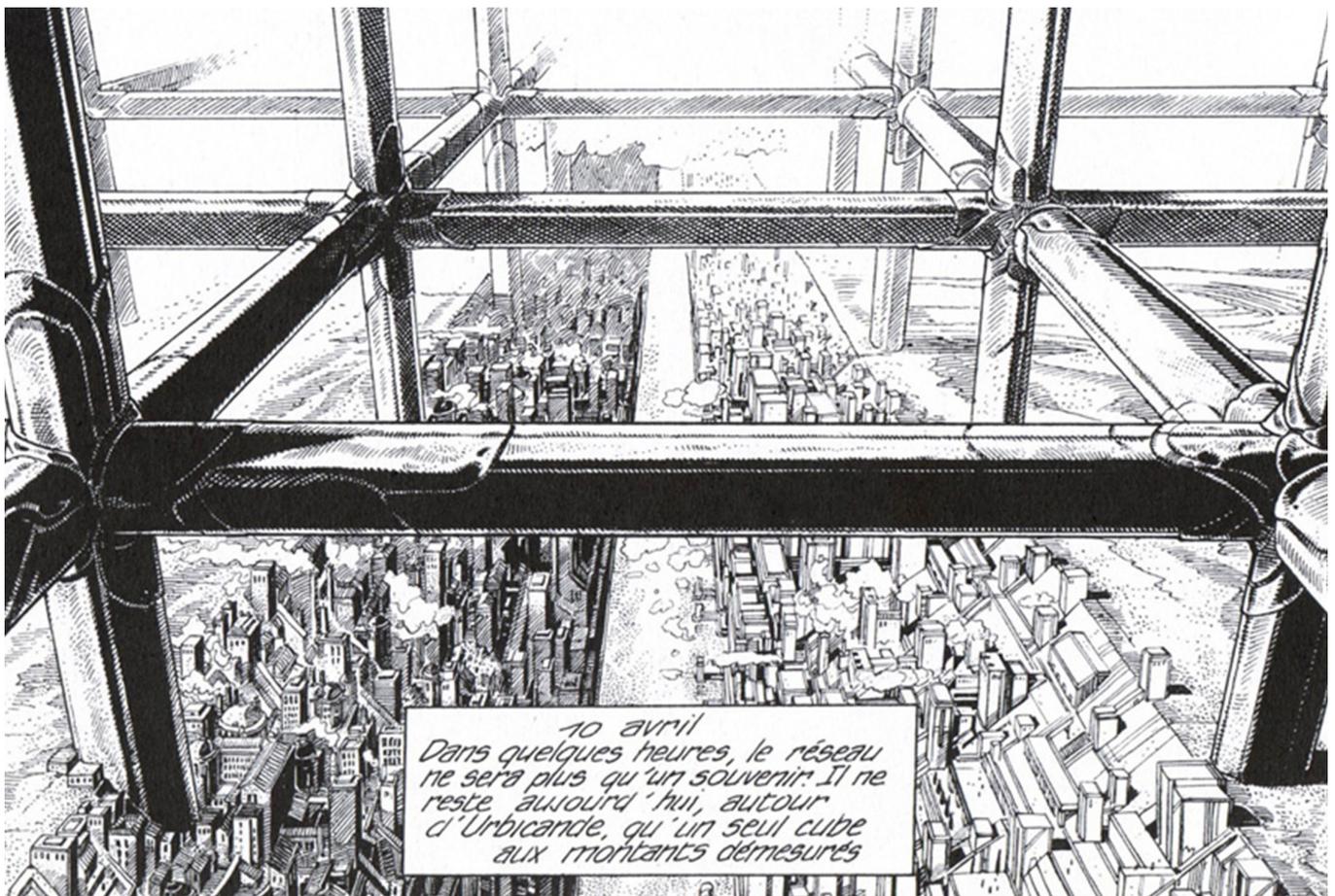
In questo quadro, nella ricerca presentata, vanno delineandosi due diverse tendenze, da una parte si scorge la necessità di approcciare la conoscenza dell'oggetto integrando e fondendo un numero sempre crescente di dati, ciascuno relativo ad una proprietà; su questa linea, il prodotto è un modello generale che abbia tutte le caratteristiche proprie di un modello univoco. In esso, i quesiti relativi alla sintesi della forma ed alla selezione delle informazioni trovano la loro risoluzione nella trasformazione del dato grezzo necessaria a renderlo integrabile e visualizzabile all'interno di un sistema condiviso. Su questo filone, si inseriscono i processi di *data fusion*, declinati rispetto a diversi livelli di fusione e trasversali rispetto a diversi ambiti di ricerca. Seguendo questi processi, i dati vengono trasformati per consentire una lettura ed una visualizzazione integrata, il modello che ne deriva presenta un contenuto informativo maggiore rispetto ai dati singoli; d'altro canto, in maniera più o meno consistente, il processo di trasformazione applicato sul dato può determinare un certo decadimento del suo potenziale informativo. Dall'altra parte, pare evidente la necessità di restringere il campo di indagine per approfondire un unico aspetto dell'oggetto e costruire, a partire da esso, modelli interpretativi altamente specialistici. Con questa impostazione, le regole di sintesi e selezione intervengono in maniera sostanziale per estrarre ed interpretare solo alcune delle proprietà dell'oggetto. In questo caso l'opportunità di integrazione cede il passo alla precisa esigenza di mettere a fuoco solo una selezione di elementi. In questo campo agiscono i modelli tematici sviluppati internamente a settori di ricerca omogenei o quelli derivati da una selezione preliminare dei dati finalizzata a distinguere e analizzare i soli caratteri significativi. Modelli di questo tipo ad esempio, riguardano il sistema strutturale trascurando l'accuratezza della geometria, descrivono la genesi formale tralasciando le informazioni relative ai caratteri costruttivi ed ai materiali o ancora, schematizzano e modellano gli indicatori di vulnerabilità sismica portando in secondo piano all'accuratezza metrica<sup>2</sup>. Tra questi due diversi approcci, la ricerca presentata si propone di sottolineare un certo rapporto di circolarità; i modelli discreti generati da processi di *data-fusion* e segmentazione di nuvole di punti si predispongono come strumenti di analisi dotati di una propria autonomia, allo stesso modo, i modelli continui e parametrici favoriscono il processo di analisi direzionando, in un certo senso, lo sguardo del ricercatore. La possibilità di disporre in un ambiente virtuale unico tanto dei primi quanto dei secondi, è necessaria al trasferimento dell'intero impalcato conoscitivo. Il modello così inteso è generato dai collegamenti che è possibile pensare e costruire tra le diverse sorgenti informative, questi collegamenti rappresentano l'infrastruttura digitale di supporto alla comprensione. Ogni "sinapsi digitale" attivata permette il passaggio tra spazi virtuali diversi in cui, di volta in volta, la lettura del modello si trasforma, cambia punto di vista e risponde a nuovi interrogativi.

L'opportunità di aver testato alcuni sistemi di integrazione rispetto all'architettura archeologica dimostra l'effettiva validità di metodologie di *information modeling* applicate su organismi edilizi stratificati. In essi, lo scarto tra l'oggetto ed i suoi modelli della rappresentazione può rivelarsi sostanziale. Proprio in ragione di questa maggiore complessità, la fase di modellazione è dovuta passare per la risoluzione delle problematiche legate alla forma, alla storia ed alla critica. Ciò ha posto al centro del problema i limiti posti dall'utilizzo di un processo standardizzabile applicato in merito ad oggetti dotati di una propria singolarità. Quello che sembrerebbe un paradosso procedurale, è invece superato grazie ad un approccio

integrativo in cui proprio la singolarità viene ricondotta a tipologie e studiata mediante le caratteristiche formali delle proprietà che la rappresentano.

