POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Modelli 3D densi tra esperienze didattiche e ricerche di soluzioni fruibili

Original
Modelli 3D densi tra esperienze didattiche e ricerche di soluzioni fruibili / Spanò, A., Donadio, E., Chiabrando, F. - In: Aquileia, l'insula tra Foro e porto fluviale. Lo scavo del Dipartimento di Studi Umanistici dell'Università di Trieste. 1. La strada / Fontana F.. - STAMPA. - Trieste : EUT Edizioni Università di Trieste, 2017. - ISBN 978-88-8303-608-8. - pp. 79-100

Availability:
This version is available at: 11583/2718504 since: 2018-11-25T11:20:02Z

Publisher:
EUT Edizioni Università di Trieste

Published
DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

25 November 2026

Antonia SPANÒ, Elisabetta DONADIO, Filiberto CHIABRANDO

Modelli 3D densi tra esperienze didattiche e ricerche di soluzioni fruibili

Le innumerevoli esperienze di documentazione metrica dei siti archeologici e dei beni culturali hanno ormai evidenziato quanto oggi sia opportuno nella fase di rilievo metrico prevedere l'integrazione di metodi differenti e multisensore che rispondano efficacemente alle esigenze specifiche che man mano si presentano nel corso delle fasi di documentazione tenendo conto anche dell'importanza dell'utilizzo di metodi quanto più possibile a basso costo rendendo il processo di rilevamento e fornitura dei dati maggiormente sostenibile[1].

Tali obiettivi sono stati perseguiti ad Aquileia sia per quanto riguarda il rilievo metrico alla scala archeologica delle emergenze di scavo, sia lo era stato anche per la documentazione a scala territoriale[2].

Introduzione ai metodi di rilievo metrico 3D

Il tratto di cardine in luce nello scavo di via Gemina, così come l'intera *domus* dei Putti danzanti, sono stati oggetto nel corso degli anni di molteplici campagne di rilievo condotte dal gruppo di Geomatica del Politecnico di Torino connesse a esperienze didattiche che hanno coinvolto gli studenti dei corsi di Architettura e Ingegneria e che hanno mirato a fornire, elaborare e aggiornare nel tempo dati 3D georeferenziati sperimentando ogni volta metodi e tecnologie di ultima generazione nel settore del rilievo metrico 3D. In questo campo, infatti, soprattutto nell'ultima decade, l'innovazione è stata rapida e continua, permettendo di acquisire dati con accuratezze e precisioni maggiori delle precedenti e con metodi di elaborazione nuovi e sempre più efficaci, in termini di automazione, velocità di elaborazione e qualità del dato (si riferirà a breve della

[1] Aicardi *et alii* 2015.
[2] Spanò, Chiabrando, Rinaudo 2012.

cosiddetta tecnica *Structure from Motion*, integrata al processo fotogrammetrico digitale, che ha rivoluzionato negli ultimi anni le prospettive di documentazione a basso costo del patrimonio culturale e del territorio). Dal rilievo tramite laser scanner a quello fotogrammetrico terrestre o aereo, sono molteplici gli sviluppi tecnologi che riguardano sia la fase di acquisizione che quella di elaborazione dei dati, permettendo di aggiornare e integrare nel tempo i dati e di approfondire in modo sempre più accurato la conoscenza dell'oggetto documentato. Operando in questo modo, nella fase successiva a quella che si svolge sul terreno, differenti elaborazioni possono essere ottenute per rispondere alle esigenze del progetto, dalla definizione dell'assetto geometrico-morfologico del manufatto all'analisi della forma architettonica, fino allo studio dello stato di conservazione delle strutture, degli elementi costruttivi e dei materiali. Nei contesti archeologici, gli obiettivi sono anche legati alle esigenze di ricostruzione della configurazione originaria dei manufatti antichi e di definizione, insieme ad altre metodologie d'indagine diagnostica, dello stato di conservazione[3].

I rilievi multisensore realizzati ad Aquileia, derivano dall'integrazione di sensori attivi (laser scanner) e sensori passivi (fotogrammetria) che permettono di elaborare modelli 3D, entrambi derivati da un dato primario che è costituito da nuvole formate da milioni di punti. I sensori passivi, usati nel campo della fotogrammetria, utilizzano la luce dell'ambiente per acquisire immagini da elaborare, registrando l'energia elettromagnetica emessa dagli oggetti rilevati; i sensori attivi, invece, usati, ad esempio, nei laser scanner, misurano gli oggetti emettendo dei segnali e registrando la tipologia di risposta riflessa (gli scanner a raggi laser sono i più diffusi nel campo del rilevamento, ma esistono anche scanner a luce strutturata o range camere). Le nuvole o la loro trasformazione in superfici triangolate possono essere texturizzate tramite ortofoto ad alta precisione. I modelli di punti o di superfici, sui quali sia stata o meno applicata la texture, possono essere ulteriormente elaborati per dare origine a molteplici rappresentazioni di natura bidimensionale o 3D (fig. 1).

Per fornire alcuni chiarimenti circa i termini e gli acronimi che verranno ripetutamente utilizzati in questo capitolo e nei prossimi connessi alle attività di Geomatica possiamo elencare le seguenti considerazioni.

Texture è un termine generico per definire un'immagine impiegata per rivestire la superficie di un oggetto virtuale, tridimensionale o bidimensionale. Nel campo del rilievo e della documentazione metrica degli ambienti costruiti, il termine richiama l'accezione che nell'informazione spaziale in genere è associata al termine *grid*, cioè una matrice *raster* di punti in cui ogni *pixel* assume una determinata dimensione, in relazione alla

[3] Bonfanti, Chiabrando, Spanò 2016. Cfr. per il contesto di via Gemina il contributo di E. Costamagna, F. Fontana, F. Sacchi.

scala dell'elaborato del rilievo, ed una precisa posizione nel piano o nello spazio, associata a coordinate cartesiane in un sistema di riferimento prescelto. Quando una simile immagine rappresenta un modello altimetrico è detta *DEM* (*Digital Elevation Model*) se il suo formato di archiviazione è nella forma di immagine, oppure *DTM* (*Digital Terrain Model*) se si tratta di un formato vettoriale in forma di punti. Ovviamente nel caso delle architetture, e in generale di patrimonio costruito, si parla di modello di forma.

