

POLITECNICO DI TORINO

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE
IN ARCHITETTURA PER IL PROGETTO SOSTENIBILE

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

Digitalizzazione del Patrimonio Culturale per una migliore accessibilità.

Virtual reality per i ninfei della città antica di Hierapolis.

RELATORE

Nannina Spanò

CORRELATORI

Lorenzo Campagna
Lorenzo Teppati Losè



**Politecnico
di Torino**

CANDIDATI

Alberto Ferrarino
Antonio Pangallo

Settembre 2021

INDICE DEI CONTENUTI

0: Introduzione	10
0.1 Il concetto di Patrimonio Culturale e di Accessibilità	10
0.1.1 Il Patrimonio Culturale	10
0.1.2 L'Accessibilità	12
0.1.2 L'obiettivo della Tesi	12
1: Il ruolo della digitalizzazione	13
1.1 Il concetto di Digitalizzazione	13
1.2 I limiti dell'oggetto fisico	13
1.3 I prodotti digitali	16
2: La città antica di Hierapolis	21
2.1 Hierapolis: Storia e Territorio	21
2.2 Storia delle ricerche sul Ninfeo dei Tritoni e sul Ninfeo del Santuario di Apollo	28
2.2.1 Il Ninfeo dei Tritoni	28
2.2.1.1 Ubicazione e inquadramento generale	28
2.2.1.2 Le ricerche archeologiche sul Ninfeo	29
2.2.1.3 Le fasi insediative	30
2.2.1.4 Il sistema idraulico	33
2.2.1.5 Il muro di fondo	34
2.2.1.6 La fronte ipostila	36
2.2.2 Il Ninfeo del Santuario di Apollo	38
2.2.2.1 Ubicazione e inquadramento generale	38
2.2.2.2 Le ricerche archeologiche sul Ninfeo e interpretazione architettonica	38
2.2.2.3 Lo stato di fatto del Ninfeo	39
2.2.2.4 La fronte ipostila	41
2.2.2.5 Periodizzazione del Ninfeo del Santuario di Apollo	42
3: Geomatica: acquisizione ed elaborazione dei dati per la documentazione del patrimonio architettonico e archeologico	44
3.1 Le discipline e tecniche della geomatica	44
3.2 Tecnica GPS/GNSS	45
3.3 La fotogrammetria	47
3.3.1 Principi geometrici della fotogrammetria	47
3.3.2 Principi analitici della fotogrammetria	48
3.3.3 La fotogrammetria digitale	50
3.3.4 I campi applicativi della fotogrammetria	51
3.3.5 UAV per la fotogrammetria aerea	52
3.3.6 La fotogrammetria terrestre	54
3.3.7 Lo schema di presa	55

INDICE DEI CONTENUTI

3.4	Scansione laser LiDAR.....	56
3.4.1	Laser scanner aereo.....	57
3.4.2	LiDAR terrestre.....	57
3.4.3	Laser scanner mobile.....	57
3.5	La stazione totale.....	58
3.6	Supporti alle ricerche archeologiche e storiche a Hierapolis mediante gli strumenti della geomatica.....	60
3.6.1	Reti topografiche e GIS.....	60
3.6.2	UAV e LiDAR.....	61
3.6.2.1	Rappresentazioni a scala urbana.....	61
3.6.2.2	Rappresentazioni a scala architettonica.....	64
4:	Il progetto di digitalizzazione del Ninfeo dei Tritoni e del Ninfeo del Santuario di Apollo.....	66
4.1	Obiettivi del progetto.....	66
4.2	Il Ninfeo dei Tritoni: elaborazione dei dati provenienti da fotogrammetria digitale UAV per la generazione di un modello fotogrammetrico compatibile con software di realtà virtuale.....	68
4.2.1	Orientamento dei fotogrammi.....	68
4.2.2	Individuazione dei GCPs (<i>Ground Control Points</i>) e CP (<i>Control Points</i>).....	69
4.2.3	Elaborazione della nuvola di punti densa.....	70
4.2.4	Elaborazione della mesh preliminare.....	70
4.2.5	Considerazioni sul modello 3D fotogrammetrico.....	71
4.2.6	Ottimizzazione dei dati per la compatibilità con i software VR:.....	72
4.2.6.1	La segmentazione della nuvola di punti.....	72
4.2.6.2	Elaborazione e <i>post processing</i> della mesh.....	74
4.2.6.3	Texturizzazione della mesh.....	75
4.2.7	I disegni architettonici del Ninfeo dei Tritoni.....	79
4.3	Il Ninfeo del Santuario di Apollo: elaborazione dei dati provenienti da fotogrammetria digitale UAV per la generazione di un modello fotogrammetrico con fini di studio archeologico e di compatibilità con software di realtà virtuale.....	85
4.3.1	gestione della nuvola di punti.....	85
4.3.2	Elaborazione della mesh preliminare.....	87
4.3.3	Ottimizzazione dei dati per la compatibilità con i software VR:.....	87
4.3.3.1	Segmentazione della nuvola di punti.....	87
4.3.3.2	generazione della mesh.....	88
4.3.3.3	Texturizzazione della mesh.....	89
4.3.4	I disegni architettonici del Ninfeo del Santuario di Apollo: stato di fatto.....	92
4.4	Il progetto di Anastilosi del Ninfeo del Santuario di Apollo in accordo con le ricerche archeologiche.....	98
4.4.1	Modellazione 3D degli elementi architettonici.....	98
4.4.1.1	Modellazione delle basi e dei fusti delle colonne.....	98
4.4.1.2	Restauro virtuale del capitello delle colonne.....	102
4.4.1.3	Modellazione dei blocchi fregio-architrave.....	105

INDICE DEI CONTENUTI

4.4.2	Posizionamento degli elementi architettonici ricostruiti sul modello 3D fotogrammetrico	109
4.4.2.1	Letture dello stato di fatto	109
4.4.2.2	Approccio geometrico	109
4.4.2.3	Letture delle tracce di cantiere	113
4.4.2.3.1	Accostamento dei quattro blocchi fregioarchitrave	113
4.4.2.3.2	Posizionamento blocchi fregio-architrave sui capitelli delle colonne	118
4.4.2.3.3	Posizionamento blocchi fregio-architrave e colonne sul modello 3D fotogrammetrico	115
4.4.2.3.4	Riposizionamento delle cornici del podio	118
4.4.2.3.5	modifica del blocco fregio-architrave A1_65	120
4.4.2.4	Ricostruzione ipotetica del resto della facciata ipostila	122
4.4.2.4.1	Ricostruzione avancorpo sud	122
4.4.2.4.2	Ricostruzione cornici del podio	123
4.4.2.4.3	Posizionamento delle colonne	124
4.4.2.4.3	Ricostruzione blocchi fregio-architrave	124
4.4.3	I disegni architettonici del Ninfeo del Santuario di Apollo: anastilosi	126
5:	Il progetto di virtual reality	129
5.1	Principi formativi della Mixed Reality	129
5.2	Gli strumenti della Virtual Reality	130
5.3	I campi applicativi della Virtual Reality	131
5.3.1	il VR a scopi formativi	131
5.3.2	il VR a scopo di intrattenimento	132
5.3.3	il VR per il Patrimonio Culturale	132
5.3.3.1	La Virtual Heritage	133
5.3.3.1.1	I musei virtuali	134
5.3.3.1.2	I virtual tour 360	135
5.4	Il Progetto VR	136
5.4.1	Il Virtual Tour nel Nineo dei Tritoni	136
5.4.1.1	Preparazione del modello per il motore grafico	136
5.4.1.2	Elaborazione del Virtual Tour nel motore grafico	137
5.4.1.2.1	Parametri di Real Time rendering	137
5.4.1.2.2	Parametri di interazione utente-modello	139
5.4.12	Il Virtual Tour nel Ninfeo del Santuario di Apollo	143
5.4.1.1	Preparazione ed elaborazione del modello	143
5.4.1.2	Interazione con i modelli di anastilosi	143
6:	Conclusioni	147

ABSTRACT

Questo percorso di tesi si sviluppa intorno al concetto di documentazione del patrimonio architettonico e archeologico della Città di Hierapolis in Turchia, attraverso un approccio multidisciplinare. I diversi contributi, che abbracciano i campi come l'archeologia e la geomatica, sono stati essenziali per condurre un progetto unitario basato sulla volontà di supportare le analisi archeologiche con le tecniche di rilievo 3D avanzato. Grazie alla collaborazione dei saperi delle diverse discipline e allo studio di fonti bibliografiche, abbiamo acquisito una maggiore consapevolezza della Città antica di Hierapolis, con particolare attenzione ai Ninfeo dei Tritoni e al Ninfeo del Santuario di Apollo.

Questi monumenti, che fino ad oggi hanno conservato diverse stratificazioni insediative, vengono digitalizzati attraverso l'applicazione degli strumenti della Geomatica, affinché le analisi su di essi possano essere arricchite da un modello scientificamente attendibile, accessibile attraverso le applicazioni di VR (Virtual Reality).

In particolare, per quanto concerne il Ninfeo dei Tritoni, il progetto di digitalizzazione ed elaborazione di un Serious Game ruota intorno all'evento sismico del VII secolo d.C. che, oltre a sancire la definitiva dismissione del Ninfeo,

provoca un crollo del muro di fondo inusuale e degno di analisi approfondite. Si sviluppa in questo caso un progetto di edutainment atto a documentare le vicende storiche del Ninfeo attraverso un virtual tour interattivo nel quale il visitatore vive un'esperienza formativa e ludica che si conclude con una simulazione del crollo del muro di fondo del Ninfeo dei Tritoni.

Il progetto sul Ninfeo del Santuario di Apollo si sviluppa sull'ipotesi della ricostruzione della facciata ipostila che dagli anni novanta è oggetto di studio da ricercatori italiani e internazionali; il nostro auspicio è che tale anastilosi virtuale, formulata sulla base dei dati materiali offerti dalla ricerca archeologica e dell'interpretazione dell'ordine architettonico, possa essere utile alla prosecuzione degli studi da parte degli storici e archeologi.

La particolarità di questo percorso di Tesi risiede nel trovare il giusto equilibrio e compatibilità tra i prodotti della geomatica e gli strumenti di Virtual reality, con la finalità di non compromettere l'alto grado di dettaglio geometrico e il livello di immersività durante questo processo.

E' importante precisare che il nostro progetto di Tesi, che si concentra sulla elaborazione dei dati digitali, è stato reso possibile grazie alla fase di acquisizione dati svolta dai gruppi di ricerca

del Prof. L. Campagna tramite rilievi tradizionali e a quello del Laboratorio di Geomatica del Politecnico di Torino (prof. A. Spanò) che ha reso disponibili i rilievi fotogrammetrici UAV (Unmanned aerial vehicle). I modelli virtuali che derivano da questi contributi, non solo risultano utili alla condivisione del patrimonio storico-archeologico attraverso un Serious Game, ma si prefigurano anche come uno strumento di studio efficace per i professionisti ed esperti.

0. INTRODUZIONE

Il concetto di Patrimonio Culturale e di Accessibilità

Il Patrimonio Culturale

Il **Patrimonio Culturale** è un complesso di beni culturali e paesaggistici che presentano interesse artistico, storico, archeologico, etnoantropologico, archivistico e bibliografico aventi valore di civiltà. (Codice dei beni culturali e del paesaggio, 2002)

I primi segnali di interesse per i concetti di conservazione e restauro dell'architettura e dei monumenti nascono nel tardo XVIII secolo con William Morris e John Ruskin, primi promotori mossi dallo stesso spirito conservativo in contrapposizione con la crescente tendenza di sostituire l'originale con copie. Il loro pensiero rimane isolato fino al 1883 quando si tiene un congresso a Venezia durante il quale architetti e ingegneri cercano un punto di mediazione sul tema del restauro e sulla lettura appropriata dei monumenti. In seguito a questo dibattito, l'attenzione al patrimonio aumenta nel tempo con le "Carte del restauro" che codificano i principi guida per gli interventi di restauro e conservazione (R. Strassoldo, 2008).

Uno dei primi approcci alla documentazione risale al 1931, in seguito alla stesura della Carta di Atene, approvata dal Primo Congresso Internazionale degli

Architetti e dei Tecnici dei Monumenti Storici (A. Spanò, 2019) che detta raccomandazioni rivolte a governi e Stati quali la cura del Patrimonio Architettonico, la definizione di leggi volte a favorire un interesse pubblico e gli investimenti scolastici per incrementare la collettiva consapevolezza dell'importanza del patrimonio artistico. Da un punto di vista tecnico la Carta di Atene rifiuta il concetto di "falso storico" prediligendo un restauro filologico rispetto a quello stilistico, e nel campo archeologico ammette esclusivamente interventi di anastilosi.

Un anno dopo il Consiglio Superiore per le Antichità e le Belle Arti emana la "Carta italiana del restauro", che riprende i capisaldi della Carta di Atene, con l'introduzione del "restauro scientifico" descritta da Gustavo Giovannoni (1873-1947) come una tecnica che prevede l'uso delle più recenti tecnologie durante ogni intervento (R. Strassoldo, 2008).

Durante il periodo postbellico vengono messi in secondo piano alcuni principi delle Carte del restauro per necessità di una celere ricostruzione e per superare il trauma causato dalla II Guerra Mondiale (E. Morezzi, 2016): come ad esempio la città di Milano, che viene distrutta dai bombardamenti conclusi nel 1945, approva nel 1948 un piano di ricostruzione¹ con la finalità di rispondere celermente all'emergenza post bellica,

1: Nel 1948 viene approvato il Piano Regolatore Venanzi che riprende i principi del Piano AR del 1945: come ad esempio riorganizzare il tessuto residenziale, decentrare le aree industriali, aumentare le aree a verde pubblico.

infatti necessità di risollevere la Città causa una violazione del Piano regolatore in termini volumetrici, di azionamento e di concessioni edilizie (LombardiaBeniCulturali).

Terminato il periodo di ricostruzione postbellico riemerge il dibattito sulle corrette pratiche di restauro con la Carta di Venezia, che nel 1964 ribadisce l'importanza storica dei monumenti e pone per la prima volta l'attenzione anche allo spazio urbano che li circonda (R. Strassoldo, 2008).

Nel 1972 viene pubblicata una seconda carta nazionale "Carta italiana del restauro" e i quattro suoi allegati riguardanti l'esecuzione di restauri archeologici, architettonici, scultorei e pittorici. Essa è composta da dodici articoli che definiscono le "norme tecnico-giuridiche che sanciscono i limiti entro i quali va intesa la conservazione, sia come salvaguardia e prevenzione, sia come intervento di restauro propriamente detto" (A. Spanò, 2019).

Durante il Congresso di Amsterdam del 1975 viene approvata la Carta europea del patrimonio architettonico che definisce l'architettura europea come patrimonio condiviso tra tutti i popoli che la compongono. Essa, oltre a riprendere alcuni concetti delle Carte precedenti, pone un'attenzione verso la condivisione alle generazioni future del patrimonio architettonico antico e verso un'architettura contemporanea di qualità in quanto diverrà patrimonio di domani.

Alla stregua di una dirompente urbanizzazione nel 1987 l'ICOMOS Consiglio Internazionale dei Monumenti e dei Siti redige la Carta di Washington incentrata sulle città storiche il cui valore universale è originato da uno sviluppo spontaneo e da un progetto (R. Strassoldo, 2008).

In seguito a queste Carte vengono redatti altri documenti incentrati sui singoli campi di applicazione con l'intento di permettere ai diversi professionisti di applicare i principi della Carta di Venezia (A. Spanò, 2019).

Carte Internazionali	Carte Nazionali
Carta di Atene (1931)	Carta del restauro (1932)
Carta di Venezia (1964)	Carta del restauro (1972)
Dichiarazione di Amsterdam (1975)	Carta del restauro (1987)
Carta di Washington (1987)	

L'Accessibilità

Il concetto di “accessibilità” non ha soltanto un’accezione fisica, intesa come la possibilità di pervenire a un determinato luogo, ma acquisisce anche significati più astratti: si pensi ad esempio alla comprensione, fruibilità e reperibilità di dati. Nel settore del patrimonio culturale architettonico il concetto di accessibilità ricopre un ruolo fondamentale in quanto ha un’importanza decisiva per la formazione dell’uomo. Infatti una maggiore consapevolezza del valore di tale patrimonio permette di rispettarlo anche in vista delle generazioni future (G.H. Brundtland, 1987).

A partire dagli anni '30 è iniziata una campagna di catalogazione e riconoscimento dei beni culturali al fine della loro tutela. Questa attenzione al patrimonio si è progressivamente evoluta fino ad oggi con l’avvento del digitale, che ha portato a miglioramenti in termini di accessibilità ai contenuti, di accessibilità ai luoghi e ha fornito strumenti avanzati atti al miglioramento delle ricerche. L’oggetto digitale costituisce, infatti, una fonte fondamentale per i servizi multimediali e ha un enorme potenziale nel contribuire all’innovazione in settori quali formazione, turismo e ricerca (M.C. Pangallozzi, 2020).

Tuttavia la digitalizzazione non è ancora del tutto in grado di garantire l’accesso a luoghi non fruibili o inagibili per questioni climatiche, geopolitiche, lavorative, fisiche.

L’obiettivo della Tesi

In particolar modo questo percorso di Tesi si sviluppa attorno al nodo che congiunge l’accessibilità e il patrimonio culturale storico attraverso un processo che si sviluppa in diversi passaggi quali: analisi archeologica dell’oggetto, utilizzo della geomatica ai fini di una documentazione avanzata, metodi interattivi di comunicazione dei contenuti acquisiti.

La nostra idea di miglioramento dell’accessibilità consiste nel rendere il patrimonio architettonico e archeologico un contesto interattivo nel quale i visitatori si trasformano in attori (L.Solima, 2012), fornendo loro ulteriori strumenti conoscitivi; inoltre la documentazione digitale in forma di modelli interattivi, come si vedrà, favorisce la collaborazione multidisciplinare tra professionisti.

1. IL RUOLO DELLA DIGITALIZZAZIONE

1.1 Il concetto di Digitalizzazione

Con il termine “digitalizzazione” si indica la conversione di oggetti fisici in forma digitale; questo processo permette nella sua forma più semplice di convertire materiali cartacei, come ad esempio stampe, fotografie e manoscritti, in documenti digitali attraverso la scannerizzazione, per essere in seguito trasferiti su un supporto di memoria. Il passaggio dal cartaceo al digitale implica due macro fasi: la prima consiste nella conversione dei dati in un sistema binario (0 e 1), affinché sia leggibile da un computer, mentre la successiva, nella decodifica del sistema binario attraverso una traduzione in interpretazioni grafiche da visualizzare, per garantire al pubblico la comprensione del suddetto documento (V.T. King, 2016)

Le risorse digitali disponibili al giorno d’oggi sono svariate e sono disponibili in vari formati. Fotografie, video, ambienti di simulazione VR, database, ricostruzioni tridimensionali, modalità multimediali di accesso alle informazioni; (A. Meschini, 2011) questi sono solo alcuni degli esempi di formati digitali che hanno apportato benefici, non soltanto in campo professionale, ma anche al pubblico, in quanto permettono un accesso facilitato ai dati e una loro miglior comprensione. Con l’avvento della rivoluzione informatica

anche il patrimonio culturale ha subito una digitalizzazione; questo nuovo approccio ha portato al perfezionamento, non soltanto sotto il punto di vista della valorizzazione dei beni, ma fornisce anche strumenti più efficaci per la salvaguardia di essi.

1.2 I limiti dell’oggetto fisico

Il patrimonio culturale, in qualità di elemento fisico, subisce diverse tipologie di degrado, le quali sono dovute a numerosi fattori, come ad esempio: inquinamento, attacchi chimici, attacchi meteorologici, cambiamenti climatici, cataclismi ecc. Questi deterioramenti dell’oggetto fisico, alterando la parvenza dell’oggetto, ne riducono la leggibilità e, nei casi più gravi, provocano problemi strutturali che ne negano o limitano l’accessibilità (Raccomandazioni NorMaL, 1990). Nell’immagine sottostante è possibile osservare il deterioramento di un monumento causato dall’usura del tempo e dalle piogge acide.

Fig. 1.1: Esempio di degrado causato dall’usura e dalle piogge acide su statua in Westphalia



Un ulteriore tipo di degrado è quello legato alla fruizione del bene, ovvero la messa a rischio dello stato di conservazione del patrimonio attraverso l'accesso ai beni da parte del pubblico; evitare questo tipo di deterioramento può portare benefici ma può anche essere uno svantaggio, in quanto l'accesso ai beni culturali è un principio fondamentale per conoscerli e mantenere vivo l'interesse da parte dell'opinione pubblica nei confronti della tutela del patrimonio. Questo dato di fatto è stato rimarcato anche dall'organizzazione mondiale dell'UNESCO:

“the growing desire of the public to know and appreciate the wealth of the cultural heritage, of whatever origin, has nevertheless led to an increase in all the dangers to which cultural property is exposed as a result of particularly easy access or inadequate protection” (UNESCO, 1978).

Un celebre esempio è l'Esercito di terracotta in Cina, conservato all'interno di un mausoleo a partire dal 1979 con l'obiettivo di garantirne la fruizione. La difficoltà che si incontra nella salvaguardia di questo patrimonio è l'errata progettazione del sistema di controllo ambientale all'interno della struttura con conseguente danneggiamento di alcune delle statue appartenenti all'esercito di terracotta causato da fessurazioni

provocate dagli agenti inquinanti presenti nell'aria (J.Cao, H. Li, J. C. Chow, J. G. Watson, S. Lee, B. Rong, J. Dong, K. Ho, 2011).

Visto che il patrimonio culturale è soggetto ai degradi sopra citati, è costantemente soggetto a lavori di manutenzione ordinaria e straordinaria.

Le opere di restauro implicano allestimenti di cantieri che spesso occultano la vista del bene e limitano il percorso di visita; un noto esempio è il ripristino delle facciate esterne del Battistero di San Giovanni e quello del Duomo a Firenze che, a causa del cantiere di restauro, sono rimaste a lungo coperte dalle impalcature.

Per ovviare a questo ostacolo, è stata creata un'esperienza audiovisiva di quindici minuti chiamata “Duomo experience”, volta a sostituire e integrare l'esperienza di visita da parte del pubblico (Redazione Nove da Firenze, 2014).

Fig. 1.2: Esercito di terracotta - Cina



Fig. 1.3: Battistero di San Giovanni - Firenze



Un altro fattore che limita l'accessibilità, soprattutto per le persone con disabilità, è la difficoltà in alcuni contesti di installare dispositivi atti ad eliminare le barriere architettoniche. Nel caso di Pompei, per esempio, ai visitatori con problemi motori non è possibile garantire un'esperienza di visita completa principalmente a causa della natura dell'area archeologica che non permette l'installazione di percorsi idonei al passaggio delle persone dotate di dispositivi ausiliari; a loro è stato dedicato un percorso alternativo, all'interno del quale, però, vi sono ulteriori limitazioni, quali: pendenze di alcune rampe superiori all'8%, mancanza di battiruota lungo i marciapiedi e gli attraversamenti, passaggi a larghezza limitata per due sedie a rotelle (Scavi di Pompei, 2018). Anche nel caso di una corretta installazione di questi dispositivi, uno dei principi del restauro è l'esecuzione di un intervento non invasivo (E. Morezzi, 2016) e spesso l'installazione di ausili per le persone con disabilità risulta difficilmente integrabile

con questo principio.

Fig. 1.4: Installazione dispositivi per disabili - Pompei



Inoltre l'accessibilità alla totalità dei beni conservati nei musei è spesso limitata dalla capacità dello spazio disponibile, specialmente per quanto riguarda i musei più celebri; alcuni esempi sono il Victoria and Albert Museum, che riesce a garantire l'accessibilità per un numero limitato di opere esposte (circa il 24%), il British Museum, con una percentuale che scende solamente allo 0,5% (L.Gardner, 2009) e la Berlinische Galerie con una percentuale del 2% della sua collezione totale, il cui direttore Thomas Köhler afferma "*We don't have the space to show more*" spiegando che il museo ha una superficie di 1200 metri quadrati nella quale esporre opere ottenute nei decenni attraverso acquisti e donazioni, fenomeno che si verifica in molti altri musei del mondo (K.B.Bradley, 2015).

Questi esempi mettono in luce la difficoltà di molti musei nell'esporre le proprie opere, con la conseguente necessità di effettuare sia una selezione di opere

significative per il pubblico sia una scelta di quante opere mostrare al pubblico in relazione allo spazio espositivo; pertanto, se da un lato l'abbondanza di materiale da esporre è un pregio poiché consente di rinnovare costantemente gli spazi espositivi, dall'altro implica l'estrema difficoltà di alcune opere minori di essere mostrate ai visitatori e agli studiosi.

1.3 I prodotti digitali

Tutte le suddette questioni sono proprie di un oggetto reale, e quindi vulnerabile; tuttavia, sono necessarie a una condivisione e conservazione del patrimonio culturale.

L'intento di questo elaborato di tesi è proprio quello di proporre un supporto alternativo che garantisca un'esperienza non sostitutiva, ma complementare e valorizzante, in risposta alle problematiche in precedenza esposte, così come propongono le riflessioni della letteratura in questo ambito (Solima, 2009).

Prendendo in considerazione un elemento digitalizzato, possiamo osservare come esso sia svincolato da tutti i problemi sopra citati, in quanto non presenti limiti di accessibilità: esso infatti, non risente di limiti legati alla disponibilità di spazio fisico per l'archiviazione e per l'accesso da parte del pubblico; infatti, guardando le evoluzioni dei dispositivi avvenute nel corso degli anni, possiamo notare come

la loro capacità di archiviazione sia aumentata al contempo della riduzione delle loro dimensioni fisiche. Gli eBook ad esempio consentono di essere memorizzati all'interno di dispositivi tascabili, in contrapposizione ai libri cartacei che invece necessitano di biblioteche o archivi per poter essere immagazzinati. In parallelo a questo discorso vi è quello legato alla fruibilità di un dato oggetto. Un oggetto digitale è in grado di essere consultato da un vasto numero di utenti. Si pensi alle visite nei musei, che per svariate questioni ad esempio legate alle normative sulla sicurezza, al coevo problema pandemico, problemi Geopolitici, atmosferici, il volume che occupano le opere stesse, garantiscono un accesso limitato. Viceversa, una risorsa digitale, server permettendo e disponibilità della rete internet, oltre a non avere problemi legati ai limiti degli spazi espositivi, potenzialmente garantisce l'accesso a un numero illimitato di persone. La risorsa digitale, per i non professionisti, è utile inoltre a coprendere meglio un oggetto, in quanto questo può essere reso più facilmente leggibile attraverso rappresentazioni semplificate e indirizzate affinché venga trasmesso un preciso messaggio, alleggerito di parte delle nozioni tecniche e specifiche che risulterebbero superflue agli occhi di un

pubblico vasto e non specializzato.

Il fotoinserimento di un rendering archeologico, ad esempio, è uno strumento spesso utilizzato per mostrare al visitatore una ricostruzione semplificata del manufatto, senza quindi evidenziare quei passaggi tecnici che hanno portato al risultato finale.

Questi vantaggi non sono solo indirizzati a un pubblico generico ma permettono anche agli specialisti di effettuare i lavori di ricerca senza dover spostare, compromettere e maneggiare la risorsa (J. Hindmarch, 2015). Un esempio comune, che si discosta dal campo architettonico e archeologico, si può individuare nella medicina, dove il ricorso a strumenti come la tomografia computerizzata e la radiografia, permettono di ottenere informazioni utili all'operazione senza dover intervenire in modo invasivo sul corpo del paziente.

Il digitale ha anche permesso la cooperazione e collaborazione di diverse figure professionali ai fini di un progetto unitario (A.Meschini, 2011). In seguito alle recenti necessità di distanziamento sociale si sono sviluppate numerose piattaforme per la comunicazione in remoto, che si sono rivelate strumenti efficaci per la realizzazione di progetti.

Una efficace comunicazione multidisciplinare non è sufficiente a

garantire il corretto svolgimento delle analisi, è infatti necessario possedere un oggetto digitalizzato, che sia leggibile dalle diverse figure partecipanti al progetto. Tramite il ricorso a questi strumenti e mezzi, i progettisti riescono a ricavare nuove informazioni che con tecnologie tradizionali non sarebbero in grado di ottenere (J. Hindmarch, 2015). Nel settore archeologico, ad esempio, l'adozione di diverse tecniche della geomatica permette l'ottimizzazione dei tempi e costi della raccolta di dati e delle analisi su un dato oggetto e facilita, inoltre, la condivisione delle informazioni tra i vari soggetti cooperanti.

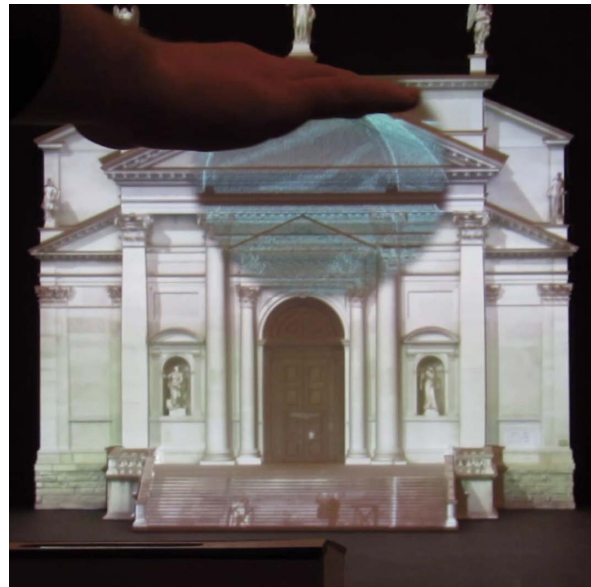
L'oggetto digitale non è solo da intendersi come elemento visualizzabile attraverso un monitor e conseguentemente non tangibile, ma può assumere anche l'accezione di replica fisica. Essa infatti è spesso utilizzata per sostituire l'opera originale, che viene conservata all'interno di caveau, aggiungendo informazioni e modificando il modo in cui l'utente si approccia all'opera stessa. I musei ad esempio possono avvalersi di copie per introdurre il visitatore a un'esperienza tattile più interattiva, nello specifico nel caso dei soggetti ipovedenti e non vedenti, come dimostrato nella ricerca di M. Neumüller del 2014 (C.Barbiani, F.Guerra, T.Pasini, 2018).

Inoltre, i modelli permettono di superare anche la “natura statica” dell’oggetto reale, che è confinato a uno specifico periodo storico: nel caso della Città di Venezia, infatti, grazie alla collaborazione tra il laboratorio di fotogrammetria della luav, Università di Venezia, e il gruppo Visualizing Venice è stato riprodotto un modello in scala stampato in 3D che è servito da supporto per un videomapping 3D, permettendo di illustrare a un pubblico generico le trasformazioni storiche della città nel corso del tempo (M.Ballarín, C.Balletti, P.Vernier, 2018).

Fig. 1.5: Stampa 3D della Basilica del Redentore - Venezia



Fig. 1.6: Controllo manuale del videomapping



L'utilizzo di modelli 3D digitalizzati consente inoltre la collaborazione multidisciplinare tra più figure professionali, garantendo così uno studio approfondito sui manufatti. Nella città di Torino, ad esempio, sono presenti numerosi edifici, eretti nel XX Secolo, prevalentemente in calcestruzzo armato, che necessitano di piani di conservazione per contenere il loro deterioramento.

Il Laboratorio di Geomatica del Politecnico di Torino ha realizzato un modello tridimensionale derivato dall'integrazione di fotogrammetria aerea, di scansioni LiDAR (*Light Detection and Ranging*) e di MMS (*Mobile Mapping System*) dei saloni B e C del Palazzo di Torino Esposizioni, utili alle analisi sismiche e strutturali (P.

P. Assali, V. Poitevin, J.F. Hullo, E. Smigiel, 2011).

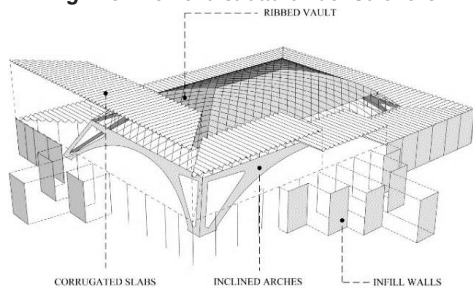
L'obiettivo delle ricerche è la stesura di un piano di conservazione (CP) sviluppato attraverso lo studio dello stato di fatto e l'analisi delle strutture delle Sale Espositive (B e C) finalizzato al retrofit, riuso e alla conservazione. (Ceravolo et al., 2020).

Fig. 1.7: Sale Espositive di Luigi Nervi del Palazzo di Torino Esposizioni



Il modello generato ha permesso di verificare lo spessore della copertura, le deformazioni causate dal tempo e dall'ampia luce della campata, e il comportamento dei materiali.

Fig. 1.8: Elementi strutturali del Salone C



Le deformazioni calcolate sono confermate dagli output generati dal modello fotogrammetrico come il DSM (Digital Surface Model), dove è possibile

notare una deformazione in corrispondenza dell'estradosso della lamiera grecata. (G. Sammartano, G. Patrucco, S. Perri, R. Ceravolo, E. Lenticchia, A. Spanò, 2021).

Fig. 1.9: Sezione longitudinale del modello 3D (UAV + LiDAR)

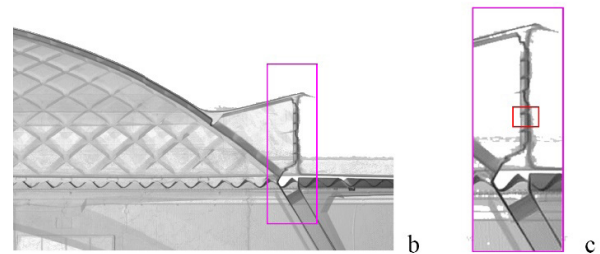
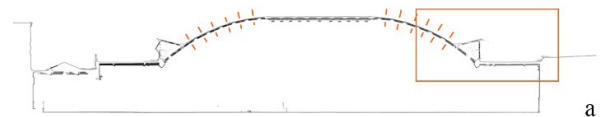
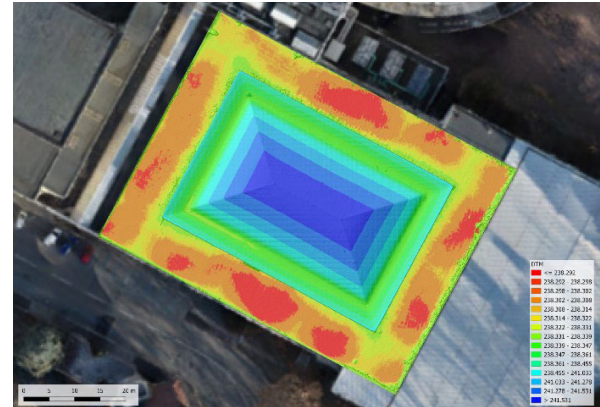


Fig. 1.10: DSM generato da UAV con sfondo Ortofoto, in evidenza il range di altezze per segnalare la deformazione in corrispondenza della lamiera grecata.



Questo progetto rappresenta un esempio di modello 3D contenente informazioni provenienti da diverse figure professionali, utili alla salvaguardia e condivisione delle strutture appartenenti al patrimonio architettonico contemporaneo della città di Torino (ICOMOS, 2017).

Come detto non solo l'esperienza digitale ha portato miglioramenti sia in campo professionale, sia nei gesti comuni della vita quotidiana, ma si è rivelata indispensabile rendendo "l'analogico" quasi totalmente obsoleto, ad esempio per quanto concerne il metodo di comunicazione. In quanto risulta più immediato lo scambio di informazioni tramite sistemi digitali avanzati.

Alla digitalizzazione tuttavia sono associati anche aspetti negativi: in primis le memorie di archiviazione nelle quali vengono salvati i file digitali, sono soggette ad obsolescenza, legata sia al processo di fabbricazione della memoria stessa, sia alla natura fisica del supporto che inevitabilmente si deteriora nel tempo provocando errori di lettura e una conseguente perdita dei dati (S.Allegrezza, 2015).

Un altro esempio di archiviazione dei file digitali è il salvataggio su "Cloud", che consiste nel non utilizzare dischi di archiviazione personale, tuttavia, oltre a non risolvere il problema dell'obsolescenza, introducono un ulteriore problema legato alla sicurezza dei dati che vengono infatti archiviati su dischi di terzi. Negli ultimi decenni sono nati numerosi software che spesso sostituiscono quelli precedenti e vengono inoltre ogni anno aggiornati; questo

provoca un fenomeno di obsolescenza legato alle versioni dei programmi e ai formati di salvataggio. Tutto ciò rende estremamente difficile analizzare i contenuti dei file e garantire interoperabilità tra i sistemi (M.Gaiani, B.Benedetti, F.I.Apollonio, 2011).

Dal punto di vista economico subentrano problematiche legate a disuguaglianze materiali e socio-culturali che limitano l'individuo nello svolgimento di un ruolo partecipativo nella società odierna (P.Amerio, 2018) infatti si è sempre più dipendenti da dispositivi elettronici per svolgere anche le azioni più comuni (K.Żyła, J.Montusiewicz, S.Skulimowski, R. Kayumov, 2020), tuttavia non tutti hanno le possibilità economiche per accedere a queste risorse, rimanendo così in una condizione di emarginazione sociale.

Infine, per quanto concerne il patrimonio culturale e archeologico, l'oggetto digitale è da intendersi come uno strumento rappresentativo dell'oggetto reale e non sostitutivo, in quanto attualmente non è in grado di coinvolgere tutti i sensi dello spettatore; pertanto la funzione di "rappresentante" del reale è limitata a determinati campi applicativi come ad esempio quelli di studio, visualizzazione e promozione¹.

1: cfr cap 4-5

2. LA CITTÀ ANTICA DI HIERAPOLIS

2.1 Hierapolis: Storia e Territorio

Epoca ellenistica e prima età imperiale

Hierapolis è una città ellenistico romana situata nel distretto di Pamukkale, appartenente all'attuale provincia di Denizli. Essa fu fondata in epoca ellenistica nel III sec a.C. nella zona della grotta del Plutonio dove fu successivamente edificato il Santuario di Apollo (F.Silvestrelli, 2000). Nonostante le scarse testimonianze archeologiche sul periodo più antico, quelle pervenute consentono di identificare la struttura della città caratterizzata da una lunga plateia orientata a NO-SE costeggiata da nove strade parallele secondarie, in greco "stenopoi", e da altre trentacinque in direzione perpendicolare (F.D'Andria, 2007). La porzione occidentale della città si imposta su un terreno pianeggiante avente quota 260-370 m s.l.m. che vede ad ovest un ripido pendio, oggi connotato da sedimentazioni calcaree divenute "genius loci" in epoca moderna, mentre nel fronte orientale vede un pendio collinare (G.Scardozi, 2007). Altre conferme, di natura archeologica, derivano da ritrovamenti quali un rilievo marmoreo raffigurante una scena di caccia e alcuni frammenti ceramici (G.Semeraro, 2007), infine le tombe a tumulo associabili a questa epoca (F.D'Andria, 2003).

Tuttavia non sono presenti fonti che determinino precisamente i confini della città in epoca ellenistica a causa dell'assenza di una cinta muraria che viene infatti eretta solo agli inizi del V sec d.C. che molto probabilmente segue i limiti ipotizzabili dell'epoca suddetta (P.Verzone, 1977).

Età imperiale

Una prova che questo impianto urbano appartenga all'epoca ellenistica è dimostrata dalla ricostruzione di Hierapolis, in seguito al terremoto nella prima età imperiale del 60 d.C., basata su un impianto già definito nelle forme (P.Verzone, 1977).

Nella città sono stati eretti diversi monumenti tra l'epoca augustea (27 a.C – 14 d.C.) e la metà del I sec d.C., come ad esempio l'Agorà Civile, la Porta Monumentale in marmo "Porta Bella" e in epoca giulio claudia (27 a.C - 68 d.C.) il Ninfeo del Santuario di Apollo e il Teatro al centro della città assumono il loro aspetto definitivo (F.D'Andria, 2003).

In seguito al terremoto sopra citato del 60 d.C., la città di Hierapolis subisce trasformazioni nel centro della città che tuttavia mantengono l'impianto originario, e espansioni della plateia, costeggiata da edifici con fronte unificato in travertino e semicolonne con fregio di

ordine dorico, con due porte onorarie agli estremi (P.Verzone, 1977). Le opere di monumentalizzazione riprendono nella prima metà del II secolo d.C. verso nord provocando una grande espansione di Hierapolis in questa direzione (F.Silvestrelli, 2000).

In questo periodo probabilmente fu eretto il Castellum Acquae sulla collina a est della città, avente funzione di distribuzione delle acque agli edifici della città tramite tubature in terracotta che correvano lungo i margini degli stenopoi (F.D'Andria, 2003).

Tra il II e il III sec d.C. vengono eretti numerosi edifici tra i quali il celebre Ninfeo dei Tritoni (P.Verzone, 1978a).

Età proto-bizantina

Non si è a conoscenza di dati relativi ulteriori espansioni di Hierapolis nel corso del IV sec d.C., ma a questo periodo risale un altro importante evento sismico che ha portato a lavori di rifunzionalizzazione e risanamento che proseguono anche nel V sec d.C., periodo in cui la città cambia drasticamente il suo aspetto in una "hierapolis cristiana", mantenendo tuttavia l'impianto urbano originario a maglia ortogonale (F.D'Andria, 2001). Inoltre viene eretta la cinta muraria che, come descritto in precedenza, circonda gran parte della città imperiale romana, escludendo quindi

gran parte dei monumenti danneggiati dal terremoto del IV sec d.C. i cui materiali vengono reimpiegati per la costruzione delle fortificazioni e nuove costruzioni, come ad esempio il Teatro Nord che fu completamente demolito (F.Silvestrelli, 2000) e il Ninfeo del Santuario di Apollo che fu smantellato (P.Arthur, 2006).

Tra il IV e il V secolo il Martyrion di S.Filippo, destinazione per i pellegrini dell'Asia minore, sorge su un'area in precedenza occupata dalla Necropoli NE (P.Verzone, 1977). Per garantire l'accesso a questo edificio viene costruita una strada che rappresenta l'unico elemento in contrapposizione con la maglia ortogonale esistente in precedenza (G.Scardozi, 2004).

Durante questo periodo alcune insulae abitative subiscono ristrutturazioni e mantengono la loro funzione.