La formalizzazione delle procedure di integrazione è passata per l'individuazione di parametri, tanto qualitativi che quantitativi, necessari alla valutazione del livello di integrazione, sia di dati che di informazioni, rispetto a criteri esplicitati nel processo. Riferendosi a modelli tridimensionali morfometrici, la valutazione dell'accuratezza si è basata su riferimenti prevalentemente metrici e geometrici, a ciò si aggiunge il fattore determinante, legato alla trasformazione del dato, che ne valuta la variazione in termini di contenuto informativo.

Questo percorso ha la prospettiva di formalizzare le procedure informatiche di integrazione oltre che a condividere un'impostazione metodologica finalizzata ad un utilizzo sempre più consapevole di modelli digitali come oggetti interlacciati, condivisi e stratificati.



La Fievre d'Urbicande, 1985

### *Note*

- 1 Ugo, 1994, p.35
- 2 Su questo ultimo caso, si cita, ad esempio, lo studio condotto da Mondello et Al., 2019. In esso, la tipologia della torre campanaria viene studiata e modellata astraendo i caratteri costruttivi significativi ai fini della valutazione della vulnerabilità sismica. La tipizzazione e parametrizzazione di tali caratteri consente di inquadrare in maniera mirata ed efficace, una specifica problematica. Si cita, in aggiunta, la ricerca portata avanti da Lo Turco et Al., 2017, in cui la modellazione degli elementi solidi si è concentrata sulla trasposizione dei fenomeni di degrado, rintracciati sulla superficie e codificati, sul modello tridimensionale.

## Glossario

### **BIM (Building Information Model)**

Approccio metodologico alla modellazione basato sulla costruzione di un modello solido tridimensionale parametrizzabile rispetto all'intera gamma di informazioni relative il ciclo vitale dell'opera, dal progetto alla costruzione, fino alla sua demolizione e dismissione. Il modello, informativo, dinamico, interdisciplinare, condiviso e in continua evoluzione, contiene dati su geometria, materiali, struttura portante, caratteristiche termiche e prestazioni energetiche, impianti, costi, sicurezza, manutenzione.

### **BIM As Built**

Modello realizzato con approccio BIM per descrivere in maniera compiuta il processo di realizzazione dell'oggetto. Oltre a comprendere le caratteristiche tridimensionali e materiche della forma, gli oggetti informativi tengono conto di tutte le modifiche e le varianti che sono state eseguite rispetto al progetto originario durante la fase di realizzazione.

### **BIM as is**

Modello realizzato con approccio BIM per descrivere lo stato di fatto dell'oggetto al momento dell'acquisizione dei dati di rilievo.

### **BIM (Scan to)**

Processo BIM che utilizza tecnologie di rilevamento avanzate, come scansione laser 3D, Structure for Motion o la fotogrammetria ad alta definizione, per ottenere nuvole di punti e superfici mesh 3D che costituiranno la base per la modellazione informativa.

### **CALIBRAZIONE DELLE LENTI**

Sistema complesso di procedure finalizzate ad individuare i parametri di distorsione radiale e distorsione tangenzia-

le propri del tipo specifico di lente. L'individuazione di tali parametri consente la correzione in post-produzione dell'immagine fotografica.

### **CLASSIFICAZIONE**

Nel settore del machine learning, operazione di assegnazione di un determinato insieme omogeneo di elementi ad una classe. La classe è determinata a priori ed è esplicitata mediante una serie di esempi.

### **DATABASE**

Archivio di dati. Le informazioni in esso contenute sono strutturate e collegate tra loro secondo un modello logico (relazionale, gerarchico, reticolare o a oggetti) e in modo tale da consentire la gestione/organizzazione efficiente dei dati grazie a particolari applicazioni software dedicate (DBMS).

### **DATASET**

Collezione di dati. In informatica si usa questo termine per indicare un insieme di dati strutturati secondo una logica relazionale, ovvero organizzati in forma di tabella.

### **FEATURE**

Caratteristica. Il termine viene utilizzato in informatica per indicare l'insieme di caratteristiche distintive di un dato riconosciute in maniera automatica o assistita.

### **GCP (Ground Control Point)**

Rappresenta un punto di coordinate note rispetto ad un dato sistema di riferimento. I GCP consentono di stabilire una connessione spaziale tra l'oggetto rilevato e la sua posizione sulla superficie terrestre.

### **GIS (Geographic Information System)**

**MODELLO 2D** Deriva dal prodotto dell'operazione di proiezione e sezione di un modello di un oggetto nello spazio. I modelli 2D coincidono con i modelli grafici e di fatto con i disegni con cui vengono convenzionalmente rappresentati alle diverse scale gli elementi costruiti. Sono dunque modelli 2D le prospettive, le assonometrie, le proiezioni quotate e le proiezioni ortogonali.

**MODELLO 3D** Elemento tridimensionale derivante da operazioni di discretizzazione (caso del rilievo) o costruzione virtuale (caso del progetto). Esso può essere materiale (plastico, stampa 3D) o immateriale (modello virtuale). In questo secondo caso il modello 3D è connesso all'uso e alle caratteristiche di modellatori, software che consentono di interagire con un ambiente digitale che, inizialmente vuoto, permette via via di costruire elementi che, composti insieme, riproducono il modello. Si instaura così una corrispondenza diretta tra spazio fisico e spazio virtuale: ciascun punto materiale  $P_r$  individuato mediante le sue coordinate  $x_r, y_r, z_r$  nello spazio reale, trova infatti immediatamente il suo corrispondente virtuale  $P_v$ , anch'esso identificato da una terna univoca di coordinate cartesiane  $x_v, y_v, z_v$ .

**MODELLO GENERATIVO** «Il Design Generativo è un processo morfogenetico che usa algoritmi strutturati come sistemi non lineari per risultati unici, infiniti ed irripetibili eseguiti da un codice-idea, come in Natura» (Soddu, 1992). «“Arte Generativa” si riferisce a qualsiasi pratica artistica nella quale l'artista usi un sistema, come (ad esempio) un set di regole di un linguaggio naturale, un programma per computer, una macchina, o un'altra invenzione procedurale, che è messa in moto con un certo grado di autonomia in modo tale da contribuire a/o risultare in un'opera d'arte completa» (Galanter, 2003).

### **MODELLO MATEMATICO**

Modello la cui forma è descritta in modo continuo attraverso equazioni parametriche che definiscono la superficie. Tra le entità matematiche più utilizzate a questo scopo troviamo attualmente le superfici NURBS.

### **MODELLO NUMERICO**

Modello discreto caratterizzato da una elevata corrispondenza geometrica con l'oggetto reale. È l'elaborazione dei dati acquisiti durante la fase di rilevamento.

### **MODELLO PARAMETRICO**

La parametrizzazione definisce una serie di variabili, e le relazioni tra di esse, che possono essere modificate per alterare il risultato finale di un sistema. Nel campo della modellazione, si fa riferimento alle relazioni esistenti tra tutti gli elementi del modello, ne consentono il coordinamento e la gestione di modifiche legate alla forma e alla geometria. Le relazioni possono essere create automaticamente dai software di modellazione, o personalizzate dall'utente nel corso delle operazioni.