L'ortofoto di precisione è una rappresentazione bidimensionale ottenibile a partire da un modello di fotogrammi orientati, per i quali cioè, è stata determinata l'esatta posizione del centro di presa nel momento dell'acquisizione dei fotogrammi. Ciò avviene applicando i principi geometrici basilari della fotogrammetria, che prevedono la disponibilità di fotogrammi con centro di presa sempre diverso, e la soluzione è ricercata tramite la misura di punti omologhi ritratti in più fotogrammi, alcuni tra i quali corrispondenti ad una serie di punti d'appoggio misurati a terra per via topografica e facilmente collimabili sulle immagini perché usualmente individuati da *target*. La realizzazione dell'ortofoto prevede che i singoli pixel del fotogramma originale siano proiettati dapprima sul modello altimetrico (DEM) secondo la geometria proiettiva ricostruita tramite il processo fotogrammetrico e poi su un piano, corrispondente generalmente al piano orizzontale (cartografico se ci si trova in tale ambito) oppure ad un qualsiasi piano di proiezione degli elaborati architettonici (piani di proiezione e sezione orizzontali o verticali).

Negli ultimi anni, i recenti sviluppi nel campo delle camere digitali e delle loro risoluzioni, dei metodi di calibrazione di queste ultime, in connessione anche a costi competitivi, e soprattutto grazie allo sviluppo degli algoritmi di *image matching* e *Structure from Motion* (SfM)[4] hanno determinato un nuovo e incessante interesse intorno ai metodi della Fotogrammetria digitale, rendendoli altamente competitivi rispetto a quelli laser scanning.

I software di fotogrammetria digitale hanno infatti progressivamente integrato algoritmi e processi derivanti da altre discipline, in particolare dalla *Computer Vision*, di cui sfrutta i sistemi SfM che permettono di stimare la posizione 3D di punti rappresentati in molteplici immagini, ricostruendo la geometria dell'oggetto rappresentato (*structure*) e la posizione delle prese (*motion*) anche quando non si è in possesso di definiti parametri di calibrazione della camera (coordinate del centro di proiezione, distanza principale, curve di distorsione dell'obbiettivo con la precisione di pochi micron). Alcuni punti caratteristici (*tie-points*) delle immagini vengono preliminarmente estratti in automatico; in particolare vengono estratti punti riconoscibili dal software grazie all'elevato contrasto radiometrico nelle differenti direzioni, che permette di identificare il pixel

[4] Lowe 2004.

in maniera univoca, secondo diversi procedimenti[5]. Ad ogni punto individuato viene assegnato un descrittore, utilizzabile nella fase successiva di *feature matching*. In questa fase i punti con i descrittori più simili (riconosciuti dal software come omologhi) vengono allineati per effettuare il passaggio successivo di triangolazione – *bundle adjustment*. Nella fotogrammetria tradizionale si utilizzano le equazioni di collinearità per stimare la posizione tridimensionale di ogni punto visibile da almeno due fotogrammi attraverso la triangolazione fotogrammetrica, noti i parametri di orientamento interno ed esterno delle immagini. L'identificazione tramite opportuni descrittori di questi punti, consente di utilizzare le regole della geometria epipolare che la tecnica SfM automatizza per sfruttare le relazioni geometriche fra i *tie points* (TP), i centri di presa e la posizione 3D del punto, e ricavare i modelli densi di punti[6].

La tecnologia laser scanning, al contempo, ha sviluppato strumentazioni adattabili a molteplici strategie di automazione delle elaborazioni delle nuvole, che ricoprono esigenze di scala di rilievo differente, permettendo di acquisire in modo semi-automatico nuvole costituite da milioni di punti, su oggetti dalle morfologie anche molto complesse e in modo sempre più speditivo[7].

Come si potrà constatare nel capitolo successivo, non meno importante è lo sviluppo negli ultimi anni della fotogrammetria aerea con velivoli senza pilota (UAV-*Unmanned Aerial Vehicle*), che con il punto di vista aereo privilegiato permette di acquisire immagini stereoscopiche da cui elaborare una documentazione 3D degli oggetti di rilievo sempre più completa, anche dall'alto appunto, e integrabile al rilievo terrestre[8].

I recenti sviluppi nel campo del rilievo UAV che consentono di acquisire oltre alle tradizionali immagini nadirali anche immagini oblique degli oggetti indagati, non sono stati perseguiti nel caso dello scavo di via Gemina, in quanto non erano ancora facilmente disponibili nel 2011. Dal momento che la componente verticale delle strutture archeologiche del sito è estremamente ridotta, il volo nadirale è stato ritenuto sufficiente ad assicurare un'adeguata documentazione.

Il rilievo multisensore della strada

Nel corso degli anni, la strategia di realizzare campagne di rilievo aggiornabili nel tempo ed il proposito di assicurare l'armonizzazione di rilievi metrici 3D a differenti scale, ha indirizzato l'adozione sin dal principio di un unico sistema di riferimento geo-

[5] Costamagna, Chiabrando, Spanò 2013.
[6] Samaan, Héno, Pierrot-Deseilligny 2013; Donadio, Chiabrando, Rinaudo 2015.
[7] Chiabrando *et alii* 2017a.
[8] Rinaudo *et alii* 2012, Sammartano, Chiabrando, Spanò 2017.

riferito. Esso fu realizzato nel 2009 con metodi rigorosi e reso disponibile in seguito alla determinazione di un insieme di reti topografiche misurate con metodo di posizionamento relativo GPS/GNSS e non fu mai cambiato. L'impianto della rete principale d'inquadramento abbraccia grossomodo l'intero insieme delle aree della città che presentano evidenze archeologiche, mentre la rete di raffittimento, è prevalentemente localizzata nell'area di scavo di via Gemina e delle immediate vicinanze (via Bolivia) e comprende due vertici della rete principale e i vertici impiegati per il rilievo delle emergenze archeologiche dello scavo (fig. 2, a-c). Le reti sono state misurate in modalità statica, i vertici sono stati misurati da più di due posizioni diverse in modo da ottenere la ridondanza di dati necessaria per effettuare la compensazione ai minimi quadrati; per la fase di calcolo è stato necessario disporre di punti di coordinate note nel sistema di riferimento cartografico prescelto, corrispondente a quello della carta tecnica regionale. In particolare sono stati utilizzati il vertice di coordinate note: IGM '95 040902 materializzato in prossimità del centro del comune ed i dati della stazione GPS permanente di Palmanova resi disponibili dalla Regione Friuli Venezia Giulia, tramite il suo server cartografico. Per il calcolo delle coordinate dei vertici è stato utilizzato il sistema di riferimento cartografico UTM-WGS84. Gli scarti quadratici medi delle coordinate dei punti, che costituiscono indici di precisione, sono attestati in media su pochi millimetri per le coordinate planimetriche, nell'intorno di 1 cm per le quote.