(F.Silvestrelli, 2000)

A cavallo tra il V e il VI sec d.C. lungo la plateia principale vengono eretti i due edifici religiosi più importanti di Hierapolis, la Cattedrale con il Battistero, la Chiesa a pilastri e altri edifici di culto minori come la basilica a tre navate, anch'essa inserita compatibilmente al tessuto urbano preesistente (G.Ciotta, L.Palmucci 2002). Inoltre in questo periodo viene eretto un complesso termale nella parte Nord della città sui resti dell'*Agorà* Settentrionale,

dal momento che la città ne era priva (F.Silvestrelli, 2000).

Età medio-bizantina

Nella metà del VII sec d.C. un nuovo terremoto colpisce la città di Hierapolis che subisce un forte declino e un calo demografico causando un parziale abbandono di molti edifici che non vengono più ricostruiti o restaurati (F.D'Andria, 2003). Vengono tuttavia eretti sulle macerie alcuni nuclei di abitazioni e edifici di culto che si discostano dal tessuto urbano preesistente (P.Verzone, 1978b). Inoltre in questo periodo la cinta muraria, in seguito al terremoto, perde la sua funzione (F.D'Andria, 2003).

Anche la viabilità, per via di strutture costruite da privati con materiali di spolio, viene alterata drasticamente e l'impianto idrico ad essa correlato danneggia definitivamente (P.Arthur, 2006).

La restante superficie urbana si ruralizza e viene convertita a pascolo e coltivazione (R.Chandler, 1775).

Fino all'XI secolo vengono erette abitazioni medio-bizantine in adiacenza ad alcune strutture come il Santuario di Apollo, il Ninfeo dei Tritoni e il Castellum Acquae (F.Silvestrelli, 2000).

Età selgiuchide

Tra il XI e XII sec d.C. l'area su cui sorge la città di Hierapolis viene contesa tra Bizantini e Turchi e nella prima metà del XII sec d.C. passa definitivamente al dominio selgiuchide (P.Verzone, 1978b). In questo periodo (XII e XIII secolo d.C.) alcune aree della città vengono progressivamente abbandonate, ma vengono erette alcune strutture a scopo militare in posizioni strategiche come la c.d. Fortezza Selgiuchide.

Nel 1385 d.C. termina il periodo cristiano a Hierapolis, con un conseguente abbandono definitivo della città, ulteriormente aggravato dal terremoto del 1354 d.C. (F.Silvestrelli, 2000)

Età ottomana

La città nei periodi successivi diventa meta di nomadi e pastori che fino alla prima metà del '900 costruiscono abitazioni e ricoveri riutilizzando materiali antichi, impiegati anche per interventi antropici di restauro eseguiti sui canali per garantire l'affluenza delle acque. (F.Silvestrelli, 2000)

Fig. 2.1: Hierapolis in epoca ellenistica e primo-imperiale

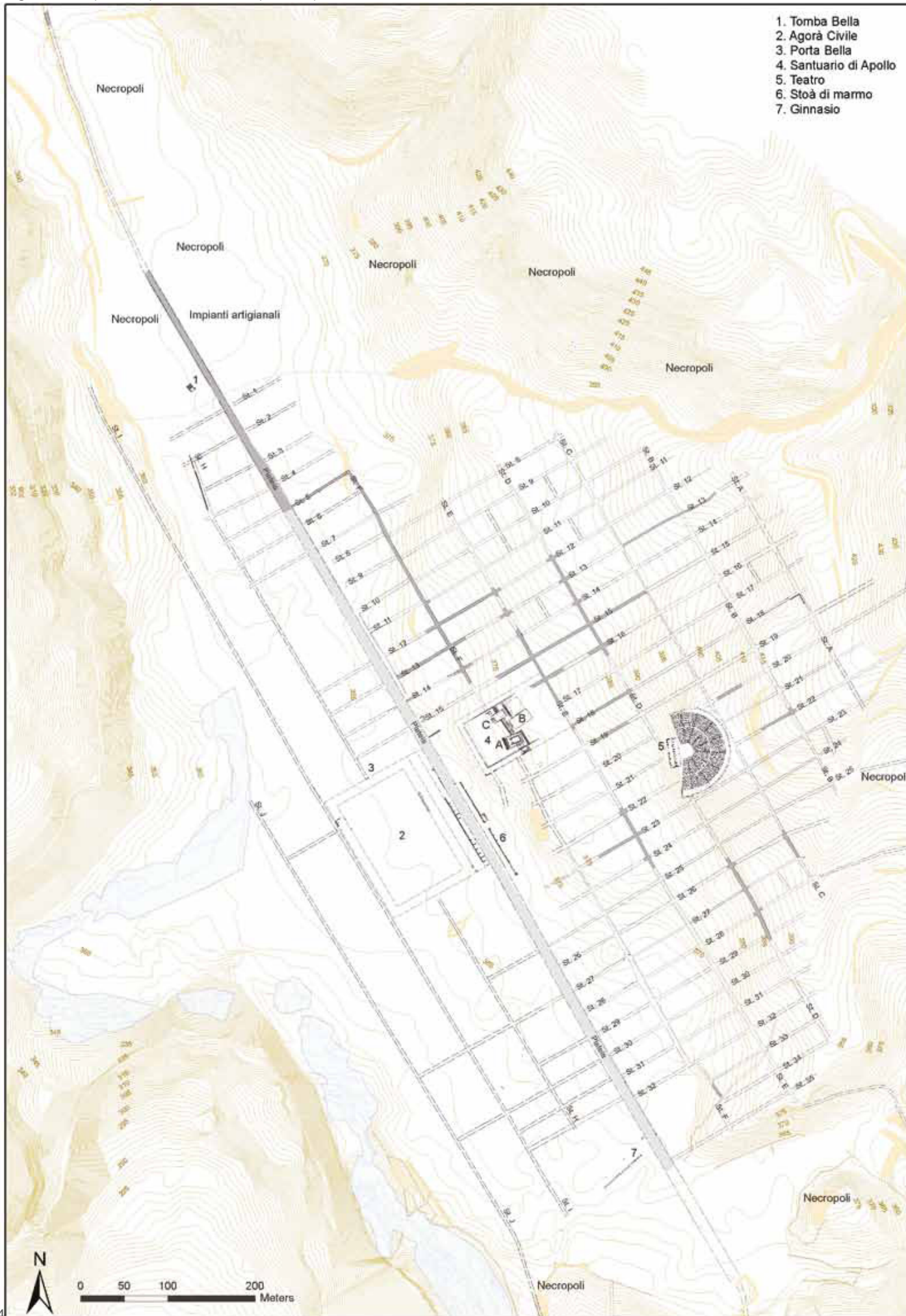


Fig. 2.2: Hierapolis nella piena età imperiale (età flavia - IV sec. d.C.).

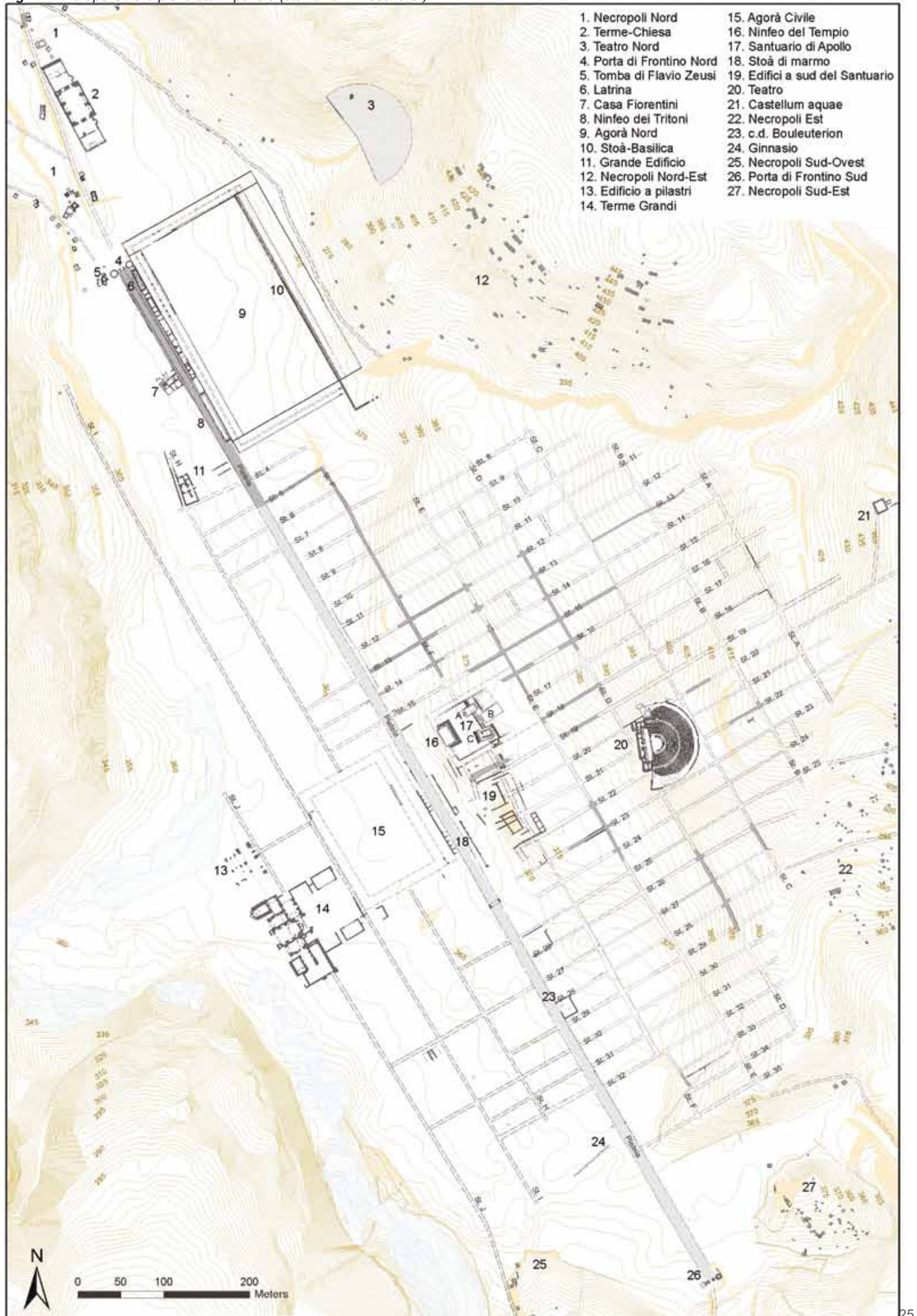


Fig. 2.3: Hierapolis in epoca proto-bizantina.

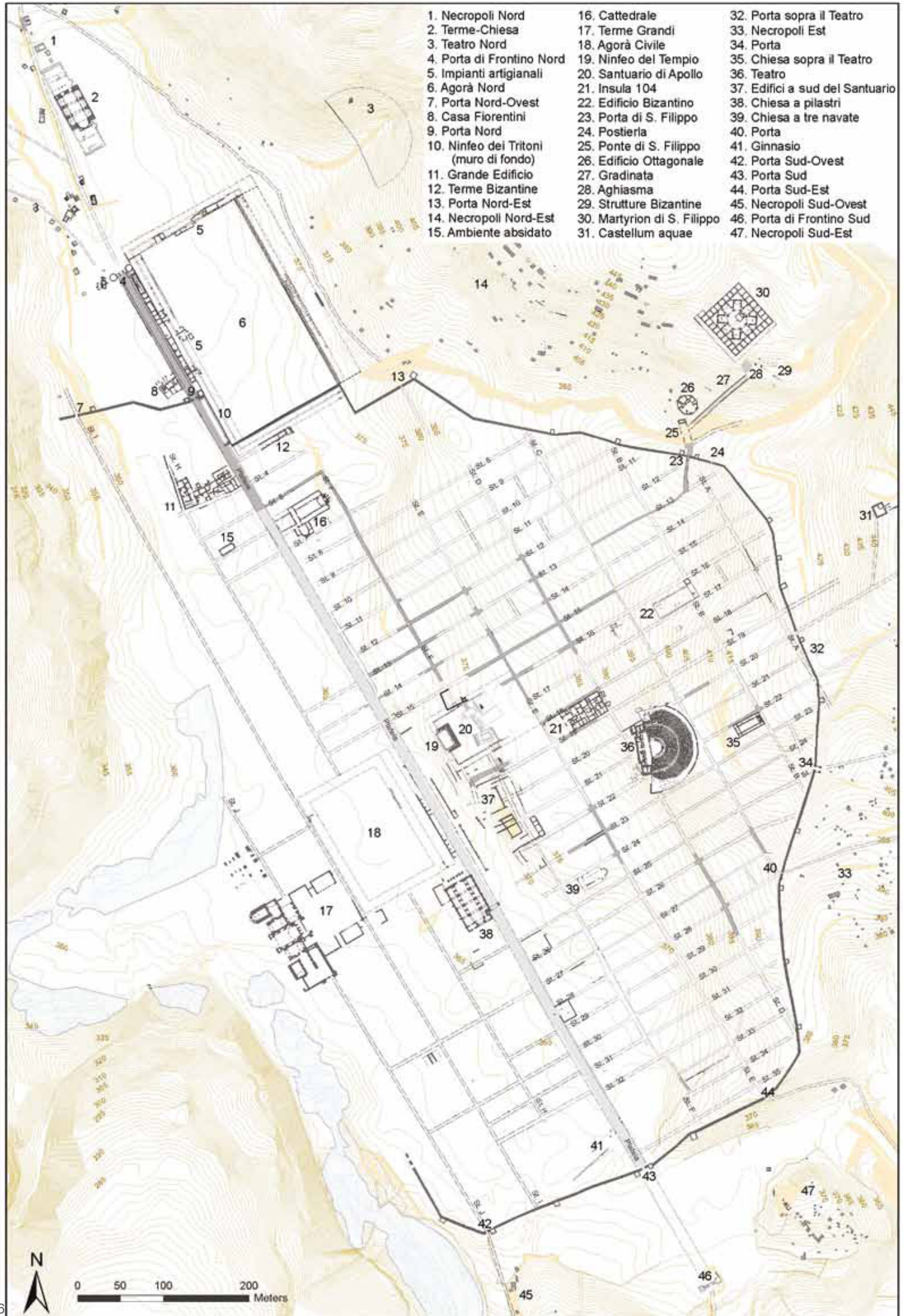
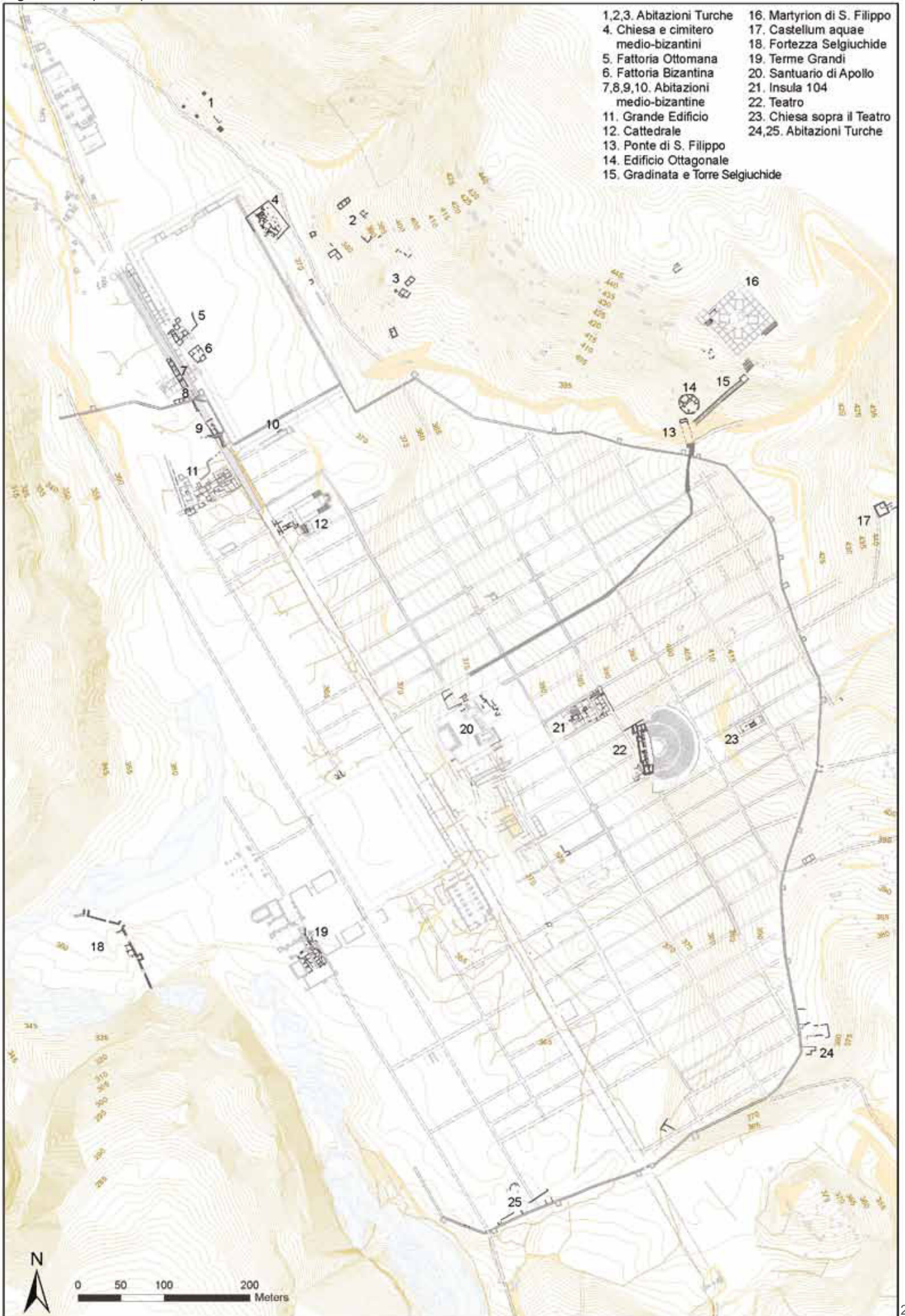


Fig. 2.4: Hierapolis dopo la metà del VII sec. d.C.



2.2 Storia delle ricerche sul Ninfeo dei Tritoni e il Ninfeo del Santuario di Apollo

Il Ninfeo dei Tritoni

Ubicazione e inquadramento generale

Il Ninfeo dei Tritoni (in figura 2.8, numero 1) è una fontana monumentale ubicata nel lato sud-ovest dell' *Agorà Nord* (in figura 2.8, numero 2) e lungo il lato nord-est della *plateia*, strada principale della Città.

Fig. 2.5: Rielaborazione fonte satellitare di Hierapolis



Il Ninfeo dei Tritoni è formato da una vasca avente lato maggiore pari a 56,9 m, lungo cui si sviluppa una facciata ipostila organizzata in tre ordini architettonici, accostata a un muro retrostante delimitato ai suoi due estremi da avancorpi rettangolari.

La vasca è delimitata posteriormente e lateralmente da un basamento continuo che sostiene il colonnato del primo ordine,

marmo costituita da cinque esedre semicircolari.

La lunghezza del Ninfeo è pari a 64,9 m. (L. Campagna, 2018).

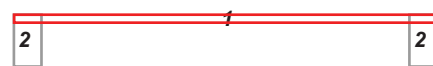
Fig. 2.6: Elementi architettonici Ninfeo dei Tritoni



- 1) Basamento continuo
- 2) Balaustra con cinque esedre semicircolari
- 3) Vasca Ninfeo
- 4) Muro di fondo

Il Ninfeo dei Tritoni viene eretto in Età Imperiale, esattamente in tarda età severiana (II - III d.C.) (F.D'Andria et al, 2008) tuttavia il suo muro di fondo appartiene a una struttura più antica, la *Stoà Ovest*.

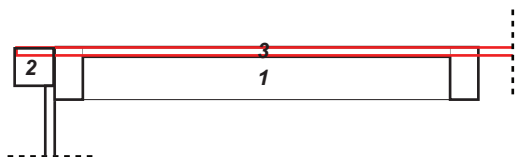
Fig. 2.7: schema dei blocchi principali del Ninfeo



- 1) Muro di fondo *Stoà Ovest*
- 2) Avancorpi Ninfeo

In età bizantina (IV - XV d.C.) viene eretta la Porta Bizantina Nord, addossata con la sua torre orientale alla parete esterna dell'avancorpo settentrionale del Ninfeo e il suo muro di fondo assume valenza di cinta muraria.

Fig. 2.8: schema concettuale delle trasformazioni bizantine



Schema concettuale

- 1) Ninfeo dei Tritoni
- 2) Torre orientale Porta Nord
- 3) Cinta muraria e muro di fondo

Le ricerche archeologiche sul Ninfeo

Nel 1887, durante la Spedizione dell'Istituto Archeologico Tedesco, il Ninfeo dei Tritoni viene rappresentato in una planimetria a piccola scala, contenuta all'interno del volume *Altertümer Von Hierapolis*, nel quale è presente inoltre una breve descrizione degli avancorpi del monumento.

Nei primi anni '90 la Missione Archeologica Italiana esegue dei saggi nell'area interessata dal crollo del muro di fondo.

Fig. 2.9: veduta del Ninfeo prima degli scavi - evidenziata in rosso l'area interessata dello scavo



L'identificazione del monumento come Ninfeo si attribuisce alle pubblicazioni di P. Verzone e D. De Bernardi Ferrero. A partire dal 1994 le ricerche su Hierapolis, promosse e condotte da F. D'Andria, includono, per la prima volta, anche il Ninfeo dei Tritoni.

Fino al 2001 vengono eseguiti otto scavi sull'area che insiste sul Ninfeo, inclusa l'area di crollo del muro di fondo e l'area occidentale della Via di Frontino.

Prima delle campagne di scavo quest'area risulta parzialmente coperta a causa di stratificazioni superficiali di terra e calcare. Questi scavi, nonostante la difficoltà causata dalla mole di calcificazioni calcaree, hanno permesso di portare alla luce stratificazioni archeologiche dovute a diversi insediamenti susseguitisi dal VII sec. fino all'età moderna (L. Campagna, 2018).

Nel 1994 la demolizione delle calcificazioni calcaree e dei canali passanti lungo la vasca ha permesso di scoprire i blocchi crollati della facciata marmorea del Ninfeo. Tra il 2001 e il 2004, durante gli scavi eseguiti per gli studi della facciata marmorea, vengono rinvenuti quattro dispositivi di immissione dell'acqua per alimentare la vasca¹.

Dagli anni 2000 l'area è stata risistemata parzialmente per garantire una migliore leggibilità, in particolare, nel 2003, sono stati riposizionati i blocchi della balaustra marmorea che delimitano frontalmente la vasca (L. Campagna, 2018).

Le fasi insediative

Gli scavi sull'area del Ninfeo dei Tritoni hanno evidenziato stratificazioni appartenenti al periodo compreso tra il terremoto del IV secolo d.C. e l'età moderna.

Lo studio dei dati degli scavi precedentemente trattati è stato condotto da F. Silvestrelli (L. Campagna, 2018), che riconosce cinque fasi insediative nell'area del Ninfeo dei Tritoni.

Fase 1: IV sec d.C. - VII sec d.C.

Questa prima fase comprende due eventi significativi per la trasformazione dell'impianto urbano e monumentale della città, il primo è il terremoto del IV secolo d.C. e il secondo è la costruzione

¹: cfr pp. 32-33.

della cinta muraria bizantina tra il IV e il V secolo d.C.

Il terremoto del IV secolo causa il crollo del terzo ordine della facciata marmorea del Ninfeo, che non viene più ricostruita, e danni all'impianto idrico e alla vasca, che vengono invece ripristinati.

Durante la costruzione delle mura bizantine il Ninfeo viene inglobato all'interno della cinta muraria, non per ragioni strategiche e strutturali, infatti il muro di fondo del Ninfeo non ha una conformazione adatta alla difesa, ma per ragioni ornamentali e funzionali.

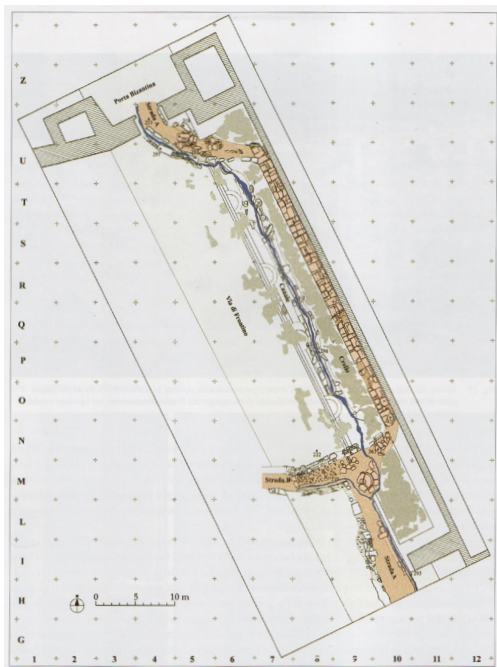
Un secondo terremoto del VII sec. d.C. colpisce la città di Hierapolis, causando la distruzione totale del Ninfeo dei Tritoni, tuttavia il suo funzionamento è cessato prima di questo evento sismico.

Fase 2: VII sec d.C. - VIII sec d.C.

In seguito al disastroso terremoto del VII secolo, la vasca e la plateia vengono occupati dai blocchi crollati della fronte ipostila e della balaustra del Ninfeo e assumono una funzione di scarico dei rifiuti relativi, forse, a operazioni di ripulitura della parte opposta della plateia. Successivamente, la plateia e i blocchi caduti vengono ricoperti totalmente da strati di accumulo portati dal vento. Viene così realizzata una strada al di sopra dello strato di accumulo, che prosegue il percorso

della Porta Bizantina Nord (strada A), una seconda strada viene realizzata verso ovest all'altezza dell'essedra meridionale (strada B), come in figura 2.10, entrambe le strade sono delimitate da muretti costruiti con materiale di riempiego (L. Campagna, 2018).

Fig. 2.10: Rielaborazione planimetrica. Fase 2



Fase 3 IX sec d.C. - X sec d.C.

Nell'epoca medio-bizantina le due strade precedentemente citate (A e B) vengono ancora utilizzate e vengono costruite in prossimità di queste, sul versante occidentale, tre complessi abitativi costruiti in parte con materiale di spolio del Ninfeo e della Porta Nord. Anch'esse insistono sullo strato di accumulo formatosi nei secoli precedenti.

Non si ha una data precisa riguardo la costruzione e l'abbandono di questi complessi ma, per via indiretta, si può indicare, grazie allo studio di abitazioni ierapolitane aventi caratteristiche simili, una fascia temporale tra il IX e X secolo (L. Campagna, 2018).

Fig. 2.11: Rielaborazione planimetrica. Fase 3

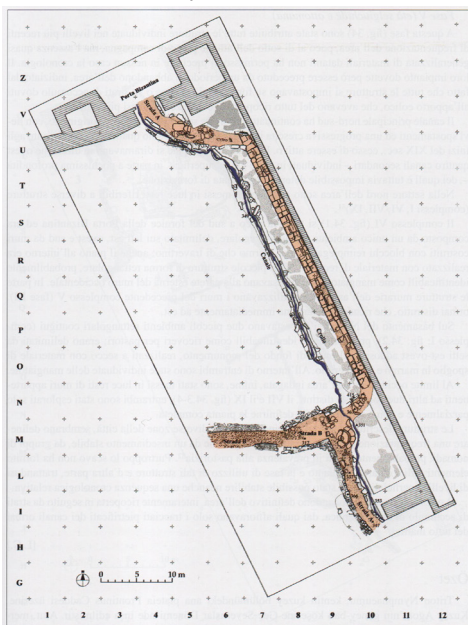


Fase 4 tardo XII sec d.C.

In seguito allo stato di abbandono, nel XII secolo si ha traccia di un nuovo insediamento testimoniato dal ripristino di una delle due strade preesistenti (Strada A). L'andamento del percorso viene ritracciato utilizzando materiali di reimpiego del Ninfeo. Le aree a ovest del canale e lungo le due strade (A e B) si presuppone siano ad uso agricolo poichè non son stati rinvenuti altri reperti relativi a questo periodo.

Questa fase si conclude con un ulteriore periodo di abbandono evidenziato dalla presenza di sedimenti calcarei rinvenuti sulla superficie della strada A, che ne dimostrano l'inutilizzo (L. Campagna, 2018).

Fig. 2.12: Rielaborazione planimetrica. Fase 4

**Fase 5 età selgiuchide e ottomana**

Questa ultima fase insediativa presenta strutture abitative impostate su uno strato di calcare e terreno che ne evidenziano il precedente stato di abbandono. Sorgono infatti diversi complessi abitativi costruiti parzialmente con materiali di recupero. A differenza dei complessi descritti nella fase 3, queste abitazioni sono per lo più abitate da popolazioni nomadi di pastori, che occupano la città di Hierapolis prima del totale e ultimo abbandono (L. Campagna, 2018).

Fig. 2.13: Rielaborazione planimetrica. Fase 5



Il sistema idraulico

Il Ninfeo dei Tritoni presentava originariamente una fontana monumentale il cui funzionamento idraulico è stato indagato approfonditamente durante il primo decennio degli anni 2000. Questa struttura è composta da una vasca di circa 57 x 5 m e ha una profondità di quasi 1,5 m. Essa confina lateralmente e posteriormente con il podio, mentre, in corrispondenza del lato frontale, una balaustra marmorea divide la vasca dalla *plateia* antistante. La balaustra si sviluppa in pianta secondo un andamento miistilineo dettato da cinque esedre a pianta semicircolare sul cui fondo era posizionato un “*labrum* circolare” (Ambrogi, 2005), mentre i tratti rettilinei sono composti da paraste interavallate da blocchi.

Nelle esedre, la parete curva centrale dispone di un “incasso circolare” (L. Campagna, 2018) funzionale al fissaggio di un doccione attraverso cui l’acqua contenuta nella vasca poteva molto verosimilmente riempire il *labrum* della rispettiva esedra.

Fig. 2.14: Particolare della quinta esedra con incasso sulla parete curva centrale e *labrum*



La ricerca archeologica ha potuto stabilire che la vasca era riempita d’acqua grazie a diversi dispositivi di adduzione posizionati nel podio e raffigurati in fig. 2.15, (n.1-2-3-4). Dalle analisi condotte sul tratto terminale di questi dispositivi, è stato possibile supporre che fosse presente un’unico canale che, attraversando l’area retrostante il Ninfeo dei Tritoni, si collegava ai diversi sistemi di adduzione per riempire la vasca. (L. Campagna, 2018)

Sul fondo della vasca, vicino alla balaustra sono presenti tracce di due tubi di deflusso (fig. 2.15, n.5-6) che verosimilmente proseguivano entrambi sotto la gradinata che compensa il salto di quota tra la *plateia* principale il fondo della vasca. Ulteriori tracce del sistema di deflusso possono essere individuate degli incavi nei pilastri, tuttavia non sono ascrivibili all’impianto originario, bensì a un rifacimento post sisma del IV sec. d.C.

Le acque, una volta attraversato l'impianto di deflusso si raccoglievano in una cloaca sotto la *plateia* (fig. 2.15, campitura grigia). La presenza di due *cloache* sotto la strada principale è un indicatore di un probabile riciclo delle acque per altri usi.

Fig. 2.15: Schema del sistema idraulico della vasca della fontana monumentale in età Imperiale



Il muro di fondo

Il muro di fondo del Ninfeo dei Tritoni ha uno spessore di circa 0,8 m e una lunghezza di circa 74 m, si arresta sulle mura bizantine raffigurate in fig. 2.16, (n.1) disposte sul tratto meridionale dell' *Agorà Nord*, e costituisce la parete orientale della torre bizantina raffigurata in fig. 2.16, (n.2).

Il muro è composto da filari di blocchi di travertino molto probabilmente montati a secco. Inoltre le tracce individuate nel tratto adiacente all'avancorpo sud e nel fronte posteriore del muro dimostrano la presenza di un rivestimento della muratura.

Fig. 2.16: Ortofoto ricavata da elaborazione fotogrammetrica del volo UAV (Unmanned Aerial Vehicle) sul Ninfeo dei Tritoni eseguito da gruppo di Geomatica del Politecnico di Torino. In evidenza il muro di fondo relazionato con la torrebizantina e le mura bizantine



La regolarità della struttura muraria ha provocato, dopo il crollo del VII sec. d.C., un'ordinata disposizione dei blocchi a terra e ancora oggi tali elementi sono disposti nell'area retrostante il Ninfeo dei Tritoni secondo dieci filari.

I fenomeni atmosferici hanno complicato la lettura dei blocchi giacenti a terra. Tuttavia risultano comunque evidenti irregolarità dimensionali tra i blocchi che conservano le testimonianze delle trasformazioni avvenute dall'edificazione nel Ninfeo alla costruzione delle Mura Bizantine (F. Todesco, 2018)

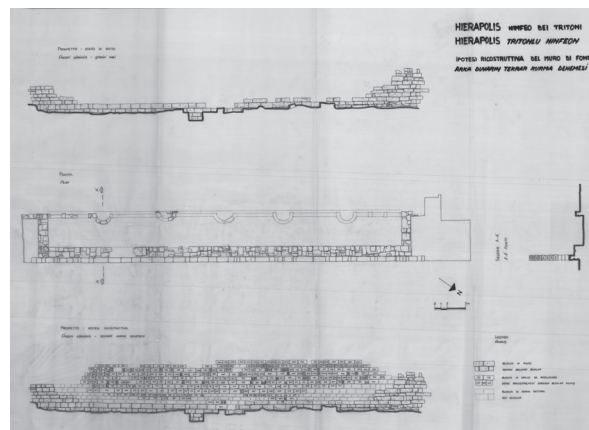
Fig. 2.17 Vista da est dei blocchi crollati del muro di fondo del Ninfeo dei Tritoni



Il susseguirsi dei terremoti che hanno interessato la città di Hierapolis sono stati oggetto di approfondite ricerche da parte dei professionisti. Le analisi sul muro di fondo del Ninfeo dei Tritoni rientrano in questi studi sismici che hanno interessato molti studiosi; il punto di vista della geomática è reperibile in (A.Spanò, 2010) E' stato quindi possibile elaborare un catalogo dei principali eventi sismici sulla base di fonti storiche antiche e sulle evidenze archeologiche (E. Altunel, 2000) tramite la collaborazione tra gli esperti di sismica e archeologia.

I lavori di E. Altunel e P.L. Hancock evidenziano la presenza di una faglia tettonica che attraversa l'intera area urbana della città in direzione NE-SE, le cui analisi confluiscono in un catalogo dei terremoti e in rappresentazioni concettuali che individuano le tracce sismiche individuate (E. Altunel, 2000). Da queste rappresentazioni è possibile individuare ben due tracce sismiche sul Ninfeo dei Tritoni nella zona dei due avancorpi e tali elementi, insieme alle competenze multidisciplinari dei ricercatori hanno permesso di ricostruire parzialmente l'esatta disposizione originaria dei blocchi crollati del muro di fondo.

Fig. 2.18: Ricomposizione per blocchi del muro di fondo eseguito dal gruppo di ricerca del Prof. L. Campagna



Facendo riferimento agli standard elaborati per il riconoscimento e valutazione delle tracce sismiche¹, possiamo affermare che il muro di fondo del ninfeo de Tritoni sia stato sottoposto ad una enorme forza sismica trasversale alla faglia che corre lungo la plateia (Altunel 2000) ed abbia subito un completo ribaltamento.

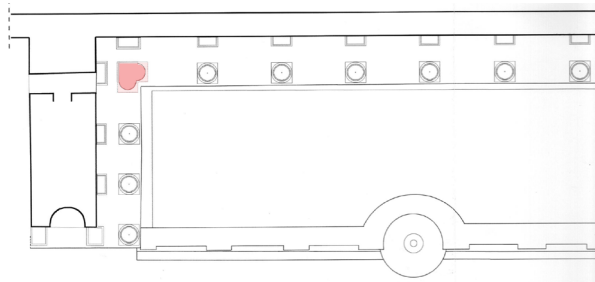
1: La direttiva italiana del 2011 definisce i principali livelli di vulnerabilità in relazione ai caratteri geometrici, strutturali e architettonici di un edificio, con lo scopo di impostare una conoscenza comune utile alla progettazione di un intervento consapevole sul patrimonio culturale. Tali danni strutturali si articolano quindi in 6 livelli di intensità, similmente a quanto accade anche nella normativa europea EMS98, definendo il livello 0 come "assenza di danno" e progredendo fino al livello 5 che identifica il collasso (Direttiva, 2011).

La fronte ipostila

Come è stato detto in precedenza, il terremoto del VII sec. d.C. ha provocato il cedimento della facciata marmorea del Ninfeo dei Tritoni. L'analisi dei resti del crollo ha permesso comunque di ricostruire la composizione della fronte ipostila (L.Campagna, 2018): essa si sviluppava su tre ordini architettonici le cui colonne correvano da un fronte interno degli avancorpi all'altro seguendo l'andamento murario di questi ultimi e del muro di fondo.

Il primo ordine corinzio era composto da ventotto colonne e, in corrispondenza dei due angoli di intersezione tra il muro di fondo e gli avancorpi, era presente un "pilastro cuoriforme" (L.Campagna, 2018) indicato in rosso in figura 2.19. Questo sistema colonnato era replicato con delle lesene retrostanti ancorate alla struttura muraria.

Fig. 2.19 *Porzione settentrionale della ricostruzione in pianta del primo ordine del Ninfeo dei tritoni*

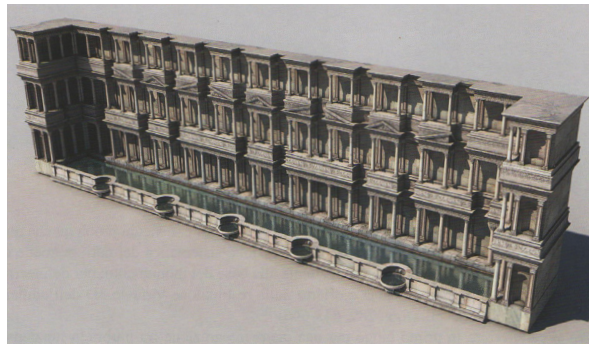


La trabeazione invece alternava un andamento a parete con altri aggettanti, collegati tramite blocchi perpendicolari. Mentre i blocchi di trabeazione ancorati alla parete ricoprivano l'intera luce tra due colonne, gli elementi aggettanti avevano dimensioni più ridotte affinché si potessero realizzare edicole o moduli su più colonne. L'altezza del primo ordine, considerata dal piano di posa delle basi del colonnato e il piano di attesa della trabeazione è di circa 5,2 m.

Su tale trabeazione si impostava il basamento del secondo ordine composito. La differenza principale di questo ordine rispetto a quello inferiore consiste, oltre al fatto che esso è composito e non corinzio, in uno sviluppo più movimentato della trabeazione: verso le aree laterali, vicino agli avancorpi, essa si configurava in un andamento rettilineo e continuo, mentre nella zona centrale era costituita da "edicole distile, delimitate da rientranze rettilinee e curvilinee e sormontate da frontoni [...] triangolari, semifrontoni e frontoni trapezoidali" (L.Campagna, 2018). L'altezza del secondo ordine, considerando anche il basamento, è di 5,95 m fino al piano di attesa delle trabeazioni orizzontali e di 7,05 m fino alla cuspide del coronamento delle edicole.

L'esiguo numero di blocchi rinvenuti attribuibili con un alto grado di attendibilità al terzo ordine della facciata ipostila, rende la ricostruzione di esso sicuramente più problematica rispetto ai due ordini inferiori. E' importante inoltre specificare che esistono elementi che escluderebbero addirittura la sua esistenza. Tuttavia le analisi condotte sui blocchi fregio-architrave, sui basamenti e sulle basi cuoriformi¹ portano a pensare che esiste anche un'ipotesi in cui la facciata marmorea del Ninfeo dei Tritoni fosse composta anche da un terzo ordine. Avendo chiarito che non è possibile effettuare ricostruzioni geometriche d'insieme o specifiche, è comunque possibile ipotizzare un'altezza del terzo ordine di quasi 5m considerando anche il basamento. Il colonnato percorreva molto verosimilmente lo stesso andamento di quelli inferiori ed esso potrebbe essere stato smantellato ancor prima della dei lavori di edificazione delle Mura Bizantine, portando quindi a supporre che, se caso in cui il terzo ordine fosse esistito, sarebbe crollato o stato rimosso in un periodo precedente al crollo dell'intera facciata ipostila durante il terremoto del VII sec d.C.

Fig. 2.20 Ricostruzione tridimensionale texturizzata con i tre ordini della facciata ipostila del Ninfeo dei Tritoni (M.Limoncelli)



¹: cfr. L. Campagna. *Hierapolis di Frigia XI. Il Ninfeo dei Tritoni*. Istanbul, Ege Yayınları, 2018. pp-211-230.

Il Ninfeo del Santuario di Apollo

Ubicazione e inquadramento generale

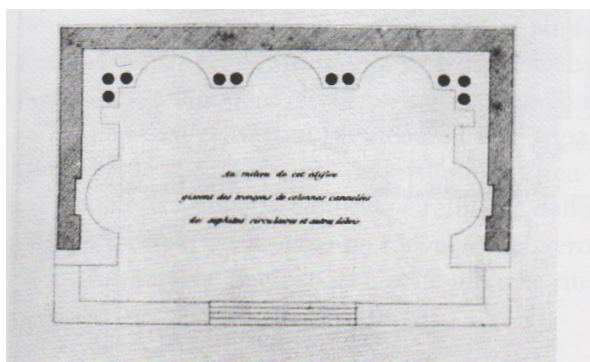
Il Ninfeo del Santuario di Apollo sorge tra il II e III sec d.C. ed è posizionato su un'area terrazzata che risale all'età augustea e giulio-claudia, precisamente sul fronte occidentale del terrazzo mediano e si imposta sul suo muro di contenimento. La fronte principale del Ninfeo si affaccia sul *theatron* e sul terrazzo inferiore che porta alla plateia principale.

Le ricerche archeologiche sul Ninfeo e interpretazione architettonica

Il Ninfeo compare all'interno di alcune vedute realizzate da viaggiatori europei, che ne rappresentano la struttura denunciandone i suoi resti.