### **MODELLO MESH**

Nel campo della modellazione 3D, la mesh poligonale (generalmente di forma triangolare) è l'insieme di vertici, spigoli e facce che definiscono la forma di un oggetto. Deriva da una procedura di interpolazione di punti disposti in maniera ordinata nello spazio cartesiano (nuvola di punti) o dalla discretizzazione di una superficie continua.

### **NUVOLA DI PUNTI (Point cloud)**

Sintesi del dato di rilievo che registra ogni singola informazione acquisita, metrica e cromatica mediante la visualizzazione di un punto in uno spazio tridimensionale. La forma dell'oggetto è descritta attraverso le coordinate spaziali  $x, y, z$  dei singoli punti.

### **ONTOLOGIA**

Disciplina che si occupa di uno dei primi e fondamentali problemi della filosofia: definire cosa esiste e di conseguenza cosa non esiste e/o è una rappresentazione di un altro oggetto. Nel campo dell'informatica, l'ontologia è una rappresentazione formale, condivisa ed esplicita, di una concettualizzazione di un dominio di interesse. Con riferimento alla rappresentazione della conoscenza, viene utilizzata per descrivere il modo in cui diversi schemi vengono combinati in una struttura dati contenente tutte le entità rilevanti e le loro relazioni in un dominio. I programmi informatici possono

Sistema informativo geografico per la gestione del territorio. Consente l'integrazione di diverse tipologie di dato, prevalentemente bidimensionali, per la georeferenziazione delle informazioni. I GIS permettono di analizzare una entità geografica sia per la sua completa natura geometrica (e simbolica) sia per il suo totale contenuto informativo. Ciò è reso possibile dall'integrazione di due sistemi prima separati: i sistemi di disegno computerizzato (CAD-Computer Aided Design) e i database relazionali (DBMS-Data Base Management System). L'implementazione del GIS avviene tramite i sistemi informativi territoriali (SIT).

### **HBIM**

Processo BIM applicato al patrimonio storico costruito. L'acronimo sta per Historic/Heritage building information modelling.

### **ICT (Information and Communication Technology)**

Indica la convergenza dell'informatica con le telecomunicazioni, identificando ogni settore legato allo scambio di informazioni e tutti i metodi e le tecnologie che servono a realizzarlo, compreso l'hardware, il software e i servizi connessi.

### **IFC (Industry Foundation Classes)**

Standard globale per lo scambio dei dati nel settore dell'edilizia. IFC è sia un modello dei dati, sia un formato di file aperto, che consente agli operatori del settore delle costruzioni di condividere i dati indipendentemente da quale applicazione software utilizzano per realizzare il loro lavoro. Tale formato offre la possibilità di fornire una continuità temporale ai dati di una certa fase del ciclo di vita dell'edificio. In questo modo, gli stessi dati possono essere utilizzati per la fase successiva, senza doverli riscrivere o utilizzare interfacce di importazione personalizzate o plug-in proprietari.

La maggioranza dei protocolli nazionali BIM e le normative da cui derivano è probabile che richiedono l'uso di IFC a partire dalla richiesta (capitolato informativo) o l'offerta di gestione informativa.

### **LOD (Level of Development)**

Livello di sviluppo con cui un modello, o un oggetto digitale del modello, può essere visualizzato e rappresentato in fase di output. La sua definizione viene esplicitata mediante le normative nazionali. In Italia, la normativa di riferimento è la UNI: 11337 che individua otto livelli LOD così specificati:

LOD A: oggetto simbolico;

LOD B: oggetto generico;

LOD C: oggetto definito;

LOD D: oggetto dettagliato;

LOD E: oggetto specifico;

LOD F: oggetto eseguito;

LOD G: oggetto aggiornato.

### **LOG (Level of Geometry)**

Livello di sviluppo della rappresentazione degli attributi geometrici. È una delle componenti di riferimento del LOD e definisce la scala del modello grafico. È una peculiarità della declinazione italiana delle normative di riferimento inglesi e statunitensi.

### **LOI (Level of Information)**

Livello di sviluppo della rappresentazione degli attributi non geometrici, informativi. Come il LOG, è una delle componenti di riferimento del LOD e definisce il livello di sviluppo dell'apparato informativo del modello. È una peculiarità della declinazione italiana delle normative di riferimento inglesi e statunitensi.

### **MACHINE LEARNING**

Insieme di tecniche e procedure di apprendimento automatico. È una branca dell'intelligenza artificiale che si occupa di rendere la macchina in grado di ragionare per induzione. Ciò avviene mediante il riconoscimento assistito, il *training*, di pattern ricorrenti in un dataset per poi generalizzare l'operazione su nuovi casi.

**MODELLO 1D** Dato testuale che descrive un oggetto in forma numerica o alfanumerica e ne permette la ricostruzione di modelli 2D/3D all'interno di uno spazio virtuale. In forma estesa, è possibile intendere anche la struttura semantica che governa il modello (proposta dell'autore).

usare l'ontologia per una varietà di scopi, tra cui il ragionamento induttivo, la classificazione, e svariate tecniche per la risoluzione di problemi.

Con riferimento ai processi BIM, le ontologie aggiungono un orientamento sulla natura degli elementi del soggetto descritto, basato su assiomi logici.

### **PARAMETRIZZAZIONE**

Classificazione e ordinamento delle possibili forme di una funzione, di una curva, di una legge fisica, secondo i valori di uno o più parametri. Nel campo della modellazione, il termine si riferisce alla definizione della forma mediante vincoli geometrici proporzionali caratteristici (parametri) il cui valore è modificabile dall'utente.

### **PROCEDURA**

La procedura è un insieme di attività ripetitive, sequenziali e condivise tra chi le attua. Esse vengono poste in essere per raggiungere un risultato determinato. In sostanza, è il "che cosa" deve essere attuato per addivenire a un "qualcosa", a un prodotto, descritto sotto forma di "regole", formalizzate o riconosciute come consuetudini.

### **SCALA DI RAPPRESENTAZIONE**

Rapporto metrico tra la dimensione misurata sull'oggetto reale e la stessa dimensione dell'oggetto rappresentato. Ogni scala ammette un certo errore di graficismo considerato come quello che si commette nel tracciare un particolare lineare con un segno grafico il più sottile possibile, tenuto conto dell'accuratezza visiva. In genere è convenzionalmente tollerato un errore di graficismo pari a un quinto di millimetro (0,2 mm).

### **SEGMENTAZIONE**

Processo di parcellizzazione di un oggetto. Nell'ambito della modellazione numerica, la segmentazione scompone la nuvola di punti in regioni omogenee per features.

### **SEMANTICA**

Ramo della linguistica che si occupa dei fenomeni del linguaggio non dal punto di vista fonetico e morfologico, ma guardando al loro significato. In informatica, la semantica

cura i rapporti tra dati, metadati e paradata e fornisce una struttura formale per l'interrogazione di un database relazionale.

### **SEMANTIC WEB**

Trasformazione del World Wide Web in un ambiente in cui i documenti pubblicati (pagine HTML, file, immagini, e così via) sono associati ad informazioni e dati (metadati) che ne specificano il contesto semantico in un formato adatto all'interrogazione e l'interpretazione (es. tramite motori di ricerca) e, più in generale, all'elaborazione automatica.