I primi rilievi fotogrammetrici ad alta risoluzione della strada

Una prima stagione di rilievi metrici 3D del tratto di cardine in luce, insieme ad alcuni ambienti della *domus*, era prefigurata mediante riprese fotogrammetriche che facevano uso di un sistema scelto per la sua economicità in relazione alla qualità del dato raggiungibile: un palo telescopico mobile, dotato di una base triangolare e, sulla sommità, di un lungo braccio trasversale dotato di contrappeso, posto a 6 m da terra, con il quale sono state acquisite immagini ad altissima risoluzione[9] (fig. 3). In quegli anni si assisteva all'inizio dello sviluppo e affermazione dei metodi di *matching* fotogrammetrico, e si può dire quindi che per quegli anni le attività didattiche intraprese

[9] La camera utilizzata è stata una Canon Eos 1D mark III, con sensore C_MOS 24 x 36 mm e obiettivo 20 mm, opportunamente calibrata per gli usi fotogrammetrici dal momento che allora (2009-2010) non erano ancora disponibili gli attuali software che integrano l'autocalibrazione della camera nella fase di orientamento del blocco fotogrammetrico. La distanza di ripresa adottata era di 6 m ca., la scala del fotogramma 1/300, mentre il rapporto base di presa-distanza era pari a ¼. (base: 1,5 m). Dal momento che le discontinuità altimetriche non sono elevate il ricoprimento del 75% è stato considerato preventivamente sufficiente; la dimensione del pixel a terra (*Ground Sampling Distance*) era mediamente di 2 mm.

sullo scavo di via Gemina fossero sicuramente innovative. Mediante l'utilizzo di uno dei primi software disponibili in cui fossero integrati algoritmi di *matching* d'immagini (*Photomodeler Scanner* della *Eos Systems*), in particolare uno *stereo matching* che successivamente interpolava DSM derivati da coppie di fotogrammi, si generò un DEM, una nuvola di punti 3D e la relativa ortofoto. Allora il DEM e la conseguente nuvola 3D erano ottenuti mediante un algoritmo di correlazione che necessitava di immagini riprese ad assi paralleli, con una sufficiente varietà della texture del materiale e con buona esposizione di luce. Il processo era semiautomatico ma prevedeva una preventiva procedura di orientamento classico dei fotogrammi, quindi la collimazione di una serie (limitata) di punti omologhi sulle diverse immagini e di una serie di target misurati per via topografica. Il DEM ottenuto, dal momento che a quel tempo la tecnica non era certo consolidata, ma si muovevano appunto i primi passi, fu confrontato con un DEM elaborato generando le linee di discontinuità della superficie (*breaklines*), ottenute in seguito ad una restituzione fotogrammetrica classica (ormai in disuso!) e da quote topografiche integrate per poi avvalersi di algoritmi d'interpolazione per la generazione della superficie continua[10] (figg. 4-5).

I risultati ottenuti attraverso questa prima applicazione a grande scala sono stati più che promettenti, con residui attestati su una media del centimetro su tutte le coordinate e hanno quindi provato l'efficacia di questo sistema per un rilievo a grande scala.

Il rilievo laser scanning terrestre

Nell'estate del 2011, l'intero scavo di via Gemina è stato oggetto di un rilievo complessivo in occasione di un consueto stage studentesco mirato all'apprendimento di una strategia che a quel tempo avevamo definito semplificata in quanto più automatica di quelle tradizionali, di rilievo metrico 3D tramite tecnologia laser scanner. In questa stessa occasione lo scavo era stato anche oggetto di un primo rilievo aereo da drone che è descritto nel capitolo successivo.

Il rilievo laser scanning, coerentemente con le specifiche di progetto che prevedono di usare sempre il medesimo sistema di riferimento, è stato aggiornato due anni dopo (2013), per modellare e rappresentare le aree che erano state nel frattempo scavate, in particolare l'area del giardino/peristilio e quello dell'area della *domus* vicino alle botteghe che si affacciano sul cardine, nella zona orientale dello scavo.

In entrambe le campagne di acquisizione, i rilievi laser terrestri sono stati eseguiti tramite il laser Faro Focus 3D, un laser a differenza di fase che valuta la distanza dei

[10] Costamagna *et alii* 2010.

punti che rileva tramite il tempo di volo e la differenza di fase tra il segnale emesso e quello riflesso dalle superfici che incontra, assicurando una precisione adeguata alla scala architettonica dell'oggetto di studio (1:20-1:50) (fig. 6).

Mentre il primo rilievo aveva necessitato circa sessanta scansioni per ricoprire l'intera area di scavo, per l'aggiornamento sono state acquisite circa venticinque scansioni fra le quali, circa dieci interessanti la zona del cardine. La strategia scelta è stata di rilevare le aree di nuovo scavo utilizzando la risoluzione opportuna per la scala del rilievo richiesta (come ordine di grandezza, la distanza reciproca tra punti successivi della nuvola, misurata alla distanza di 10 m dal sensore, è impostata in fase di acquisizione su 6 mm ca.). Le zone limitrofe a quelle di ultimo scavo sono state rilevate mediante scansioni in posizione più distante del consueto, in modo da ottenere nuvole più rade ma che assicurassero in fase di elaborazione la garanzia dell'esatta sovrapposizione con la nuvola originaria, ed in modo da sostituire nel modello di punti complessivo, le porzioni di nuvole attestate sulle aree di nuovo scavo. La fase di acquisizione è stata eseguita settando scansioni a 360°, facendo in modo che fosse acquisita l'intera superficie di interesse e che fosse garantito un ricoprimento minimo del 60% tra scansioni adiacenti e un minimo di tre target in comune. Come mostra la figura 6, in quegli anni l'uso cospicuo di target misurati per via topografica si configurava come via piuttosto necessaria per potere unire successivamente tutte le scansioni con buone precisioni in un unico sistema di riferimento. Oggi, lo sviluppo dei software di registrazione delle nuvole consente nuove strategie di allineamento, come quello denominato per forma, che consente di ridurre drasticamente l'uso dei target misurati per via topografica. Il loro minor numero, che rende più rapida la fase di acquisizione, continua ad essere indispensabile per poter assegnare alla nuvola complessiva le coordinate del sistema di riferimento locale o geografico prescelto, e affinché sia garantita la possibilità di integrazione dei dati multisensore e nel tempo.

Una volta ottenuta un'unica nuvola georiferita è stato necessario "pulirla", eliminando l'insieme dei punti acquisiti accidentalmente dal laser e non appartenenti all'oggetto di interesse. Il laser, infatti, a differenza delle tradizionali tecniche di rilievo, non consente di operare una scelta a priori dei punti da misurare, ma acquisisce tutti i punti che incontra, restituendo nuvole costituite da milioni di punti in cui sono presenti anche punti non necessari. Per tali motivi è quindi sempre necessario operare una pulizia della nuvola, che necessita anche di una riduzione del rumore (degli *outlier*, cioè i tipici errori accidentali insiti nelle misure) e facilitando così la fase successiva di modellazione (fig. 7).

Il passo successivo è consistito quindi nella realizzazione, attraverso un processo di triangolazione, di un modello di superficie (*mesh*), in cui le lacune tra punti adiacenti della nuvola sono colmate da triangoli creati per interpolazione (fig. 8).