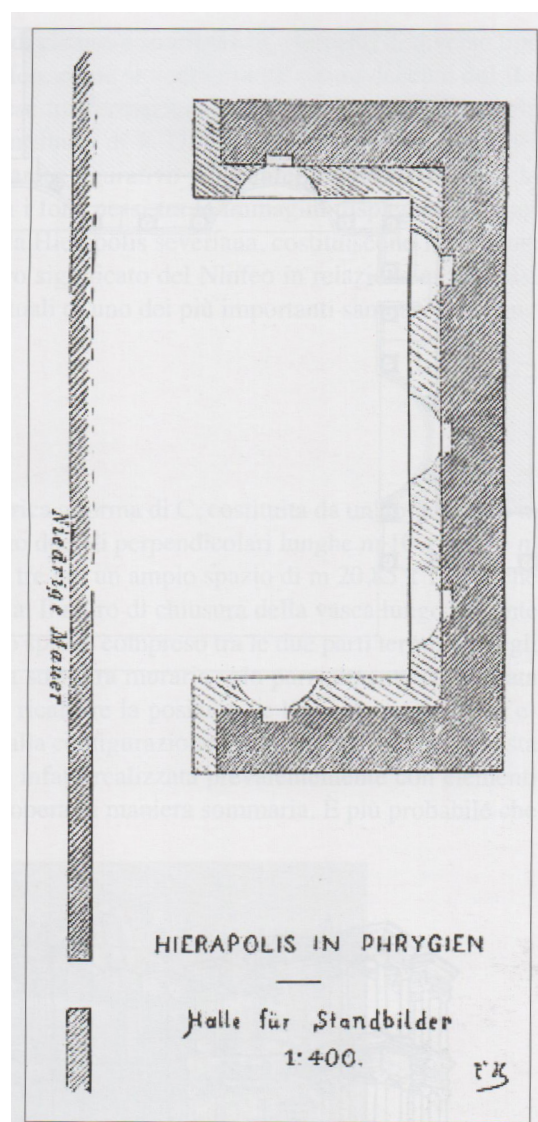
La prima pianta ricostruttiva è tracciata da Ch.Tremaux, che nel 1858 definisce il Ninfeo come "exèdre".

Fig. 2.21: pianta ricostruttiva del Ninfeo da parte di Ch. Trémaux



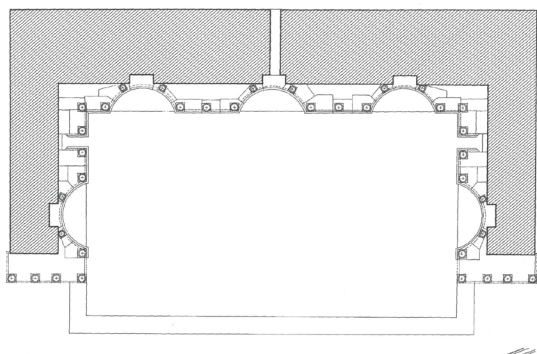
Nel 1898 all'interno del volume *Altertümer Von Hierapolis* compare una seconda pianta schematica ricostruttiva del Ninfeo del Santuario di Apollo (L. Campagna, 2018).

Fig. 2.22: pianta ricostruttiva del Ninfeo in *Altertümer Von Hierapolis*



Durante gli scavi sulla vasca del Ninfeo, realizzati nel corso delle attività della Missione Archeologica Italiana diretta da P. Verzone degli anni '50-'70, viene definita la reale funzione della struttura. A seguito dello scavo diretto da G. Carettoni, tra il '62 e il '64, D. De Bernardi Ferrero studia il Ninfeo ed elabora una proposta ricostruttiva.

Fig. 2.23: pianta ricostruttiva del Ninfeo da D. De Bernardi Ferrero



Le ricerche proseguono nel 2001 da parte della MAIER (Missione Archeologica Italiana A Ierapolis Di Frigia) sotto la direzione di F. D'Andria e progetto di G. Semeraro.

A partire dal 2009 il rilievo del monumento condotto dagli architetti Nino Sulfaro e Fabio Todesco e il censimento degli elementi architettonici da parte degli archeologi Clara Terranova e Alessio Toscano Raffa, hanno permesso di ridatare complessivamente il Ninfeo, collocando la sua costruzione tra il II e III sec d.C. Questi studi, insieme al contributo

di F. D'Andria, che evidenzia i rapporti tra gli apparati figurativi scoperti negli scavi precedenti e il complesso di movimenti spirituali dell'età severiana, rappresentano una solida base per ricostruire la migliore ipotesi della storia del Ninfeo (L. Campagna, 2018).

Stato di fatto del Ninfeo

Fig. 2.24: Vista da Sud-Ovest modello 3D texturizzato ricavata da rielaborazione fotogrammetrica del volo eseguito dal Laboratorio di Geomatica del Politecnico di Torino sul Ninfeo del Santuario di Apollo



Fig. 2.25: Vista da Nord-Est modello 3D texturizzato ricavata da rielaborazione fotogrammetrica del volo eseguito dal Laboratorio di Geomatica del Politecnico di Torino sul Ninfeo del Santuario di Apollo



Il Ninfeo del Santuario di Apollo ha una configurazione planimetrica a forma di "C", ricoprendo un'area di circa 30,4 x 10m al centro della quale è collocata la vasca di raccolta delle acque. Sulla porzione orientale della vasca sono stati rinvenuti resti di tavelle (1) che consentono di definire la quota del fondo della vasca. La muratura principale e gli avancorpi adiacenti poggiano su una sostruzione muraria (2) che ripercorre approssimativamente l'andamento delle pareti soprastanti. Essa costituisce la fondazione del Ninfeo, per questo motivo è sormontata da due fasce di blocchi in travertino (3) che formano la base di appoggio di un podio ad andamento mistilineo. Il podio (4) presenta una cornice marmorea modanata (5) aggettante circa 7 cm rispetto al suo sostegno e su di essa si possono notare i fori di fissaggio per il posizionamento delle basi del colonnato del primo ordine.

Fig. 2.26: Particolare della porzione inferiore della fronte est del Ninfeo del Santuario di Apollo



A quota 3m dal piano del podio, la muratura, realizzata con blocchi di travertino regolari, presenta una scanalatura funzionale all'ancoraggio dei blocchi fregio-architrave del primo ordine (1), mentre le porzioni di muratura alla quota del secondo ordine presentano una tecnica costruttiva diversa (2), poiché realizzata con elementi di reimpiego. Questa differenza tra i paramenti murari dei due ordini fa presupporre due fasi costruttive in epoche storiche differenti: si pensa infatti che la muratura del secondo ordine sia stata realizzata dopo il sisma del IV secolo d.C. (N. Sulfaro, 2018).

Fig. 2.27: Differenza tra i paramenti murari del Ninfeo del Santuario di Apollo



Non sono presenti tracce relative al dispositivo di adduzione dell'acqua, che alimentava la vasca del Ninfeo, ma esso doveva attraversare il foro presente nella nicchia centrale, evidenziato nell'immagine sottostante. Secondo la ricostruzione di D. De Bernardi Ferrero la vasca si sarebbe riempita fino alle esedre, superando quindi la quota del podio (N. Sulfaro, 2018).

Fig. 2.28: Foro per l'adduzione dell'acqua nella vasca del Ninfeo del Santuario di Apollo



La fronte ipostila

Gli scavi condotti tra il 2003 e il 2010 hanno permesso di scoprire gli elementi architettonici della fronte ipostila, articolata su due ordini, che percorreva il perimetro del podio. Il primo ordine era caratterizzato da: basi ionico-attiche; fusti lisci; capitelli compositi, blocchi fregio-architrave, cornici orizzontali.

La conformazione della fronte ipostila è basata prevalentemente sugli studi di D. De Bernardi Ferrero, tuttavia alcuni caratteri del secondo ordine sono stati parzialmente modificati da F. D'Andria.

Fig. 2.29: Ricostruzione prospettica della fronte ipostila e vasca di D.B.Ferrero



La cornice del podio presenta dei fori per il posizionamento delle basi delle colonne, evidenziati nella fotografia sottostante, che indicano la disposizione del colonnato del primo ordine. Sulla cornice è presente anche la traccia di basi più ridotte in corrispondenza delle cinque esedre, su cui poggiano colonne più piccole su piedistallo (L. Campagna, 2018).

Fig. 2.30: Fori per il posizionamento delle colonne



La trabeazione percorre lo stesso andamento mistilineo del podio e la ricostruzione del suo andamento è indicata da D. De Bernardi; tuttavia, con le successive ricerche, non si può verificare con certezza la proposta di D. De Bernardi per i tratti della fronte degli avancorpi.

Periodizzazione del Ninfeo del Santuario di Apollo

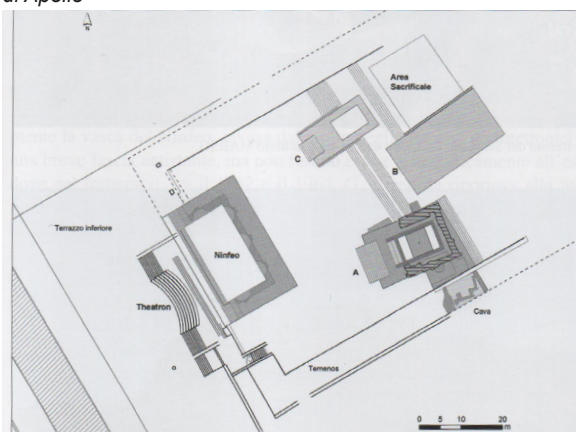
La data di costruzione del Ninfeo ipotizzata da P. Verzone e D. De Bernardi Ferrero può essere riconsiderata sulla base di dati più recenti. Gli studiosi si sono basati sulle tecniche costruttive della struttura che, come è stato descritto in precedenza, sono diverse tra il primo e il secondo ordine e inquadrano quest'ultimo in un'epoca più recente.

Un'ulteriore ricerca si deve a T. Ismaelli che si occupa di uno studio approfondito sulle funzioni svolte all'interno dell'area

del Santuario di Apollo indentificando il Ninfeo come tappa preliminare per essere ammessi ai riti che si svolgevano successivamente all'interno del Santuario. Durante questi studi, inoltre, si scopre che il Ninfeo risulta un fabbricato di sostituzione a un monumento precedente del quale non si hanno informazioni, ad eccezione di un suo muro di fondazione ritrovato sotto il paramento nord del Ninfeo del Santuario di Apollo.

In età severiana soltanto l'edificio B in figura 2.38 (identificato come Tempio di Apollo) è stato ristrutturato, probabilmente con l'intento di evidenziare i caratteri religiosi e di culto, pertanto l'erezione del Ninfeo del Santuario di Apollo, con i suoi apparati iconografici e statuari, aveva verosimilmente l'intento di mostrare l'identità religiosa cittadina anche all'esterno dell'area sacra (L. Campagna, 2018).

Fig. 2.31: Planimetria proposta da G. Semeraro del Santuario di Apollo



In questi termini, il Ninfeo aveva la funzione di prospetto monumentale che fungeva da collegamento tra il terrazzo più basso, che si collegava alla plateia, e i terrazzi superiori del Santuario. Il monumento diviene quindi parte di un più articolato percorso rituale che inizia dal theatron per preludere alle performance rituali dei terrazzi superiori, preceduti quindi dalla purificazione con le acque del Ninfeo. Solo dopo si prosegue con un graduale avvicinamento alla divinità protettrice della città lungo i terrazzi ascendenti. Dopo l'evento sismico del IV secolo d.C. l'area sacra, ad eccezione dell'Edificio A che continuava a conservare un tale prestigio da continuare a raccogliere fedeli, viene convertita in una zona adibita allo stoccaggio di materiali da convertire in calce. Il Ninfeo del Santuario di Apollo, infatti, perde la sua funzione spirituale evidenziata da due azioni principali: la sostituzione del fronte della vasca con una muratura costruita con elementi di reimpiego e il ripristino di condotti idraulici che permettevano l'adduzione dell'acqua nella vasca negando però la raccolta diretta. E' probabile quindi che la rifunzionalizzazione del Ninfeo nel periodo successivo al terremoto del IV secolo d.C. sia avvenuta per realizzare un deposito di acqua a cielo aperto o un castellum aquae per controllare la

distribuzione dell'acqua verso gli edifici ripristinati a valle. (L. Campagna, 2018).

3. GEOMATICA: Acquisizione ed elaborazione dei dati per la documentazione del patrimonio architettonico e archeologico

3.1 Discipline e tecniche della geomatrica

Il rilievo, che descrive in maniera analitica i caratteri formali, geometrici e la localizzazione dell'oggetto di studio, è uno strumento essenziale della documentazione, al pari delle analisi e delle ricerche storiche, che costituiscono un aspetto necessario per venire a conoscenza delle trasformazioni territoriali di un luogo e delle sue stratificazioni. Il rilievo costituisce un pilastro della Geomatica, disciplina che automatizza la gestione informatica dei dati del rilievo e rappresentazione del territorio. Essa consente il trattamento interdisciplinare e interoperabile di informazioni, rilevate con molteplici procedure acquisite in spazi temporali ridotti per poter essere rappresentate correttamente ai fini di un'analisi territoriale (C. Achille, C. Monti, 2001).

La Geomatica prevede il coinvolgimento di numerose discipline e tecniche quali:

- *Informatica*
- *Cartografia*
- *Geodesia*
- *Topografia*
- **Posizionamento satellitare**
- **Fotogrammetria**
- *Telerilevamento*
- **Scansione laser**
- *Sistemi informativi territoriali*

Le sopra citate discipline e tecniche hanno valenza scientifica e in quanto tali, molte, possono fornire dati geometrici misurabili. Spesso, inoltre, i dati acquisiti derivano non solo dall'applicazione di una di queste discipline, ma anche dall'interazione tra esse.

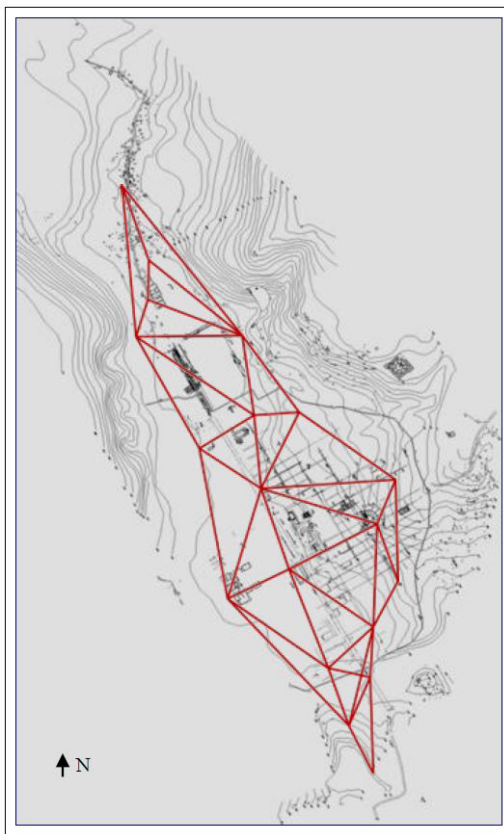
Esistono due metodi principali per conoscere le coordinate spaziali dei punti appartenenti a un dato spazio architettonico o oggetto: *il rilievo architettonico tradizionale* e *il rilievo metrico architettonico*.

Il primo, ricorre a strumenti tradizionali per effettuare misure dirette, che comparano una unità fisica con un'unità di misura (M. Bianchini, 2008). Questo metodo, viene spesso affiancato al rilievo metrico architettonico, che utilizza strumenti più avanzati per effettuare le misurazioni.

Il rilievo metrico architettonico integra i rilievi diretti con rilievi indiretti, come topografia, metodi di rilievo fotogrammetrico e LiDAR. Vengono definiti "indiretti" quei rilievi che ricavano una dimensione attraverso calcoli matematici tra misure di altre grandezze fisiche. La topografia in questo approccio metrico riveste un ruolo fondamentale poichè permette di inquadrare l'oggetto da rilevare in un insieme geometrico di punti (rete topografica), collegati tra loro da direzioni note, da cui eseguire le misure di dettaglio sull'oggetto (A.Spanò, 2018).

La topografia permette di avere un unico sistema di riferimento che consente un'omogeneità di precisione delle coordinate dei punti dell'oggetto da misurare e inoltre di contenere la propagazione dell'errore. E' necessario definire i vertici della rete topografica affinché abbraccino il manufatto o lo spazio nel suo complesso, eseguendo raffittimenti di vertici in tutte le porzioni da documentare (A.Spanò, 2020). Segue un esempio di rete principale GPS della città di Hierapolis, realizzata nel 1997.

Fig. 3.1: Rete topografica della Città di Hierapolis



3.2 Tecnica GPS/GNSS

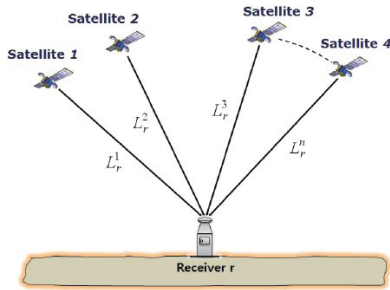
Il GNSS (*Global Navigation Satellite System*) è un sistema di posizionamento e navigazione che riceve segnalazioni da satelliti artificiali. Le costellazioni di questi ultimi sono numerose e alcune sono complete, come il GPS (*Global Positioning System*) di matrice americana e il GLONASS (*GLObalnaya NAVigationionnaya Sputnikovaya*) sviluppato in Russia, mentre altre sono ancora parziali (Galileo, BeoDou, QZSS). (A.Cina, 2014)

I sistemi GNSS vengono utilizzati sia per localizzare i vertici della rete topografica, precedentemente citate, sia sono utili il rilevamento dei GCPs (*Ground Control Points*) (M. Bianchini, 2008). E' possibile quindi ricavare le coordinate incognite X,Y,Z di un punto terrestre supponendo conosciuta la posizione dei satelliti nel sistema di riferimento ECEF (*Earth-Centered Earth-Fixed*), chiamato anche geocentrico.

Il calcolo delle coordinate del punto terrestre consiste nella misurazione di un numero minimo necessario di *range*, ovvero le distanze tra i satelliti e i ricevitori terrestri. (A.Cina, 2014)

Le coordinate ottenute possono essere convertite da geocentriche (ECEF) a geografiche.

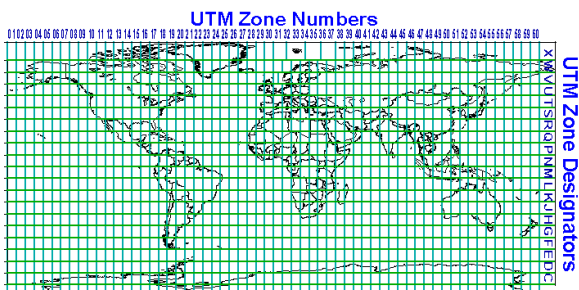
Fig.3.2: Schema esemplificativo del funzionamento del GNSS



“Le trasformazioni di coordinate sono utili per operare in riferimenti più vicini alla realtà fisica o ingegneristica di quanto sia il sistema di riferimento ECEF cartesiano geocentrico” (A.Cina, 2014)

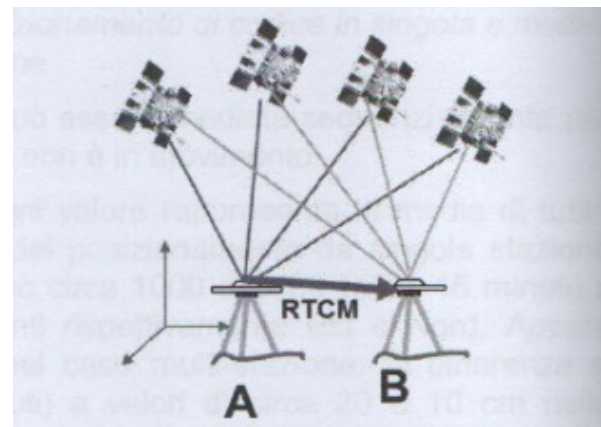
Le coordinate dei vertici vengono convertite in coordinate plano-altimetriche nel sistema di riferimento UTM-WGS84 poichè è il sistema di riferimento unificato mondiale. Il WGS84, acronimo di (*World Geodetic System 1984*), costituisce un modello matematico terrestre nel sistema di riferimento UTM e viene utilizzato dal sistema di navigazione GNSS. (L.Surace. 2004).

Fig. 3.3: Sistema di coordinate UTM



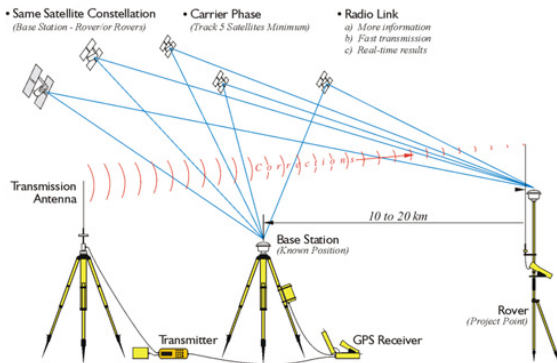
Il DGNSS (Differential Global Navigation Satellite System), è un posizionamento differenziale attraverso un ricevitore mobile (rover), di coordinate ignote, che riceve il segnale dai satelliti GNSS e un messaggio di correzione da una stazione di posizione nota (stazione base) (A.Cina, 2014). Il DGNSS può essere eseguito secondo il metodo statico e cinematico. Il primo viene utilizzato principalmente per la misura dei vertici della rete topografica, il secondo prende il nome RTK (*Real Time Kinematic*) e si utilizza per i rilievi di dettaglio in tempo reale.

Fig. 3.4: Schema posizionamento differenziale



Nella tecnica RTK il rover, oltre a ricevere un segnale di codice, riceve anche un segnale di fase da una coppia di ricevitori geodetici a doppia frequenza. Grazie a queste due informazioni è possibile ottenere posizionamenti GPS nell'ordine del centimetro, infatti si utilizza per rilievi di dettaglio.

Fig. 3.5: Schema di posizionamento RTK



3.3 La Fotogrammetria

Una delle tecniche appartenenti alla geomatica è la fotogrammetria, essa può essere definita come *“l’arte e la scienza per determinare la posizione e la forma degli oggetti a partire da fotografie. I risultati delle misure fotogrammetriche possono essere:*

- Numeri, cioè coordinate di punti oggetto in un sistema di coordinate tridimensionale;
- Disegni, cioè carte topografiche rappresentanti particolari planimetrici e curve di livello, oppure altre rappresentazioni grafiche di oggetti;
- Immagine, di solito fotografie rettificate (ortofotopiani) e mappe da esse derivate (ortofotocarte), ma anche immagini digitali” (K. Kraus, 1994).

Questo metodo di rilievo consente di studiare un oggetto senza la necessità di un contatto diretto, aspetto in comune con il telerilevamento. L’accesso all’oggetto

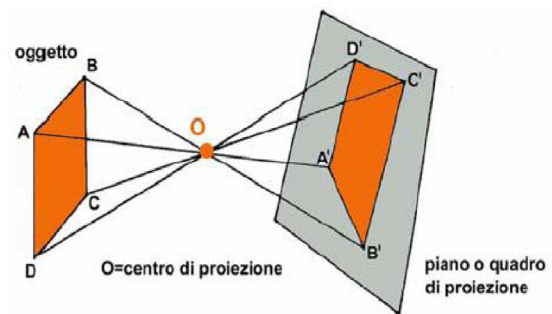
è così unicamente legato al tempo di acquisizione delle immagini dello stesso e all’appoggio topografico, ovvero la misura dei punti di controllo che tratteremo successivamente¹ (K. Kraus, 1994).

La fotogrammetria si basa su alcuni principi geometrici e analitici.

Principi geometrici della fotogrammetria

La fotogrammetria si basa sui principi della prospettiva centrale delle immagini fotografiche.

Fig. 3.6: Stella proiettiva

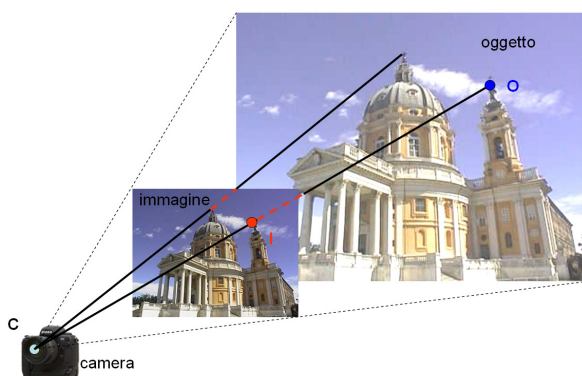


La proiezione centrale genera una corrispondenza tra i “punti oggetto” appartenenti all’oggetto tridimensionale e le loro proiezioni su un piano bidimensionale, chiamate “punti immagine”. La prospettiva è centrale perchè i raggi proiettivi convergono tutti in un unico punto chiamato centro di proiezione, assimilabile al centro dell’obiettivo della fotocamera (A.Spanò, 2020).

1: cfr: p. 69

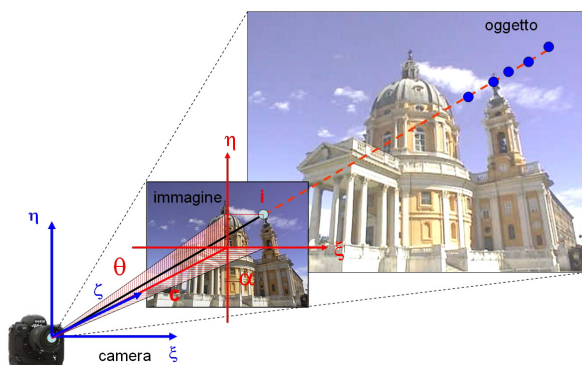
Da queste caratteristiche ne consegue che a un punto "O" dell'oggetto reale corrisponda un solo punto "I" sul fotogramma.

Fig. 3.7: Il fotogramma come prospettiva centrale



Tuttavia non è verificata la situazione inversa, ovvero che a un punto "I" dell'immagine corrisponda un solo punto "O" dell'oggetto reale, infatti ad ogni punto immagine possono corrispondere infiniti punti oggetto che giacciono sul raggio di proiezione.

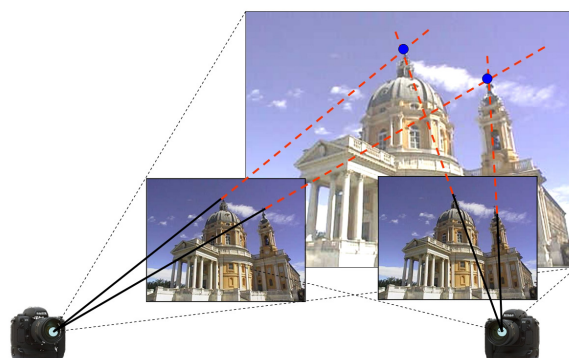
Fig. 3.8: Corrispondenza di un punto del fotogramma a molteplici punti dell'oggetto reale.



Per questo motivo per ottenere le coordinate di un punto dell'oggetto è necessario disporre di almeno due fotogrammi aventi centri di proiezione diversi.

Questo punto viene così definito come intersezione tra due raggi proiettanti (A. BIASION et al, 2015).

Fig. 3.9: Il principio della fotogrammetria



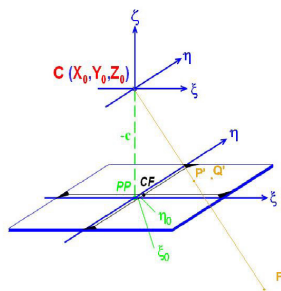
Principi analitici della fotogrammetria

Una corretta esecuzione della prospettiva centrale in fotogrammetria è possibile se si conoscono i parametri di orientamento interno ed esterno della camera, che permettono di definire le relazioni tra le coordinate immagine dei punti, le coordinate dei punti oggetto corrispondenti e dei centri di presa tramite le equazioni di collinearità. Queste equazioni prevedono rototraslazioni tra i sistemi di riferimento interno ed esterno.

I parametri di orientamento interno sono:

- La distanza c tra il centro di prospettiva e il punto principale (PP) del fotogramma
- Le coordinate immagine del punto PP (ξ_0, η_0)

Fig. 3.10: Orientamento interno



L'orientamento interno è un modello matematico geometrico ideale, infatti nella realtà sono presenti errori dell'obiettivo, della camera e del fotogramma.

Nel settore delle camere metriche, per ovviare agli errori dovuti alla macchina ogni casa produttrice fornisce già questi dati utili alla calibrazione nei software specifici (K. Kraus, 1994).

Nelle camere di uso comune invece questi dati non vengono forniti.

Di seguito vengono riportati alcuni esempi di parametri di calibrazione di una camera CanonPowerShot S110:

Fig. 3.11: Esempio di parametri di calibrazione della camera CanonPowerShot S110

CanonPowerShotS110_5.2_4000x3000 (RGB), Sensor Dimensions: 7.440 [mm] x 5.580 [mm]
EXIF ID: CanonPowerShotS110_5.2_4000x3000

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	2860.478 [pixel] 5.320 [mm]	2047.508 [pixel] 3.808 [mm]	1494.393 [pixel] 2.780 [mm]	-0.040	-0.012	0.007	0.000	0.004
Optimized Values	2869.992 [pixel] 5.339 [mm]	1962.999 [pixel] 3.651 [mm]	1470.137 [pixel] 2.734 [mm]	-0.039	-0.009	0.005	-0.003	-0.003

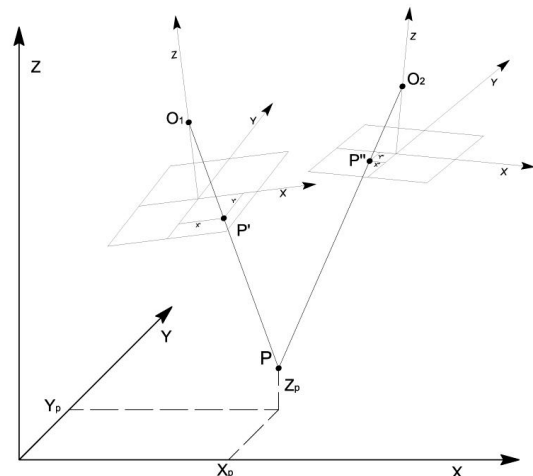
R1, R2, R3, T1 e T2 sono parametri che rappresentano la distorsione radiale e tangenziale della camera.

L'orientamento interno quindi definisce il "sistema di riferimento immagine e la posizione reciproca dei centri di proiezione e dei fotogrammi" (A.Spanò, 2020).

L'orientamento esterno, invece, definisce i parametri spaziali della camera nel sistema di coordinate prestabilito, definendo quindi la posizione nello spazio dei centri di presa e l'orientamento dei fotogrammi.

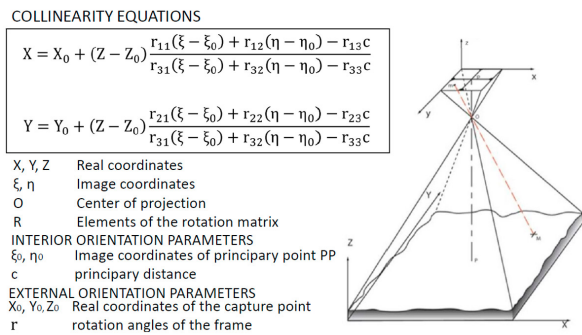
Quindi, tramite l'intersezione di raggi omologhi, è possibile ricavare delle coordinate spaziali dei punti oggetto (A.Spanò, 2020).

Fig. 3.12: Orientamento esterno di due fotogrammi



Come anticipato, la conoscenza dei sistemi di riferimento interno ed esterno, è utile per sviluppare le equazioni di collinearità, che comprendono le traslazioni nello spazio dei sistemi di riferimento. Esse si basano sul modello geometrico secondo cui il punto oggetto, il centro di proiezione e il punto immagine giacciono sulla stessa retta:

Fig. 3.13: Equazioni di collinearità



La fotogrammetria digitale

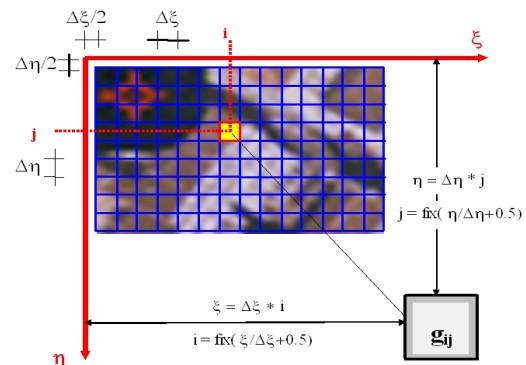
Il passaggio al digitale ha permesso di utilizzare immagini non fotografiche ma numeriche, strutturate quindi in una matrice di pixel. Queste matrici vengono processate attraverso un computer per avviare la procedura fotogrammetrica automatizzata. In particolar modo il sistema fotogrammetrico digitale è composto da due unità separate, l'unità di acquisizione e l'unità di restituzione. La prima ha il compito di acquisire le fotografie secondo uno schema prestabilito e fornirle

in formato digitale affinché si conoscano i parametri di orientamento interno, utili alla fase successiva (K. Kraus, 1994).

La seconda, invece, ha il compito di orientare i fotogrammi in maniera automatizzata attraverso procedure di *image matching* fondate su tecniche di *pattern recognition*.

Pertanto la prima fase è estremamente importante per una corretta misurazione poichè se l'unità di acquisizione non fosse calibrata correttamente, l'unità di restituzione non genererebbe un risultato attendibile.

Fig. 3.14: Il sistema di riferimento dell'immagine digitale



La fase di orientamento, prevede alcuni processi algoritmici di *image matching* e *features extraction*, che consistono nella auto correlazione dei punti omologhi dei fotogrammi attraverso una comparazione statistica dell'informazione radiometrica dei pixel.

Una delle grandi innovazioni di questa

fase è la possibilità di ottenere un modello basato su nuvole di punti 3D e una mesh texturizzata dell'oggetto.

La tecnica maggiormente utilizzata in fotogrammetria digitale è la tecnica SfM (*Structure from Motion*), che consente l'estrazione dei dati metrici sfruttando le informazioni radiometriche dei fotogrammi ricavati da una camera in movimento:

“[. . .] traditional photogrammetry derives calibration parameters of the camera and the camera poses mainly from well-distributed GCPs and tie points, a Structure from Motion (Sfm) approach computes simultaneously both [. . .] it extracts corresponding image features from a series of overlapping photographs captured by a camera moving around the scene” (G. Verhoeven, 2011).

Il modello 3D generato da questa metodologia, ad esempio nel settore dei Beni Culturali, ha valenza metrica, solo se ha accuratezze garantite, con una certa tolleranza, dai GCPs, dai CPs (*Check Points*) e i processi di georeferenziazione. La SfM utilizza alcuni algoritmi specifici come: SIFT (*Scale-invariant feature transform*) e RANSAC (*Random Sample Consensus*). Il primo si occupa del riconoscimento di punti omologhi (*tie points*), aventi un alto contrasto radiometrico (D.G. Lowe, 2004).

Il secondo, invece, calcola gli errori di matching.

Per identificare e descrivere i punti omologhi viene assegnato loro un descrittore e viene effettuata una triangolazione, questa fase di calcolo viene chiamata BBA (*Bundle Block Adjustment*). I processi SfM sfruttano le regole della geometria epipolare, che mette in relazione i tie points, i centri di presa e le coordinate spaziali dei punti. Grazie a questa relazione si genera un modello denso prodotto dall'intersezione dei vari punti omologhi di ogni fotogramma. (P.Meli, 2015).

I campi applicativi della Fotogrammetria

I due principali campi applicativi della Fotogrammetria sono la *Fotogrammetria aerea* e la *Fotogrammetria terrestre*.

La prima si è evoluta grazie alle molteplici sperimentazioni che nel corso degli anni hanno ricercato il giusto equilibrio tra i vari aspetti tecnici come ad esempio: portata, peso e manovrabilità del dispositivo. Questi tentativi di sperimentazione hanno spaziato in passato dalle più strane metodologie, come l'uso di volatili, prototipi non motorizzati, vele, bracci telescopici, alle più recenti tecnologie più o meno convenzionali. Per scopi militari, nel 1950, nascono i primi UAV (*unmanned aerial vehicles*) e

i RPV (*remotely piloted vehicles*) per necessità di sicurezza, in quanto pilotati a distanza. Tali dispositivi aerei sono divenuti disponibili per altri scopi, come ad esempio la documentazione del patrimonio culturale e hanno migliorato le loro prestazioni in termini di autonomia e manovrabilità.

Fig. 3.15: *Fotogrammetria aerea, metodi sperimentali*

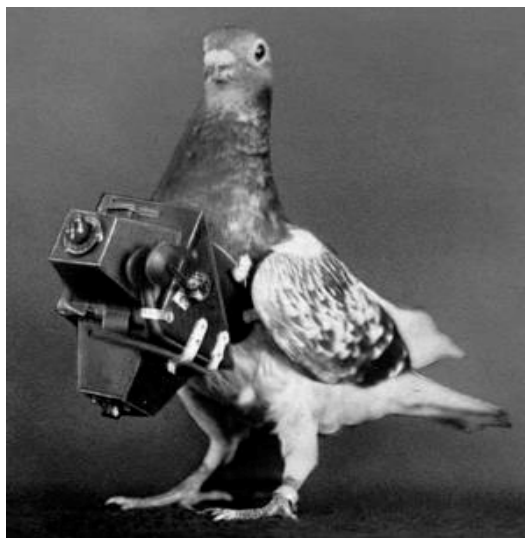


Fig. 3.16: *Fotogrammetria aerea, metodi sperimentali*



UAV per la fotogrammetria aerea

Con lo svilupparsi delle tecniche SfM citate prima, l'utilizzo di droni UAV è cresciuto in molti campi tra cui quello della geomatica in combinazione con la tecniche fotogrammetrica e topografica (F. Nex, F. Remondino, 2014). In questo tipo di applicazione il sistema UAV permette di acquisire immagini che possono essere successivamente utilizzate per estrarre informazioni metriche attraverso approcci di tipo fotogrammetrico. L'uso di questo dispositivo in geomatica richiede principalmente dei sensori di posizionamento GNSS, sensori di assetto IMU (*Inertial Measurement Unit*) e camere digitali. Il drone è composto da quattro parti principali: il telaio, le eliche, i motori e una camera. Questi componenti permettono al drone di sollevarsi da terra e catturare fotogrammi o video dell'oggetto

Fig. 3.17 *Componenti del drone*



E' possibile pilotare le piattaforme UAV da terra tramite radiocomando, oppure far seguire al dispositivo un percorso prestabilito mediante un autopilota che integra i sistemi GNSS e IMU per controllare il drone in tempo reale.

I droni UAV si suddividono in diverse tipologie: ad ala fissa, a turbina o multirottore a decollo verticale. Questi ultimi si suddividono a loro volta per il numero di eliche in possesso, maggiore è il numero, maggiore è la sua capacità di carico e la sua stabilità in aria. (F.Chiabrando et al, 2013)

Fig. 3.18: Tipologie di droni a rotore

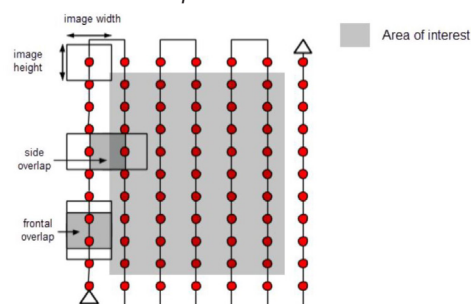


É possibile pianificare il volo secondo percorsi manuali o automatici.

E' fortemente raccomandato eseguire fotogrammi seguendo un percorso regolare, percorrendo strisciate parallele tra loro e, se necessario, effettuarne altre in direzione perpendicolare e con camera inclinata a 45°. Inoltre, per garantire un GSD costante, è opportuno mantenere

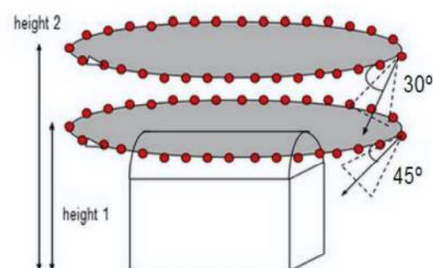
l'altezza di volo invariata rispetto alla conformazione del terreno.

Fig. 3.19: Schema delle possibili strisciate del drone



Infine, per rilevare correttamente gli alzati degli edifici, è necessario eseguire voli circolari con telecamera inclinata a 45°. Strategia adottata principalmente in campo Architettonico e Archeologico (F.Guerra,2015).

Fig. 3.20: Schema del percorso a inquadratura inclinata



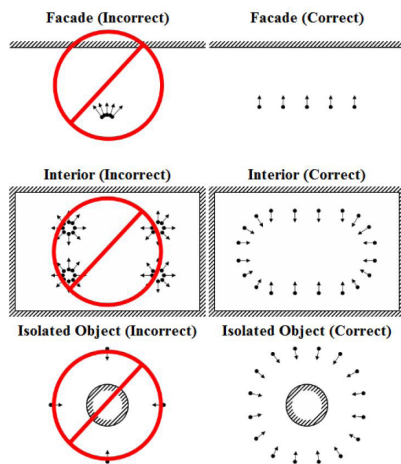
La fotogrammetria terrestre

La fotogrammetria terrestre si basa su principi simili a quelli enunciati precedentemente per la fotogrammetria aerea, con una camera utilizzata manualmente da un operatore.

Viene spesso utilizzata per rilevare oggetti di piccole dimensioni e rilievi a scala architettonica.

Vi sono alcune regole da seguire per un corretto rilievo, alcune di queste sono indicate nella figura 4.30, che illustra come sia sempre necessario cambiare la posizione del centro di proiezione.

Fig. 3.21: Metodologia acquisizione fotogrammetria terrestre

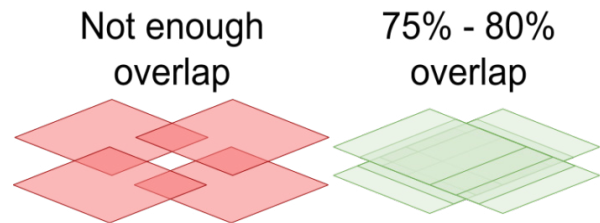


Lo schema di presa

La fotogrammetria aerea e terrestre si basa sui principi della stereoscopia, ovvero la collimazione stereoscopica dei punti omologhi per garantire la percezione spaziale di un oggetto. Per una corretta riuscita della ripresa è necessario un overlapping stereoscopico maggiore del 70% (A.Spanò, 2020).

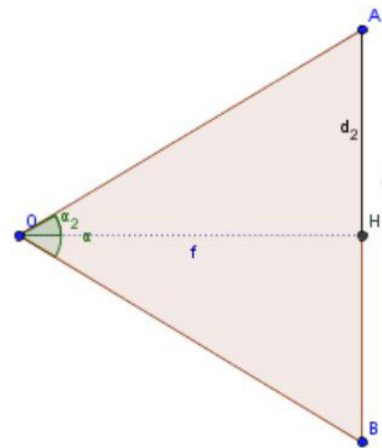
Infatti la restituzione è possibile solo se si hanno almeno due fotogrammi ripresi da due differenti punti di vista. (A. Lingua, D, Marenchino, 2007)

Fig. 3.22: Rappresentazione schematica di overlap



Per valutare l'area coperta da una singola foto è necessario conoscere l'angolo di campo α . Questo valore è spesso fornito dalla casa produttrice dell'obiettivo e rappresenta l'angolo di ripresa. Questo parametro è fondamentale per determinare l'area di ricoprimento a terra, infatti ha una relazione trigonometrica con l'altezza di volo.