### **SHAPEFILE**

vettore geospaziale per software GIS sviluppato da ESRI, si compone di primitive quali punti, linee, poligoni e testi. Queste primitive sono connesse a degli attributi che ne specificano il ruolo ed il significato nel contesto.

### **VPL (Visual Programming Language)**

Linguaggio di programmazione basato su icone ed oggetti grafici per sviluppare un programma. Il suo contesto di programmazione include icone, simboli e frecce di connessione per rappresentare l'input e l'output di ogni passaggio.

## Bibliografia

### Riferimenti bibliografici

#### *I modelli digitali della Rappresentazione*

BRUSAPORCI, S. 2013. Modellazione e rappresentazione digitale per i beni architettonici. In: BRUSAPORCI, S. (ed.) *Modelli complessi per il patrimonio architettonico-urbano*. 18-24

BRUSAPORCI, S. 2011. Modelli digitali per la comunicazione dell'architettura/ Digital models for architectural representation. *Disegnarecon*, 9. 107-115

BRUSAPORCI, S. 2013. Digital modelling and representation of architectural heritage. 18-24.

CACCIOTTI, R. , BLASKO, M., VALACH, J., A diagnostic ontological model for damages to historical constructions, *Journal of cultural heritage* 16 (1) (2015) 40–48.).

CALVANO, M. 2019. *Disegno Digitale Esplicito. Processi digitali per la rappresentazione della città, l'architettura, il prodotto*, Canterano, Aracne Editrice.

CENTOFANTI, M. 2018. The Scientific Dimensions of the Digital Model. *Disegno*, (2), 10.

FUSCO, G. 1986. Dibattito. *I fondamenti scientifici della rappresentazione. Roma 17-18-19 aprile*. Roma, Kappa Editori. 189

IPPOLITO, A. and ATTENNI, M. 2016. ἔκφρασις (ekphrasis). Un problema di rappresentazione. In: BERTOCCI, S. and BINI, M. (Eds.) *Le ragioni del disegno. Pensiero, forma e modello nella gestione della complessità / The reasons of drawing. Thought, shape and model in the complexity management*. Firenze, 15-16-17 settembre 2016.

Firenze, Gangemi Editore. 395-402

MIGLIARI, R. 1991. Il disegno degli ordini e il rilievo dell'architettura classica: Cinque Pezzi Facili. *Disegnare. idee, immagini*, 2, 49-65.

MIGLIARI, R. 2001. *Geometria dei modelli*. Roma: Kappa Editore.

MIGLIARI, R. 2004. *Disegno come modello*. Roma: Kappa Editore.

MIGLIARI, R. 2008. Introduzione alla prospettiva dinamica interattiva. In: MIGLIARI, R. (ed.) *Prospettiva dinamica interattiva-La tecnologia dei videogiochi per l'esplorazione di modelli 3D di architettura*. Roma: Kappa Editore.

PEIRCE, C. S. S. 1906. Prolegomena to an apology for pragmatism. *The Monist*, 16 (4), 492-546.

UGO, V. 1994. *Fondamenti della rappresentazione architettonica*, Bologna, Società editrice Esculapio.

UNALI, M. 2009. Qual è il modello di rappresentazione compreso nella rivoluzione informatica? What sort of representation model is used by the IT revolution?. *Disegnare idee immagini* (39), 30-30.

VALENTI, G. M. 2004. MI il modello integrato. In: MIGLIARI, R. (ed.) *Disegno come Modello. Riflessioni sul disegno nell'era informatica*. Roma: Edizioni Kappa.

*Patrimonio costruito e metodologie di acquisizione dei dati*

ACKOFF, R. 1989. From data to wisdom. *Journal of Applied Systems Analysis*, 16, 3-9.

ADEMBRI, B., CIPRIANI, L., FANTINI, FILIPPO & BERTACCHI, S. 2015. Reverse designing: an integrated method for interpreting ancient architecture. *SCientific RESearch and Information Technology-SCIRES*, 5, 15-32.

ADEMBRI, B., CIPRIANI, L. & BERTACCHI, G. 2017. Guidelines for a digital reinterpretation of architectural restoration work: reality-based models and reverse modelling techniques applied to the architectural decoration of the Teatro Marittimo, Villa Adriana. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-5/W1, 599-606.

ATTENNI, M., BIANCHINI, C., BONUCCI, M., CANIGLIA, V., GRIFFO, M., INGLESE, C. & IPPOLITO, A. 2017. (Di) Segni di pietra sul duomo di Terni. Dai traccianti di cantiere ai modelli digitali. *Territori e frontiere della rappresentazione / Territories and frontiers of representation*. Napoli: Gangemi Editore.

BAGLIONI, L. & INGLESE, C. 2015. Il rilievo integrato come metodo di studio: il caso di San Bernardino ad Urbino. *Disegnare. Idee ed Immagini*, 51, 34-45.

BENEDETTI, B., GAIANI, M. & REMONDINO, F. 2010. *Modelli digitali 3D in archeologia: il caso di Pompei*, Pisa, Edizioni della Normale.

BIANCHINI, C. 2007. Dal reale al virtuale (e ritorno): il modello ligneo di Antonio da Sangallo per il nuovo San Pietro in Vaticano. *Disegnare. Idee ed Immagini*, 34, 36-49.

BIANCHINI, C. 2012. Rilievo e Metodo Scientifico. Survey and Scientific Method. *Elogio della Teoria. Identità delle discipline del Disegno e del Rilievo*. Roma: Gangemi Editori

BIANCHINI, C. 2012 (b). *La documentazione dei teatri antichi del mediterraneo*, Roma, Gangemi Editore

BIANCHINI, C. 2014. Survey, modeling, interpretation as multidisciplinary components of a knowledge system. *SCientific RESearch and Information Technology-SCIRES*, 4, 15-24.

BIANCHINI, C. 2015. Un nuovo approccio alla conoscenza delle architetture complesse la Casa dei Cavalieri di Rodi al Foro di Augusto. *Bullettino della Commissione Archeologica Comunale di Roma*, 116, 177-182

BIANCHINI, C., INGLESE, C. & IPPOLITO, A. 2016. *I Teatri del Mediterraneo come esperienza di rilevamento integrato / The Theaters of the Mediterranean as integrated survey experience*, Sapienza University press.

BRUSAPORCI, S. 2017. The Importance of Being Honest: Issues of Transparency in Digital Visualization of Architectural Heritage.

BRUSAPORCI, S. C., MARIO LUCCHESI, VITTORIO 2014. Architectural Heritage and 3D Models. In: PAOLO DI GIAMBERARDINO, D. I., RENATO NATAL JORGE, JOÃO MANUEL R. S. TAVARES (ed.) *Computational Modeling of Objects Presented in Images. Lecture Notes in Computational Vision and Biomechanics 15*. Springer International Publishing Switzerland.

CIPRIANI, L. & FANTINI, F. 2015. Modelli digitali da Structure from Motion per la costruzione di un sistema conoscitivo dei portici di Bologna. *Disegnare. Idee, Immagini.*, 50, 70-81.