Il modello che si ottiene da questo processo necessita nuovamente dell'intervento di un operatore esperto dal momento che anch'esso può presentare delle lacune più o meno grandi da colmare o integrare. Inoltre possono verificarsi errori topologici di sovrapposizione tra triangoli che vanno eliminati.

Una volta elaborato un modello completo e privo di errori è stato successivamente possibile texturizzarlo con le ortofoto elaborate dai dati del rilievo fotogrammetrico aereo (figg. 9-10). Il modello finale è una fedele e accurata rappresentazione virtuale del cardine da cui è possibile estrarre, come si vedrà nel paragrafo seguente, molteplici informazioni.

Elaborazioni 2D

Come descritto nei paragrafi precedenti, dai dati 3D acquisiti ed elaborati da tecniche multisensore è possibile estrarre molteplici rappresentazioni 2D e 3D che permettono di indagare dettagliatamente l'oggetto di studio.

I modelli finali, infatti, oltre a rappresentare un mezzo comunicativo efficace ed intuitivo del bene oggetto di studio, consentendo la navigazione interattiva o l'estrazione di molteplici viste assonometriche e/o prospettiche, permettono di ricavare, in opportuni software, svariate rappresentazioni utili ad approfondire la conoscenza geometrica e morfologica del bene in oggetto.

In specifici software di modellazione è possibile estrarre curve di livello a passi scelti dall'operatore che consentono di valutare l'andamento geometrico delle strutture, dei loro possibili fuori piombo e/o cedimenti (un esempio di estrazione automatica è presentato in fig. 5b).

L'operatore può, inoltre, inserire infiniti piani sezione partendo da una vista nadirale della nuvola secondo svariati scopi, ottenendo in questo modo viste bidimensionali della nuvola, georiferite, sulle quali è possibile, ad esempio, restituire le rappresentazioni tradizionali quali piante e sezioni 2D.

Nel caso specifico del tratto di cardine di via Gemina, alcune elaborazioni sono consistite nell'estrazione di viste bidimensionali della nuvola 3D a partire dalle quali è stato possibile restituire profili di sezione 2D in posizioni opportunamente scelte. Sono state, così, estratte e restituite venti sezioni trasversali della strada (fig. 11), che evidenziano nella loro successione un buono stato di conservazione della strada nella porzione settentrionale; nel tratto meridionale invece le pendenze del terreno in direzione della casa confermano i dati di lettura dei materiali archeologici che denunciano una zona di intensi rimaneggiamenti.

Due sezioni trasversali (fig. 12), passanti rispettivamente per l'accesso ad una delle botteghe e per il corridoio di accesso ai locali della *domus*, evidenziano le relazioni altimetriche tra la strada, il portico e le botteghe.

Lungo una sezione tipo si può riscontrare un dislivello di 30 cm ca. tra il livello del sedime della strada e quello dell'interno della bottega, e un dislivello di 60 cm ca. tra lo stesso livello della strada e quello di un ambiente della *domus*.

Due sezioni longitudinali del cardine completano la sequenza (fig. 13). È importante sottolineare quanto sia significativa in questa fase di elaborazione la capacità dell'operatore nel discretizzare i dati offerti nella nuvola densa 3D al fine di restituire rappresentazioni facilmente comprensibili e che rispondano alle esigenze di progetto.

Prospettive

Grazie alle esperienze condotte in questi anni si sono potute sperimentare le potenzialità delle più moderne tecnologie di rilievo metrico multisensore, in un contesto archeologico che per sue caratteristiche ha richiesto la configurazione multiscala. Tali tecniche hanno permesso di costituire ed elaborare un ricchissimo archivio di dati 3D sullo scavo di Aquileia sempre integrabile nel tempo e da cui è possibile estrarre molteplici rappresentazioni che ci auguriamo utili per il proseguimento degli studi. I modelli 3D realizzabili forniscono un importante documento e testimonianza dello stato di conservazione dell'oggetto rilevato al momento delle riprese, e possono costituire un efficace mezzo comunicativo e divulgativo se utilizzati con scopi didattici. L'elevata accuratezza e precisione dei dati raccolti consente inoltre di rendere tali dati fruibili per molteplici indagini e analisi specialistiche[11].

Molte applicazioni recenti mirano a sperimentare la gestione e interoperabilità di questa grande mole di dati in piattaforme GIS e BIM al fine di renderli più facilmente interrogabili, fruibili e integrabili dagli attori coinvolti nel processo di conservazione e valorizzazione del patrimonio.

Ad oggi, i GIS sono metodi ormai più che consolidati per l'archiviazione e gestione informatizzata dei dati grazie alla possibilità offerta di analizzare e integrare nel tempo dati alfanumerici con riferimento spaziale e geografico. Nell'ultima decade, si è assistito ad una ricca proposta e sperimentazione di progetti di comunicazione alternativi finalizzati alla valorizzazione del patrimonio: prodotti multimediali che presentano le ipotesi di ricostruzione di paesaggi e strutture architettoniche, webGIS tramite i quali è possibile accedere alle

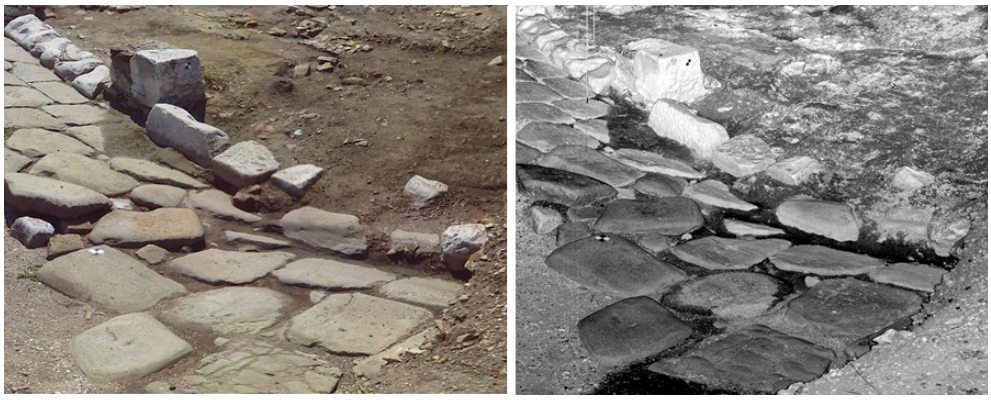
[11] Cfr. *infra* i capitoli 2.6 e 6.1.

planimetrie di scavo e alla documentazione fotografica, e ancora HBIM in cui il metodo di progettazione parametrico è messo a servizio anche del patrimonio esistente[12].