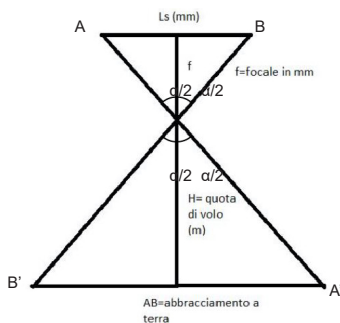
Fig. 3.23: Copertura del singolo fotogramma



In figura 4.26 si considera O come centro di presa e origine dell'angolo α , angolo di campo formato dagli estremi del cono ottico, f come lunghezza focale.

$$\alpha = 2 \cdot \text{atan}(d/2f)$$

Fig. 3.24: Copertura singolo fotogramma



$$\text{ricoprimento a terra } (A'B') = H_{\text{volo}} \times \tan(\alpha/2) \times 2$$

Sapendo la misura AB del fotogramma è possibile ricavare la dimensione dei lati dell'area inquadrata a terra, utilizzando il rapporto di forma del sensore (F.Guerra,2015).

L'altezza di volo influenza anche un altro parametro, chiamato GSD (*Ground Sample Distance*). Esso rappresenta la distanza tra il centro di due pixel consecutivi espressa in unità di misura territoriale e va gestito a seconda del risultato finale che si vuole ottenere: più basso è il GSD più alto è il livello di dettaglio.

$$\leq \text{GSD} = (h \times d) / f$$

Dove:

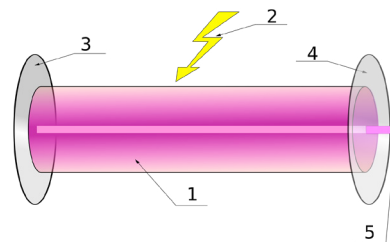
- GSD: Ground Sample Distance cm/px
- h: altezza di quota o distanza di presa [m]
- d: dimensione del pixel del sensore [µm]
- f: distanza focale della camera

3.4 Scansione laser LiDAR

Il laser scanner, usa la tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*), deriva da sistemi di misura di distanze (distanziometri) ma si basano sull'incidenza di raggi laser su un oggetto. Il laser è un fascio di luce monodirezionale a singola lunghezza d'onda (quindi monocromatico).

In figura 4.10 sono rappresentati i componenti del laser.

Fig. 3.25 Funzionamento laser



Componenti di un Laser:

- 1) Mezzo ottico attivo
- 2) Energia fornita al mezzo ottico
- 3) Specchio
- 4) Specchio semiriflettente
- 5) Fascio laser in uscita

Il laser è stato classificato a seconda della sua pericolosità di emissione, questa classificazione è definita dal parametro LEA (*Acceptable Emission Limit*) che definisce 5 classi di pericolosità. Il LiDAR appartiene alla classe 1.

Fig. 3.26: Parametri LEA

Class	Dangerousness
Class 1	In this class are included all the so-called "intrinsically safe"
Class 2	It's important not to watch to the laser ray
Class 3A	It's important not to stare at the laser or to watch directly with optic devices
Class 3B	The sight at the laser ray is always dangerous
Class 4	It's important to avoid the direct or reflect eye and skin contact to the laser ray

Laser scanner aereo

I laser scanner aerei rientrano nella categoria di strumenti installati su elicotteri e aerei, e consentono di acquisire i dati durante il volo.

Fig. 3.27: Esempio di aereoelicottero con laser scanner



I tre componenti principali di questo dispositivo consistono in un trasmettitore, un ricevitore e un sistema di memorizzazione dati, che consentono di misurare le coordinate tridimensionali di ogni punto del territorio scansionato, per mezzo di un repentino spostamento e rotazione del sensore.

Dal momento che il sistema di rilevamento è posizionato su un velivolo in movimento, è necessario associare un dispositivo GPS (*Global positioning system*) e IMU al sensore per conoscere la sua posizione in ogni istante. Viene solitamente accostata a questo sistema di rilievo laser una macchina fotografica digitale, avente lunghezza focale adatta al tipo di misurazione, che permette di ottenere modelli 3d texturizzati e ortofoto. (A. Biasion et al, 2015)

LIDAR terrestre

Fig. 3.28: Sistema LiDAR terrestre



I laser scanner terrestri sono strumenti di acquisizione che non sono installati su supporti mobili. Vi sono due categorie di essi, differenziati per precisione, portata massima e modalità di acquisizione: *laser scanner distanziometrici* e *laser scanner triangolatori*. I primi garantiscono portate maggiori (fino a 1km) con precisioni sotto al centimetro. I secondi, invece, presentano precisioni sotto al millimetro con tuttavia portate minori (massimo 10m).

I laser scanner distanziometrici hanno caratteristiche simili alle stazioni totali, con la differenza che quest'ultime prevedono la collimazione di punti scelti da parte di un operatore. Infatti con questi laser scanner, essendo totalmente automatizzati, non vi è la possibilità di scegliere i punti da collimare, ma solamente la loro densità e l'area di incidenza (A. Biasion et al, 2015).

Molti produttori di laser scanner distanziometrici integrano una fotocamera digitale all'interno dello strumento, affinché la nuvola di punti contenga anche l'informazione radiometrica migliorandone così la sua lettura. Tuttavia è possibile utilizzare macchine fotografiche digitali esterne a supporto del laser scanner, con il vantaggio di una migliore qualità e la possibilità di sostituirla con una più aggiornata (A. Biasion et al, 2015).

Laser scanner mobile

Fig. 3.29: Laser scanner mobile su veicoli



Infine un ulteriore sistema MMS (*Mobile Mapping System*) è il MMV (*Mobile Mapping Vehicle*), un veicolo (automobile, imbarcazione, veicolo su rotaie) che permette di acquisire diversi dati provenienti da sensori quali ad esempio GNSS, IMU, camere digitali e LiDAR (F.Chiabrando et al, 2013).

Negli ultimi anni, con lo svilupparsi della geometria computazionale e della robotica, sono nati sistemi di MMS

estremamente leggeri e compatti, dotati di tecnologia SLAM (*Simultaneous localization and mapping*), che permettono di rilevare anche zone al coperto e di difficile accesso, fornendo una mappatura 3D accurata senza utilizzare il GPS, permettono infatti all'operatore di definire il percorso di rilevamento.

I limiti principali di questo sistema MMS sono legati alla sua natura di acquisizione di riconoscimento delle geometrie non geolocalizzate, infatti per ottenere una scansione efficace è necessario eseguire percorsi chiusi, inoltre la complessità geometrica dell'oggetto da rilevare è direttamente proporzionale alla riuscita della scansione (G.Sammartano et al, 2018).

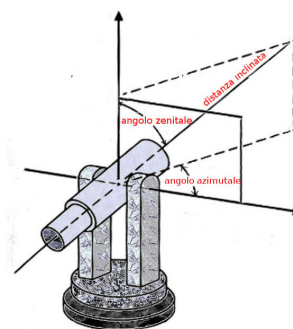
Fig. 3.30: Laser scanner mobile ZEB GO



3.5 La stazione totale

Lo strumento tradizionalmente utilizzato in topografia è la stazione totale che permette di misurare contemporaneamente gli angoli azimutali, zenitali e distanze e collocare i punti misurati in un sistema di coordinate predefinito.

Fig. 3.31: Schema misurazioni di angoli e distanze della stazione totale



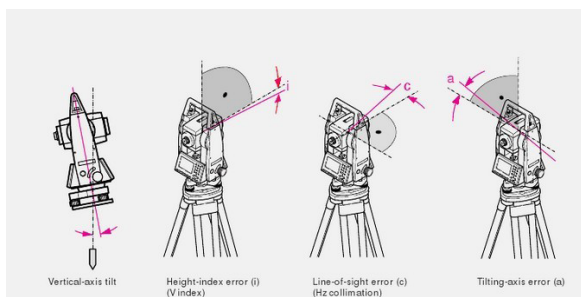
Nello specifico la stazione totale consente la misurazione di diversi punti appartenenti all'oggetto, memorizzando angoli e distanze all'interno di uno spazio di archiviazione, per poi essere convertite in coordinate dagli operatori durante la fase di elaborazione dei dati.

Questo strumento è composto da quattro elementi principali:

- **Alidada:** struttura a "U" munita di un morsetto che controlla la rotazione meccanica lungo l'asse verticale (zenith)
- **cannocchiale topografico:** è uno strumento ottico collocato tra i due bracci

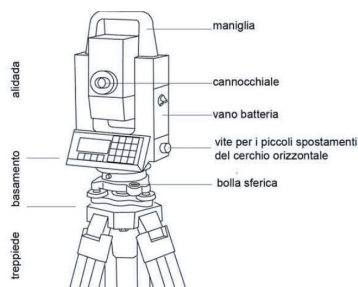
estremi dell'alidada e collegato a questi tramite un perno orizzontale che ne consente la rotazione meccanica lungo il rispettivo asse. La rotazione è controllata attraverso un morsetto. Vi è un terzo asse di rotazione, chiamato anche asse di collimazione, proprio del cannocchiale, di tipo ottico.

Fig. 3.32: Assi di rotazione della stazione totale



- **basetta:** serve da livella tra treppiede e stazione. E' interposta tra la stazione e la base di collegamento.
- **base di collegamento:** è in collegamento con il treppiede e la basetta
- **treppiede:** elemento portante che serve a sorreggere e stabilizzare la stazione totale sul vertice della rete topografica (M. Bianchini, 2008).

Fig. 3.33: Componenti stazione totale



La stazione totale, in fotogrammetria e TLS (*Terrestrial Laser Scanning*), viene utilizzata per la misura dei GCPs. Per misurare i punti di controllo ed evidenziarli si utilizzano appositi marker, oggetti distinguibili dal punto di vista radiometrico, che vengono applicati sull'oggetto da rilevare e/o sul terreno. Questa operazione non è sempre necessaria, infatti qualora la zona da rilevare fosse caratterizzata da punti naturali ben distinguibili.

La funzione principale dei marker consiste nell'ottimizzazione del processo fotogrammetrico per renderlo più accurato. Essi servono inoltre alla georeferenziazione dell'intero rilievo e permette inoltre l'unione di prodotti (nuvole di punti) provenienti da tecnologie differenti come UAV e TLS.

Fig. 3.34: Esempio di posizionamento dei marker sull'oggetto da rilevare, fotografia da volo UAV del 2018



Supporti alle ricerche archeologiche e storiche a Hierapolis mediante gli strumenti della geomatica

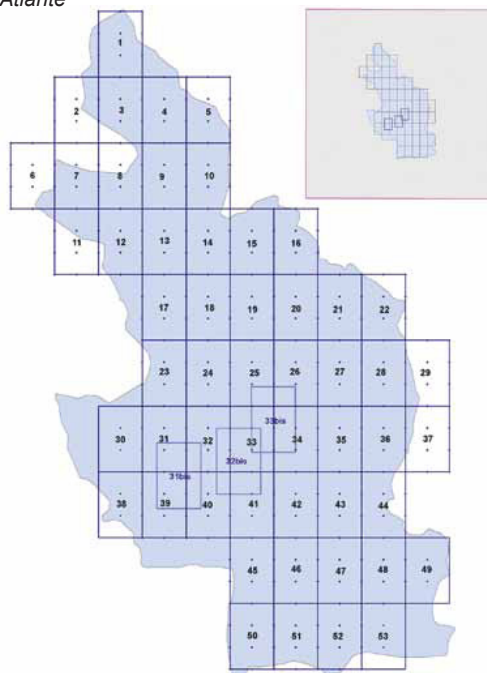
La ricostruzione della storia di Hierapolis è il frutto di una collaborazione multidisciplinare tra diverse figure come storici, archeologi ed esperti di tecniche avanzate di rilievo. La MAIER (Missione Archeologica Italiana a Hierapolis di Frigia) si occupa degli studi archeologici della città dagli anni '60. Queste ricerche sono iniziate sotto la direzione del Politecnico di Torino con i Professori P. Verzone e D. De Bernardi. La direzione ed il coordinamento degli studi sono passati a partire dagli anni 2000 all'Università del Salento con il Professor F. D'Andria e dal 2016 dalla Professoressa G. Semeraro.

Reti topografiche e GIS

L'interazione tra i diversi campi di ricerca elencati in precedenza ha evidenziato l'esigenza di creare un supporto comune nel quale i vari team fossero in grado di condividere le loro ricerche e le loro strategie. Nasce così l'*Atlante di Hierapolis di Frigia*, una carta fondativa comune atta alla condivisione dei lavori scientifici. L'*Atlante* è composto da 53 fogli in scala 1:1000 cadauno, realizzato grazie a diversi contributi quali: tecniche di telerilevamento avanzato,

geomatica, "cartografia computerizzata e prospezioni geosferiche" (F. D'Andria, et al, 2008). L'*Atlante* permette così a ogni *équipes* di riportare i risultati del proprio lavoro con il quadro generale e di consultare le cartografie e schede dei monumenti in rete mediante l'uso del WebGIS di Hierapolis. (F. D'Andria, et al, 2008).

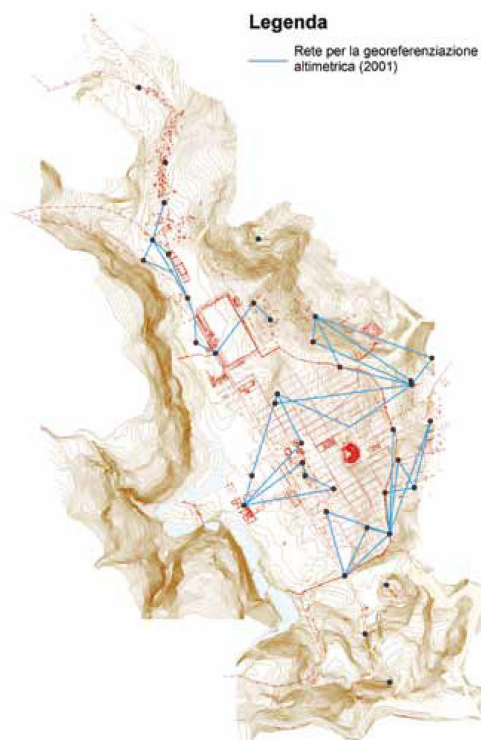
Fig. 3.35: Rappresentazione del taglio dei 53 fogli dell'*Atlante*



Un contributo fondamentale del Laboratorio di Geomatica del Politecnico di Torino, a partire dal 2001, consiste nel realizzare una serie di reti topografiche con lo scopo di georeferenziare le informazioni raccolte, negli anni precedenti, in sistemi di riferimento nazionali globali (WGS84).

Il Laboratorio di Informatica per l'Archeologia dell'Università del Salento, coordinato dalla professoressa Grazia Semeraro, ha elaborato i dati di scavo all'interno del sistema GIS (Geografic Information System). Questo contributo è stato essenziale poichè ha permesso la fruizione immediata del posizionamento georeferenziato e catalogato dei reperti archeologici. Così è possibile integrare i rilievi di dettaglio in un sistema a scala urbana (B.Pecere in F. D'Andria, et al, 2008).

Fig. 3.36: Rappresentazione della rete del 2001 per la georeferenziazione altimetrica



UAV e LiDAR

Come accennato, Il Laboratorio di Geomatica del Politecnico di Torino a partire dagli anni '90 fornisce un supporto agli studi archeologici della MAIER, attraverso tecniche della geomatica quali ad esempio la tecnologia UAV e LiDAR (F. Chiabrando, F. D'Andria, G. Sammartano, A. Spanò, 2017).

Durante gli studi sulla Città di Hierapolis sono stati eseguiti alcuni voli sia a scala urbana mediante l'uso di UAV, sia a scala architettonica tramite UAV con l'integrazione LiDAR terrestre.

Gli output generati da queste due tecnologie sono parte di un progetto di documentazione e comunicazione in costante evoluzione poiché questi modelli possono essere sempre consultati per la navigazione ai fini di studi archeologici e stratigrafici, oppure possono essere usati per effettuare analisi strutturali o dei degradi (F. D'Andria, et al, 2008).

Rappresentazioni a scala urbana

I rilievi a scala urbana del 2015 hanno permesso di generare diversi output quali: il DSM (Digital Surface Model) funzionale alla rappresentazione a scala urbana dello stato di fatto e dell'andamento del terreno e le ortofoto (F. Chiabrando, et al, 2017) *“a tutti gli effetti una carta proiettata,*

dotata di caratteristiche di scala e precisione non lontane dalla rappresentazione vettoriale” (A.Spanò in F. D’Andria, et al, 2008).

Per tali acquisizioni dei dati è stato utilizzato il drone eBee della SenseFly, impostando il GSD a 2cm per ricavare informazioni sufficientemente precise per un volo a scala urbana (1:1000).

Fig. 3.37: SenseFly Ebee drone



Il dispositivo è stato equipaggiato con due sensori diversi: il primo è il Canon PowerShot S11 RGB che, con una risoluzione di 12 MPixel, è in grado di catturare dati nello spettro visibile; lo scopo del rilievo è quello di ricavare ortofoto e modelli tridimensionali fotogrammetrici sono stati processati i dati RGB, che ricavano informazioni nello spettro visibile.

Sulle aree interessate dal rilievo sono stati posizionati dei target e successivamente

misurati come punti di controllo attraverso l'utilizzo di un approccio GNSS tramite tecnica RTK. In particolare sono stati impiegati due GPS Leica System 500: il primo è stato posizionato su di un vertice principale della rete topografica, mentre il secondo è stato utilizzato come rover, facendo ricorso alla comunicazione radio tra i due ricevitori per la trasmissione della correzione in tempo reale. Infine le coordinate di punti di controllo sono state misurate con un'accuratezza orizzontale di 0,02m e una tolleranza verticale di 0,04m.

L'elaborazione dei dati acquisiti è avvenuta in tre fasi distinte: processo iniziale, densificazione della nuvola di punti, generazione del DSM e dell'ortofoto. Durante la prima fase vengono estratte le informazioni di orientamento interno e esterno per generare una nuvola sparsa di punti.

Grazie al software di elaborazione dati è possibile importare le coordinate dei targets e individuarli nei fotogrammi per editare i TPs e CPs, i primi sono i punti di matching tra i fotogrammi, i secondi invece permettono di ottenere un output di alta qualità sia in termini di precisione geometrica sia di accuratezza di georeferenziazione.

Supporti alle ricerche archeologiche e storiche a Hierapolis mediante gli strumenti della geomatica

Dopo questa operazione il software è in grado di riottimizzare il modello in un sistema di coordinate reali.

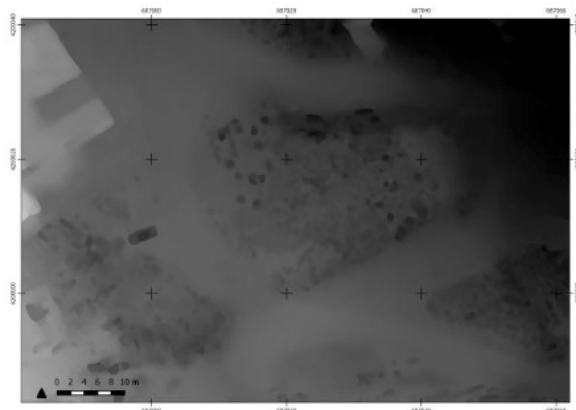
All'interno del software viene successivamente generata una densificazione della nuvola utile alla generazione di modelli 3D texturizzati e ortofoto.

Seguono due esempi di output derivati dal rilievo con UAV:

Fig. 3.38: Estratto ortofoto del Santuario di Apollo da modello fotogrammetrico - Area A
Realizzata da gruppo di Geomatica del Politecnico di Torino.



Fig. 3.39: Estratto DSM dei reperti archeologici catalogati da modello fotogrammetrico
Realizzata da gruppo di Geomatica del Politecnico di Torino.



Segue un esempio di catalogazione in ambiente GIS dei reperti archeologici grazie all'integrazione del UAV.

Fig. 3.40: Rappresentazione in ambiente GIS della catalogazione dei reperti archeologici.

Realizzata da gruppo di Geomatica del Politecnico di Torino.



Rappresentazioni a scala architettonica

I rilievi a scala architettonica hanno invece permesso di documentare i manufatti con una accuratezza maggiore¹, complice, come citato precedentemente, l'unione in alcuni casi delle tecnologie UAV e LiDAR. Sono stati infatti eseguiti rilievi di dettaglio utili allo studio dei manufatti, in particolare in questa tesi tratteremo due dei rilievi eseguiti: il rilievo sul Ninfeo del Santuario di Apollo e sul Ninfeo dei Tritoni.

In particolare, per quanto concerne il Ninfeo del Santuario di Apollo, sono stati eseguiti diversi voli con UAV e alcune scansioni LiDAR. L'integrazione di queste due tecnologie ha permesso di generare un modello di studio estremamente dettagliato grazie alle scansioni laser²; è possibile vedere la differenza tra una mesh generata da una nuvola di punti fotogrammetrica UAV e una LiDAR in figura 3.42.

Tuttavia questa tecnologia presenta alcuni limiti, uno tra questi è la difficoltà di rilievo delle coperture vista la sua natura di laser scanner terrestre. Per questo motivo le scansioni LiDAR sono state integrate alle scansioni fotogrammetriche da drone, colmando così le sue lacune.

Per i rilievi di dettaglio del Ninfeo del Santuario di Apollo è stato utilizzato un Phantom DJI 4, un dispositivo UAV con all'interno un ricevitore GPS/GNSS per

eseguire autonomamente un volo prestabilito. Esso consiste in uno strumento a basso costo che risponde alle necessità di portabilità e di rispetto delle norme turche sui voli. (A. Spanò, F. Chiabrando, G. Sammartano, L. Teppati Losè, 2018)

Fig. 3.41: Immagine di un DJI Phantom 4 con tabella delle specifiche tecniche



payload (with batt.)	1380 gr.
Max speed	16 m/s (without wind)
Camera sensor	1/2.3" da 12 Mpixels
Camera lens	FOV 94° 20 mm (35 mm format)

A causa delle dimensioni imponenti del monumento, il GSD è stato definito attorno a 1 cm, questo aspetto fa derivare una quota di volo di 25 m. Il drone ha eseguito delle strisciate nadirali ed oblique per rilevare con precisione sia il terreno, sia gli alzati. L'elaborazione dei dati ottenuti dai voli è stata eseguita con il software Agisoft Photoscan, che ha generato una nuvola di punti, a partire da 241 immagini, molto precisa in quanto i punti di controllo sono stati misurati con la stazione totale, infatti il risultato finale ha raggiunto una accuratezza intorno ai 5 millimetri.

Il lavoro di post-processing utile all'allineamento delle due nuvole UAV e LiDAR è estremamente importante per generare un output preciso. (A. Spanò, et al, 2018)

1: L'accuratezza nei rilievi di dettaglio è nell'ordine dei millimetri, crf. cap. 4

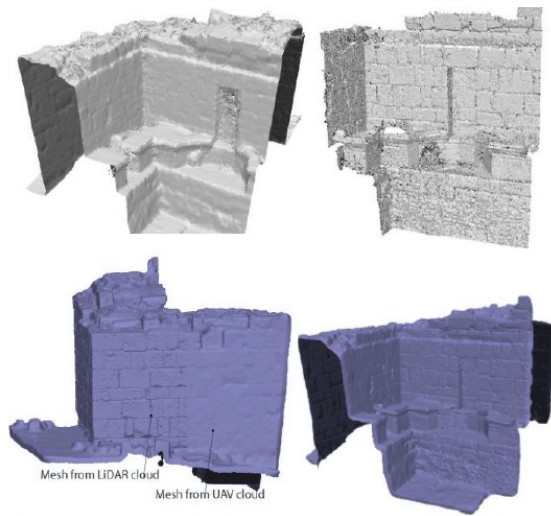
2: La scansione dell'angolo nord mette in evidenza la differenza tra una tecnologia UAV e LiDAR: il modello segmentato di questa porzione ricavato da scansioni LiDAR, infatti, contiene quasi 3 milioni di punti, mentre quello ottenuto con la fotogrammetria UAV, ne contiene quasi 331 mila

Supporti alle ricerche archeologiche e storiche a Hierapolis mediante gli strumenti della geomatica

Queste operazioni di integrazione delle scansioni permette di generare modelli multiscala, ovvero modelli che integrano rilievi a grande scala, visti precedentemente, con rilievi di dettaglio. La nostra tesi di laurea si basa su questo principio, che come vedremo successivamente nei capitoli dedicati al progetto, permette inoltre di alleggerire i modelli per essere inseriti all'interno di software per la navigazione VR.

Fig. 3.42: Comparazione mesh generata da una nuvola di punti fotogrammetrica e una LiDAR.

Realizzata da gruppo di Geomatica del Politecnico di Torino.



4. IL PROGETTO DI DIGITALIZZAZIONE DEL NINFEO DEI TRITONI E DEL NINFEO DEL SANTUARIO DI APOLLO

4.1 Obiettivi del progetto

Il progetto nasce dalla volontà di documentare il Patrimonio Architettonico della città di Hierapolis sfruttando il concetto di multidisciplinarietà. Grazie all'importante contributo fornito dal Professor Campagna, che ha seguito il nostro percorso di Tesi di Laurea fornendoci materiale e indicazioni indispensabili alla sua stesura, si è potuto coniugare il contributo della Geomatica alle esigenze della ricerca archeologica. Il nostro lavoro parte da questo presupposto, ed ha comportato la ricognizione su alcune fonti bibliografiche per acquisire le conoscenze basilari sulle aree monumentali dei due ninfei prescelte per la nostra tesi.

La Tesi si sviluppa su due applicazioni di geomatica e poi di VR, su due monumenti della Città di Hierapolis, il Ninfeo dei Tritoni e il Ninfeo del Santuario di Apollo. Per quanto concerne il primo, l'intento è quello di documentare, mediante una simulazione semplificata, il terremoto del VII secolo d.C. che ha causato il crollo del muro di fondo del Ninfeo e che, come visto in precedenza, ha portato alla dismissione del Ninfeo stesso. Per quanto riguarda il Ninfeo del Santuario di Apollo, invece, l'intento è quello di proporre una ricostruzione virtuale della facciata ipostila, generando

un modello che possa anche essere di supporto alla prosecuzione degli studi archeologici e della realizzazione del progetto di anastilosi previsto nell'angolo NORD-EST dell'edificio, angolo soggetto a studi approfonditi dal Gruppo di ricerca del Professore Campagna di individuazione dei blocchi marmorei della trabeazione.

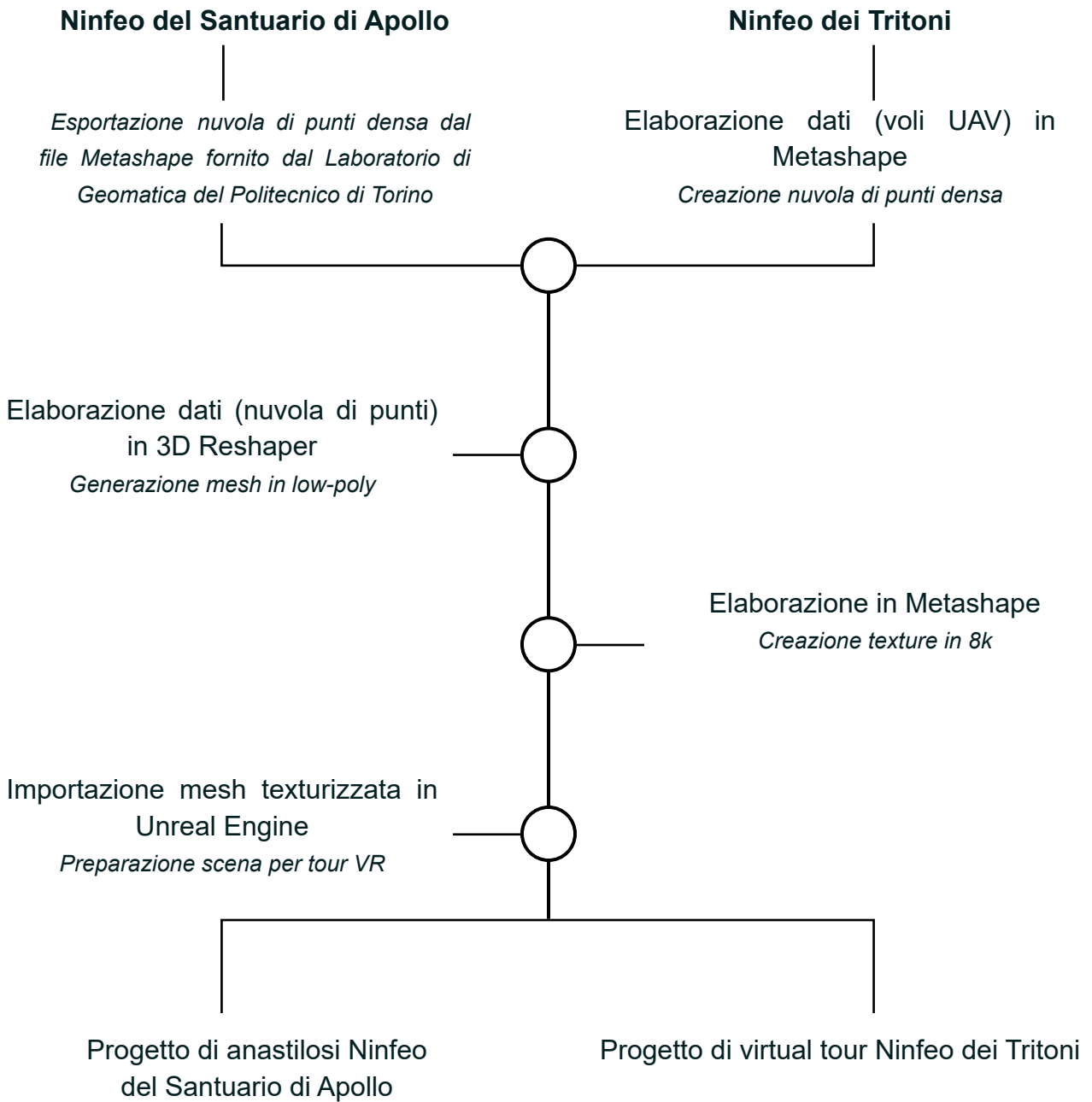
Per la realizzazione dei due progetti sono stati utilizzati i due voli UAV eseguito nel 2018 dal gruppo di Geomatica del Politecnico di Torino. La scelta dell'utilizzo della fotogrammetria digitale per la generazione dei modelli 3D deriva dalla necessità di avere modelli precisi, texturizzati e sufficientemente "leggeri" per poter essere utilizzati all'interno dei software di navigazione tramite VR che vedremo nei capitoli successivi.

Il procedimento seguito per la generazione dei due modelli 3D fotogrammetrici è il medesimo per entrambi i Ninfei e prevede un importante lavoro di segmentazione della nuvola di punti che vedremo successivamente più nel dettaglio¹.

Segue la sequenza di operazioni che abbiamo eseguito per la generazione dei due modelli fotogrammetrici da importare all'interno del software VR.

1: crf. p. 73 ; p. 88

Fig. 4.1: Pipeline elaborazione dei dati sui Ninfei dei Tritoni e del Santuario di Apollo



4.2 Il Ninfeo dei Tritoni: elaborazione dei dati provenienti da fotogrammetria digitale UAV per la generazione di un modello fotogrammetrico compatibile con software di realtà virtuale

Come citato in precedenza abbiamo utilizzato i dati forniti dal Gruppo di Geomatica del Politecnico di Torino che ha eseguito un volo nel 2018 sul Ninfeo. Il volo è stato realizzato mediante un

Fig. 4.2: Report Metashape Ninfeo dei Tritoni - informazioni generali sui fotogrammi

Survey Data

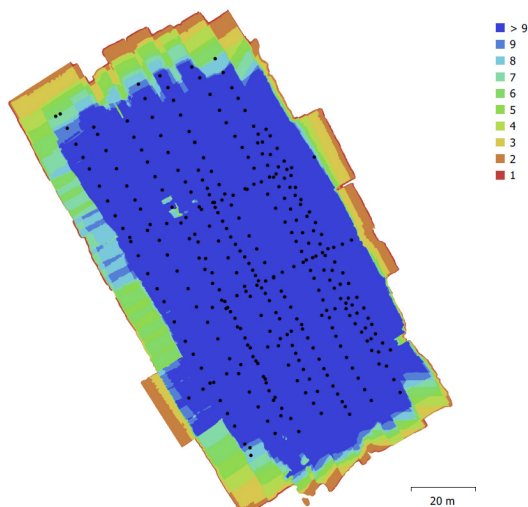


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	317	Camera stations:	317
Flying altitude:	20.8 m	Tie points:	475,247
Ground resolution:	7.85 mm/pix	Projections:	1,628,346
Coverage area:	0.0117 km ²	Reprojection error:	1.25 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC330 (3.61mm)	4000 x 3000	3.61 mm	1.56 x 1.56 μ m	No

Table 1. Cameras.

Drone DJI Phantom 4 Pro, sono state acquisite 317 immagini ad una quota di volo media di circa 20 metri. Dal report generato dal software utilizzato per la generazione della nuvola di punti (Agisoft Metashape) è possibile notare come il percorso del drone sia lineare e regolare, con un overlap delle immagini superiore a 9 fotogrammi nella zona centrale del Ninfeo.

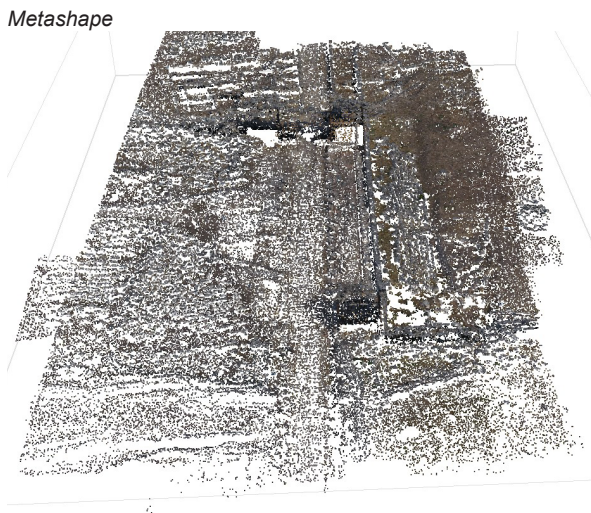
Orientamento dei fotogrammi

La prima operazione eseguita, dopo aver importato i fotogrammi all'interno del software Agisoft Metashape, è stata quella di orientare i fotogrammi: il programma stima automaticamente i parametri di orientamento interno ed esterno della camera, generando una nuvola sparsa di punti preliminare in un sistema di coordinate relativo, utilizzando una triangolazione area e un "bundle block adjustment".

Per ottenere una stima della posizione delle camere più accurata possibile abbiamo impostato un'accuratezza di allineamento a livello *highest*, che aumenta di 4 volte la dimensione di ogni foto migliorando l'accuratezza per la localizzazione dei TP (*tie points*). Per quanto concerne i parametri di allineamento, il *Key Point Limit* indica il limite massimo delle caratteristiche dei punti di ogni fotogramma che il programma deve rilevare; il *Tie Point Limit* indica il

limite massimo dei punti di matching tra le immagini sfruttando l'algoritmo SIFT citato in precedenza. Per il nostro progetto abbiamo utilizzato un limite di 40.000 di key points e 10.000 di tie points. Grazie a questi parametri è stato possibile stimare le coordinate dei centri di presa e il loro orientamento per tutte le immagini acquisite.

Fig. 4.3: Esempio di nuvola sparsa all'interno del software



Individuazione GCP e CP

Successivamente abbiamo individuato manualmente in ogni fotogramma i target posizionati nei pressi del Ninfeo, le cui coordinate sono state misurate durante la campagna tramite sistemi GNSS. Ai target vengono assegnate le coordinate rilevate e vengono utilizzate come GCPs o CPs. Questo passaggio permette di ottenere un output di alta qualità in termini di accuratezza di georeferenziazione

(Agisoft Metashape user manual, 2019). Sono stati individuati 13 punti di controllo, 9 utilizzati come GCPs e 4 come CPs. L'errore medio (RMSe) ottenuto alla fine di questa fase dell'elaborazione è al di sotto del centimetro per i GCPs e nell'ordine di un paio di centimetri per i CPs.

Fig. 4.4: Report Metashape per il Ninfeo dei Tritoni - GCP

Ground Control Points

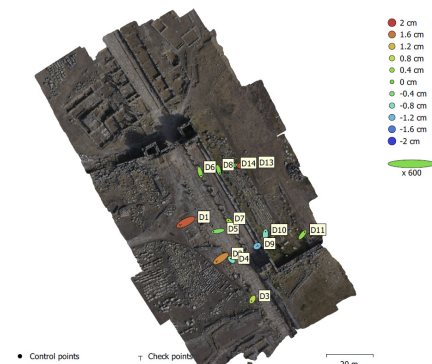


Fig. 4.5: Report Metashape Ninfeo dei Tritoni -

GCP tabella errori

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
D3	-0.138733	-0.227125	0.707629	0.756023	0.662 (20)
D4	-0.15973	0.153354	-0.789281	0.819753	0.458 (49)
D5	-0.637767	-0.106091	-0.240691	0.68988	0.526 (54)
D6	0.134427	-0.466871	0.262764	0.552344	0.527 (44)
D7	-0.159505	0.160841	0.415078	0.472865	0.641 (54)
D8	0.144431	-0.460981	0.110543	0.495564	0.511 (46)
D10	0.0339375	0.436049	-0.813678	0.923776	0.550 (70)
D11	0.307885	0.382472	0.305467	0.578262	0.648 (20)
D14	0.475056	0.128352	0.0421691	0.493893	0.361 (35)
Total	0.305051	0.315453	0.493553	0.660425	0.540

Table 5. Control points.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
D1	-0.832106	-0.423924	1.77729	2.0077	0.671 (33)
D2	-0.65253	-0.444489	1.47197	1.67035	0.707 (54)
D9	0.104558	0.0667502	-1.15485	1.1615	0.462 (51)
D13	0.794818	0.0921785	1.89486	2.05687	0.493 (53)
Total	0.663488	0.312344	1.60075	1.76073	0.586

Table 6. Check points.

Grazie all'utilizzo dei punti di controllo è

possibile georeferenziare le immagini acquisite e i successivi prodotti del rilievo in un sistema di coordinate globale (WGS84), risolvendo la fase di orientamento esterno del processo fotogrammetrico.

Elaborazione della nuvola di punti densa

Lo step successivo consiste nella densificazione della nuvola, processo che prende il nome di *dense matching*.

Il software, per eseguire questa operazione, processa le posizioni stimate delle camere per generare una nuvola densa di punti estremamente dettagliata. La nuvola di punti densa consente, nelle fasi successive, di generare mesh 3D, ortofoto, DEM e texture.

Anche in questo secondo step sono disponibili diversi parametri di ricostruzione che influenzano la qualità finale della nuvola.

Per il progetto del Ninfeo dei Tritoni sono stati utilizzati i seguenti parametri, che hanno generato una nuvola densa composta da 307.044.928 di punti:

Dense Point Cloud	
Points	307,044,928
Point colors	3 bands, uint8
Depth maps generation parameters	
Quality	Ultra High
Filtering mode	Mild

Vista la necessità di realizzare un modello tridimensionale fotogrammetrico fedele alla realtà, abbiamo scelto di impostare il parametro di ricostruzione su un livello

ultrahigh, che permette di processare le foto originali senza ridurle di dimensioni. Per quanto riguarda il secondo parametro, ovvero la *filtering mode*, che consente di calcolare le mappe di profondità e filtrarne i valori anomali per ogni immagine, abbiamo scelto di utilizzare la modalità *mild*, per la necessità di restituire in maniera distinguibile gli elementi più piccoli presenti nei fotogrammi come ad esempio i blocchi in travertino, la pavimentazione, i giunti di malta dei blocchi.

Fig. 4.6: Esempio di nuvola densa di punti da Metashape



Elaborazione della mesh preliminare

Il terzo step permette di costruire un modello poligonale partendo dalla nuvola di punti precedentemente generata.

Per il progetto del Ninfeo dei Tritoni abbiamo generato un modello poligonale composto da 64.981.528 facce.

Per la generazione del modello poligonale abbiamo utilizzato i seguenti parametri:

- *Surface type*: abbiamo scelto un tipo di superficie *arbitrary* poiché adatto per la modellazione architettonica come edifici e statue.
- *Source data*: vista la necessità di ottenere un modello poligonale altamente dettagliato abbiamo impostato come fonte per la generazione della mesh la nuvola di punti densa.
- *Interpolation*: abbiamo deciso di abilitare l'interpolazione per far sì che il software chiuda automaticamente i poligoni non risolti della mesh.

Considerazioni sul modello 3D fotogrammetrico

Il modello tridimensionale fotogrammetrico ottenuto da Agisoft Metashape, come abbiamo visto precedentemente, presenta alcuni problemi di incompatibilità con il software che useremo successivamente volto alla navigazione VR. Infatti per una esperienza di navigazione fluida è necessario che il modello importato sia sufficientemente leggero conservando però un alto livello di dettaglio. Per soddisfare questi due requisiti è necessario manipolare il modello 3D tramite un processo di segmentazione, cercando di diminuire il più possibile il numero di poligoni nelle porzioni meno rilevanti, come ad esempio il contesto e le parti di terreno non oggetto di scavo.