DESCARTES, R. 1641. *Meditationes de prima philosophia, in qua dei existentia & animae immortalitas demonstratur*. Paris: Michaelem Soly. (ed. inglese a cura di Elizabeth S. Haldane, 1911, pp. 25-29)

DOCCI, M. BIANCHINI, C. 2016. Il ruolo dei modelli virtuali 3D nella conservazione del patrimonio architetto-

- nico e archeologico. In *Disegnare.Idee, immagini*, n. 53, pp. 3, 4.
- FLORIDI, L. 2013. Information Quality. *Philosophy & Technology*, 26.
- GABELLONE, F. 2012. La trasparenza scientifica in archeologia virtuale. Commenti al Principio N.7 della Carta di Siviglia. *Caspur Scires*.
- GONIZZI BARSANTI, S., REMONDINO, F. & VISINTINI, D. 2013. 3d surveying and modeling of archaeological sites – some critical issues. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, II-5/W1, 145-150.
- IPPOLITO A., ATTENNI M., BARTOLOMEI C., 2017. Digital acquisition: reflections on data quality, *Archeologia e Calcolatori*, 507-519.
- MANFERDINI, A. M. & RUSSO, 2013 M. Multi-scalar 3D digitization of Cultural Heritage using a low-cost integrated approach. *2013 Digital Heritage International Congress (Digital Heritage)*, 28 Oct.-1 Nov. 2013. 153-160.
- London Charter, 2009. Retrieved from: <http://www.londoncharter.org/>
- MUDGE, M., MALZBENDER, T., CHALMERS, A., SCOPIGNO, R., DAVIS, J., WANG, O., GUNAWARDANE, P., ASHLEY, M., DOERR, M., PROENÇA, A. & BARBOSA, J. 2008. Image-based empirical information acquisition, scientific reliability, and long-term digital preservation for the natural sciences and cultural heritage. In: ROUSSOU, M. & LEIGH, J. (eds.) *EUROGRAPHICS 2008*.
- PAMART, A., PONCHIO, F., ABERGEL, V., ALAOU M'DARHRI, A., CORSINI, M., DELLEPIANE, M., F., M., SCOPIGNO, R. & DE LUCA, L. 2019. A Complete Framework Operating Spatially-Oriented Rti in a 3d/2d Cultural Heritage Documentation and Analysis Tool. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*.
- PUCHE, J. M. 2016. Al Di LÀ Della Morte Del Disegno Archeologico. I Massive Data Acquisition Systems (Mdas) in Archeologia. *Archeologia e Calcolatori*, 189-208.
- La conservazione del patrimonio mediante il restauro*
- BINDA, L., SAISI, A., ZANZI, L. & BARONIO, L. 2001. Tecniche di indagine e progetto delle indagini per la diagnosi strutturale. In: PESANTI, S. (ed.) *Il progetto di conservazione: linee metodologiche per le analisi preliminari, l'intervento, il controllo di efficacia. Rapporti di ricerca*. Firenze: Alinea.
- CAPPONI, G. 2009. L'invecchiamento e il degrado. In: CARBONARA, G. (ed.) *Atlante del restauro architettonico*. Torino: UTET.
- CARBONARA, G. 1992. Analisi degli antichi edifici. In: CARBONARA, G. (ed.) *Restauro architettonico*. Torino: UTET.
- DE ANGELIS D'OSSAT, G. 1982 (1°ed 1972). *Guida allo studio metodico dei monumenti e delle loro cause di deterioramento*, Roma, Multigrafica Editrice.
- FIORANI, D. 1996. Rilievo del degrado e diagnostica. In: CARBONARA, G. (ed.) *Trattato di Restauro architettonico*. Torino: UTET.
- Il modello numerico e l'integrazione di dati eterogenei*
- BOSTRÖM, H., STEN, A., MARCUS, B., RONNIE, J., ALEXANDER, K., JOERI, L., LARS, N., MARIA, K., ANNE, P. & TOM, Z. 2007. On the definition of information fusion as a field of research. *Tech Report*. Institutionen för kommunikation och information: Skövde, Sweden.
- CALLIERI, M., DELLEPIANE, M., PONCHIO, F., POTTENZIAN, M. & SCOPIGNO, R. 2016. ARIADNE Visu-

al Media Service: easy web publishing of advanced visual media. In: S. CAMPANA, R. S., G. CARPENTIERO, M. CIRILLO (ed.) *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA)*. Siena: Archaeopress, Oxford.

KHALEGHI, B., KHAMIS, A., KARRAY, F. O. & RAZAVI, S. N. 2013. Multisensor data fusion: A review of the state-of-the-art. *Information Fusion*, 14, 28 - 44.

LAHAT, D., ADALI, T. & JUTTEN, C. 2015. Multimodal Data Fusion: An Overview of Methods, Challenges, and Prospects. *Proceedings of the IEEE*, 103, 1449-1477.

LORENZINI, M. 2016. Le API di Europeana come esempio di integrazione e rappresentazione delle risorse culturali. *Archeologia e calcolatori*, Suppl.8, 211-216.

MAIETTI F., DI GIULIO R., BALZANI M., PIAIA E., MEDICI M., FERRARI F. (2017) Digital Memory and Integrated Data Capturing: Innovations for an Inclusive Cultural Heritage in Europe Through 3D Semantic Modelling. In: Ioannides M., Magnenat-Thalmann N., Papagiannakis G. (eds) *Mixed Reality and Gamification for Cultural Heritage*. Springer, Cham

NICCOLUCCI, F. 2017. Ariadne e gli open data: come trasformare i dati archeologici da open a "fair". *Archeologia e Calcolatori*, Supplemento 9, 141-150.

PAMART, A., GUILLON, O., FARACI, S., GATTET, E., GENEVOIS, M., VALLET, J. M. & DE LUCA, L. 2017. Multispectral photogrammetric data acquisition and processing for wall paintings studies. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W3, 559-566.

PETROVIC, V., VANONI, D., RICHTER, A., LEVY, T. & KUESTER, F. 2014. Visualizing high resolution three-dimensional and two-dimensional data of cultural heritage sites. *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, 14, 93-100.

RANZUGLIA, G., CALLIERI, M., DELLEPIANE, M., CIGNONI, P. & SCOPIGNO, R. 2013. MeshLab as a complete tool for the integration of photos and color with high resolution 3D geometry data. In: GRAEME EARL, T. S., ANGELIKI CHRYSANTHI, PATRICIA MURRIETA-FLORES, CONSTANTINOS PAPADOPOULOS, IZA ROMANOWSKA AND DAVID WHEATLEY (ed.) *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA)*. Southampton: Amsterdam University press, Amsterdam.

RAMOS, M. & REMONDINO, F. 2015. Data fusion in Cultural Heritage – A Review. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5/W7, 359-363.

SOLER, F., MELERO, F. J. & LUZÓN, M. V. 2017. A complete 3D information system for cultural heritage. *Journal of cultural heritage*, 23, 49-57.

ZINS, C. 2007. Conceptual approaches for defining data, information, and knowledge. *Jasist*, 58, 479-493.

#### *Il modello numerico e la segmentazione*

APOLLONIO, F. I., GAIANI, M. & BERTACCHI, S. 2019. MANAGING CULTURAL HERITAGE WITH INTEGRATED SERVICES PLATFORM. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W11, 91-98.

APOLLONIO, F. I., BASILISSI, V., CALLIERI, M., DELLEPIANE, M., GAIANI, M., PONCHIO, F., RIZZO, F., RUBINO, A. R., SCOPIGNO, R. & SOBRA', G. 2018. A 3D-centered Information System for the documentation of a complex restoration intervention. *Journal of Cultural Heritage*, 29, 89-99.