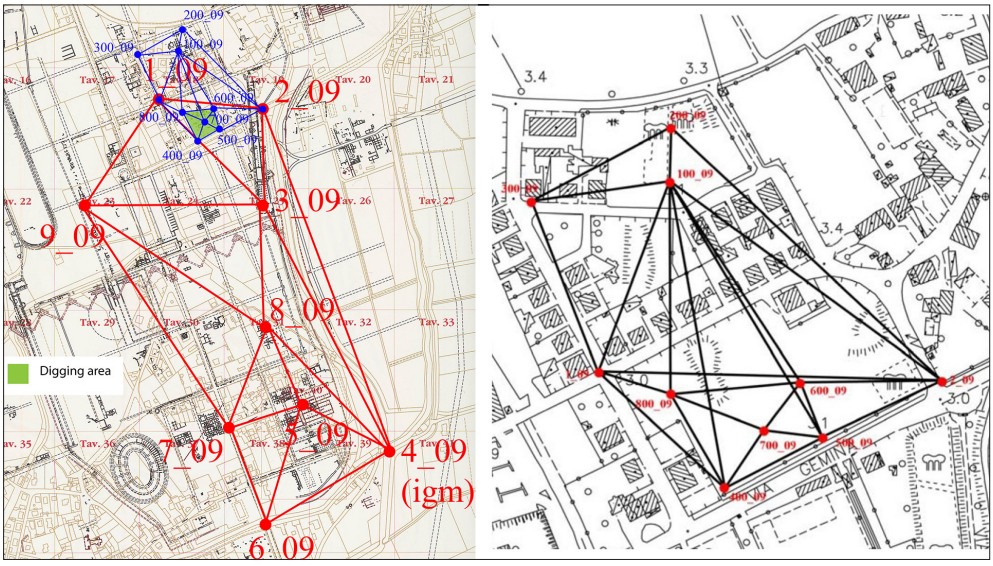
[12] Saygi *et alii* 2013.

ILLUSTRAZIONI

Fig. 1 Una fotografia dei basoli della strada ed una immagine, ripresa dallo stesso punto di vista, del modello laser di punti, nella quale il *color range* in scala di grigio rappresenta l'intensità di riflessione del materiale (cioè la riflettività, che è la quarta grandezza rilevata dallo scanner laser per ogni punto, oltre ai due angoli e distanza dai quali si ricavano le coordinate cartesiane dei punti) (Politecnico di Torino).
Fig. 2 a. Rappresentazione della rete principale d'inquadramento sulla carta archeologica della città di Aquileia allora disponibile (da Bertacchi 2003) e rete topografica di raffittimento dell'area di via Gemina sovrapposta alla carta catastale; b. Rappresentazione della rete topografica principale mediante l'upload delle coordinate (riferite al sistema cartografico globale UTM /WGS84) nel browser cartografico Google Earth; c. Rappresentazione della rete di raffittimento mediante il medesimo sistema di upload in Google Earth delle coordinate dei vertici in un file di formato GIS (Politecnico di Torino).
Fig. 3 Fase di acquisizione da palo (Politecnico di Torino).
Fig. 4 Nuvola di punti 3D (*Digital Surface Model*) con texture proiettata (Politecnico di Torino).
Fig. 5 a. Ortofoto elaborata con le immagini acquisite da palo telescopico con segnalazione dei target usati per l'orientamento fotogrammetrico; b. Estrazione automatica dei contorni degli elementi rilevati da DEM e loro sovrapposizione su ortofoto (Politecnico di Torino).
Fig. 6 a. il laser Faro Focus 3D; b. materializzazione dei target riflettenti sulle superfici rilevate.
Fig. 7 Vista nadirale della nuvola di punti "integrativa", che ha sostituito nelle sue parti più fitte e corrispondenti alle aree di aggiornamento dello scavo, la nuvola complessiva (Politecnico di Torino).
Fig. 8 a-b Viste nadirali della nuvola acquisita con laser, in cui i cerchi mostrano la posizione del laser al momento dell'acquisizione, e del modello di superficie (*mesh*) (Politecnico di Torino).
Fig. 9 a-b Ortofoto rigorose dell'intera area di scavo e dell'area relativa al cardo ed alle botteghe generate da fotogrammi acquisiti da esacottero. Si tratta delle due configurazioni relative al volo alto con dimensione del pixel a terra pari a 5.8 mm e al volo basso, con GSD pari a 2.9 mm. Entrambe le ortofoto sono rappresentate nel sistema di riferimento adottato per le elaborazioni, che mostra grandi traslazioni rispetto al sistema cartografico globale. (Politecnico di Torino).
Fig. 10 Modello complessivo dello scavo derivato dal rilievo laser scanning con ortofoto da drone proiettata (Politecnico di Torino).
Fig. 11 Sezioni trasversali progressive del cardo proiettate sull'ortofoto. È possibile notare che solo in una porzione di esso si può ancora visibilmente apprezzare la tipica conformazione a schiena d'asino originaria (Politecnico di Torino).
Fig. 12 Sezioni trasversali che attraversano il sistema strada-portico- bottega, e lungo un corridoio di servizio (Politecnico di Torino).
Fig. 13 Sezioni longitudinali del cardo (Politecnico di Torino).



1


Digging area
1_09
2_09
3_09
4_09
(igm)
5_09
6_09
7_09
8_09
9_09
100_09
200_09
300_09
400_09
500_09
600_09
700_09
800_09
GEMINA