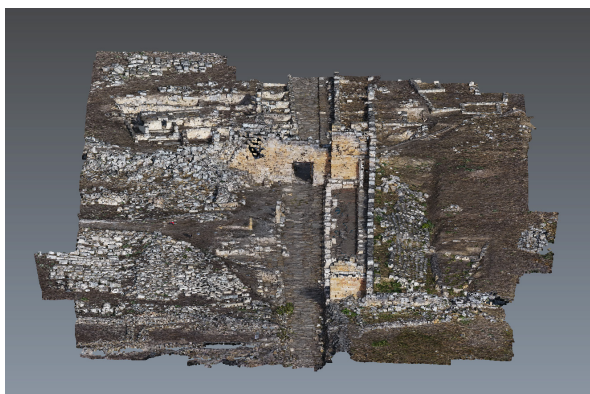
Per giungere a un risultato soddisfacente sono state effettuati diversi tentativi. Il primo tentativo è stato quello di texturizzare la mesh ottenuta da Metashape e importarla nel software di navigazione VR, tuttavia, come citato sopra, la navigazione risultava poco fluida e la texture poco definita. Nel secondo tentativo è stata importata la mesh generata da Metashape su 3D Reshaper, un software che permette di avere maggiori strumenti per la gestione di nuvole e mesh, ma il processo di segmentazione della mesh

risultava estremamente dispendioso in termini di tempo, e inoltre le operazioni di riduzione della mesh non erano sufficienti. Il tentativo che risulta essere il più adatto ai nostri scopi consiste nel gestire le operazioni di segmentazione direttamente sulla nuvola di punti densa generata in Metashape all'interno del software 3D Reshaper. Così facendo non si eseguiranno più operazioni di riduzione della mesh ma, partendo da una nuvola di punti densa molto dettagliata, si può gestire il livello di dettaglio della mesh. Questo aspetto viene trattato di seguito più nel dettaglio.

Ottimizzazione dei dati per la compatibilità con i software VR

Come citato precedentemente il metodo da noi utilizzato, che per i nostri scopi risulta essere il più adatto, prevede come primo step l'importazione della nuvola di punti geolocalizzata in WGS84 all'interno del software 3D Reshaper.

Fig. 4.7: Esempio di nuvola densa di punti in 3DReshaper



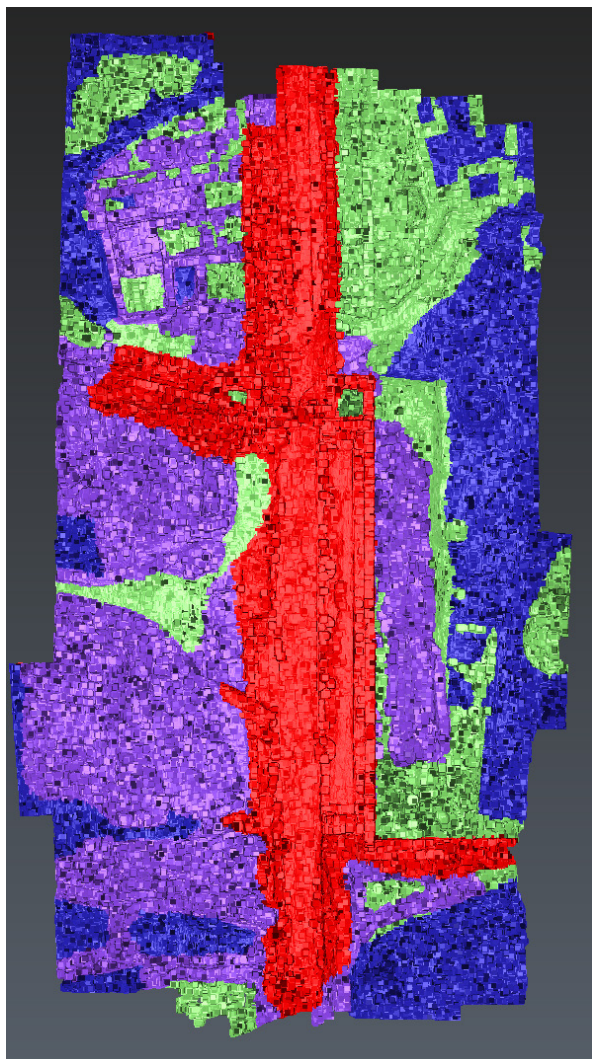
La segmentazione della nuvola di punti

Tale nuvola di punti è stata segmentata secondo 4 LOD (*level of detail*) come visibile in figura 4.8. Il primo livello, ovvero quello con dettaglio minore, interessa le aree di terreno circostanti che hanno valenza di contesto e sono aree prevalentemente pianeggianti che non necessitano di un dettaglio accurato, necessario invece per gli alzati. Il secondo e il terzo livello interessano le aree che costeggiano la Via di Frontino dove sono collocati resti archeologici e alzati di rilievo.

L'ultimo livello, con dettaglio maggiore, comprende la Via di Frontino, i resti della Porta bizantina Nord e la torre addossata, i resti del muro di fondo del Ninfeo e della vasca, LA TORRE SUD e i resti delle murature delle abitazioni bizantine oltre la Porta Nord.

Questa segmentazione è stata dettata dalla necessità di mantenere un ottimo livello di dettaglio sui resti archeologici e sulla zona di navigazione principale (Via di Frontino) e ridurre il dettaglio nelle zone più lontane dal punto di navigazione principale.

Fig. 4.8: Esempio di segmentazione nuvola densa di punti nel software 3DReshaper

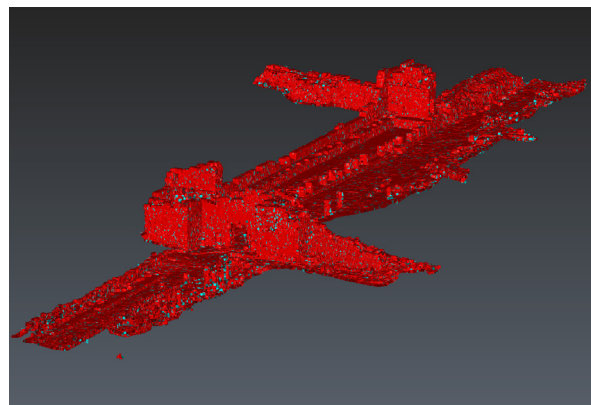


- Livello dettaglio 4
- Livello dettaglio 3
- Livello dettaglio 2
- Livello dettaglio 1

Successivamente abbiamo eseguito le operazioni di riduzione del rumore.

E' stato necessario ridurre il rumore della nuvola di punti per evitare di ottenere una mesh affetta da errori topologici . Per eseguire questa operazione è stata prima utilizzata la funzione di riduzione rumore integrata all'interno del software e successivamente eseguita una pulizia manuale.

Fig. 4.9: Esempio di riduzione automatica del rumore sulla nuvola di punti nel software 3DReshaper



Nell'immagine è rappresentata la porzione della nuvola di punti con LOD 4 i cui punti color ciano raffigurano i punti che verranno eliminati in seguito all'operazione di riduzione del rumore, che, in questo caso sono 38000.

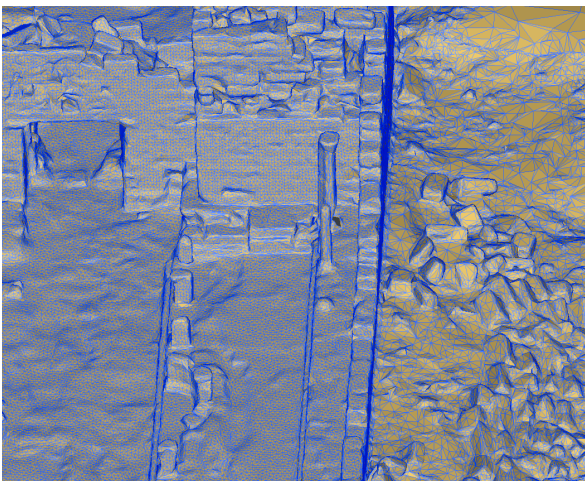
Elaborazione e post processing della mesh

Eseguita una pulizia totale della nuvola di punti su tutto il Ninfeo dei Tritoni, abbiamo generato le 4 mesh secondo i 4 LOD citati in precedenza.

Nel 4 LOD ad esempio, abbiamo cercato di generare una mesh che fosse altamente dettagliata e fedele alla realtà riducendo al minimo il numero di poligoni. Nel primo LOD, invece, la mesh presenta triangoli a maglia larga.

Durante la fase di generazione delle mesh è possibile osservare nella maglia poligonale alcune mancanze e/o artefatti. La correzione di questi errori può avvenire automaticamente o manualmente, abbiamo scelto la correzione manuale poichè risulta essere la più efficace per i nostri scopi.

Fig. 4.10: Esempio di mesh generata secondo i 4 LOD



In fase di chiusura dei buchi può avvenire una inversione delle normali delle superfici, ovvero l'inversione di orientamento dei vettori perpendicolari al piano tangente a un punto della superficie curva. Questo aspetto è critico poichè in fase di texturizzazione tutte le normali della mesh devono avere lo stesso orientamento, pertanto è necessario agire manualmente per ovviare a questo problema. L'ultimo passaggio eseguito consiste nella fusione delle varie mesh per ottenere un'unica superficie poligonale. Anche in questo caso abbiamo deciso di procedere con un'operazione semi-automatica che consente di creare superfici di collegamento tra mesh adiacenti. Il risultato finale è una mesh ridotta del 98.6% composta da 903.145 facce contro le 64.981.528 di facce del modello di partenza.

Fig. 4.11: Esempio di unione della mesh in 3DReshaper

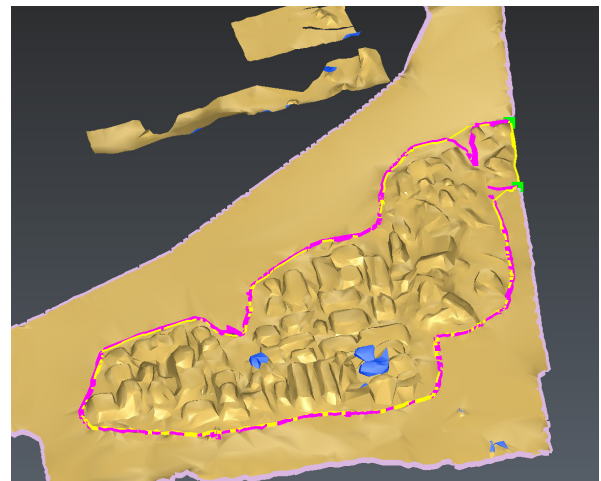
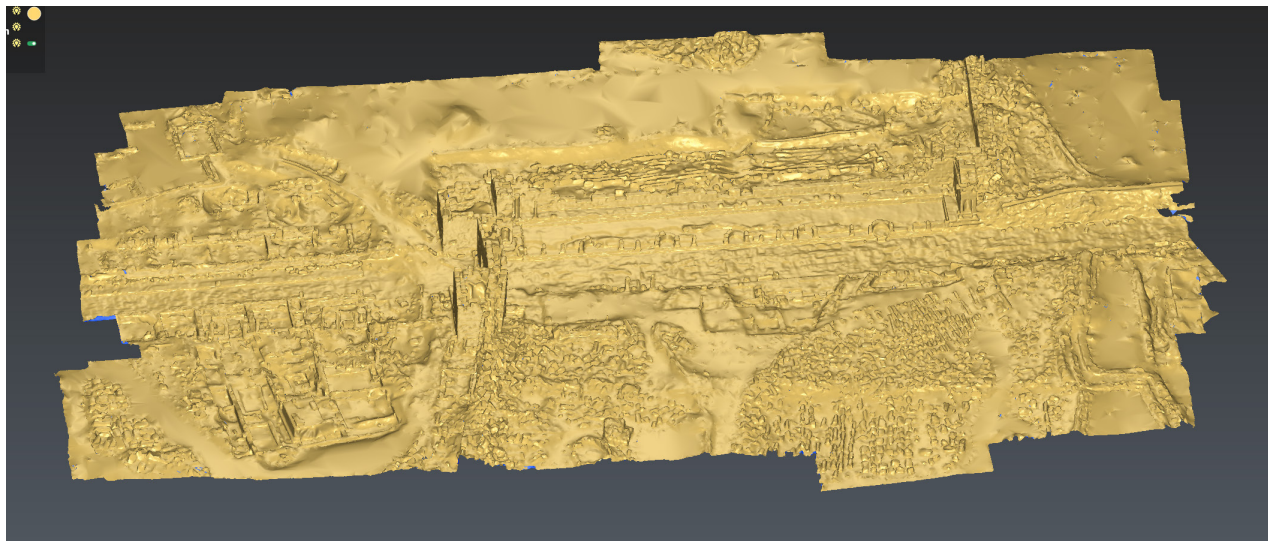


Fig. 4.12: Mesh finale in 3DReshaper



Texturizzazione della mesh

La texture è fondamentale nel nostro lavoro dal momento che il modello elaborato precedentemente ha subito un cambiamento topologico (*retopology*). Risulta quindi necessario compensare la mancanza di dettaglio geometrico nelle aree a LOD più basso e arricchire le aree a LOD più alto attraverso una texture dettagliata.

Questa *retopology* è stata necessaria dal momento che il modello fotogrammetrico è pensato anche per essere inserito all'interno di software per la navigazione VR. Tuttavia andando a modificare le geometrie originali del modello, durante la fase di texturizzazione emergono alcune criticità.

Abbiamo infatti eseguito diverse prove di

texturizzazione prima di ottenere un risultato ottimale.

Il primo tentativo nasce dalla necessità di completare il lavoro di texturizzazione all'interno del programma 3D Reshaper, per evitare eventuali problemi di incompatibilità di formato e localizzazione del modello tra diversi programmi di fotogrammetria. Abbiamo quindi provato a generare la texture estrapolando le informazioni radiometriche contenute nei punti della nuvola di punti densa importata da Metashape. Questo metodo attribuisce i valori radiometrici contenuti nella nuvola di punti solamente ai vertici della mesh. Tuttavia, a causa della segmentazione effettuata in precedenza, le aree a LOD basso risultano avere una texture che non

soddisfa i nostri requisiti. In figura 4.13 si può notare infatti che nella porzione di terreno a LOD basso, la texture risulta essere scarsamente precisa e dettagliata.

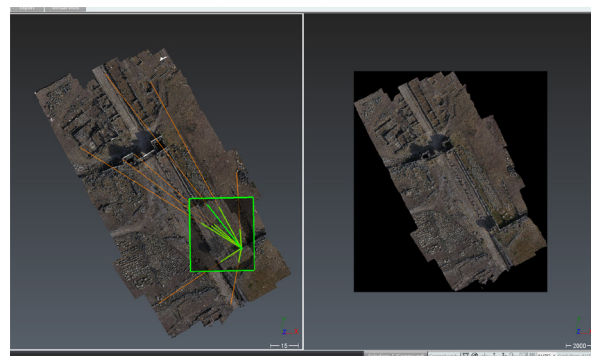
Fig. 4.13: *Texturizzazione mesh tramite nuvola di punti*



Il secondo tentativo, sempre all'interno di 3D Reshaper, sfrutta la funzione *texture from picture* contenuta all'interno del programma stesso, che permette di proiettare i singoli fotogrammi sul modello. Questo metodo è risultato molto efficace poichè ha permesso di proiettare l'ortofoto generata da Metashape precedentemente e quindi generare una texture di alta qualità. Tuttavia essendo l'ortofoto una immagine che non rappresenta gli

alzati, il modello in queste parti risulta mancante di texture. E' possibile integrare alla texture altri fotogrammi, però essendo un lavoro che prevede il riconoscimento manuale dei punti immagine e i punti della mesh, risulta poco preciso soprattutto nel nostro caso, in cui la mesh ha subito una *retopology*.

Fig. 4.14: *Texturizzazione mesh tramite texture from picture*

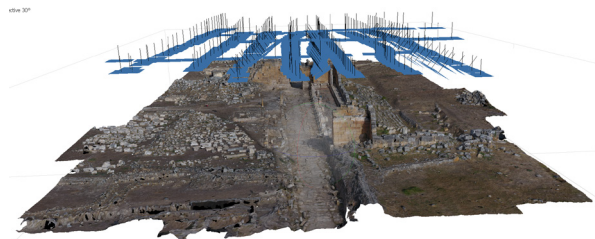


L'ultimo tentativo, che nel nostro caso è risultato essere il più adatto, consiste nel sostituire il modello fotogrammetrico generato su Metashape con il modello segmentato di 3D reshaper e successivamente riproiettare i fotogrammi su questa nuova mesh.

Per eseguire questo passaggio è estremamente importante prestare attenzione ai sistemi di riferimento affinché il programma riesca ad eseguire una sostituzione dei modelli correttamente. Questo processo di texturizzazione

richiede tuttavia un grande quantitativo di memoria RAM per ottenere texture ad alta risoluzione. Per questo motivo abbiamo eseguito molteplici prove di generazione della texture a diverse risoluzioni. Le texture a bassa risoluzione (4k e 10k) non presentano un dettaglio sufficiente per la distinzione e compressione di vari elementi del modello, poichè questa risoluzione si distribuisce su un modello di grosse dimensioni. Un risultato accettabile si è ottenuto generando una texture a 25k di risoluzione, che permette di distinguere i dettagli del modello segmentato, ma che ha richiesto circa 55 GB di RAM.

Fig. 4.15: Texturizzazione 4k del modello segmentato in Agisoft Metashape



La texture in 25k ottenuta risulta quindi molto dettagliata, tuttavia all'interno dei software di navigazione VR, nello specifico *Unreal Engine 4*, non è possibile importare texture con risoluzione superiore a 8k. Quindi la strategia adottata per ovviare a questo limite consiste nel dividere la mesh in tre porzioni e generare una texture in 8k per

ognuna di esse. In questo modo si preserva la qualità desiderata ed è possibile importare il modello segmentato e diviso in tre parti all'interno del software VR.

Fig. 4.16: Schema concettuale divisione texture 8k Ninfeo dei Tritoni



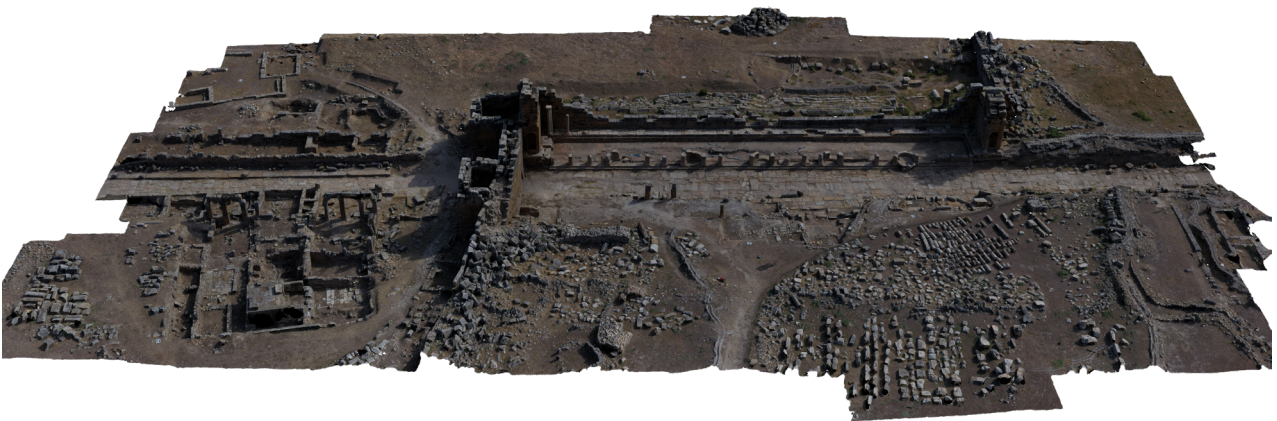
In conclusione, l'output finale generato, finalizzato sia per scopi di ricerca sia per essere importato all'interno di software VR, consiste in tre modelli separati del Ninfeo dei Tritoni, texturizzati in 8k.

Questo modello essendo stato ottimizzato risulta estremamente leggero e quindi facilmente navigabile.

Fig. 4.17: Vista da sud-est Porta Nord del modello texturizzato all'interno del software di modellazione 3D



Fig. 4.18: Vista da ovest complessiva del modello texturizzato all'interno del software di modellazione 3D



I disegni architettonici del Ninfeo dei Tritoni

Fig. 4.19: Rielaborazione dell'ortofoto con crocicchi ricavata da rielaborazione fotogrammetrica del volo UAV (Unmanned Aerial Vehicle) sul Ninfeo dei Tritoni eseguito da gruppo di Geomatica del Politecnico di Torino. GSD=1.57cm/pix

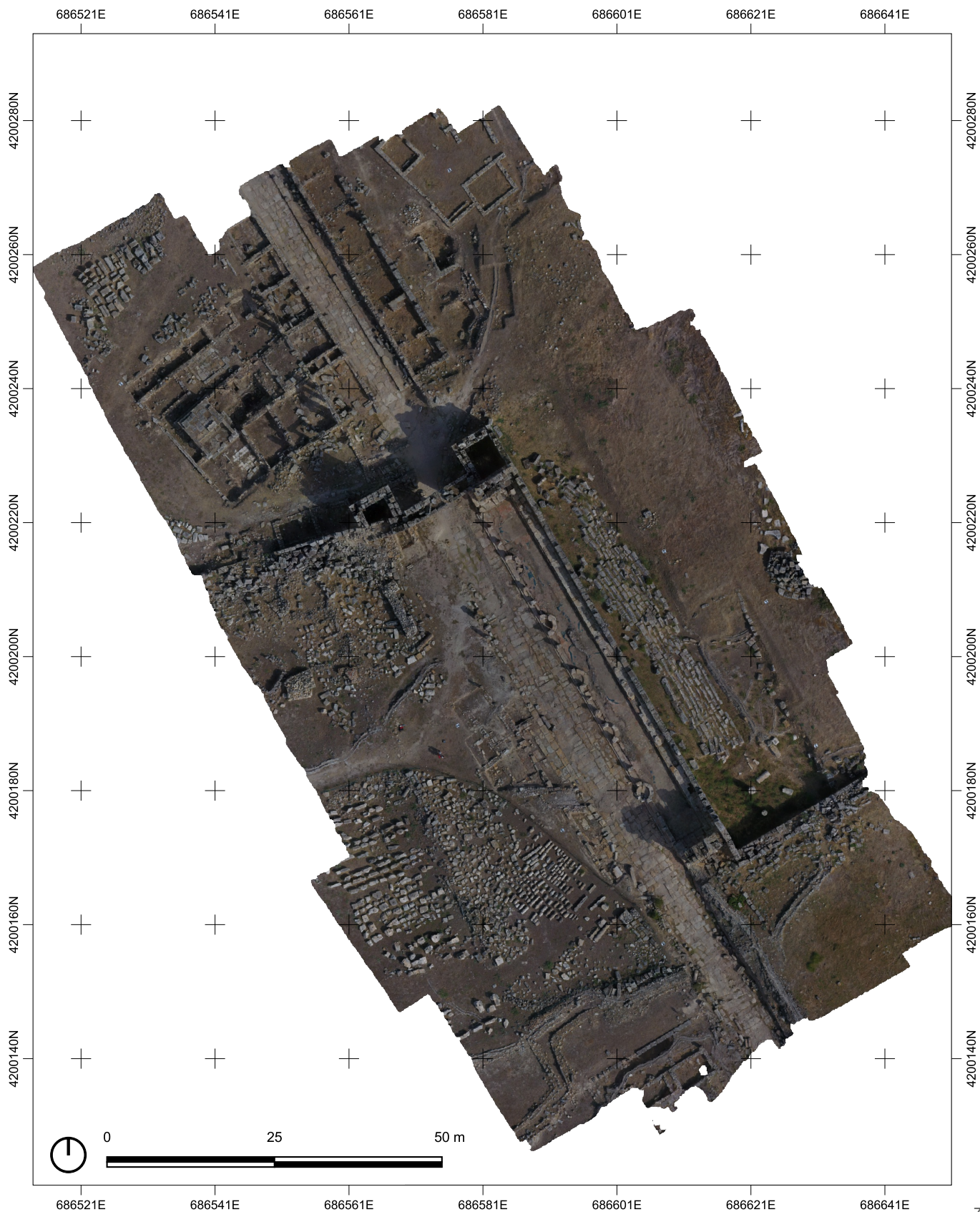


Fig. 4.20: Curve di livello quotate ed estratte da DEM (Digital Elevation Model) con equidistanza di 1 m, con ortofoto di sfondo. ricavata da rielaborazione fotogrammetrica del volo UAV (Unmanned Aerial Vehicle) sul Ninfeo dei Tritoni eseguito da gruppo di Geomatica del Politecnico di Torino. GSD=1.57cm/pix

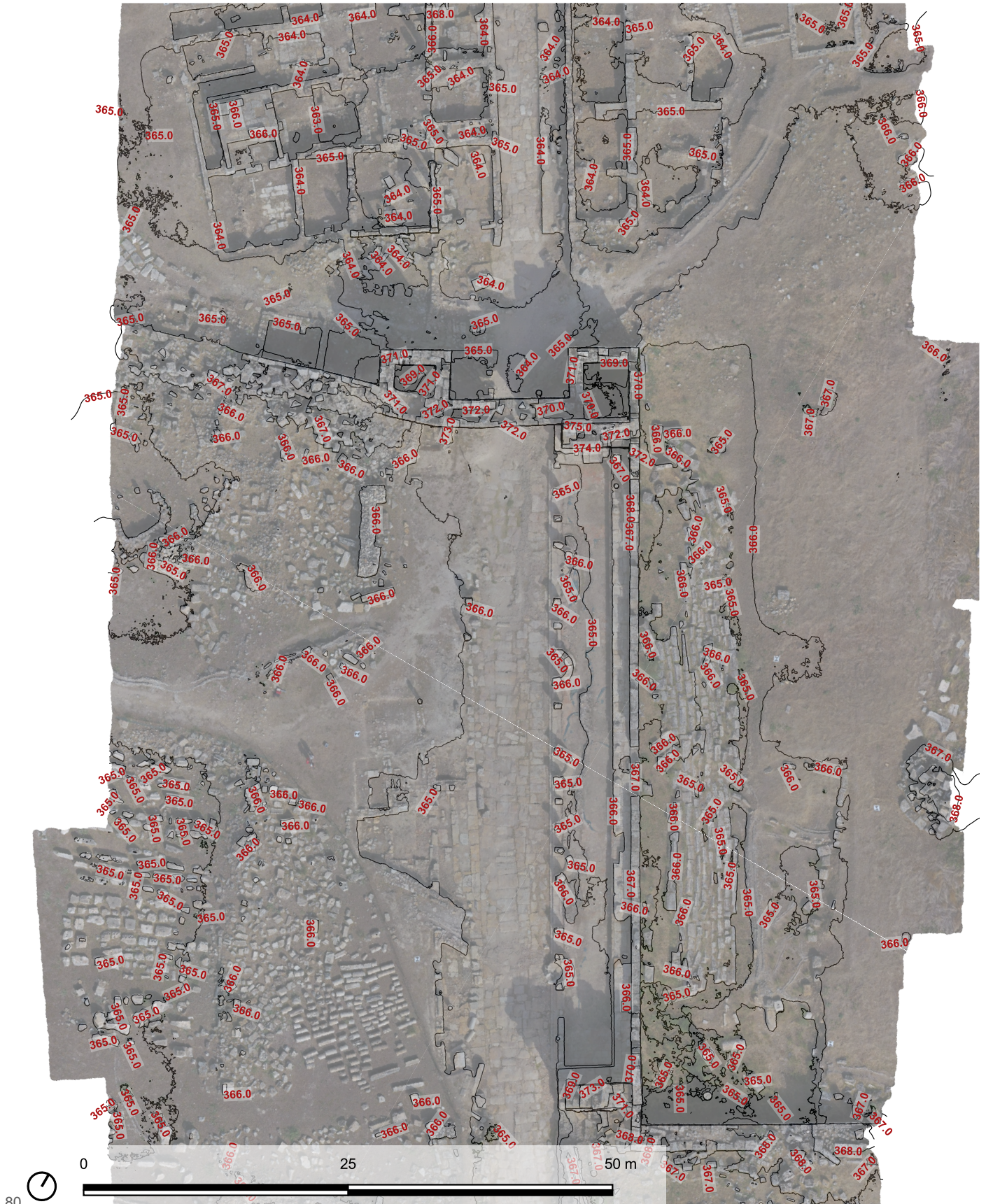


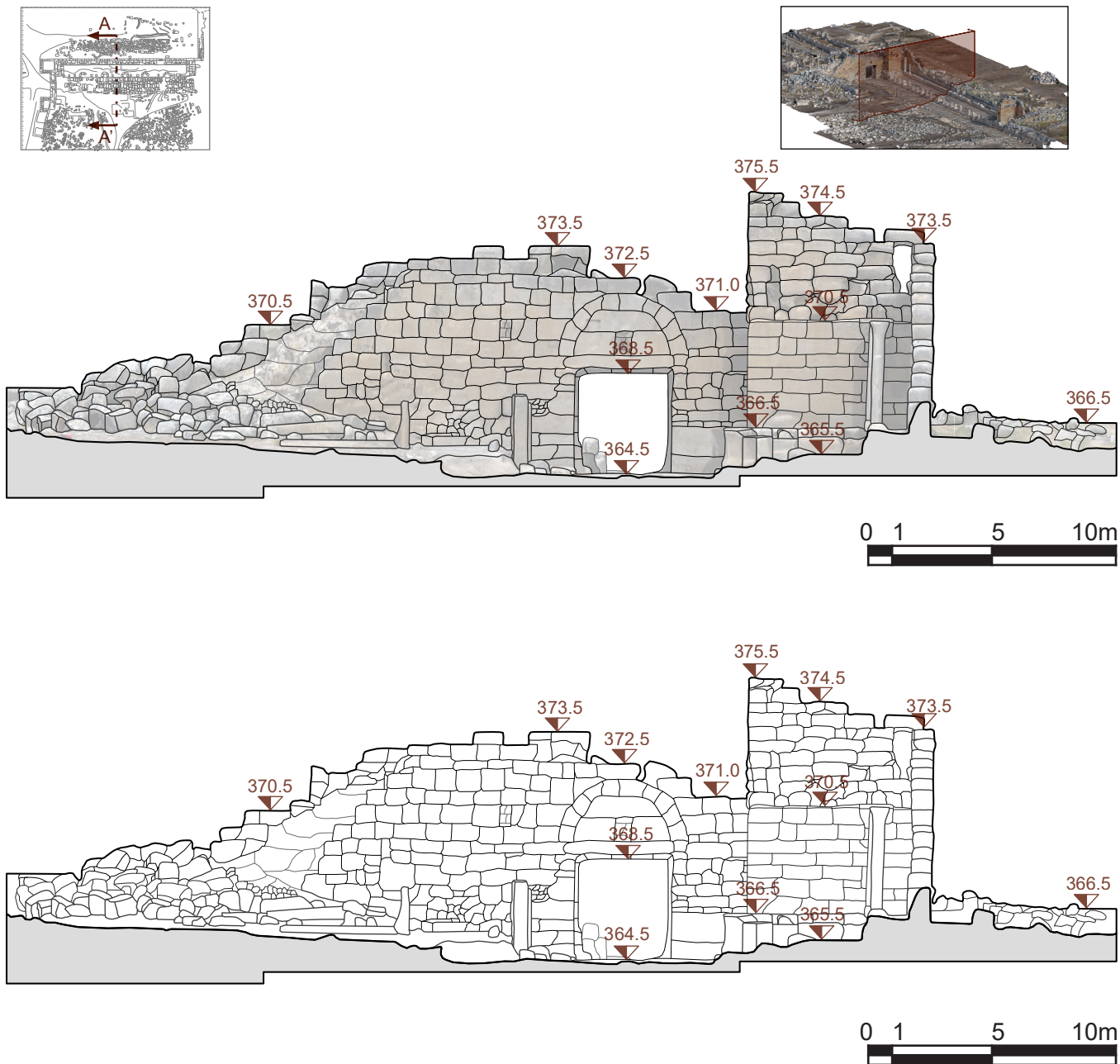
Fig. 4.21: Restituzione ortofoto - Planimetria del Ninfeo dei Tritoni con quote altimetriche SLM espresse in metri e ortofoto come sfondo



Fig. 4.22: Restituzione ortofoto - Planimetria del Ninfeo dei Tritoni con quote altimetriche SLM espresse in metri



Fig. 4.23: Sezione AA' delle strutture in situ del Ninfeo dei Tritoni ricavata da nuvola di punti con e senza nuvola di punti.



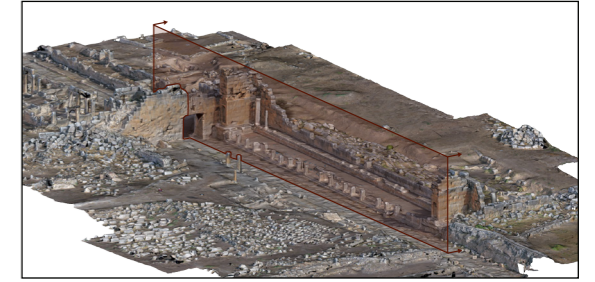
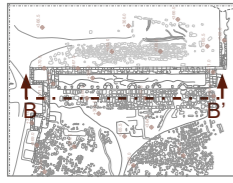
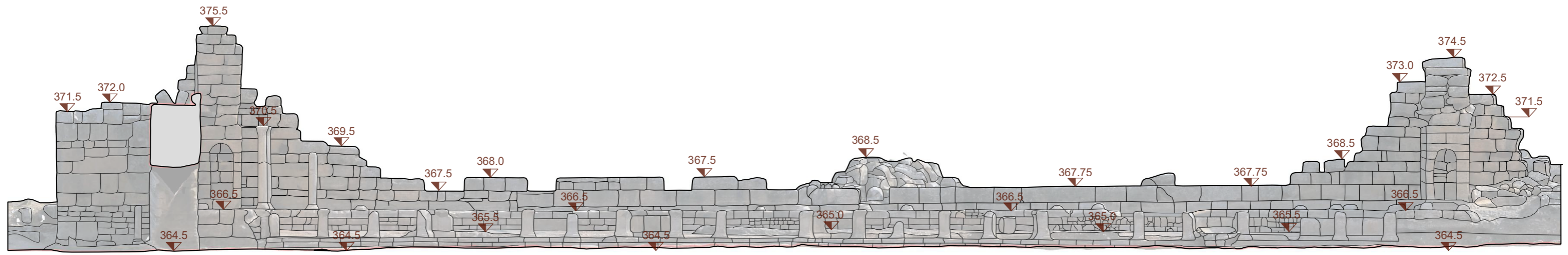
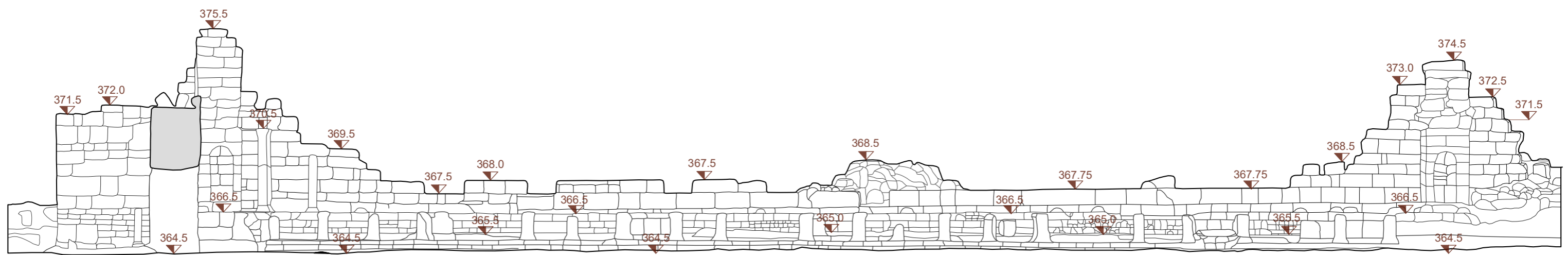


Fig. 4.24: Sezione BB' delle strutture in situ del Ninfeo dei Tritoni ricavata da nuvola di punti con e senza nuvola di punti.



SCALA 1:200
0 1 2 5m



SCALA 1:200
0 1 2 5m

4.3 Il Ninfeo del Santuario di Apollo: elaborazione dei dati provenienti da fotogrammetria digitale UAV per la generazione di un modello fotogrammetrico con fini di studio archeologico e di compatibilità con software di realtà virtuale

Come è stato descritto in precedenza, il Ninfeo del Santuario di Apollo conserva ancora oggi tracce di una complessa stratificazione storica che è oggetto di studio dai professori italiani sin dalla metà degli anni 90. Il nostro progetto di anastilosi vuole partire da questi contributi multidisciplinari per proporre una ricostruzione virtuale della facciata ipostila, generando un modello che possa anche essere di supporto alla prosecuzione degli studi archeologici. Le fasi principali in cui si articola questo percorso sono le seguenti:

- 1) Generazione del modello fotogrammetrico
- 2) Modellazione degli elementi architettonici della fronte ipostila secondo le fonti archeologiche e dei materiali
- 3) Posizionamento dei singoli blocchi della fronte ipostila sul modello 3D fotogrammetrico secondo ipotesi ricostruttive che si sono evolute anche nel corso degli scavi e l'approfondimento degli studi

4) Quotatura del disegno architettonico del progetto di anastilosi per il suo uso operativo

Gestione della nuvola di punti

Fig. 4.25: Report Metashape Ninfeo del Santuario di Apollo : informazioni generali sui fotogrammi

Survey Data

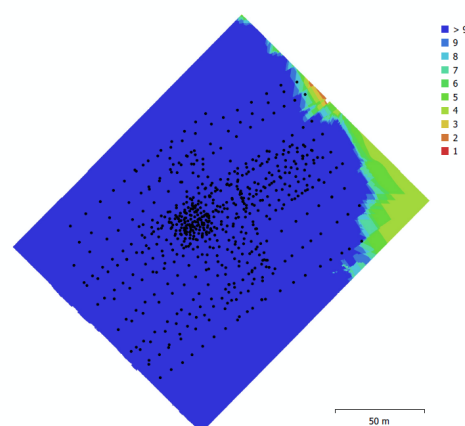


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	667	Camera stations:	667
Flying altitude:	28.9 m	Tie points:	806,087
Ground resolution:	8.52 mm/pix	Projections:	2,980,310
Coverage area:	0.027 km ²	Reprojection error:	1.66 pix

Il processo per giungere alla realizzazione del modello 3D fotogrammetrico segue le fasi evidenziate precedentemente nel progetto del Ninfeo dei Tritoni.

Nel 2018 sull'area del Santuario di Apollo sono stati realizzati numerosi voli mediante UAV utilizzando sia droni con volo automatizzato come il DJI Mavic Pro sia droni a guida manuale come il DJI Spark. La differenza principale che contraddistingue questo progetto rispetto al precedente consiste nella

disponibilità di una precedente elaborazione dei dati acquisiti, da parte del gruppo di Geomatica del Politecnico di Torino, che abbiamo utilizzato per velocizzare la fase di generazione del modello. Abbiamo infatti importato la nuvola densa di punti, già realizzata dal Team, all'interno del software 3dReshaper per procedere alla fase di pulizia e segmentazione. La nuvola importata è stata generata dall'allineamento di 667 foto scattate dai diversi voli. Sono stati utilizzati 29 GCPs e 7 CPs che hanno permesso di ottenere un errore medio sotto al centimetro.

Fig. 4.26: Cattura report Metashape Ninfeo del Santuario di Apollo - GCP

Ground Control Points



Fig. 4. GCP locations and error estimates. Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape. Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Fig. 4.27 : Report Metashape Ninfeo del Santuario di Apollo GCP tabella errori

Label	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	Total (mm)	Image (pix)
D1	-4.93053	-1.83402	-7.40893	9.08659	0.320 (25)
D2	-2.77923	6.27529	0.316953	6.87051	0.447 (19)
D4	-2.89843	2.19093	1.3625	3.88039	0.393 (29)
D5	5.85825	0.48351	-6.77784	8.97174	0.642 (13)
D6	6.72002	-4.93002	-7.63957	11.3061	0.764 (10)
D7	-0.0983875	5.87275	-2.47221	6.37265	0.852 (10)
D8	9.50856	5.15524	-7.98139	13.4422	0.687 (12)
D9	-2.85708	2.60294	-2.24858	4.4715	0.678 (21)
D10	-8.07987	2.18501	-0.293121	8.37523	0.463 (23)
D11	1.25547	-0.329118	4.22662	4.42141	0.687 (16)
D12	-2.14155	0.937466	1.265	2.65806	0.695 (28)
D13	1.48358	3.46444	5.9566	7.04872	0.274 (35)
D14	-5.8003	4.34486	5.18194	8.90919	0.243 (23)
D16	-0.185781	-5.17622	0.391661	5.19434	0.493 (9)
D18	-1.87287	0.807093	11.0467	11.2333	0.084 (10)
D20	-3.598	-7.5085	-12.524	15.0391	0.465 (19)
D21	0.180223	-2.52046	6.86431	7.31464	0.396 (44)
D22	-5.19069	-2.92995	7.46379	9.55175	0.440 (24)
D23	5.46412	6.11285	-9.28738	12.3887	0.383 (22)
D24	0.348412	-3.94229	3.37055	5.19843	0.653 (12)
D25	-2.21805	-2.04272	4.04754	5.04728	0.424 (34)
D26	-3.89115	-0.674034	2.88251	4.88919	0.249 (30)
D27	-0.688877	-6.11766	0.937343	6.22727	0.420 (19)
D28	5.30254	-5.40206	0.67233	7.59942	0.236 (13)
D29	3.52232	-4.28624	-2.39158	6.04138	0.417 (13)
D30	-0.138545	9.09931	5.06658	10.4157	0.218 (19)
D31	2.18105	-2.40079	2.12233	3.87622	0.441 (11)
D32	2.55325	0.636451	0.678273	2.71739	0.469 (10)
D33	2.99152	-0.0740439	-4.82883	5.68087	0.267 (7)
DNIN					
D3					
Total	4.07065	4.18046	5.51823	8.03102	0.465

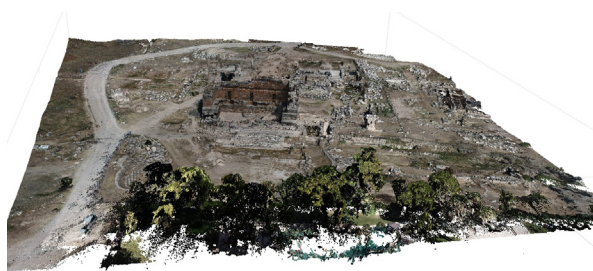
Table 5. Control points.

La nuvola densa composta da 115.378.482 di punti con parametro di ricostruzione di livello *high*, che elabora le immagini acquisite alla risoluzione originale, ovvero senza applicare *downscaling* (Agisoft Metashape).

Dense Point Cloud	
Points	115,378,482
Point colors	3 bands, uint8
Depth maps generation parameters	
Quality	High
Filtering mode	Moderate

Per quanto riguarda la *filtering mode* è stata scelta la modalità *mild*, una modalità di filtro che consente di mantenere alto il parametro di ricostruzione dei dettagli (Agisoft Metashape).