CALLIERI, M., DELLEPIANE, M., PONCHIO, F., POTENZIAN, M. & SCOPIGNO, R. 2017. Delivering and using 3d models on the web: are we ready? / Distribución y uso de modelos 3d en la web: ¿estamos listos? *Virtual Archaeology Review*, 8, 1-9.

- CIPRIANI, L. & FANTINI, F. 2017. Digitalization culture vs archaeological visualization: integration of pipelines and open issues. *In*: D. AGUILERA, A. G., T. KERSTEN, F. REMONDINO, AND E. STATHOPOULOU (ed.) *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Nafplio, Greece: International Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS).
- DEL POZO, S., HERRERO-PASCUAL, J., FELIPE-GARCÍA, B., HERNÁNDEZ-LÓPEZ, D., RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, P. & GONZÁLEZ-AGUILERA, D. 2015. multi-sensor radiometric study to detect pathologies in historical buildings. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-5/W4, 193-200.
- GRILLI, E., MENNA, F. & REMONDINO, F. 2017. A REVIEW OF POINT CLOUDS SEGMENTATION AND CLASSIFICATION ALGORITHMS. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W3, 339-344.
- GRILLI, E., DININNO, D., PETRUCCI, G. & REMONDINO, F. 2018. from 2d to 3d supervised segmentation and classification for cultural heritage applications. *In*: REMONDINO, F., TOSCHI, I. & FUSE, T., eds. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2018 ISPRS TC II Mid-term Symposium “Towards Photogrammetry 2020”, 2018 Riva del Garda. 399-406.
- GRILLI, E., FARELLA, E. M., TORRESANI, A. & REMONDINO, F. 2019. GEOMETRIC FEATURES ANALYSIS FOR THE CLASSIFICATION OF CULTURAL HERITAGE POINT CLOUDS. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W15, 541-548.
- HAM, S., OH, Y., CHOI, K. & LEE, I. 2018. Semantic segmentation and unregistered building detection from uav images using a deconvolutional network. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2, 419-424.
- HESS, M. R., PETROVIC, V. & KUESTER, F. 2017. interactive classification of construction materials: feedback driven framework for annotation and analysis of 3d point clouds. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W5, 343-347.
- MESSAOUDI, T., VÉRON, P., HALIN, G. & DE LUCA, L. 2018. An ontological model for the reality-based 3D annotation of heritage building conservation state. *Journal of Cultural Heritage*, 100-112.
- ÖZDEMİR, E. & REMONDINO, F. 2018. Segmentation of 3d photogrammetric point cloud for 3d building modeling. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-4/W10, 135-142.
- PANELLA, F., BOEHM, J., LOO, Y., KAUSHIK, A. & GONZALEZ, D. 2018. Deep learning and image processing for automated crack detection and defect measurement in underground structures. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2, 829-835.
- SAKAMOTO, M., TSUGUCHI, M., CHHATKULI, S. & SATOH, T. 2018. Extended multiscale image segmentation for castellated wall management. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2, 999-1005
- Il modello parametrico e la struttura semantica*
- ACIERNO, M., CURSI, S., SIMEONE, D. & FIORANI, D. 2017. Architectural heritage knowledge modelling: An ontology-based framework for conservation process. *Journal of cultural heritage*, 124-133.
- APOLLONIO, F. I. 2016. Classification schemes and model validation of 3D digital reconstruction process. *In*: BÖRNER, W. & UHLIRZ, S. (eds.) *20th International Conference on Cultural Heritage and New Technologies*. Vienna: Museen der Stadt Wien – Stadtarchäologie.

- APOLLONIO, F. I., GAIANI, M. & ZHENG, S. 2012. BIM - based modeling and data enrichment of classical architectural buildings. *SCientific RESearch and Information Technology- SCIRES-IT*, 2, 41-62.
- APOLLONIO, F. A. G. E. 2015. A paradata documentation methodology for the Uncertainty Visualization in digital reconstruction of CH artifacts. *Scires-It*, 5, 1-24.
- ANDREWS, P., ZAIHRAYEU, I. & PANE, J. 2012. A Classification of Semantic Annotation Systems. *Semantic Web*, 25.
- BIANCONI, F., FILIPPUCCI, M. & MAGI MECONI, F. 2018. Parametrical Vitruvius. Generative modeling of the architectural orders. *SCientific RESearch and Information Technology*, 8, 29-48.
- BIAGINI, C., CAPONE, P., DONATO, V. & FACCHINI, N. 2016. Towards the BIM implementation for historical building restoration sites. *Automation in Construction*, 71, 74-86.
- BOLOGNESI, C. & GARAGNANI, S. 2018. From a point cloud survey to a mass 3D modelling: Renaissance HBIM in Poggio a Caiano. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2, 117-123.
- BORGHINI, S. & CARLANI, R. 2011. La restituzione virtuale dell'architettura antica come strumento di ricerca e comunicazione dei beni culturali: ricerca estetica e gestione delle fonti. *Disegnarecon*, 9.
- BRUNO, N. & RONCELLA, R. 2018. Restoration oriented HBIM system for cultural heritage documentation: the case study of Parma cathedral. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2, 171-178
- BRUMANA, R., BANFI, F., CANTINI, L., PREVITALI, M. & TORRE, D. T. D. E. 2019. Hbim Level of Detail-Geometry-Accuracy and Survey Analysis for Architectural Preservation. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W11, 293-299.
- BRUSAPORCI, S., CENTOFANTI, M., RUGGIERI, A., TATA, A. & MAIEZZA, P. 2019. Per una riflessione teorico-metodologica sulla procedura HBIM di modellazione informativa dei beni architettonici | For a theoretical-methodological consideration on the HBIM procedure for the informative modelling of the architectural Heritage. In: BELARDI, P. (ed.) *Riflessioni : l'arte del disegno/ il disegno dell'arte = Reflections : the art of drawing/ the drawing of art : 41. convegno*. Perugia: Gangemi Editore.
- CACCIOTTI, R. & VALACH, J. 2015. The MONDIS Project Semantic Web and the Protection of Historic Buildings. In: IEEE (ed.) *Digital Heritage*. Granada, Spain.
- CASALE, A., VALENTI, G. M., CALVANO, M. & ROMOR, J. 2013. Modellazione parametrica. Tecnologie a confronto. In: CASALE, A. (ed.) *Geometria descrittiva e rappresentazione digitale*. Roma: Edizione Kappa.
- DE LUCA, L., VÉRON, P. & FLORENZANO, M. 2007. A generic formalism for the semantic modeling and representation of architectural elements. *The Visual Computer*, 23, 181-205.
- DE LUCA, L. 2011. Verso la caratterizzazione semantica di rappresentazioni digitali di artefatti architettonici: linee programmatiche di ricerca / Towards the semantic characterization of digital representations of architectural artifacts: programmatic lines of research. *disegnarecon*, 4, 99-106.
- DE LUCA, L., BUSARAYAT, C., STEFANI, C., PHILIPPE, V. & M, F. NUBES: describing, analysing, documenting and sharing digital representations of heritage buildings. Conference on Semantic 3D Media and Content-Proceedings of Focus K3D conference on Semantic 3D Media and Content, 2010 France.
- DIARA, F. & RINAUDO, F. 2018. Open source HBIM