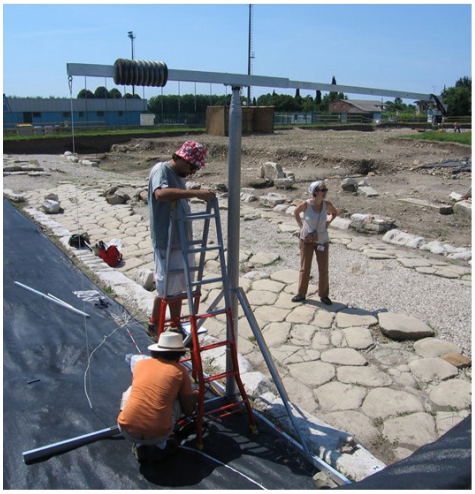
2a



2b

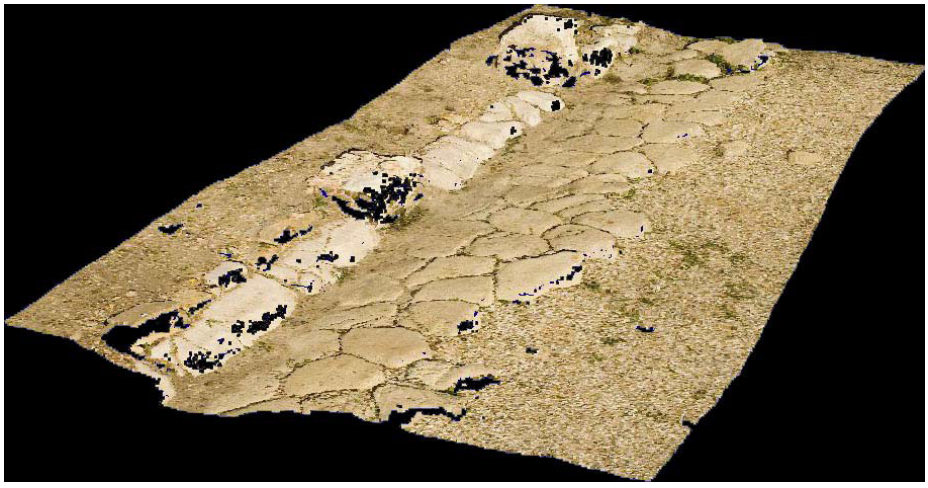


2c

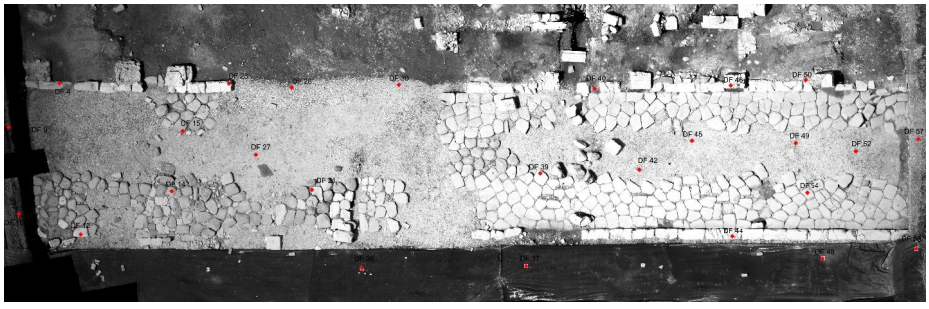




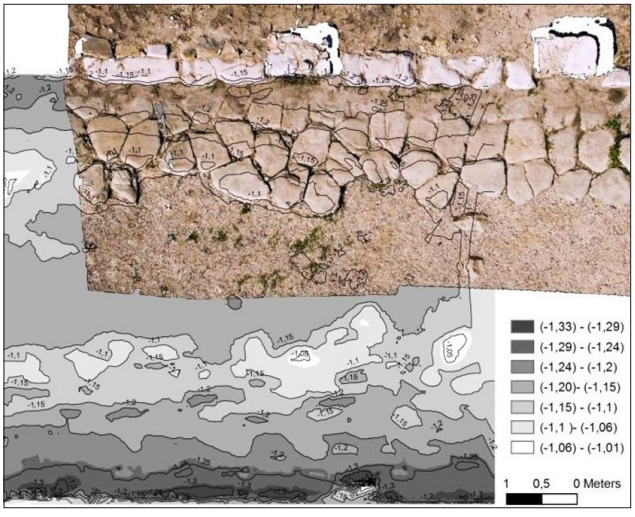

3



4



5a



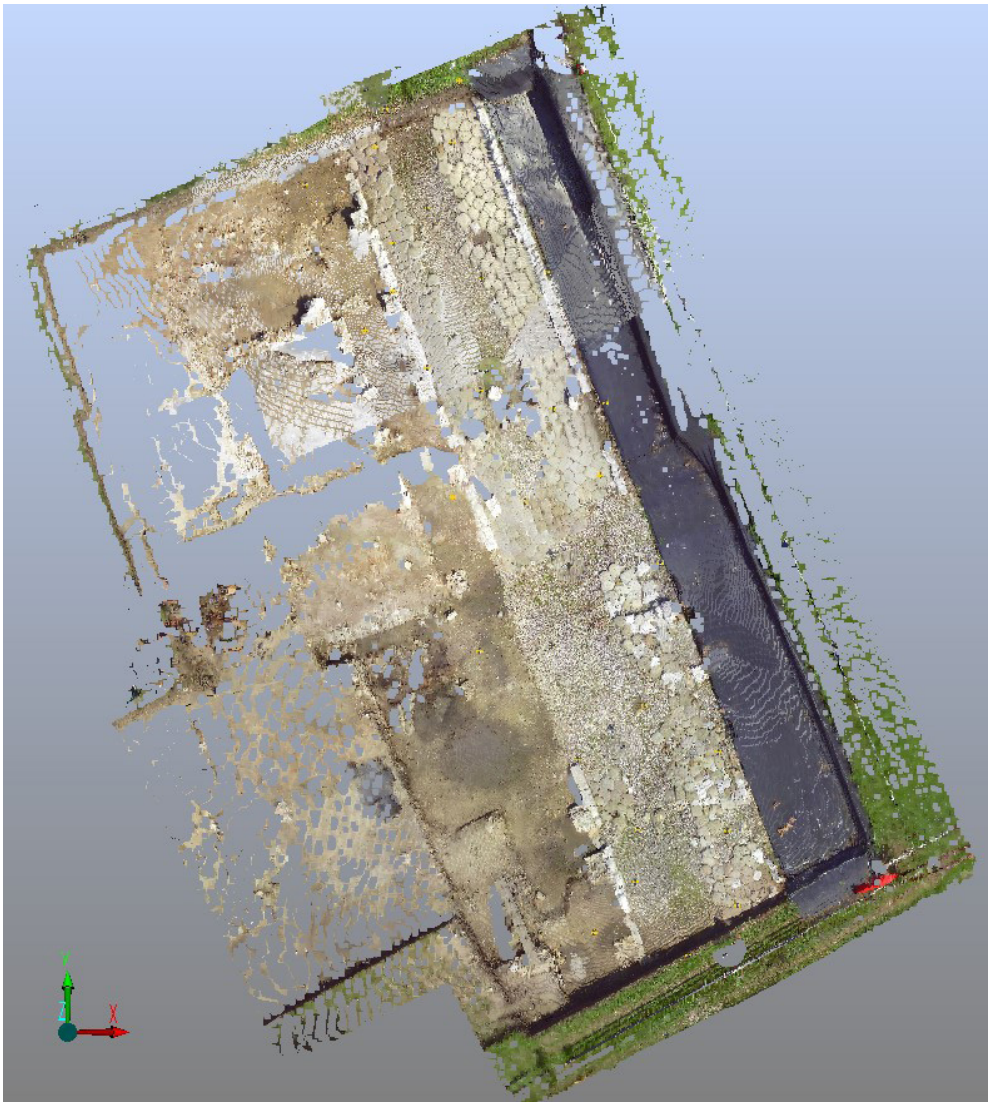
5b



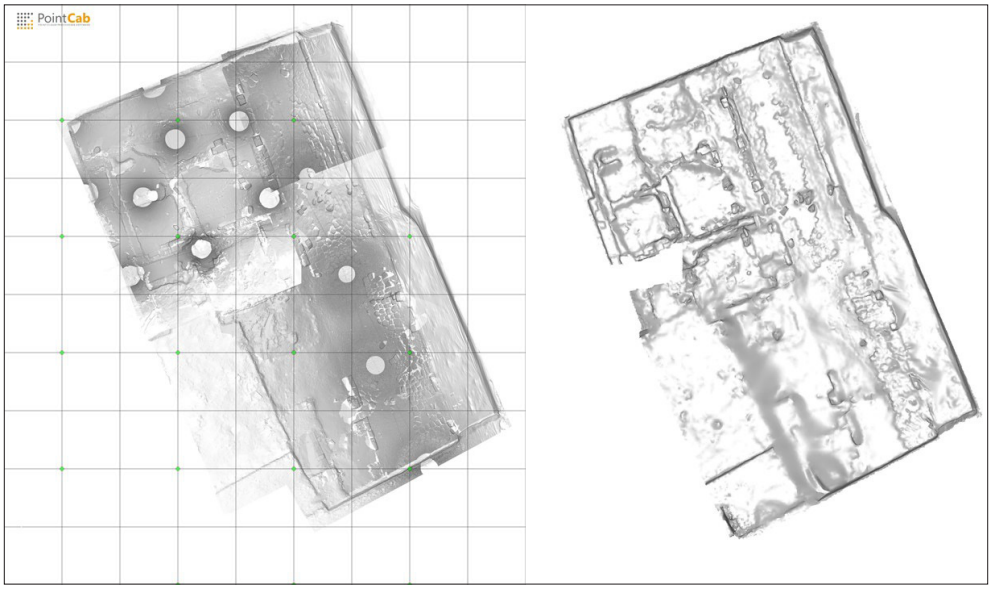
6a

6b



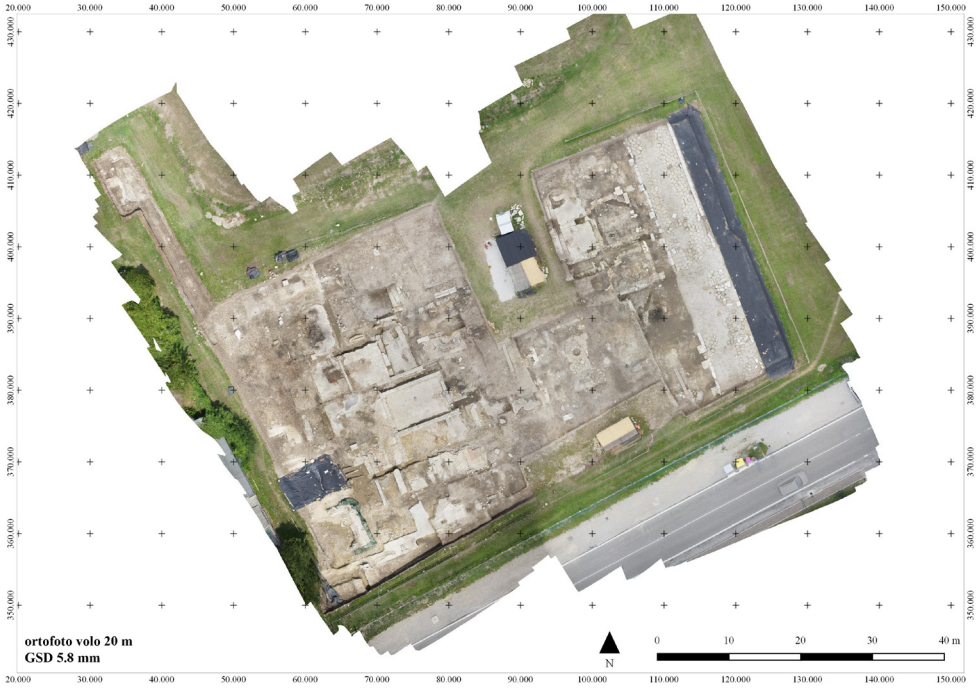


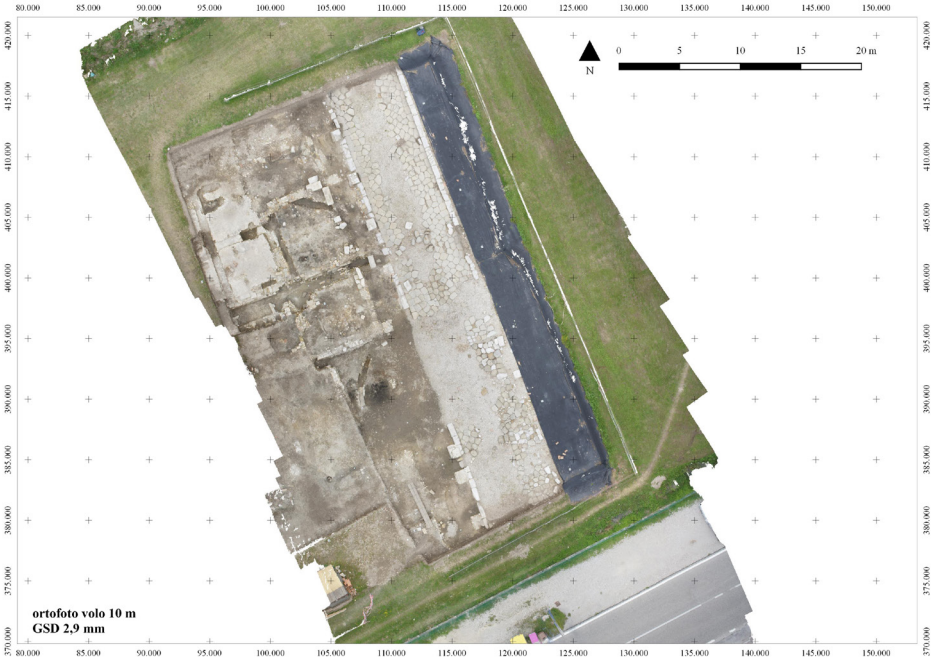
7


PointCab

8a,b

9a


20.000
30.000
40.000
50.000
60.000
70.000
80.000
90.000
100.000
110.000
120.000
130.000
140.000
150.000
430.000
420.000
410.000
400.000
390.000
380.000
370.000
360.000
350.000
ortofoto volo 20 m
GSD 5.8 mm
N
0
10
20
30
40 m


80.000
85.000
90.000
95.000
100.000
105.000
110.000
115.000
120.000
125.000
130.000
135.000
140.000
145.000
150.000
420.000
415.000
410.000
405.000
400.000
395.000
390.000
385.000
380.000
375.000
370.000
N
0
5
10
15
20 m
ortofoto volo 10 m
GSD 2,9 mm