Fig. 4.28: Nuvola densa di punti su Agisoft Metashape



Elaborazione della mesh preliminare

Il modello poligonale, prodotto dal Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali del Politecnico di Torino, è stato generato partendo dalla precedente nuvola di punti densa citata.

Per il progetto del Ninfeo del Santuario di Apollo è stato generato un modello poligonale composto da 5.469.276 facce. Per la generazione del modello poligonale sono stati utilizzati i seguenti parametri già sperimentati per il Ninfeo dei Tritoni:

- *Surface type*: abbiamo scelto un tipo di superficie *arbitrary* poiché adatto per la modellazione architettonica come edifici e statue.
- *Source data*: vista la necessità di ottenere un modello poligonale altamente dettagliato abbiamo impostato come fonte per la generazione della mesh la

nuvola di punti densa.

- *Interpolation*: abbiamo deciso di abilitare l'interpolazione per far sì che il software chiuda automaticamente i poligoni non risolti della mesh.

Come citato precedentemente il modello sarà utile in una fase successiva per poter essere sostituito con il modello generato all'interno del software 3D Reshaper, che consentirà di eseguire una perfetta segmentazione di quest'ultimo, partendo dalla nuvola di punti densa.

Ottimizzazione dei dati per la compatibilità con i software VR

Il processo di generazione del modello segmentato ha eseguito gli stessi passaggi elencati nel progetto precedente. Il Ninfeo del Santuario di Apollo tuttavia risulta essere un manufatto di dimensioni minori rispetto al Ninfeo dei Tritoni, inoltre la finalità del progetto è diversa, infatti se il modello del Ninfeo dei Tritoni ha come scopo un'esperienza VR incentrata sulla conoscenza delle ricerche archeologiche e storiche, il modello del Ninfeo del Santuario di Apollo, invece, sarà il modello di studio per l'anastilosi che vedremo successivamente¹.

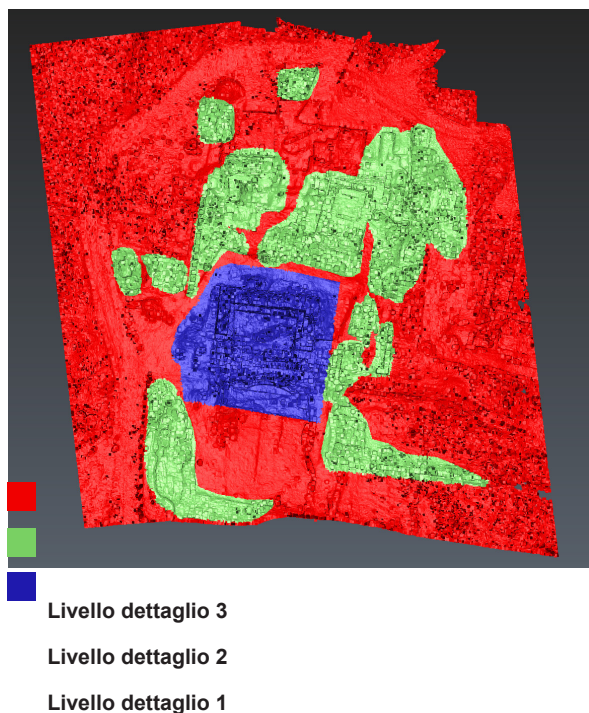
Segmentazione della nuvola di punti

Prendendo in considerazione questi due aspetti fondamentali abbiamo diviso la

1: cf. pp. 98-126

nuvola di punti e generato una mesh con differenti gradi di dettaglio.

Fig. 4.29: Segmentazione nuvola densa di punti

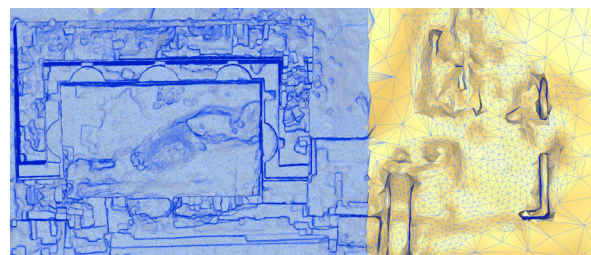


Come è possibile notare, la divisione a seconda dei LOD si divide in tre macro zone principali: LOD3 equivale al contesto circostante, principalmente composto da terreno; il LOD2 è caratterizzato dalla presenza in superficie di reperti archeologici catalogati; infine il LOD 1, composto da una mesh a maglia molto fitta, appartiene al Ninfeo oggetto di studio della nostra Tesi.

Generazione della mesh

La nuvola ha subito tutte le lavorazioni citate per il Ninfeo dei Tritoni ed è stata generata una mesh secondo i 3 LOD citati in precedenza.

Fig. 4.30: Esempio di mesh generata secondo i 4 LOD

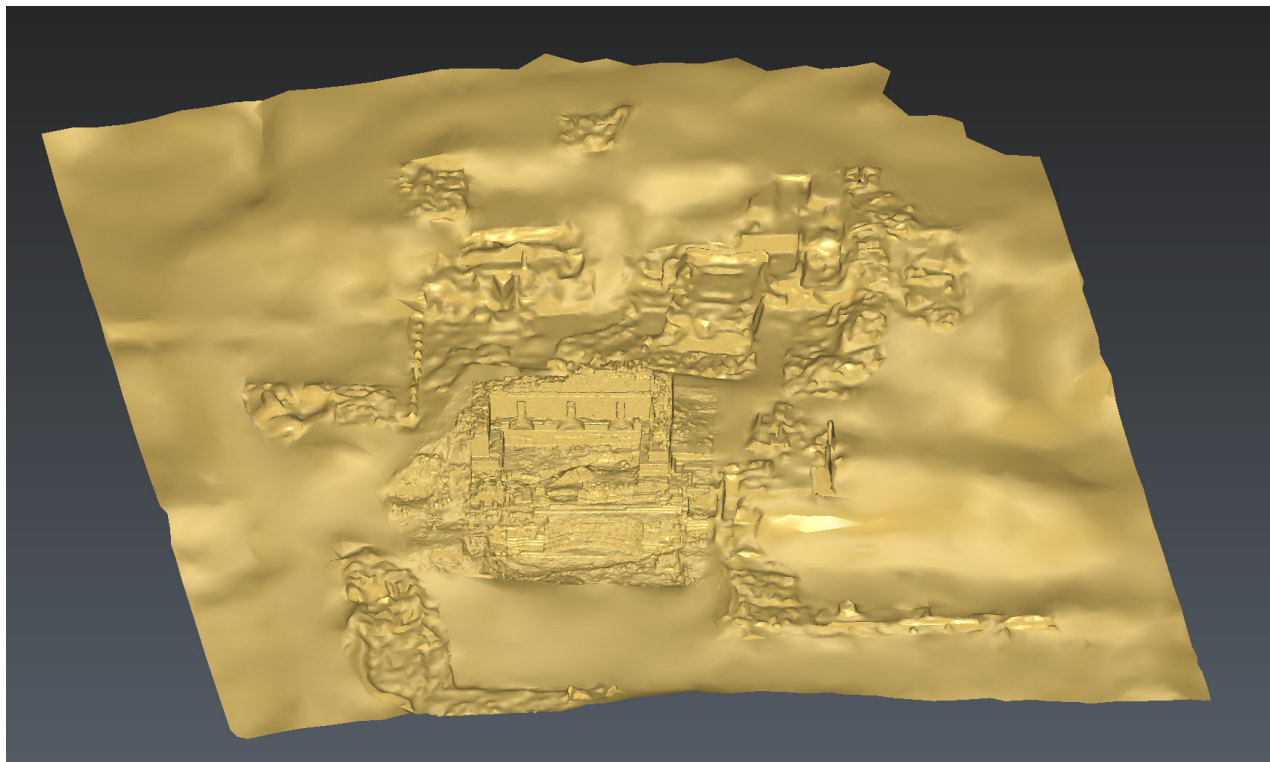


La differenza tra i vari LOD, in questo progetto è molto evidente, si può infatti notare come la maglia della mesh che compone il Ninfeo del Santuario di Apollo sia estremamente precisa e dettagliata rispetto al contesto.

La segmentazione della mesh ha permesso di decimare il suo numero di poligoni dell'85%, dalla mesh iniziale generata su Metashape, composta da 5.469.276 di facce, a 824.529 del modello decimato.

La riduzione del numero di poligoni della mesh è soprattutto importante in questo progetto, poichè permette agli studiosi di poter navigare all'interno di esso con facilità, pur non disponendo di hardware professionale.

Fig. 4.31: Mesh finale in 3DReshaper



Texturizzazione della mesh

Nel progetto del Ninfeo del Santuario di Apollo la fase di texturizzazione è risultata estremamente importante per poter riconoscere, nella fase successiva, alcuni dettagli per eseguire un corretto progetto di anastilosi. Anche per questo step abbiamo eseguito gli stessi procedimenti adottati nel progetto del Ninfeo dei Tritoni. Seguendo la metodologia messa a punto per il Ninfeo dei Tritoni è stato importato il modello

generato in 3D Reshaper, all'interno del software Metashape, sostituito il modello con quello già presente all'interno di quest'ultimo e riproiettato le camere su questa nuova mesh.

Anche per questo progetto abbiamo deciso di dividere il modello per i motivi inerenti la texturizzazione della mesh, citati nel progetto precedente¹. Per il Ninfeo del Santuario di Apollo abbiamo deciso di dividere il modello in quattro parti.

1: cf. p. 75

Fig. 4.32: Schema concettuale divisione texture 8k Ninfeo dei Tritoni

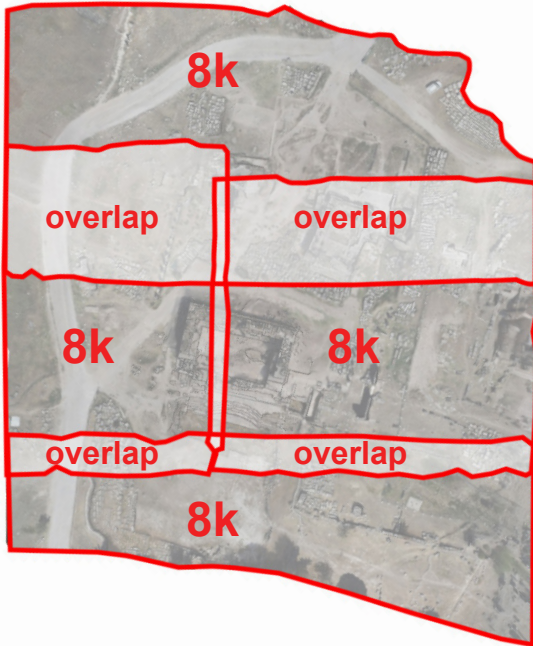


Fig. 4.33: Vista dall'alto del Ninfeo del Santuario di Apollo texturizzato



L'output finale generato, consiste in quattro modelli separati del Santuario di Apollo, texturizzati in 8k. Questo modello, essendo stato ottimizzato, risulta estremamente leggero e quindi facilmente navigabile senza però compromettere la qualità visiva dell'esperienza.

Fig. 4.34: Vista da ovest fronte principale del Ninfeo - Cattura modello texturizzato all'interno del software di modellazione 3D

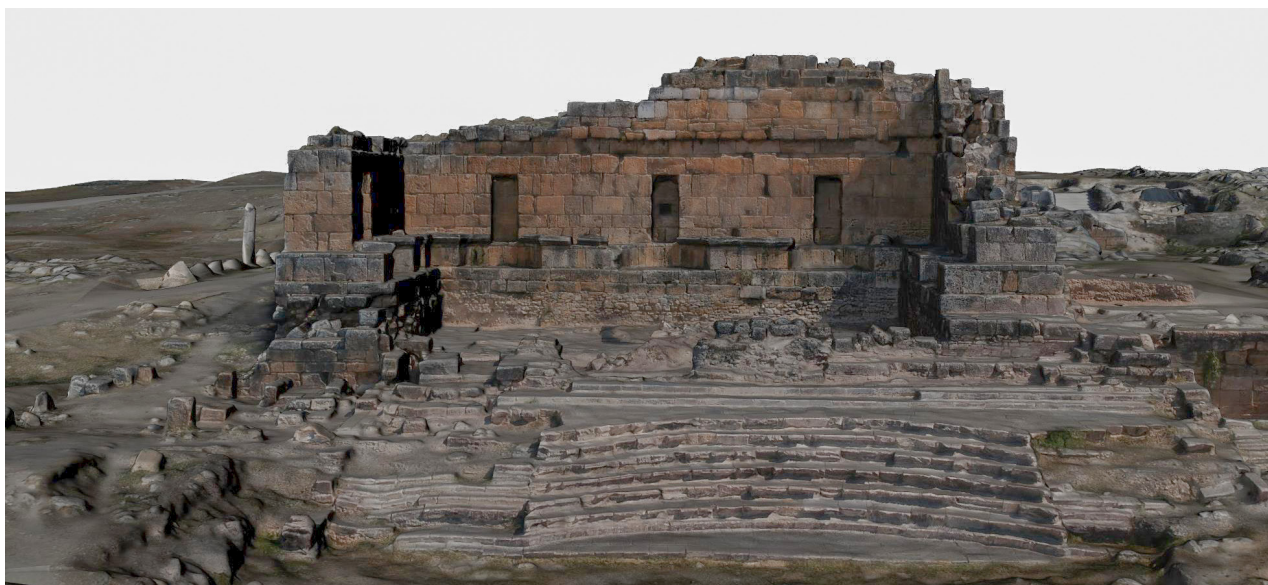


Fig. 4.35: Vista da sud fronte principale del Ninfeo - Cattura modello texturizzato all'interno del software di modellazione 3D



I disegni architettonici del Ninfeo del Santuario di Apollo: stato di fatto

Fig. 4.36: Rielaborazione dell'ortofoto con crocicchi ricavata da rielaborazione fotogrammetrica del volo UAV (Unmanned Aerial Vehicle) sul Ninfeo dei Tritoni eseguito da gruppo di Geomatica del Politecnico di Torino. GSD=8.52mm/pix



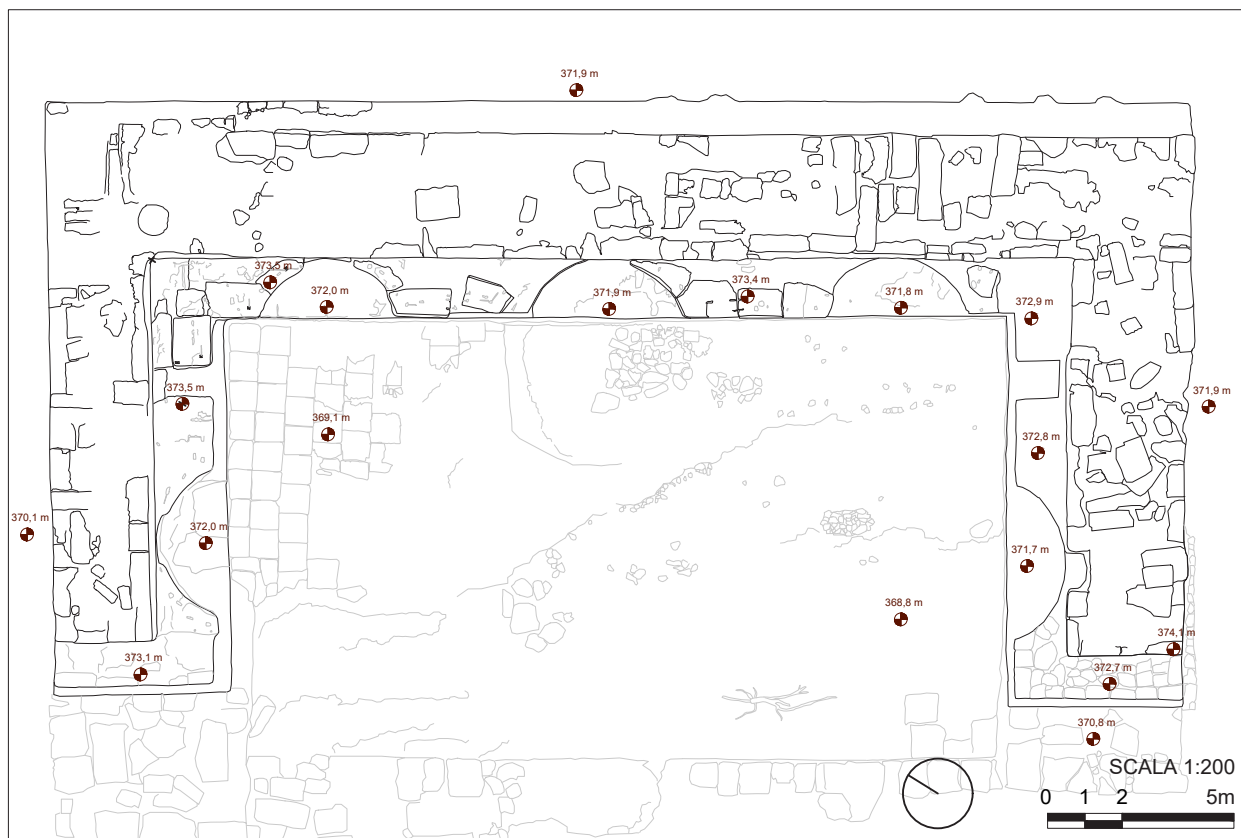
0 10 20 m

SCALA 1:250

Fig. 4.37: Curve di livello quotate ed estratte da DEM (Digital Elevation Model) con equidistanza di 0.5 m, con ortofoto di sfondo. ricavata da rielaborazione fotogrammetrica del volo UAV (Unmanned Aerial Vehicle) sul Ninfeo dei Tritoni eseguito da gruppo di Geomatica del Politecnico di Torino. GSD=8.52mm/pix

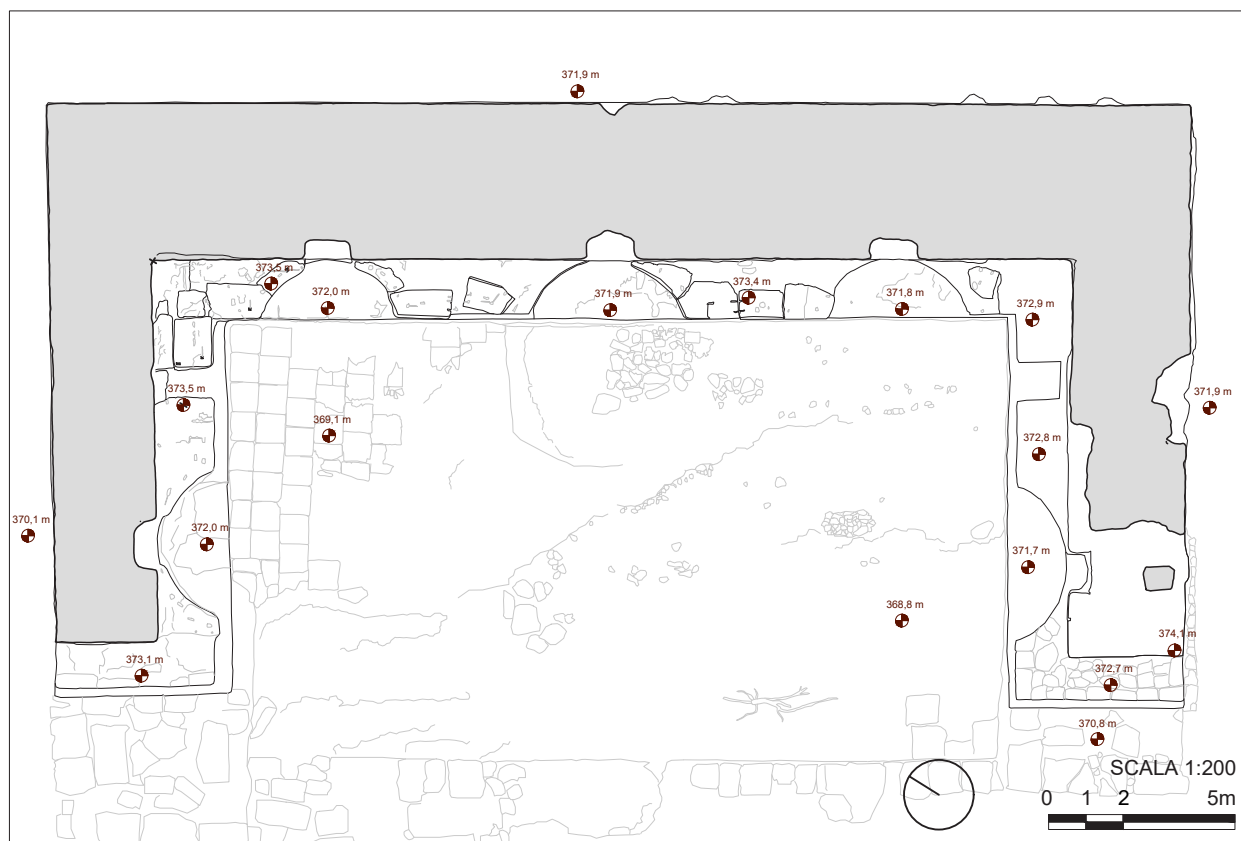


Fig. 4.38: Planimetria delle strutture in situ del Ninfeo del Santuario di Apollo ricavata dal modello 3D fotogrammetrico, con e senza ortofoto.



I disegni architettonici del Ninfeo del Santuario di Apollo: stato di fatto

Fig. 4.39: Pianta delle strutture in situ del Ninfeo del Santuario di Apollo ricavata dal modello 3D fotogrammetrico, sezionato a +1m dal Marker D4 posto sulla cornice del podio a quota + 373,527 m slm. Con e senza Ortofoto.



I disegni architettonici del Ninfeo del Santuario di Apollo: stato di fatto

Fig. 4.40: Prospetto Nord-Est delle strutture in situ del Ninfeo del Santuario di Apollo ricavata da nuvola di punti con e senza nuvola di punti.

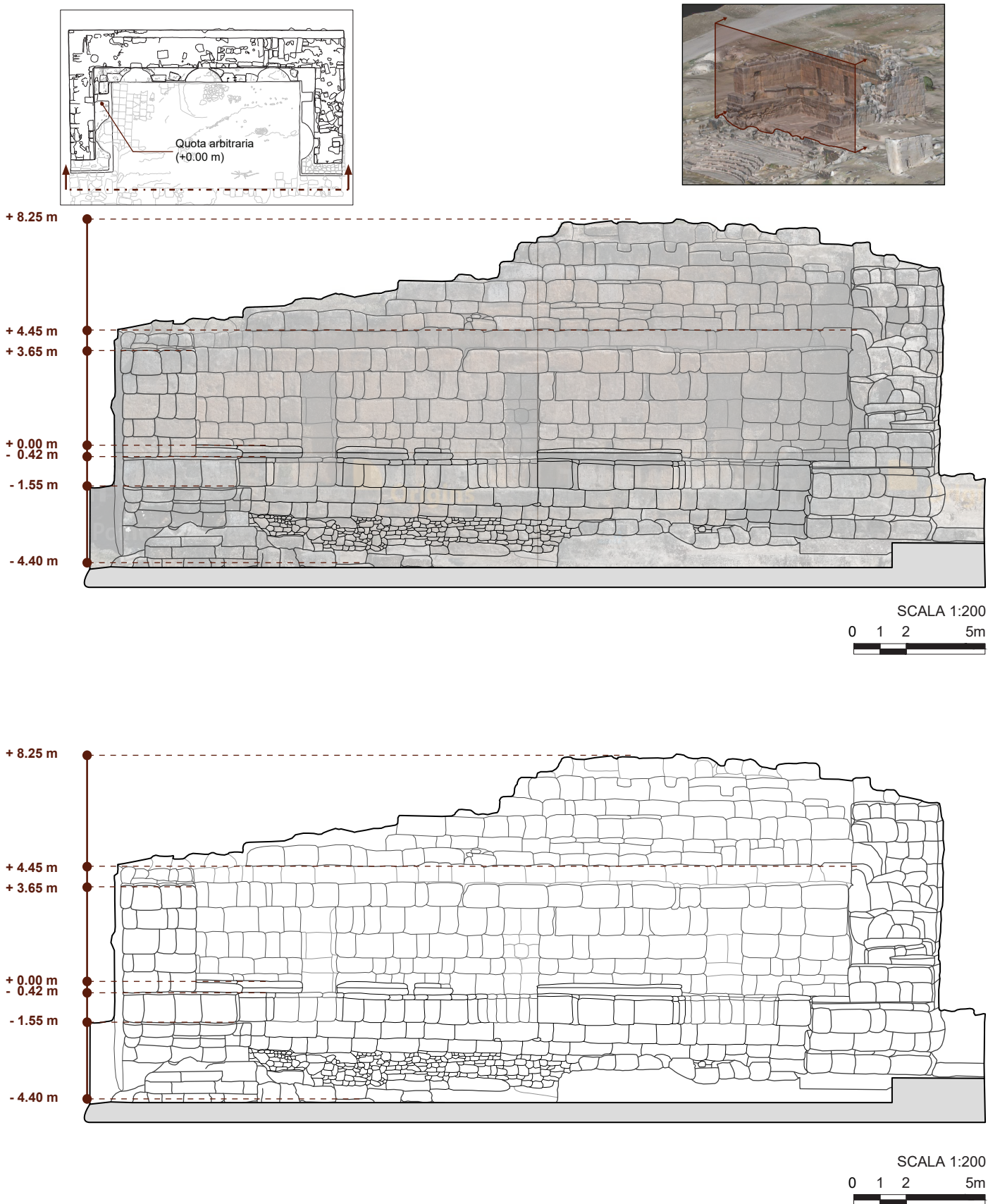
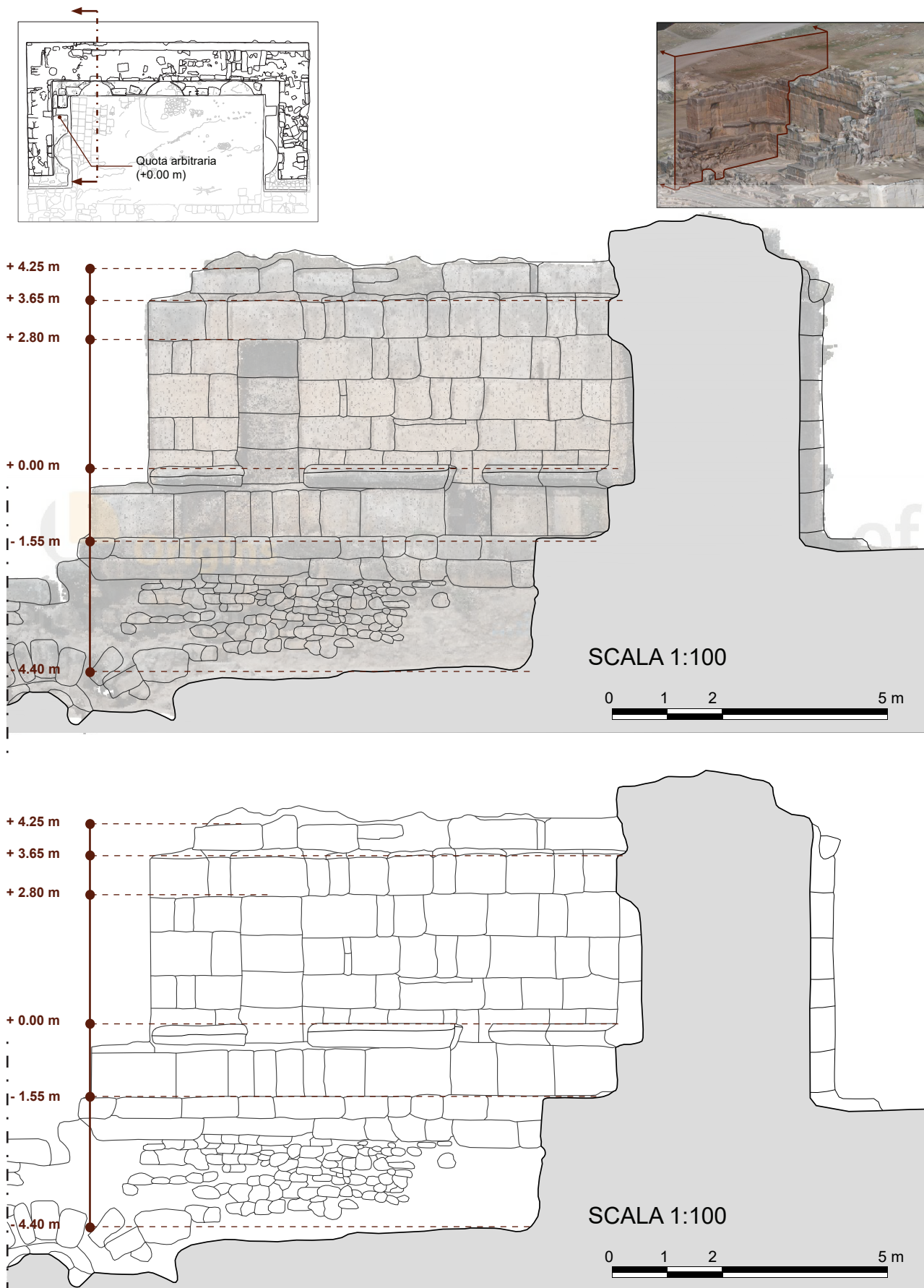


Fig. 4.41: Sezione delle strutture in situ del Ninfeo del Santuario di Apollo ricavata dalla nuvola di punti, sezionata in corrispondenza della nicchia nord del fronte principale. In trasparenza la nuvola di punti.



4.4 Il progetto di anastilosi del Ninfeo del Santuario di Apollo in accordo con le ricerche archeologiche

Il modello 3D fotogrammetrico segmentato è utile come base di studio per il progetto di anastilosi. Lo studio delle fonti, citate precedentemente, è risultato fondamentale per poter ricostruire tridimensionalmente gli elementi architettonici della facciata ipostila.

Divideremo il paragrafo in punti per guidare e facilitare la lettura dei lavori eseguiti.

Modellazione 3D degli elementi architettonici

La prima operazione che è stata eseguita consiste nella restituzione tridimensionale degli elementi architettonici utili al progetto di anastilosi.

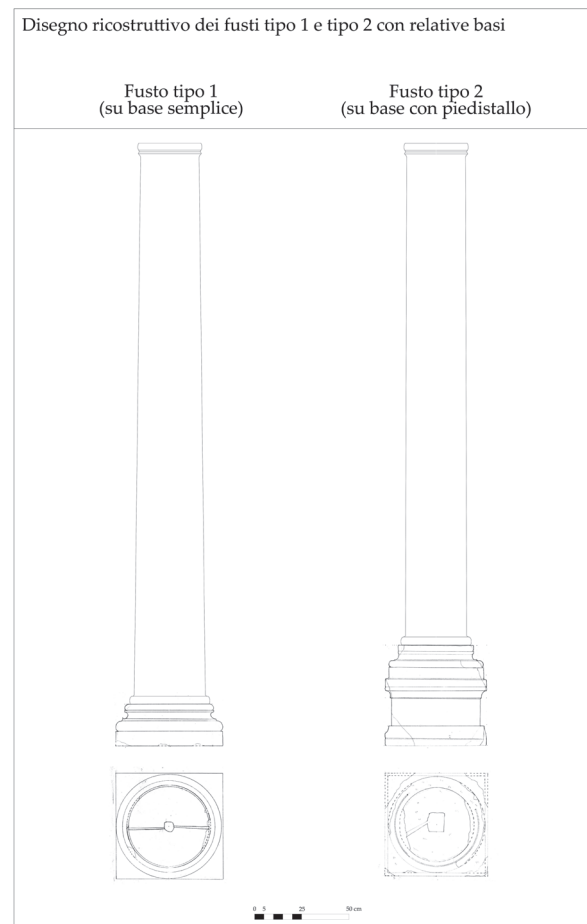
Grazie ai materiali di studio del Prof. Campagna, che ha fornito schemi di restituzione da rilievo diretto dei blocchi architettonici, ed al continuativo scambio e discussione che ci ha accordato, abbiamo realizzato i modelli 3D dei singoli elementi. Ogni fonte ricevuta presenta diverse restituzioni grafiche, come ad esempio i blocchi fregio-architrave restituiti sotto forma di eidotipi, o il capitello sotto forma di PDF 3D. Per questo l'approccio alla restituzione tridimensionale

si è dovuta adattare in base a ogni tipo di fonte:

Modellazione 3D delle basi e fusto delle colonne

Il Professore L. Campagna ha fornito una restituzione (originale in scala 1:5) in pianta e prospetto dei due tipi di colonne che componevano il primo ordine della facciata del Ninfeo del Santuario di Apollo.

Fig. 4.42: Disegno ricostruttivo dei fusti delle colonne rilevate e restituite dal Gruppo di ricerca del Professor L. Campagna



Grazie a questi disegni e con l'ausilio del materiale fotografico a supporto, abbiamo realizzato due modelli 3D.

La restituzione è avvenuta scalando in primo luogo il disegno grazie alla scala grafica presente. Successivamente abbiamo restituito bidimensionalmente, seguendo il disegno, metà fusto. Sfruttando la simmetria radiale delle colonne e delle basi, il modello è stato costruito per rivoluzione delle linee generatrici intorno all'asse verticale della colonna.

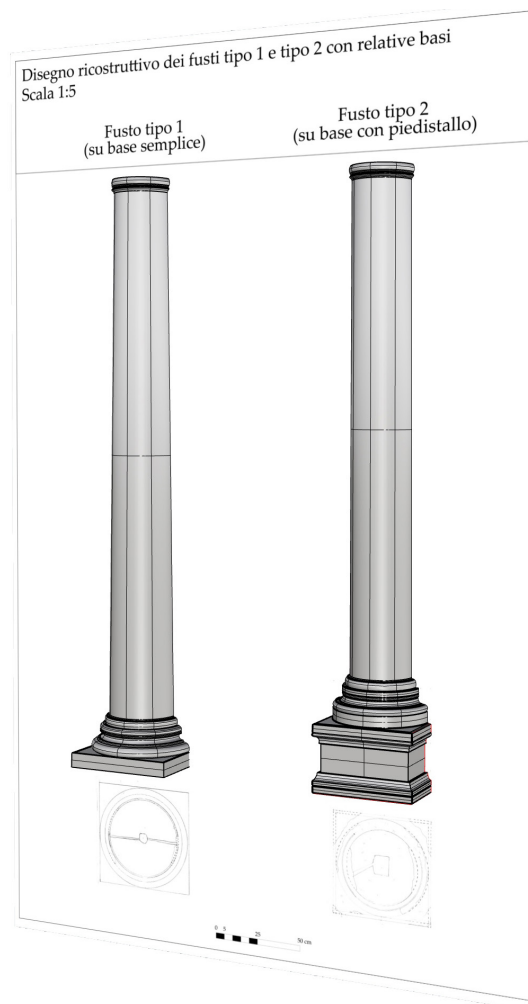
Fig. 4.43: Fotografia piedistallo e base della colonna tipo 2



Fig. 4.44: Fotografia base della colonna tipo 1

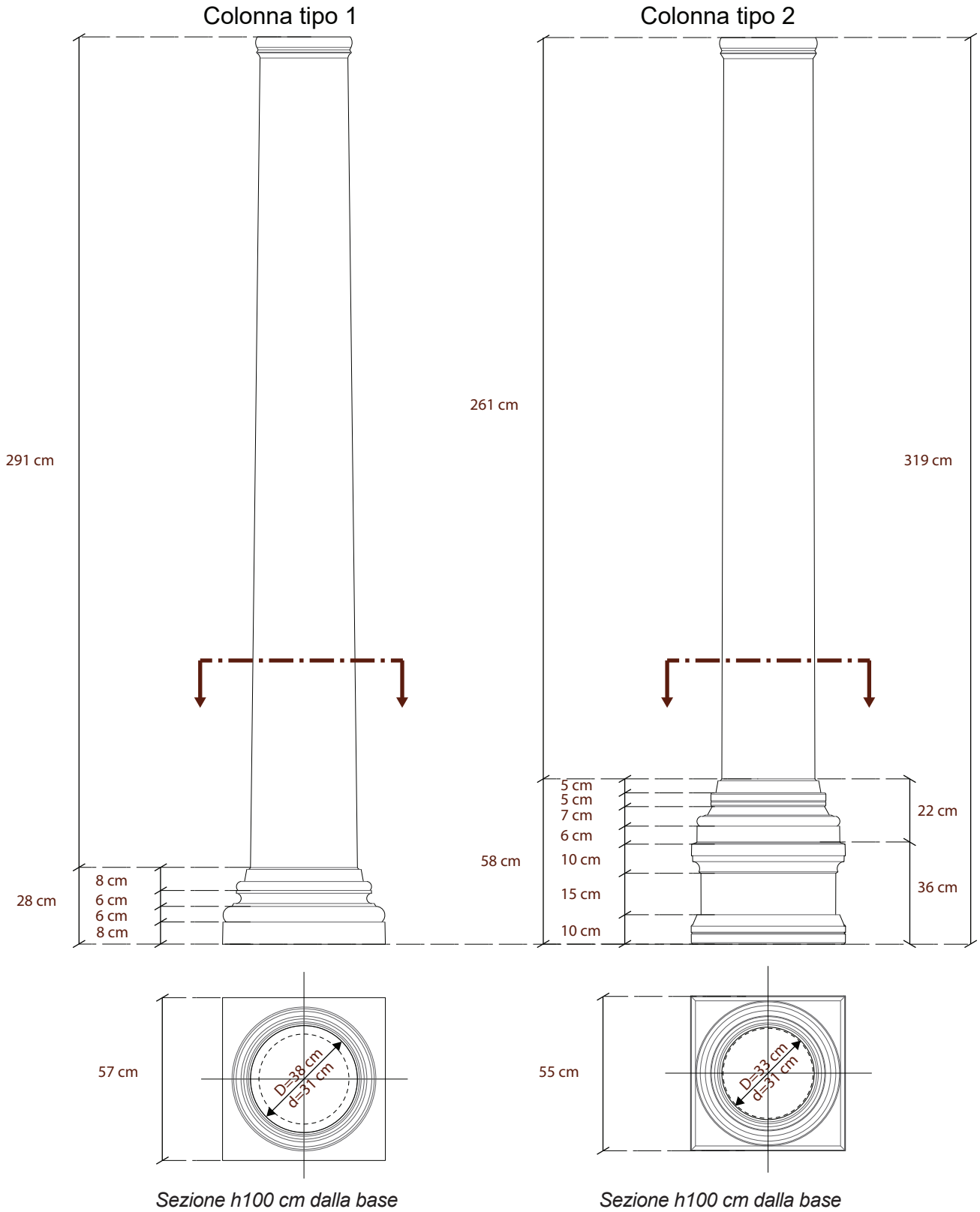


Fig. 4.45: Ricostruzione tridimensionale sulla base del Disegno ricostruttivo dei fusti delle colonne



Dal modello 3D è stato possibile ricavare un disegno architettonico di dettaglio in formato digitale, che ha consentito di avere un controllo specifico dal punto di vista anche delle geometrie generative di ogni dettaglio degli elementi architettonici, nonché di poterli quotare.

Fig. 4.46: Restituzione bidimensionale quotata dei fusti delle colonne modellate tridimensionalmente partendo dai disegni architettonici del gruppo di ricerca del Professor L.Campagna. Accuratezza c.a 5mm



SCALA 1:20



Come si evince dalla ricostruzione tridimensionale e dal disegno quotato è possibile distinguere due tipi di colonne.

La colonna tipo 1 è composta da una base ionico attica di altezza 28 cm a base quadrata semplice di lato 57cm; da un fusto liscio di altezza 291 cm di diametro minore (d) 31 cm e maggiore (D) 38cm.

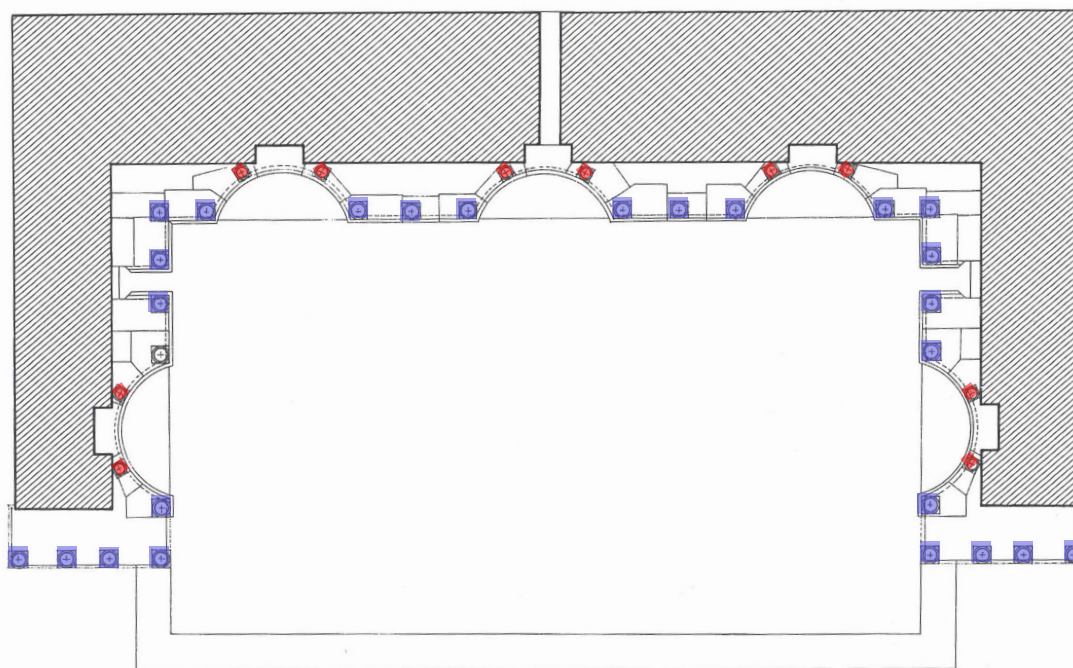
La colonna tipo 2 presenta una base ionico attica di altezza 22 cm, lavorata insieme ad un dado a pianta quadrata alto 36cm; un fusto liscio di altezza 261cm di diametro minore (d) 31 cm e maggiore (D) 33 cm.

Entrambe le colonne hanno un'altezza complessiva pari a 319 cm

Secondo la ricostruzione di D. De Bernardi Ferrero le colonne di tipo 1 si impostano sui tratti rettilinei della cornice del podio parallela al muro di fondo: tre colonne all'estremità dell'esedra centrale; due nei restanti tratti. Le colonne di tipo 2 invece si impostano all'interno delle esedre e sono posizionate in prossimità del muro di fondo (L. Campagna, 2018).

Segue una rielaborazione della pianta ricostruttiva di D. De Bernardi Ferrero con evidenziate le colonne di tipo 1 e 2.