- for cultural heritage: a project proposal. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2, 303-309.
- EMPLER, T. 2018. Information Modeling Procedure to Represent a Territory Affected by Earthquake. *Disegno*, 2, 147-156.
- DORE, C. & MURPHY, M. 2013. Semi-Automatic Modelling of Building Façades with Shape Grammars using Historic Building Information Modelling. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5/W1, 57-64.
- FASSI, F., MANDELLI, A. T., SIMONE, RECHICHI, F. & FIORILLO, F. A., CRISTIANA 2016. VR for Cultural Heritage, A VR-WEB-BIM for the Future Maintenance of Milan's Cathedral. In: MONGELLI, L. T. D. P. A. A. (ed.) *Third International Conference, AVR 2016*. Lecce, Italy: Springer International Publishing.
- GARAGNANI, S., GAUCCI, A. & GOVI, E. 2016. AR-CHAEOBIM: dallo scavo al building information modeling di una struttura sepolta. il caso del tempio tuscanico di uni a Marzabotto. *Archeologia & Calcolatori*, 27, 251-270.
- GIOVANNINI, E. 2017. VRIM workflow: semantic H-BIM objects using parametric geometries. In: EMPLER, T. (ed.) *3DModeling&BIM*. Roma, Facoltà di Architettura "Sapienza".
- INZERILLO, L., MASSIMILIANO LO TURCO, PARRINELLO, S., SANTAGATI, C. & VALENTI, G. M. 2016. BIM and architectural heritage: towards an operational methodology for the knowledge and the management of Cultural Heritage. *disegnarecon*. L'Aquila: University of L'Aquila.
- LOGOTHETIS, S., KARACHALIOU, E., VALARI, E. & STYLIANIDIS, E. 2018. Open source cloud-based technologies for BIM. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2, 607-614.
- LO TURCO, M., MATTONE, M. & RINAUDO, F. 2017. Metric Survey and Bim Technologies to Record Decay Conditions. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLII-5, 261-268.
- MAIEZZA, P. 2019. As-built reliability in architectural hbim modeling. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W9, 461-466.
- MURPHY, M., MCGOVERN, E. & PAVIA, S. 2013. Historic Building Information Modelling – Adding intelligence to laser and image-based surveys of European classical architecture. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 76, 89-102.
- POCOBELLI, D. P., BOEHM, J., BRYAN, P., STILL, J. & GRAU-BOVÉ, J. 2018. Building information models for monitoring and simulation data in heritage buildings. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2, 909-916.
- QUATTRINI, R., BATTINI, C. & MAMMOLI, R. 2018. HBIM to vr. Semantic awareness and data enrichment interoperability for parametric libraries of historical architecture. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2, 937-943.
- QUATTRINI, R., CLINI, P., NESPECA, R. & RUGGERI, L. 2016. Misura e Historical Information Building: sfide e opportunità nella rappresentazione di contenuti 3D semanticamente strutturati. *disegnarecon*, 9, 14-14.11.
- ROSSI, M. L. 2019. Algoritmi Generativi ed Innessi Cinquecenteschi : Genesi Proto-parametrica del Loggiato Rinascimentale = Generative Algorithms and XVI century grafts : Proto-parametric genesis of the Renaissance Loggia. In: BELARDI, P. (ed.) *UID : Unione Italiana per il Disegno : 2019. Riflessioni : l'arte del disegno/ il disegno dell'arte = Reflections : the art of drawing/ the drawing of art : 41. convegno*. Perugia: Gangemi Editore.

SANTAGATI, C., LO TURCO, M. & GAROZZO, R. Reverse information modeling for historic artefacts: towards the definition of a level of accuracy for ruined heritage. *In: REMONDINO, F., TOSCHI, I. & FUSE, T., eds. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Towards Photogrammetry 2020*, 2018 Riva del Garda. 1007-10014.

SAYGI, G. & REMONDINO, F. 2013. Management of Architectural Heritage Information in BIM and GIS: State-of-the-art and Future Perspectives. *International Journal of Heritage in the Digital Era*, Vol. 2(4), 695-713.

SERLORENZI, M., LAMONACA, F., PICCIOLA, C. & CORDONE, C. 2012. Il Sistema Informativo Territoriale Archeologico di Roma: SITAR. *Archeologia e Calcolatori*, 31-50.

SOLODOVNIK, I. 2010. Ontologia ed epistemologia: dalla filosofia all'uso moderno all'implicazione pratica negli archivi digitali. *Bollettino Filosofico*, 26, 357-371.

VERDIANI, G., VINCENZO, D., MARSUGLI, F. & PIANIGIANI, L. 2018. Patrimonio costruito e BIM: il palazzo di Francesco de' Medici nella Fortezza Vecchia di Livorno fa un secondo passo nell'epoca digitale.

YANG, X., LU, Y.-C., MURTIYOSO, A., KOEHL, M. & GRUSSENMEYER, P. 2019. HBIM Modeling from the Surface Mesh and Its Extended Capability of Knowledge Representation. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8, 301.

#### *Le indagini diagnostiche sul patrimonio costruito*

ALBA, M. I., BARAZZETTI, L., SCAIONI, M., ROSINA, E. & PREVITALI, M. 2011. Mapping Infrared Data on Terrestrial Laser Scanning 3D Models of Buildings. *Remote Sensing*, 3, 1847-1870.

CARROZZO, M. T. 2006. Il contributo della Geofisica ai Beni Culturali: alcune esperienze nel Salento. *Memorie di*

*Scienze Fisiche e Naturali*, XXX, 187-204.

CLARKSON, G., LUO, S. & FUENTES, R. Thermal 3D Modelling. 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2017). 2017 Taipei, Taiwan. 493-499.

COSTANZO, A., MINASI, M., CASULA, G., MUSACCHIO, M. & BUONGIORNO, M. F. 2015. Combined use of terrestrial laser scanning and IR thermography applied to a historical building. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 15, 194-213.

DAILY, W., RAMIREZ, A., BINLEY, A. & LABRECQUE, D. 2005. 17. Electrical Resistance Tomography—Theory and Practice. *In: BUTLER, D. (ed.) Soc. Exploration Geophysics: Near Surface Geophysics*.

HAM, Y. & GOLPARVAR-FARD, M. 2013. An automated vision-based method for rapid 3D energy performance modeling of existing buildings using thermal and digital imagery. *Advanced Engineering Informatics*, 27, 395 - 409.

GALLI, M., GRIFFO, M., INGLESE, C., ISMAELLI, T., DE GIORGI, L., DITARANTO, I., LEUCCI, G. & SCARDOZZI, G. Rappresentare il visibile e conoscere il non visibile: studi sulla Basilica Iulia al Foro Romano. *In: BELARDI, P., ed. 41° convegno internazionale dei docenti delle discipline della rappresentazione*, 2019 Perugia. Gangemi Editore, pp. 667-674.

GOODMAN, D. & PIRO, S. 2013. *GPR Remote Sensing in Archaeology*, Springer Verlag.

HESS, M., KUESTER, F. & TRIVEDI, M. 2014 Multi-modal registration of high-resolution thermal image mosaics for the non-destructive evaluation of structures. 2014 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST) Proceedings, 14-17 Oct. 2014. 216-221.