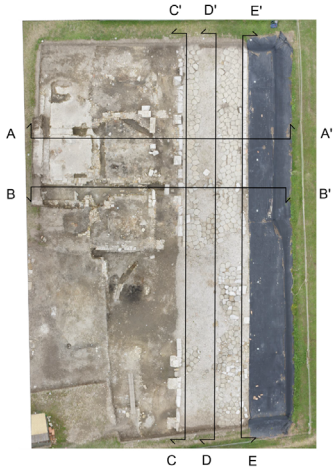
9b


N
0
10
20
30
40 m

10


2.06 2.35 2.24
2.22 2.39 2.24
2.24 2.35 2.25
2.27 2.34 2.25
2.25 2.34 2.26
2.29 2.34 2.28
2.37 2.46 3.35
2.32 2.38 2.28
2.26 2.47 2.33
2.15 2.38 2.59
2.17 2.36 2.79
2.20 2.49 2.82
2.11 2.43 2.80
2.12 2.46 2.78
2.16 2.47 2.77
2.12 2.38 2.69
2.22 2.36 2.65
2.33 2.47 2.67
2.46 2.56 3.45
0 1 5

11

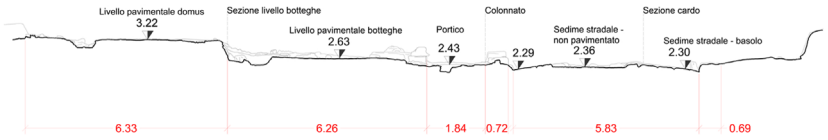


Navigatore sezioni

SEZ A-A'
Quota livello sedime stradale non pavimentato 2.36 m
Quota livello pavimentale botteghe 2.63 m (+0.27 m)
Quota livello pavimentale domus 3.22 (+0.59 m)

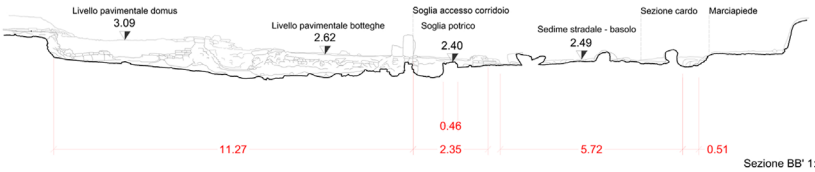






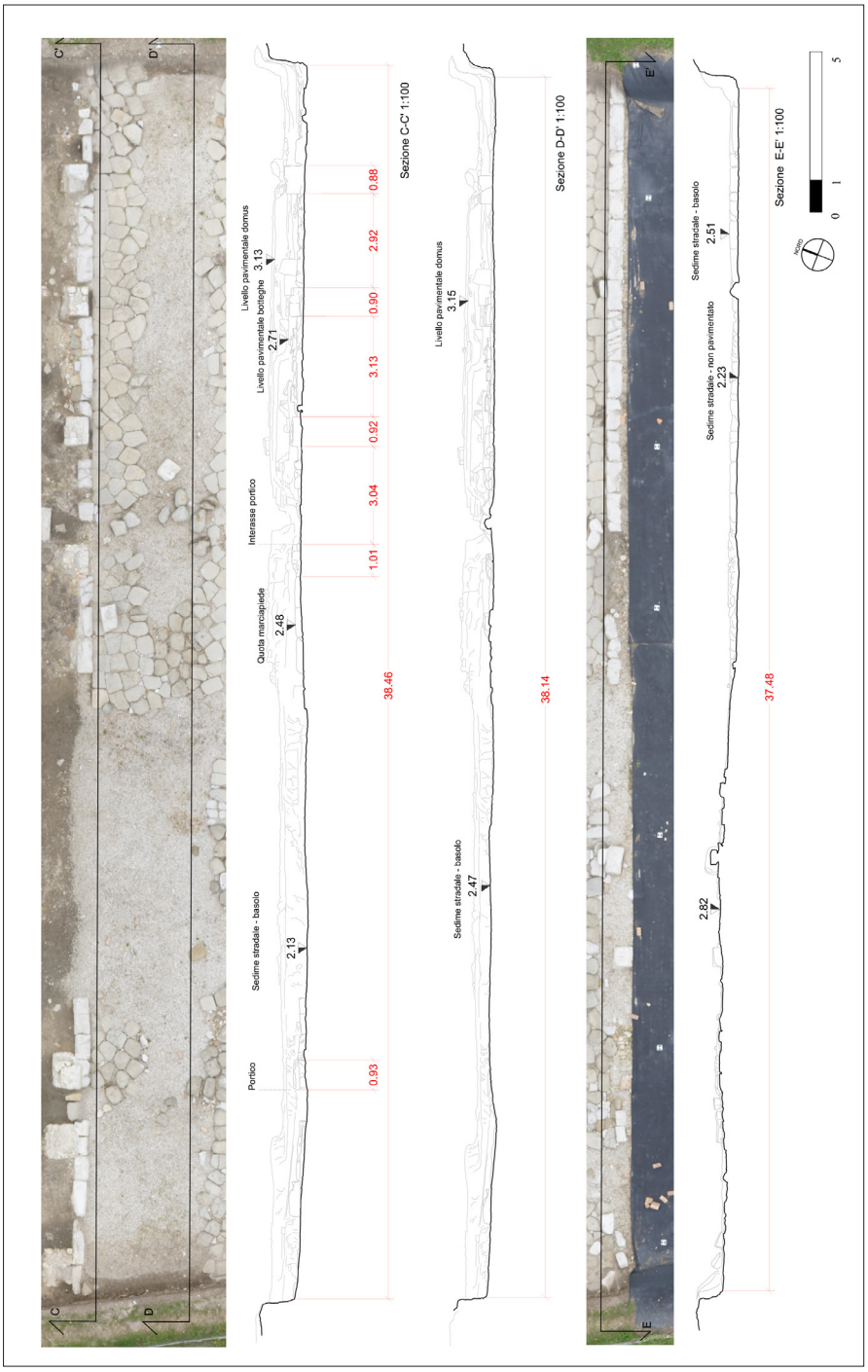
Sezione A-A' 1:100





Sezione BB' 1:100

12


C
D
Portico
Sedime stradale - basolo
2.13
0.93
Quota marciapiede
2.48
Interasse portico
1.01
Livello pavimentale botteghe
2.71
3.04
Livello pavimentale domus
3.13
0.92
0.90
2.92
0.88
38.46
Sezione C-C' 1:100
Sedime stradale - basolo
2.47
Livello pavimentale domus
3.15
38.14
Sezione D-D' 1:100
E
E'
2.82
Sedime stradale - non pavimentato
2.23
Sedime stradale - basolo
2.51
37.48
Sezione E-E' 1:100
Nord
0
1
5

13