Fig. 4.47: Rielaborazione pianta ricostruttiva della facciata ipostila del primo ordine del Ninfeo del Santuario di Apollo da D. De Bernardi Ferrero



■ Colonne tipo 1

■ Colonne tipo 2

Restauro virtuale del capitello delle colonne

Per la restituzione tridimensionale del capitello delle colonne abbiamo adottato un approccio differente. La fonte infatti consiste in un PDF 3D generato da una acquisizione fotogrammetrica di un capitello del primo ordine, che rappresenta una fonte decisamente più ricca di uno schizzo a matita quotato.

Poichè il capitello rilevato presenta numerose lacune e lesioni superficiali che ne inficiano la corretta lettura, abbiamo deciso di ricostruirne uno utilizzando le parti meno deteriorate del capitello fornito in formato PDF 3D, attuando quindi un *restauro virtuale*. Per restauro virtuale si intende una ricostruzione digitale bidimensionale o tridimensionale su una replica digitale. Può avere diversi fini tra i quali la rappresentazione virtuale di un possibile intervento di restauro sull'oggetto reale; la rappresentazione simulata dell'oggetto in una data epoca storica; il miglioramento della leggibilità dell'oggetto attraverso un restauro reversibile, poichè digitale. (M. Limoncelli, 2019), (C.Balletti, M.Dabrowski, F.Guerra, P.Vernier, 2020). Quest'ultimo fine si pone alla base della nostra ricostruzione del capitello composito. Tuttavia non sono stati integrati elementi decorativi, ma si è sfruttata la

porzione di capitello meglio conservata per la ricostruzione dello stesso. Questa metodologia mira quindi a migliorare la leggibilità dell'oggetto in analisi senza ricostruirlo dettagliatamente.

Il blocco originale, così come il modello 3D fotogrammetrico in formato PDF 3D, come citato precedentemente presenta numerose mancanze, le più evidenti in corrispondenza della voluta, delle foglie di acanto come mostrato nell'immagine che segue.


Fig. 4.48: Modello fotogrammetrico del capitello delle colonne, fornito dal Gruppo di ricerca di L. Campagna



La realizzazione del modello 3D prevede come prima operazione la conversione del PDF 3D in un file .obj, questo formato consente la gestione dell'oggetto all'interno di programmi di modellazione 3D, come Rhinoceros.

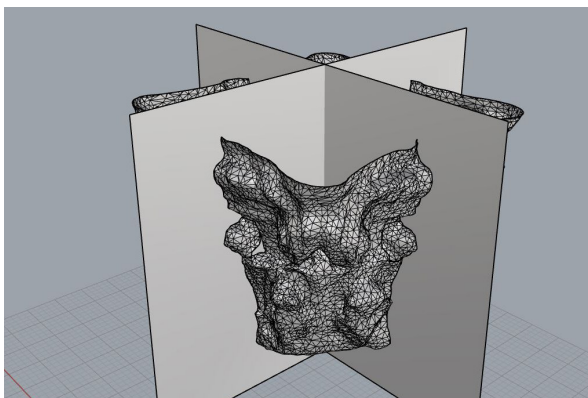
Successivamente la mesh è stata scalata correttamente con le misure fornite nella scheda tecnica che segue in figura 4.49.

Fig. 4.49: Scheda tecnica della catalogazione del capitello C.2.1 delle colonne, modello da reperto esistente per tutte le colonne del primo ordine del fronte

Sigla blocco	C.2.1
Numerazione per l'anastilosi	Capitello n. 1
Immagine	
Dimensioni	Alt. cm 44,3; diam. base cm 32/33; lato ab. cm 52 (calcolato).

In seguito abbiamo eseguito una divisione longitudinale in quattro parti uguali lungo gli assi di simmetria del capitello. Con questa operazione abbiamo individuato la porzione del capitello più intatta per sostituire con essa le parti affette da mancanze, tramite la funzione *mirroring*. In figura 4.50 è mostrata la divisione del capitello con la successiva sostituzione delle parti.

Fig. 4.50: Rielaborazione del modello tridimensionale del modello fotogrammetrico del capitello



Successivamente abbiamo importato il nuovo modello ottenuto all'interno del software 3DReshaper, che grazie ai suoi *tools* per la modifica delle mesh ha permesso di poter unire le quattro parti tra loro, rifinire la mesh e colmare i due buchi alle due estremità per ottenere una mesh chiusa.

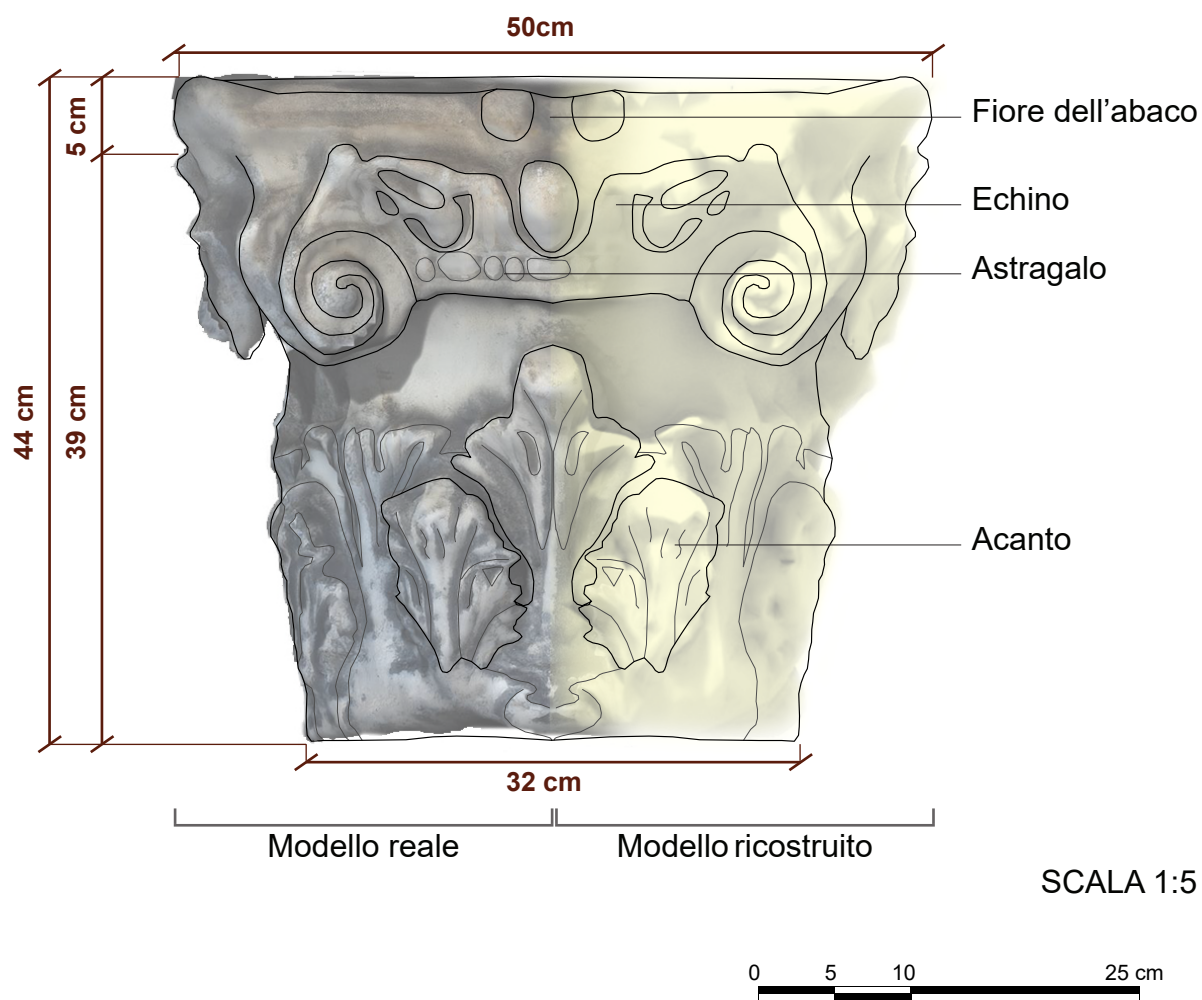
Il risultato ottenuto è un capitello semi-ricostruito, in scala e senza aggiunte di dettagli non più presenti nella realtà.

Per il lavoro di anastilosi verrà utilizzato il modello ottenuto per tutte le colonne del primo ordine.

Fig. 4.51: Vista del modello 3D ottenuto in seguito alla rielaborazione del modello fotogrammetrico



Fig. 4.52: Restituzione bidimensionale quotata del capitello con nomenclatura degli elementi che lo compongono



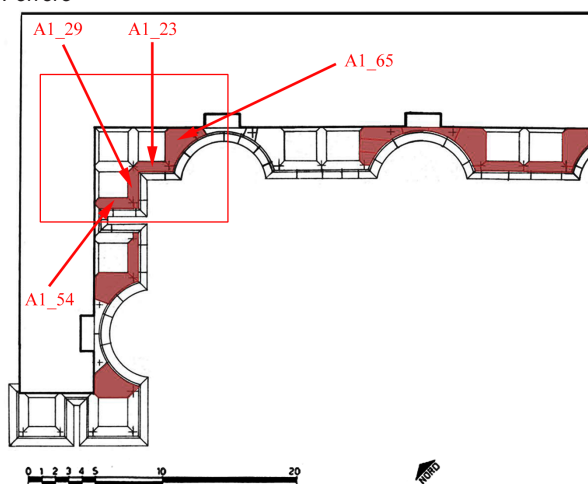
Modellazione 3D dei blocchi fregio-architrave

Gli ultimi elementi architettonici restituiti tridimensionalmente sono i blocchi fregio-architrave, dell'angolo nord, del primo ordine, appartenenti alla facciata ipostila del Ninfeo.

Gli eidotipi forniti dal Professor L. Campagna sono stati realizzati mediante rilievi tradizionali, la loro restituzione non può quindi avere una precisione elevata, gravata ulteriormente dalla complessità geometrica dei blocchi stessi.

Lo stralcio di pianta che segue raffigura i quattro blocchi fregio-architrave di cui il Gruppo di ricerca del Professor Campagna ha sufficienti dati archeologici per il corretto collocamento indicato in figura 4.53.

Fig. 4.53: Stralcio della rielaborazione del Professor L. Campagna sulla pianta schematica di ricostruzione delle trabeazioni del primo ordine del Ninfeo da D. De Bernardi Ferrero



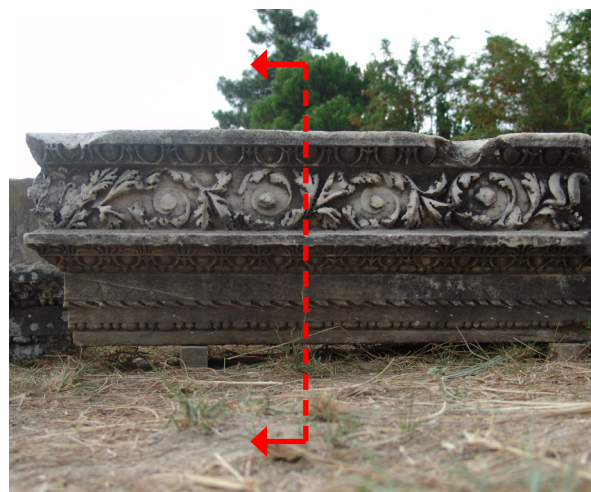
Abbiamo seguito gli stessi procedimenti per tutti e quattro i blocchi¹:

- *Restituzione 2D della sezione del blocco fregio-architrave*
- *Restituzione 2D dei piani di attesa o posa dei blocchi²*
- *Estruzione lineare 3D dei profili frontali e posteriori della sezione trasversale*
- *Modellazione delle superfici restanti per chiudere il volume del blocco*

La prima operazione eseguita è stata restituire bidimensionalmente il disegno della sezione fornitaci.

Segue in figura 4.54 una fotografia di un blocco di esempio, in questo caso A1_29, con indicato il verso della sezione tipo rappresentata in figura 4.55:

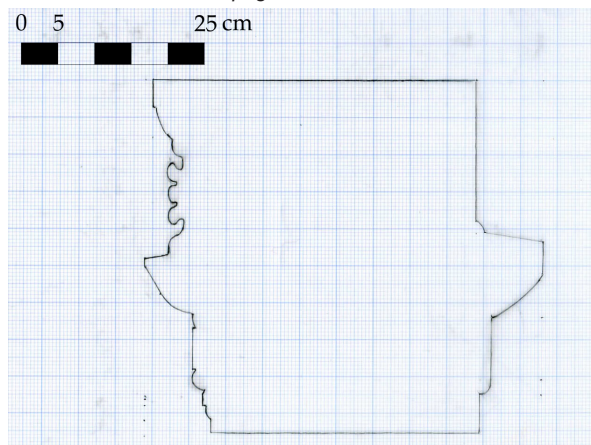
Fig. 4.54: Rielaborazione della fotografia del profilo frontale del blocco fregio-architrave A1_29 con indicazione della linea di sezione



1: Nonostante i procedimenti descritti siano inerenti a tutti e quattro i blocchi, per l'elemento A1_65 è stata applicata una modifica. cfr. p. 120

2: Per i blocchi A1_54, A1_29, A1_23 sono stati vettorializzati gli eidotipi dei piani di attesa, mentre per il blocco A1_65 è stato vettorializzato il disegno architettonico con scala grafica del piano di posa.

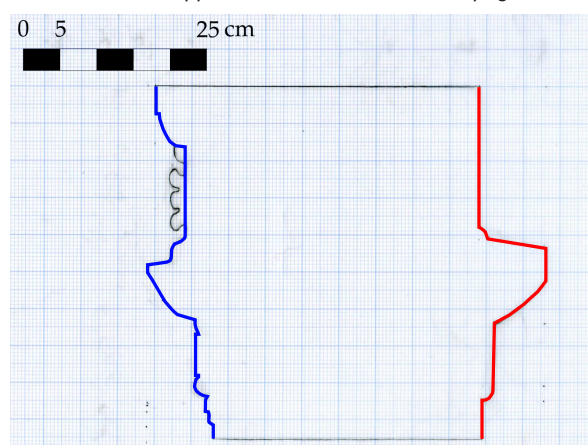
Fig. 4.55: Disegno ricostruttivo della sezione trasversale tipo del blocco fregio-architrave rilevata e restituita dal Gruppo di ricerca del Prof. L. Campagna



Trattandosi di una ricerca che mira a ricostruire operativamente una porzione del primo ordine del fronte scena del Ninfeo, ed essendo quindi la scala di analisi quella architettonica, il nostro lavoro non è danneggiato dall'assenza dei dati riguardanti la decorazione dei blocchi. Ciò che interessa infatti è la loro relazione geometrica e la verifica della loro posizione secondo l'ipotesi ricostruttiva. La scala grafica rappresentata nel disegno ha permesso di realizzare una restituzione in scala utile al lavoro sopracitato.

Successivamente si è realizzata restituzione vettoriale del profilo posteriore (figura 4.56 in rosso) e frontale (figura 4.56 in blu) del blocco fregio architrave.

Fig. 4.56: Rielaborazione del disegno ricostruttivo della sezione trasversale tipo del blocco fregio-architrave rilevata e restituita dal Gruppo di ricerca del Prof. L. Campagna



L'operazione di vettorializzazione dei profili ha permesso di ricostruire tridimensionalmente i blocchi fregio-architrave tramite un'estrusione degli stessi utilizzando come generatrici geometriche il profilo del piano di attesa degli eidotipi (o del profilo del piano di posa del disegno architettonico in scala per il blocco A1_65). In figura 4.57 è raffigurata una sezione che volge verso il piano di attesa, ovvero la superficie

Fig. 4.57: Rielaborazione della fotografia del profilo frontale del blocco fregio-architrave A1_29 con indicazione della linea di sezione



sommitale del blocco fregio-architrave. I profili posteriori e frontali vettorializzati precedentemente sono stati quindi estrusi lungo le rispettive direttrici individuate nelle rielaborazioni degli eidotipi o dei disegni architettonici che ci sono stati forniti. Va segnalato nuovamente in questo caso la presenza di possibili errori dovuti alle misurazioni. Segue un esempio di vettorializzazione dell'eidotipo del blocco fregio-architrave A1_29 e della direttrice di estrusione per il profilo frontale (figura 4.58 in blu) e per il profilo posteriore (figura 4.58, in rosso).

Fig. 4.58: Rielaborazione del disegno ricostruttivo del piano di attesa del blocco fregio-architrave A1_29 rilevato e restituito dal Gruppo di ricerca del Prof. L. Campagna

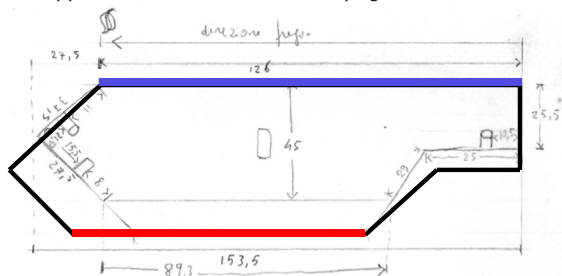
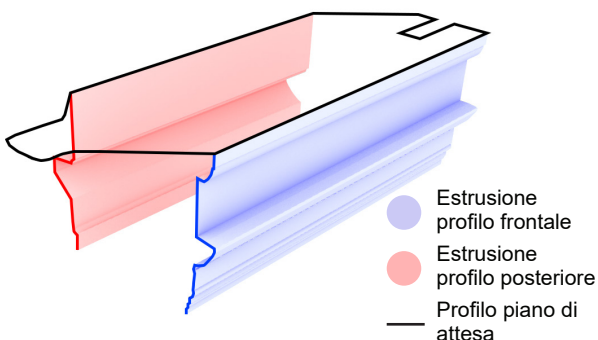


Fig. 4.59: Schema concettuale della metodologia di restituzione tridimensionale dei blocchi fregio-architrave



Dopo la modellazione delle superfici restanti, ovvero le interfacce di contatto tra un blocco e quello adiacente, il risultato ottenuto consiste in quattro modelli tridimensionali dei blocchi fregio-architrave. Il blocco A1_65 presenta alcuni errori di misurazione che verranno colmati attraverso una integrazione virtuale¹. In figura 4.60 sono rappresentati i quattro elementi architettonici dell'angolo nord, mentre gli altri sono stati ricostruiti virtualmente secondo una procedura diversa, che verrà spiegata successivamente², poichè non è possibile iniziare la loro ricomposizione tridimensionale secondo gli eidotipi o disegni architettonici in scala.

1: La restituzione del piano di posa del blocco A1_65 è stato scalato di un fattore 1.2 affinché risultasse coerente con il modello 3D fotogrammetrico, gli altri blocchi fregio-architrave e il capitello della colonna sottostante. Sono state quindi rispettate le proporzioni del disegno architettonico, ma non è stata rispettata la scala grafica indicata in figura 4.60.

2: crf. p. 124

Fig. 4.60: Abaco dei blocchi fregio-architrave restituiti tridimensionalmente su base dei disegni ricostruttivi dei piani di attesa e di posa dei blocchi fregio-architrave rilevati e restituiti dal Professor L. Campagna. SCALA 1:50

	BLOCCO FREGIO-ARCHITRAVE A1_54	BLOCCO FREGIO-ARCHITRAVE A1_29	BLOCCO FREGIO-ARCHITRAVE A1_23	BLOCCO FREGIO-ARCHITRAVE A1_65
EIDOTIPO				
PIANO DI ATTESA (AA') scala 1:50				
PROSPETTO FRONTALE (BB') scala 1:50				
PIANO DI POSA (CC') scala 1:50				
SEZIONE TRASVERSALE (DD') scala 1:50				

Posizionamento degli elementi architettonici ricostruiti sul modello 3D fotogrammetrico

Ultimata la modellazione dei blocchi fregio-architrave e delle colonne, seguendo le fonti fornite dal Professor Campagna, sono stati eseguiti alcuni tentativi di posizionamento degli stessi in relazione dell'attuale situazione dell'angolo nord est del Ninfeo, a partire dal podio tuttora in situ. La metodologia adottata per la realizzazione del posizionamento sopracitato si articola nelle seguenti fasi:

Lettura dello stato di fatto

La lettura del manufatto, indirizzata al posizionamento degli elementi architettonici, è iniziata dall'esame degli studi riportati nel capitolo 2. Il modello fotogrammetrico e i suoi prodotti sono stati utili per supportare lettura di fonti materiali e ricerche archeologiche, infatti la possibilità di visualizzare direttamente sul modello le descrizioni permette di comprenderle meglio.

Trattandosi di una struttura realizzata con differenti tecniche costruttive, frutto di interventi di restauro succeduti negli anni, la struttura presenta diverse irregolarità. Inoltre in seguito agli eventi sismici¹, la struttura presenta alcune defomazioni, soprattutto lungo il fronte interno dell'ala meridionale che ha subito

una rototraslazione in direzione est-ovest. Di conseguenza muro di fondo e i due avancorpi del monumento non sono perfettamente ortogonali tra loro e, inoltre, hanno sezione variabile (L. Campagna, 2018).

Approccio geometrico

Il primo step eseguito è servito per l'ottenimento di un posizionamento indicativo degli elementi architettonici modellati sul modello 3D fotogrammetrico. Per il posizionamento delle colonne e dei blocchi fregio-architrave si è ricorso alle piante ricostruttive della Professoressa D. De Bernardi Ferrero:

Fig. 4.61: Pianta ricostruttiva della facciata ipostila del primo ordine del Ninfeo del Santuario di Apollo da D. De Bernardi Ferrero

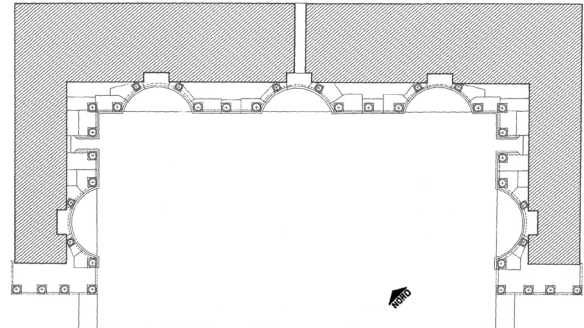
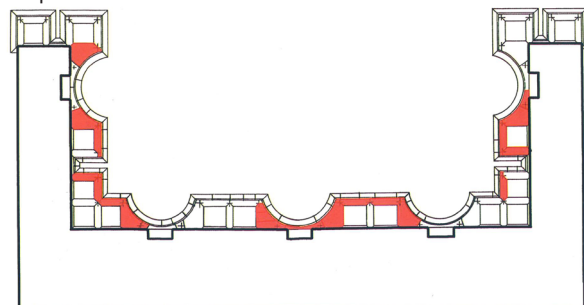


Fig. 4.62: Pianta schematica di ricostruzione delle trabeazioni del primo ordine del Ninfeo da D. De Bernardi Ferrero



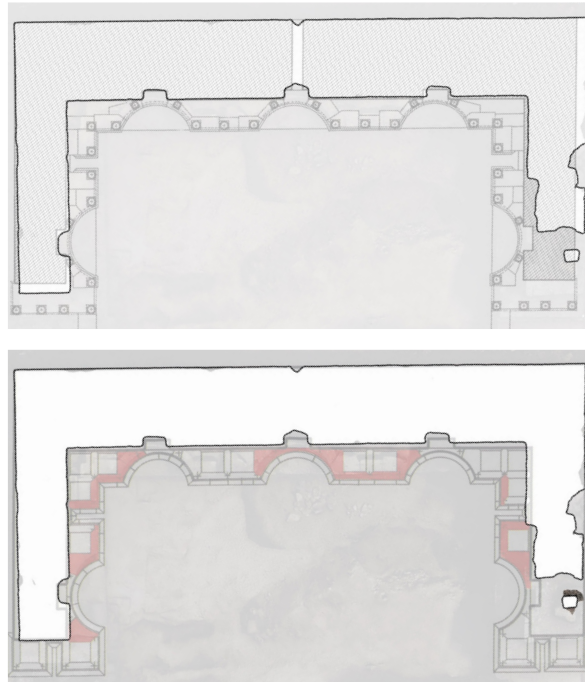
1: crf. p. 35

Entrambe le piante schematiche di ricostruzione rappresentano una geometria del Ninfeo del Santuario di Apollo ideale, si veda ad esempio l'ortogonalità tra il muro di fondo e gli avancorpi, poichè l'intento della Studiosa è quello di rappresentare schematicamente la collocazione delle colonne e dei blocchi fregio-architrave del primo ordine. Pertanto non sono da intendersi con una valenza metrica. Questo aspetto è confermato dal confronto tra il modello 3D fotogrammetrico, sezionato a +1 m rispetto alla cornice del podio, e la rispettiva pianta ricostruttiva. Come citato in questo capitolo il modello fotogrammetrico ha una precisione del centimetro.

Fig. 4.63: Vista dall'alto del modello 3D fotogrammetrico texturizzato



Fig. 4.64: Sovrapposizione piante ricostruttive di D. De Bernardi Ferrero su modello 3D fotogrammetrico



Quindi i disegni ricostruttivi della Professoressa D. De Bernardi Ferrero sono stati scomposti e ricomposti per parti come in figura 4.65 all'effettiva consistenza dei fronti interni del Ninfeo, forniti dal modello fotogrammetrico.

Successivamente sono state sovrapposte le porzioni del disegno ottenute al modello 3D fotogrammetrico per minimizzare lo scostamento tra i disegni ricostruttivi ideali e la forma reale dell'edificio restituito dal modello.

Di seguito è mostrato il procedimento di segmentazione eseguito sulla pianta ricostruttiva raffigurante il posizionamento ideale delle colonne. Come è possibile notare nell'avancorpo Sud, maggiormente interessato dagli eventi sismici, è necessario spezzare l'allineamento in due settori. Lo stesso procedimento è eseguito sulla pianta ricostruttiva dei blocchi fregio-architrave della Professoressa D. De Bernardi Ferrero.

Fig. 4.65: Navigatore per figura 4.55

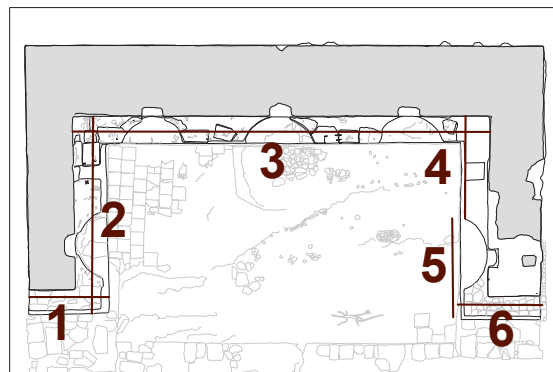
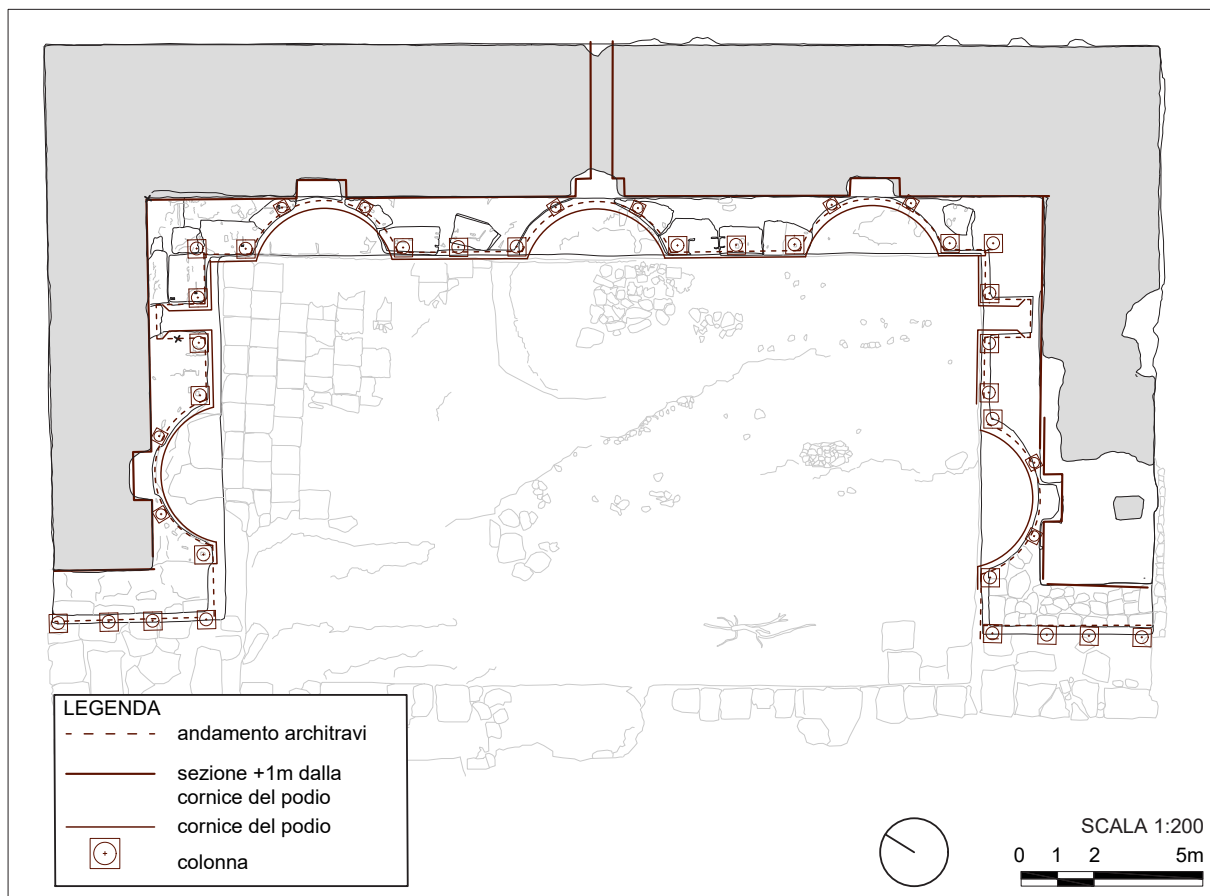


Fig. 4.66: Segmentazione delle piante ricostruttive di D. B. Ferrero e allineamento sui singoli fronti del modello 3D fotogrammetrico



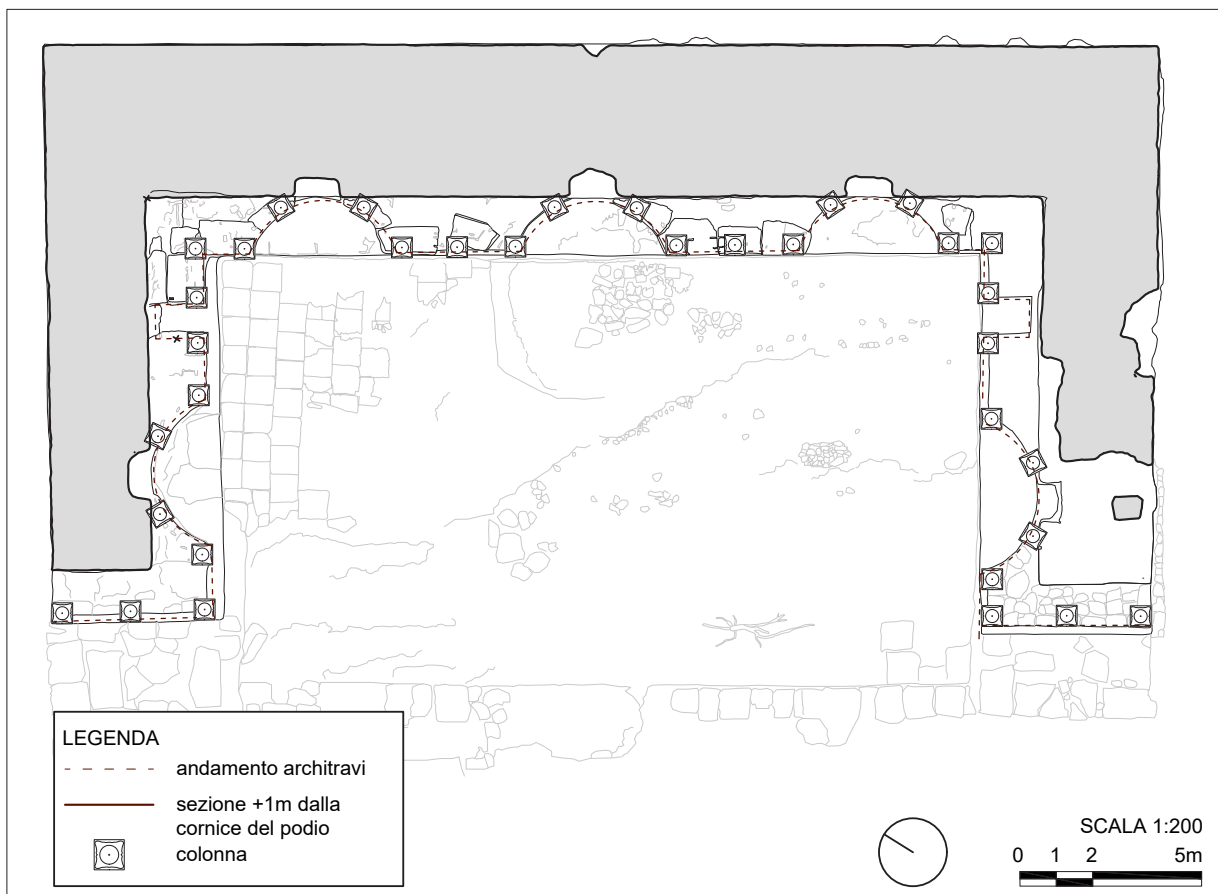
Una volta eseguita la segmentazione e il riallineamento sul modello 3D fotogrammetrico, si ottiene un prezioso schema di posizionamento delle colonne e dei blocchi fregio-architrave mostrato nell'immagine sottostante.

La pianta schematica ottenuta presenta alcune incongruenze, accettabili in questa fase preliminare, dovute agli inevitabili scostamenti tra la forma attuale del podio e delle murature del Ninfeo rispetto allo schema ricostruttivo schematico; lo stato attuale della fabbrica deriva infatti sia da trasformazioni antiche e riposizionamenti moderni dei blocchi di cornice del podio,

sia è dovuta ai terremoti antichi.

Queste incongruenze sono state risolte grazie a un approccio basato sull'osservazione delle tracce di cantiere, ovvero l'individuazione di elementi caratteristici sul modello 3D fotogrammetrico utili ad affinare il posizionamento degli elementi architettonici. È quindi risultato fondamentale il continuo adeguamento dell'idea ricostruttiva rispetto allo stato di fatto è stata in tutte le fasi confrontata con il Prof. L. Campagna, per verificarne la rispondenza rispetto all'interpretazione archeologica.

Fig. 4.67: Pianta del primo ordine della facciata ipostila del Ninfeo del Santuario di Apollo seguendo i disegni ricostruttivi della Professoressa D. De Bernardi Ferrero



Letture delle tracce di cantiere

Per la realizzazione di un concreto progetto di anastilosi non sono sufficienti competenze architettoniche, ma è necessario il supporto di diverse discipline professionali che, fornendo diversi contributi, permettono di elaborare un progetto unitario. Il percorso di anastilosi intrapreso è stato quindi guidato da regole compositive dell'ordine architettonico, dai dati materiali desunti dalla lettura dei dati archeologici e dalla necessaria verifica di compatibilità proporzionale tra l'esistente e l'ipotesi, secondo le seguenti fasi, che verranno sviscerate nei paragrafi successivi:

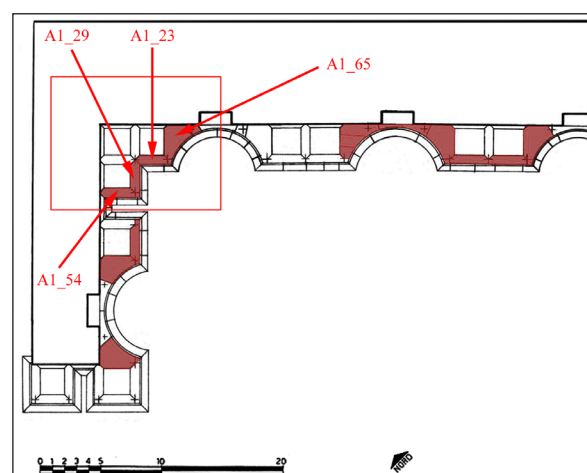
- *Accostamento dei quattro blocchi fregio-architrave*
- *Posizionamento dei blocchi fregio-architrave sui capitelli delle colonne*
- *Posizionamento dei blocchi fregio-architrave e colonne sul modello 3D fotogrammetrico*
- *Riposizionamento delle cornici del podio e modifica blocco A1_65*
- *Ricostruzione ipotetica del resto della facciata ipostila*

Accostamento dei quattro blocchi fregio-architrave

La prima operazione consiste nel relazionare tra loro i quattro blocchi precedentemente modellati seguendo i disegni forniti dal Gruppo di ricerca del

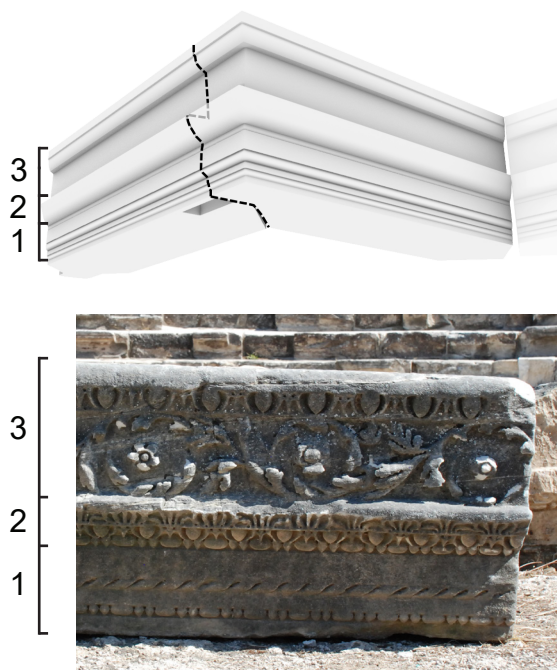
Professore L. Campagna. L'identificazione dei blocchi disponibili da posizionare è riportata nella figura 4.68.

Fig. 4.68: *Stralcio della rielaborazione del Professor L. Campagna sulla pianta schematica di ricostruzione delle trabeazioni del primo ordine del Ninfeo da D. De Bernardi Ferrero*



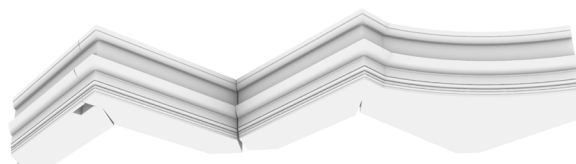
Questo passaggio è fondamentale poiché si ottiene un modello rigido composto dai quattro blocchi fregio-architrave, che riduce le variabili di posizionamento dello stesso sul modello 3D fotogrammetrico. La disposizione è avvenuta tenendo conto della superficie di contatto tra i blocchi fregio-architrave adiacenti e garantendo la continuità tra le modanature, come illustrato nelle immagini che seguono.

Fig. 4.69: Veduta prospettica dal basso della restituzione tridimensionale dei blocchi fregio-architrave con nomenclature degli elementi architettonici



- 1: architrave con tre “fasce in aggetto separate da un astragalo a perle ovoidali allungate e fusarole sferiche e da un nastro intrecciato”(L. Campagna, 2018).
- 2: “cimasa costituita da un astragalo con stesse decorazioni del precedente, da un *kymation* ionico ad ovolo e freccette, da un *anthemion* di palmette e un listello terminale liscio”(L. Campagna, 2018).
- 3: “fregio composto da tralci giraliformi e da un *kymation* ionico ad ovolo e freccette e da un listello terminale liscio” (L. Campagna, 2018).

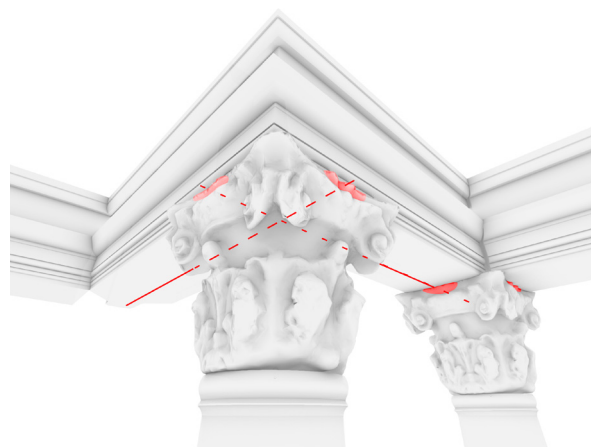
Fig. 4.70: Veduta dal basso prospettica della restituzione tridimensionale dei blocchi fregio-architrave posizionati in sequenza



Posizionamento dei blocchi fregio-architrave sui capitelli delle colonne

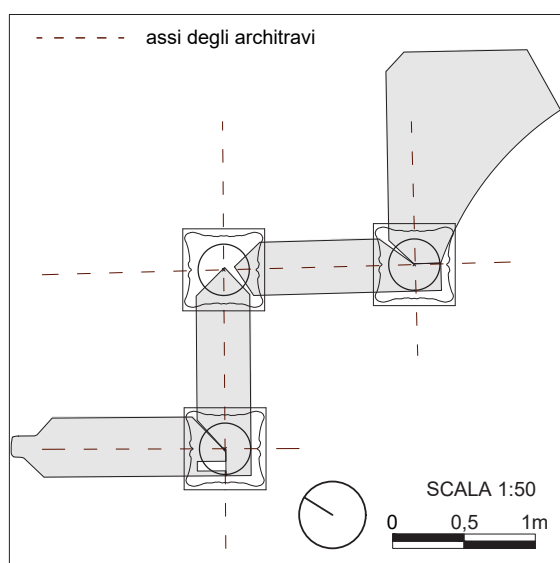
Partendo dal posizionamento delle colonne, citato precedentemente, si è perfezionato secondo alcuni vincoli compositivi e strutturali. Infatti il posizionamento delle colonne è vincolato affinché il fiore d’abaco dei capitelli giaccia lungo l’asse dei piani di posa dei blocchi fregio-architrave.

Fig. 4.71: Schema concettuale del posizionamento del capitello sui blocchi fregio-architrave. In evidenza gli assi del blocco fregio-architrave e la decorazione floreale del capitello.



Inoltre il posizionamento del baricentro delle colonne è dettato dall'intersezione degli assi dei piani di posa dei blocchi fregio-architrave.