- JOL, H. 2009. *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*, Elsevier Science
- KNIAZ, V. V. & MIZGINOV, V. A. 2018. Thermal texture generation and 3d model reconstruction using sfm and gan. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2, 519-524.
- LAGÜELA, S., LUCIA, D. V., JOAQUIN, M.-S. & JULIA, A. 2013. Automatic thermographic and RGB texture of as-built BIM for energy rehabilitation purposes. *Automation in Construction*, 31, 230–240.
- LEUCCI, G., MASINI, N., PERSICO, R. & SOLDOVIERI, F. 2011. GPR and sonic tomography for structural restoration: the case of the cathedral of Tricarico. *Journal of Geophysics and Engineering*, 8, S76.
- LEUCCI G. 2015, *Geofisica Applicata all'Archeologia e ai Beni Monumentali*, Dario Flaccovio Editore, Palermo.
- LEUCCI G. 2019, *Nondestructive Testing for Archaeology and Cultural Heritage: A practical guide and new perspective*, Springer, Berlin.
- LIN, D., JARZABEK-RYCHARD, M., SCHNEIDER, D. & MAAS, H. G. 2018. Thermal texture selection and correction for building facade inspection based on thermal radiant characteristics. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2, 585-591.
- MACHER, H., BOUDHAIM, M., GRUSSENMEYER, P., SIROUX, M. & LANDES, T. 2019. Combination of thermal and geometric information for bim enrichment. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W15, 719-725.
- MANATAKI, M., ARRIS, A. S., DONATI, J. & CUENCA-GARCÍA, C. 2015. GPR: Theory and Practice in Archaeological Prospection. In: SARRIS, A. (ed.) *Best Practices of GeoInformatic Technologies for the Mapping of Archaeolandscape*.
- MORIGI, M. P., CASALI, F., BETTUZZI, M., BRANCACCIO, R. & D'ERRICO, V. 2010. Application of X-ray Computed Tomography to Cultural Heritage diagnostics. *Applied Physics A*, 100, 653-661.
- NEUBAUER, W., BORNIK, A., WALLNER, M. & VERHOEVEN, G. 2019. *Novel volume visualisation of GPR data inspired by medical applications*.
- RANGEL, J. & SOLDAN, S. 3D Thermal Imaging: Fusion of Thermography and Depth Cameras. 12th International Conference on Quantitative Infrared Thermography, 7 - 11 July 2014, 2014 France, Bordeaux.
- PAYNE, E. 2013. Imaging Techniques in Conservation. *Journal of Conservation and Museum Studies*, 10.
- PREVITALI, M., BARAZZETTI, L., REDAELLI, V., SCAIONI, M. & ROSINA, E. 2013. Rigorous procedure for mapping thermal infrared images on threedimensional models of building façades. *Journal of Applied Remote Sensing*, 7.
- SCAIONI, M., ROSINA, E., L'ERARIO, A. & DÌAZ-VILARIÑO, L. Integration of infrared thermography and photogrammetric surveying of built landscape. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-5/W1, 2017 GEOMATICS & RESTORATION – Conservation of Cultural Heritage in the Digital Era, 2017 Florence, Italy 153-160.
- NUZZO, L., LEUCCI, G., NEGRI, S., CARROZZO, M. T. & TATIANA, Q. 2002. Application of 3D visualization techniques in the analysis of GPR data for archaeology. *Annals of Geophysics*, 45.
- ZHOU, B. 2019. Electrical Resistivity Tomography: A Subsurface-Imaging Technique.

*La Basilica Iulia*

BIANCHI, E., 2010, *Foro Romano. L'intervento dei Tarquini prima della Cloaca Maxima*, in *Studi Romani* LVIII, nn. 1-4, 3-26.

GALLI, M., INGLESE, C., ISMAELLI, T. & GRIFFO, M. (1) Rome under Rome: survey and analysis of the east excavation area beneath the Basilica Iulia. 2018 3rd Digital Heritage International Congress (DigitalHERITAGE) held jointly with 2018 24th International Conference on Virtual Systems & Multimedia (VSMM 2018), 26-30 Oct. 2018 2018. 1-4.

GALLI M, GRIFFO M, INGLESE C, ISMAELLI T. (2) Vecchi scavi e nuove tecnologie. Primi risultati del Progetto Basilica Iulia. *Archeologia & Calcolatori*. 2019;30:229-249.

GALLI M, GRIFFO M, INGLESE C, T. ISMAELLI, L. DE GIORGI, I. DITARANTO, G. LEUCCI, AND G. SCARDOZZI. (3) Rappresentare il visibile e conoscere il non visibile: studi sulla Basilica Iulia al Foro Romano. Paper presented at: 41° convegno internazionale dei docenti delle discipline della rappresentazione 2019; Perugia.

GIULIANI C.F., VERDUCHI P. 1993, Basilica Iulia, in E.M. STEINBY (ed.), *Lexicon Topographicum Urbis Romae, I*, Roma, Quasar, 177-179.

CARETTONI G., FABBRINI L. 1961, Esplorazione sotto la Basilica Giulia al Foro Romano, in *RAL*, 16, 51-60.

COARELLI F. 1985, *Il Foro Romano. Periodo repubblicano e augusteo*, Roma.

*Le terme di Diocleziano*

CANDILIO, D. 1992. *La natatio*, *Bollettino di Archeologia* 13-15, 143-145.

SERLORENZI, M. & LAURENTI, S., 2002. *Terme di*

*Diocleziano. Santa Maria degli Angeli*, EDUP, Roma.

FRIGGERI, R. & MAGNANI CIANETTI, M., 2014. *Le terme di Diocleziano. La certosa di Santa Maria degli Angeli*, Mondadori Electa, Milano.

*Il ninfeo di Egeria*

BARTOLI, A. 1914. *I monumenti antichi di Roma nei disegni degli Uffizi di Firenze*, Roma, Bontempelli.

DE CRISTOFARO, A. 2002. Valle della Caffarella. Indagini al Ninfeo di Egeria (Municipio xi). *BC* 103, 233-236.

DE CRISTOFARO, A. 2005. Il Ninfeo di Egeria nella valle della Caffarella a Roma: pavimenti e rivestimenti parietali. *Atti AISCOS*, X, 613-628.

DE CRISTOFARO, A. 2013. Baldassarre Peruzzi, Carlo V e la ninfa Egeria: il riuso rinascimentale del Ninfeo di Egeria nella valle della Caffarella. *Horti Hesperidum* 1, 85-138.

DE CRISTOFARO, A. 2014. Il Ninfeo di Egeria nella valle della Caffarella a Roma. Forma, cronologia, funzione. *Orizzonti*, XV, 31-49.

DUBBINI, R. 2018. *La Valle della Caffarella nei secoli*. Roma.

FEA, C. 1816. *Prodromo di nuove osservazioni e scoperte fatte nelle Antichità di Roma*. Roma.

GRIFFO, M., CIMADOMO, P. & MENCONERO, S. 2019. Integrative irt for documentation and interpretation of archaeological structures. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W15, 533-539.

KAMMERER-GROTHAUS, H., KOCKS, D. 1983. Spelonca di Egeria, *Mededelingen van het Nederlands Instituut te Rome* 44, 61-77.

NIELSEN, P. POULSEN, *The Temple of Castor and Pollux*  
*1. The pre-Augustan temple phases with related decorative*  
*elements*, *Lavori e studi di archeologia* 17, Roma 1985

QUILICI, L. 1968. La valle della Caffarella e il Triopio di  
Erode Attico, *Capitolium* 43, 329-346.