Fig. 4.72: Restituzione bidimensionale della disposizione reciproca tra colonne e blocchi fregio-architrave

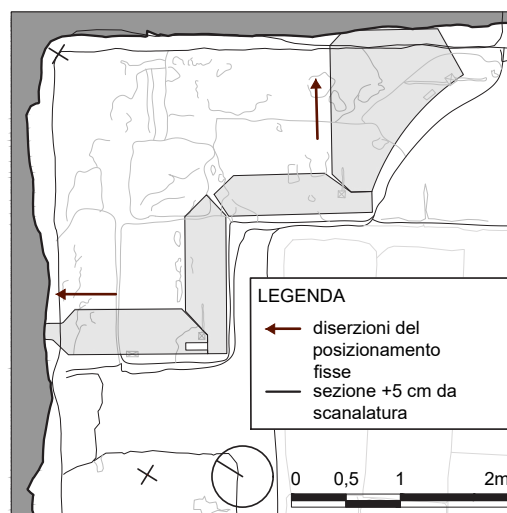


La metodologia sopracitata non è valida per la colonna sottostante il blocco A1-65 addossata al muro di fondo. Infatti il blocco fregio-architrave A1-65 ha un andamento curvilineo e inoltre permangono alcune incertezze di dimensionamento del suo modello ricostruttivo, come detto precedentemente. Per il collocamento della colonna sopracitata si utilizza come punto di riferimento il foro per la colatura del piombo presente sulla cornice del podio sottostante, che tratteremo nel paragrafo successivo.

Posizionamento dei blocchi fregio-architrave e colonne sul modello 3D fotogrammetrico

Ottenuto un gruppo di modelli 3D composto da blocchi fregio-architrave e colonne, è possibile relazionarlo al modello 3D fotogrammetrico. Il criterio di relazione adottato per ancorare il gruppo dei modelli ricostruiti dei blocchi e il modello 3D del Ninfeo è basato sull'appoggio dei blocchi fregio-architrave sulla scanalatura del muro di fondo che inoltre, essendo angolare, porta ad un'unica possibile soluzione di posizionamento. In figura 4.73 è mostrato lo schema concettuale relativo ai limiti di movimento degli oggetti di anastilosi sul modello 3D fotogrammetrico.

Fig. 4.73: Schema concettuale dei vincoli spaziali dei blocchi fregio-architrave relazionati al modello 3D fotogrammetrico



Questa operazione è avvenuta grazie al confronto tra le tracce di cantiere, leggibili sul modello 3D del Ninfeo e gli elementi architettonici aggiunti. La texture del modello 3D fotogrammetrico, infatti, evidenzia la posizione dei fori per la colatura del piombo, presenti sulle cornici del podio. Questi fori, originariamente, venivano utilizzati per fissare le basi delle colonne alla cornice del podio (L. Campagna, 2018), pertanto il

baricentro delle colonne da noi individuato deve coincidere con questi. Tuttavia la collocazione di queste cornici è frutto di un riposizionamento in loco non volto a un progetto di anastilosi, pertanto risulterebbe errato il posizionamento delle colonne riferendosi all'attuale posizione di esse. Come vedremo successivamente, infatti, è necessario effettuare alcuni spostamenti di tali cornici.

Fig. 4.74: Restituzione bidimensionale di dettaglio in corrispondenza dell'angolo nord della collocazione delle colonne e dei blocchi fregio-architrave sul modello 3D fotogrammetrico

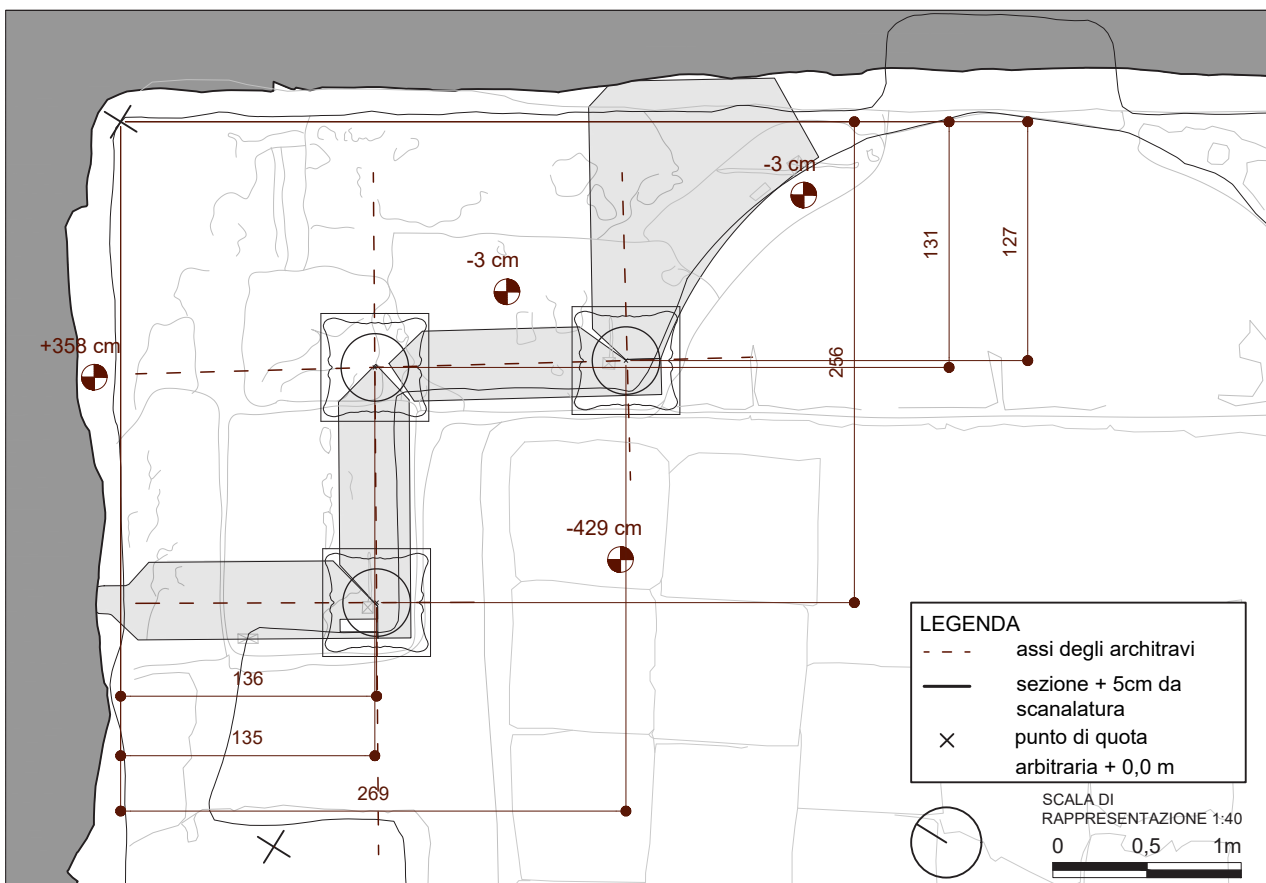
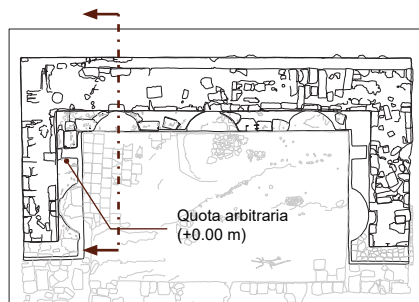
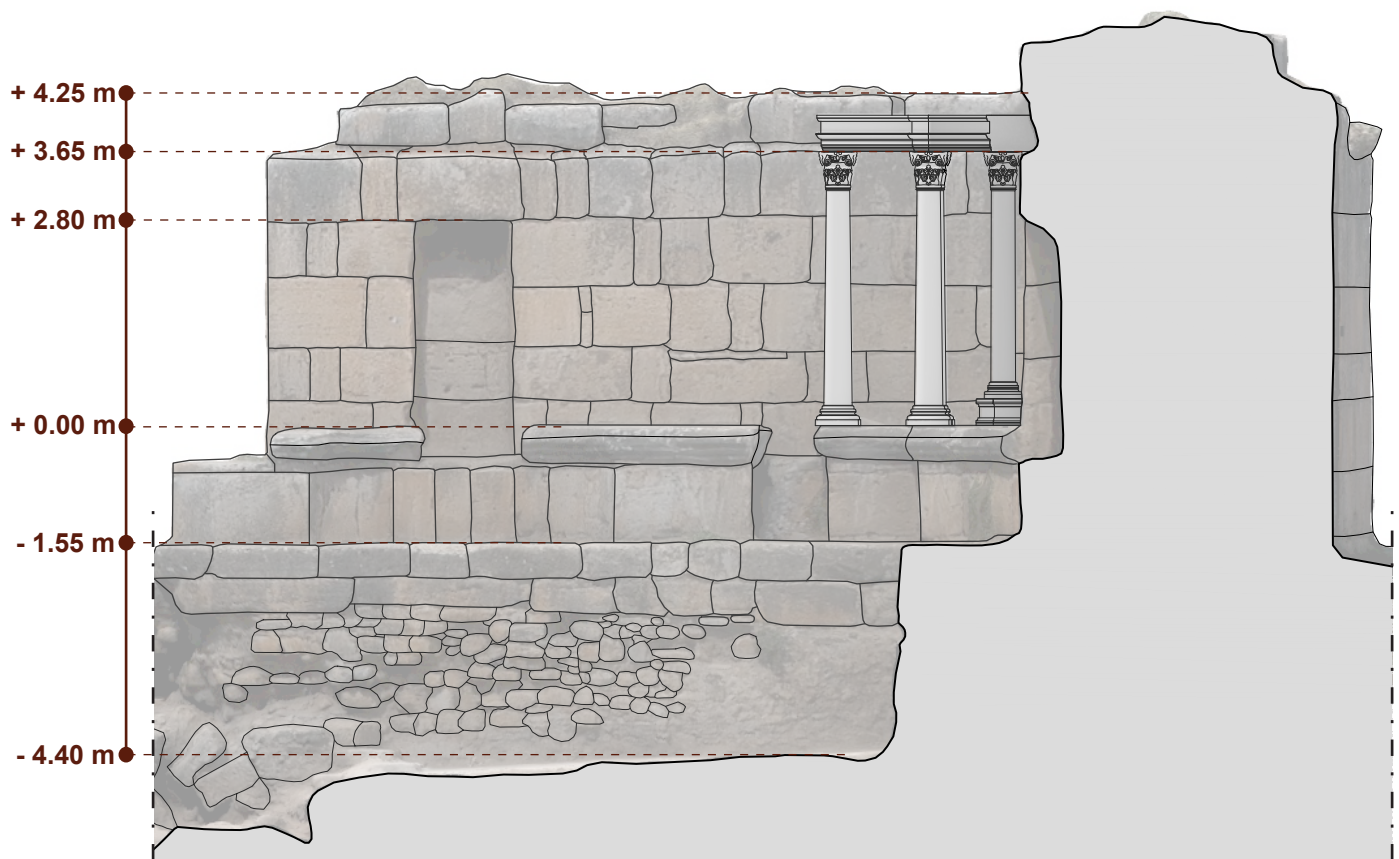


Fig. 4.75: Restituzione modello fotogrammetrico - Sezione trasversale del Ninfeo del Santuario di Apollo con colonne e blocchi fregio-architrave collocati sul modello 3D fotogrammetrico



SEZIONE A-A'



SCALA 1:100



Riposizionamento delle cornici del podio

Nella fase precedente si è completata la relazione tra il gruppo di modelli 3D, oggetto di anastilosi, e il modello fotogrammetrico.

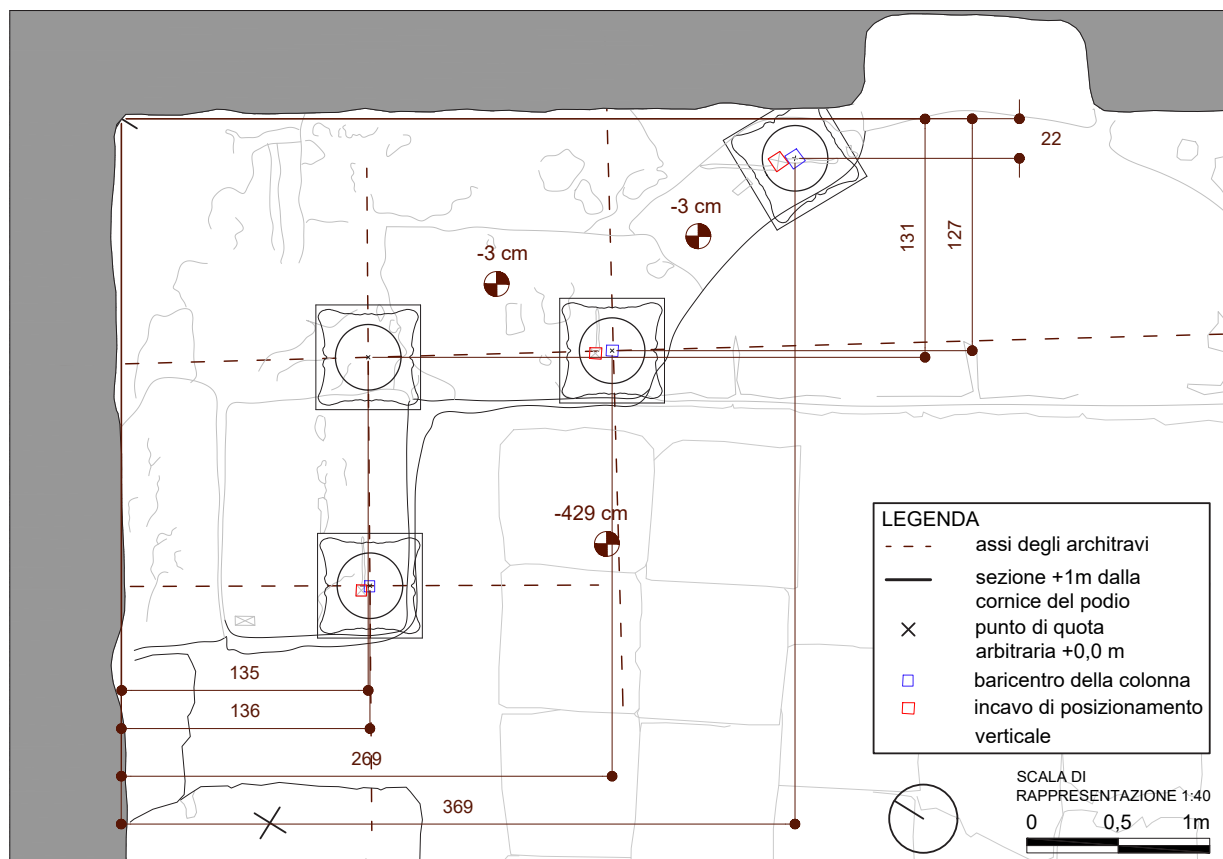
La comparazione tra questi due modelli tridimensionali evidenzia lo scarto tra i baricentri delle colonne e gli "incavi" (L.Campagna, 2018) delle cornici come illustrato in figura 4.76.

La proposta che ne scaturisce è che le cornici necessitino di un riposizionamento, in modo che i fori delle colature del piombo delle colonne possano trovarsi in posizione corretta rispetto alla ricostruzione illustrata precedentemente.

Grazie a questo spostamento è anche possibile posizionare la colonna addossata al muro di fondo, sottostante il blocco A1-65.

La disposizione di questa colonna, nonostante gli spostamenti delle cornici del podio, non risulta corretta in quanto il

Fig. 4.76: Restituzione bidimensionale di dettaglio dello spostamento delle cornici del podio in corrispondenza del baricentro delle colonne



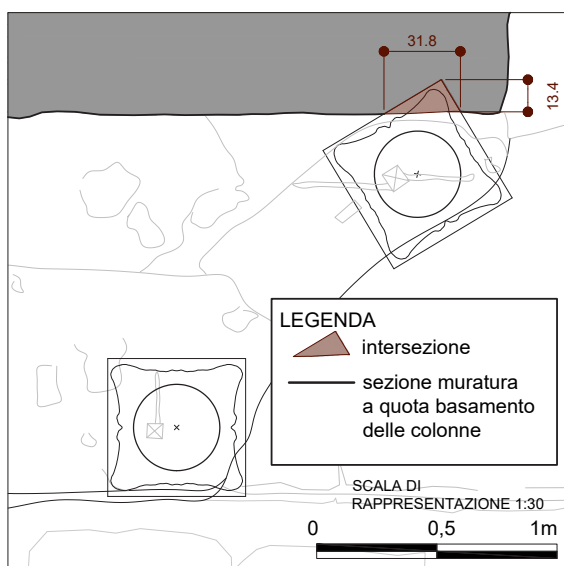
suo dado a base quadrata e capitello si intersecano con il muro di fondo di circa 12 cm (figura 4.77)

Si elabora quindi la seguente proposta per ovviare al problema

Proposta progettuale

La cornice del podio, che funge da base per la colonna con dado a pianta quadrata, consisterebbe in un blocco differente, con l'incavo di fissaggio verticale in una posizione che permetta una collocazione più realistica della colonna sovrastante. E' necessario che tale cornice rispetti la continuità di curvatura delle modanature del blocco di cornice adiacente in corrispondenza dell'esedra e che abbia un incavo di fissaggio verticale che localizzi la colonna entro il limite strutturale definito

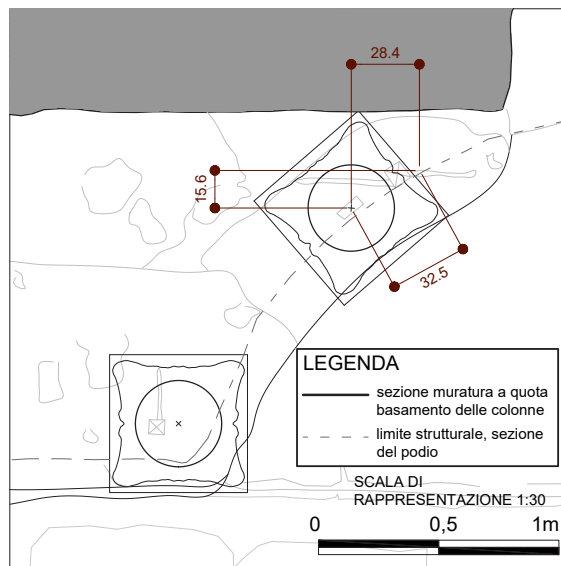
Fig. 4.77: Particolare della reilaborazione bidimensionale della colonna sottostante il blocco A1_65



dal podio. Infatti come è possibile notare in figura 4.78, il baricentro della colonna si trova in prossimità del limite del podio, contrariamente alle altre colonne il cui baricentro ricade all'interno dello stesso.

La proposta progettuale è avvalorata nel caso in cui si prenda in considerazione il collocamento della colonna con dado a base quadrata sulla cornice del podio dell'avancorpo nord. Il baricentro di questa colonna rientra all'interno del limite strutturale del podio e non vi sono incongruenze tra la stessa e la muratura dell'avancorpo. Tuttavia tale cornice presenta continuità formale con la cornice adiacente. In conclusione la cornice del podio in analisi potrebbe appartenere a un'altra esedra del Ninfeo.

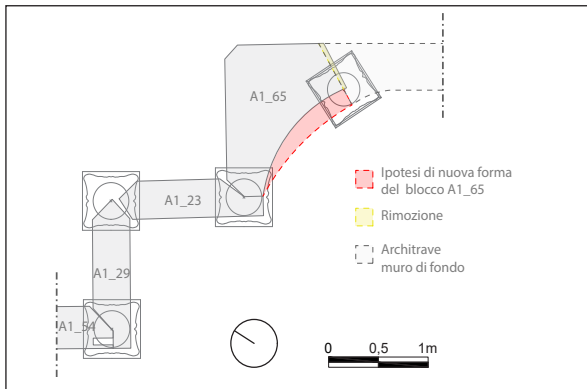
Fig. 4.78: Spostamento della colonna sottostante il blocco A1_65



Modifica del blocco fregio-architrave A1_65

Il blocco A1_65, nonostante l'operazione di scala eseguita per far sì che poggiasse sulla scanalatura del muro di fondo, necessita di alcune modifiche affinché insista correttamente sul capitello della colonna sottostante, come mostrato nella schema concettuale in figura 4.79.

Fig. 4.79: Schema concettuale di modifica del blocco A1_65



Le modifiche effettuate sul blocco A1_65 interessano la superficie frontale curva e la superficie di contatto con il blocco fregio-architrave addossato al muro di fondo. In seguito a questa modifica infatti, tutti i capitelli delle colonne aggettano della stessa quantità rispetto ai piani di posa dei blocchi fregio-architrave, uniformando il linguaggio tra i vari elementi architettonici. Nelle rappresentazioni tridimensionali si è deciso di raffigurare con colori differenti i vari elementi architettonici in base al loro livello di attendibilità¹.

1: crf. p. 125

In conclusione, i procedimenti eseguiti per la realizzazione dell'anastilosi in corrispondenza dell'angolo nord del Ninfeo del Santuario di Apollo sono schematizzati in figura 4.80 e si suddividono in:

- 1) Posizionamento del piano di posa dei blocchi fregio architrave sulla scanalatura muraria
- 2) Individuazione degli assi dei piani di posa per la collocazione dei capitelli delle colonne
- 3) Proiezione delle intersezioni degli assi sul piano delle cornici del podio per individuare il centro di fissaggio verticale delle basi delle colonne
- 4) Spostamento delle cornici del podio affinché i loro incavi di fissaggio verticale coincidano con i centri delle colonne

Fig. 4.80: Schema riassuntivo degli spostamenti degli elementi architettonici in relazione al modello 3D fotogrammetrico

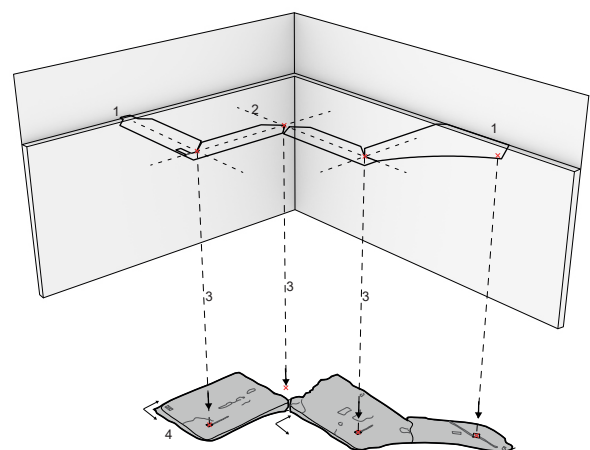
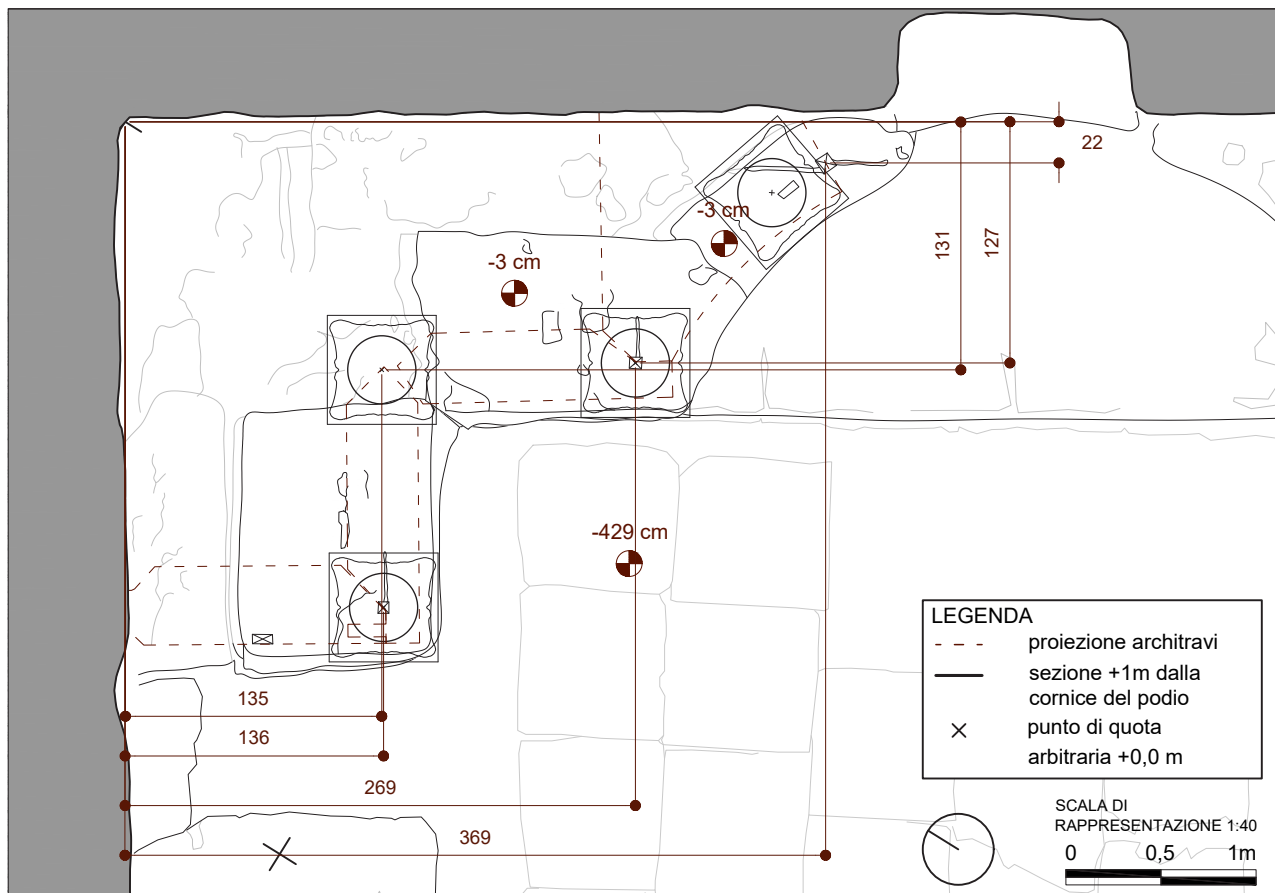


Fig. 4.81: Restituzione bidimensionale delle colonne e blocchi fregio-architrave in corrispondenza dell'angolo Nord



Ricostruzione ipotetica del resto della facciata ipostila

Il lavoro di anastilosi si conclude con il completamento della facciata ipostila del primo ordine che, essendo ancora in fase di studio, presenta numerose lacune relative agli blocchi architettonici che la compongono. Infatti, a eccezione dell'angolo nord-ovest, la facciata ipostila viene ricostruita idealmente facendo riferimento alle piante ricostruttive e al disegno prospettico della Professoressa D. De Bernardi e le tracce di cantiere presenti sul modello 3D fotogrammetrico. Si configura quindi un progetto di anastilosi contenente diversi livelli di attendibilità: a partire dal più fondato ovvero quello di cui sono stati rinvenuti i blocchi architettonici e la loro posizione sul Ninfeo, fino al meno affidabile appartenente alla facciata ipostila i cui elementi architettonici sono ancora dispersi.

La ricostruzione ideale della facciata ipostila si articola secondo le seguenti fasi ricostruttive:

- *Ricostruzione avancorpo sud*
- *Ricostruzione cornici del podio*
- *Posizionamento colonne*
- *Ricostruzione e posizionamento dei blocchi fregio-architrave*

Ricostruzione avancorpo sud

L'avancorpo sud del Ninfeo del Santuario di Apollo presenta danni relativi ai terremoti succeduti negli anni¹, infatti la struttura muraria è parzialmente crollata rendendo illeggibili le tracce di cantiere utili al posizionamento dei blocchi fregio-architrave. La sua ricostruzione risulta pertanto necessaria per completare l'anastilosi ideale del primo ordine della facciata ipostila.

La presenza in situ dei primi blocchi che compongono l'avancorpo pone le basi per il tracciamento del perimetro di estrusione, si restituisce infatti il profilo esterno dell'avancorpo e si estrude linearmente in direzione zenitale fino al raggiungimento della scanalatura presente sul muro, con funzione di appoggio per i blocchi fregio-architrave. La scanalatura sul muro si realizza utilizzando la media delle profondità delle stesse, che risulta essere 18 cm. La nicchia, presente sull'avancorpo e conservata solo in parte, si completa fino al raggiungimento dell'ultimo filare dei blocchi di travertino delle nicchie conservate.

Si assegna un materiale vitreo per rendere distinguibile l'intervento e consentire la visualizzazione degli elementi sottostanti. Segue una vista dell'avancorpo sud ricostruito.

1: crf. p. 40

Fig. 4.82: Veduta da nord-ovest della ricostruzione dell'avancorpo sud sul modello 3D fotogrammetrico



Ricostruzione cornici del podio

Le cornici del podio risultano necessarie per collocare alla giusta quota le colonne. In situ sono state ricollocate solo alcune di esse, principalmente nella porzione nord dell'edificio, mancano infatti le cornici lungo tutto l'avancorpo sud e parzialmente nella porzione meridionale del muro di fondo. Si procede quindi alla modellazione delle cornici del podio utilizzando come profilo di estrusione la superficie mistilinea del podio e come profilo di estrusione la sezione trasversale della cornice ricavata dal modello 3D fotogrammetrico. Non conoscendo la dimensione dei singoli blocchi di cornice, si decide di realizzare un unico volume. È emerso in questa fase una variazione di quota tra i due avancorpi nord e sud, che comporta un dislivello di 35 cm circa. Perciò si integra sul podio dell'avancorpo sud un volume nella parte inferiore della cornice per colmare il dislivello.

Fig. 4.83: Veduta a volo d'uccello del modello 3D fotogrammetrico con posizionamento punti per la lettura delle quote



Fig. 4.84: Tabella delle quote dei punti posizionati sul modello 3D fotogrammetrico

Measure Shape				
Selected shapes				
	Coordinates	Profile	Volume	
Point	X (m)	Y (m)	Z (m)	DEM altitude (m)
1 (Point)				
1	686909.341603	4200027.597499	373.039	373.039
2 (Point)				
1	686924.169389	4200024.307875	372.983	372.983
3 (Point)				
1	686929.752679	4200011.914758	372.952	372.952
4 (Point)				
1	686922.892701	4200005.540320	372.682	372.682

Quel che si sa è che parte delle cornici sono state riposizionate nel corso dei restauri, ma attualmente persiste un dislivello tra le superfici superiori delle cornici del podio tra la zona nord e sud del Ninfeo a causa della variazione di quota del podio citato precedentemente. È necessario quindi uniformare la quota delle cornici affinché il colonnato poggi su un piano orizzontale, per questo motivo viene aggiunto un volume sotto le cornici comprese tra l'edera settentrionale e l'edera meridionale del muro di fondo.

Segue l'immagine delle cornici ricostruite e inserite sui podi del modello 3D fotogrammetrico.

Fig. 4.85: Veduta a volo d'uccello del modello 3D fotogrammetrico con ricostruzione podi per eliminare il dislivello



Posizionamento delle colonne

Le colonne si posizionano sul modello 3D del Ninfeo sfruttando, laddove presenti, gli incavi delle cornici per la colatura del piombo e, dove assenti, la pianta ricostruttiva della Professoressa D. De Bernardi, tenendo tuttavia presente che nella parte terminale dei due avancorpi, è più probabile la presenza di sole tre colonne (ipotesi L. campagna) rispetto all'ipotesi De Bernardi che ne prevedeva 4. L'immagine che segue raffigura le colonne aggiunte sul modello 3D fotogrammetrico.

Fig. 4.86: Veduta da ovest est del modello 3D fotogrammetrico con inserimento delle colonne sulle cornici



Ricostruzione blocchi fregio-architrave

La ricostruzione dei blocchi fregio-architrave avviene in maniera simile alla metodologia utilizzata per le cornici del podio. Infatti si sfrutta la superficie mistilinea del podio come profilo di estrusione principale, modificata attraverso un *offset* esterno pari alla distanza media dell'oggetto del profilo esterno dei piani di posa dei blocchi fregio-architrave e il profilo esterno del podio. Si crea un modello 3D unico dei blocchi fregio-architrave del primo ordine e si posa esso sulle colonne precedentemente collocate.

Il risultato finale consiste in un'anastilosi virtuale e ideale del primo ordine della facciata ipostila a eccezione dell'angolo nord nel quale si colloca la ricostruzione e posizionamento dei blocchi esistenti così come illustrato nei paragrafi precedenti. Segue l'immagine relativa l'anastilosi ideale.

Fig. 4.87: Veduta da ovest del modello 3D fotogrammetrico con inserimento dei blocchi fregio-architrave sulle colonne



Nell'immagine che segue è raffigurata l'anastilosi completa con i diversi livelli di attendibilità basato sui blocchi esistenti pervenuti.

LEGENDA:

- Livello attendibilità alto
- Livello attendibilità medio
- Livello attendibilità basso - ricostruzione ideale

Fig. 4.88: Veduta d'insieme del modello 3D fotogrammetrico del Ninfeo del Santuario di Apollo con l'inserimento delle ricostruzioni tridimensionali del primo ordine della facciata ipostila secondo i diversi livelli di attendibilità



I disegni architettonici del Ninfeo del Santuario di Apollo: anastilos

Fig. 4.89: Pianta ricostruttiva del progetto di anastilos del Ninfeo del Santuario di Apollo, ricavato dal modello 3D fotogrammetrico, sezionato a +1m dal Marker D4 posto sulla cornice del podio a quota + 373,527 m slm.

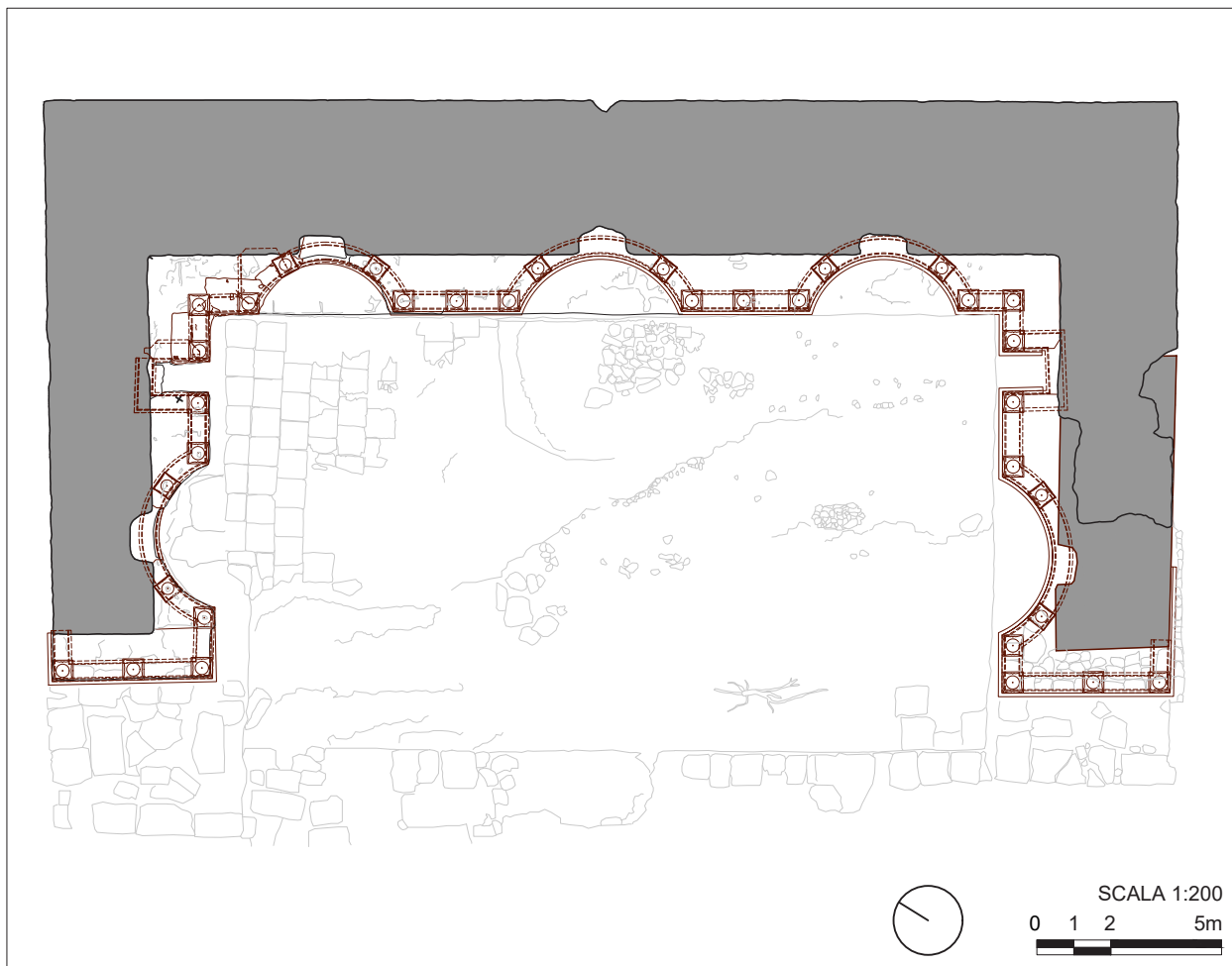


Fig. 4.90: Prospetto ricostruttivo del progetto di anastilosi del Ninfeo del Santuario di Apollo, ricavato dal modello 3D fotogrammetrico e nuvola di punti.

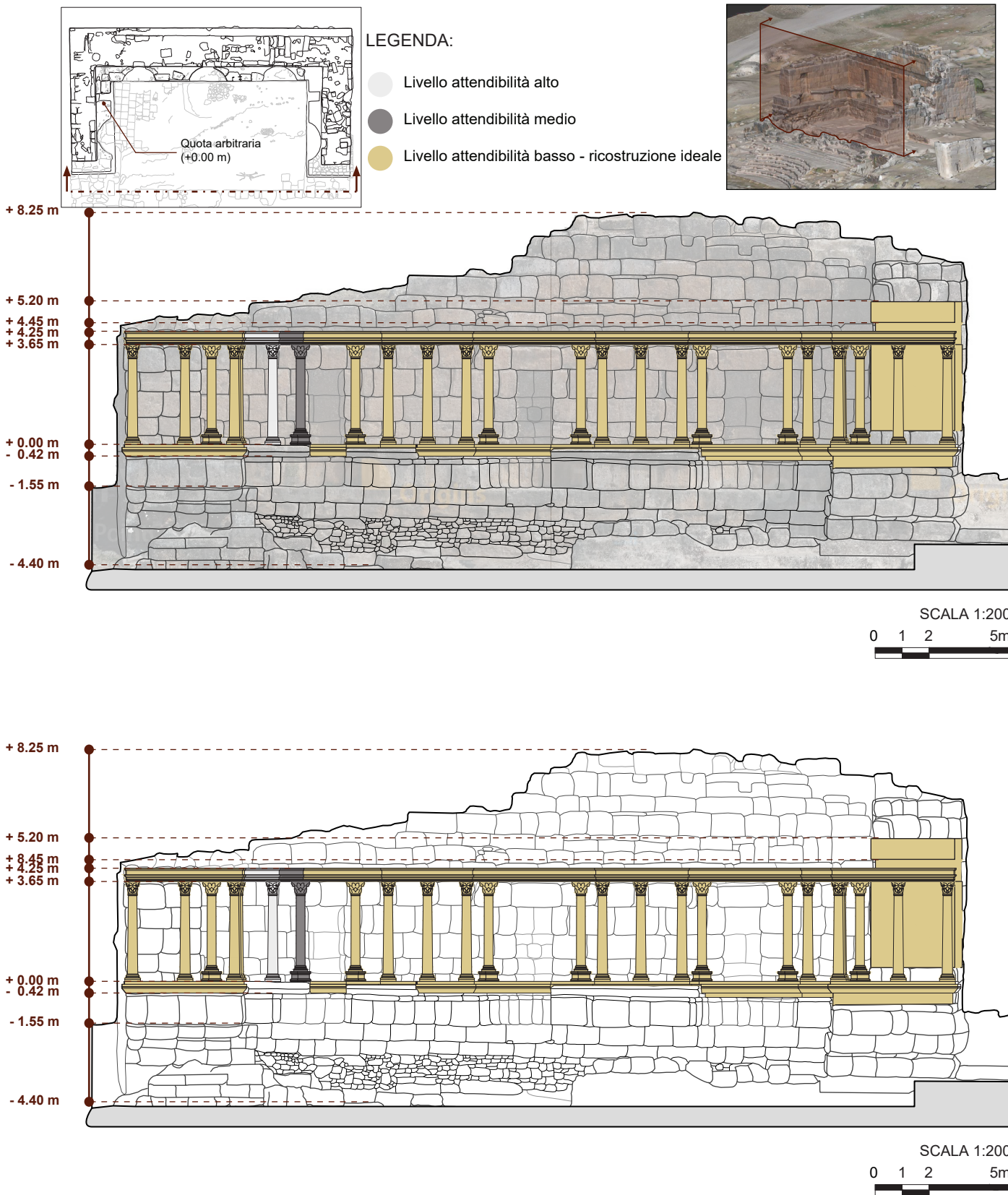


Fig. 4.91: Sezione trasversale ricostruttiva del progetto di anastilosi del Ninfeo del Santuario di Apollo, ricavato dal modello 3D fotogrammetrico e nuvola di punti, sezionato in corrispondenza della nicchia nord del fronte principale

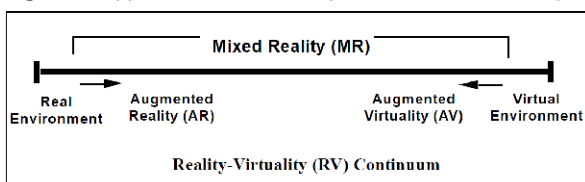


5. IL PROGETTO DI VIRTUAL REALITY

5.1 Principi formativi della Mixed Reality

La combinazione del mondo reale con il mondo virtuale prende il nome di MR (*Mixed Reality*), questa tecnologia assume valenza di AR (*Augmented Reality*) quando l'ambiente reale è arricchito da alcuni contenuti digitali, e di VR (*Virtual Reality*) quando vi è una completa sostituzione del mondo reale con ologrammi (P.Milgram, H.Takemura,

Fig. 5.1: Rappresentazione dello spettro della mixed reality



La *mixed reality* è al giorno d'oggi largamente utilizzata specialmente nel settore del *gaming*, e nell'ambito della *cultural heritage* viene sfruttata per rendere più immersiva la fruizione consentendo accessi facilitati o filtrati ai beni. Nello specifico per quanto concerne le esposizioni museali, questa tecnologia si utilizza spesso per allestire mostre digitali utili per vivere un'esperienza in anteprima del museo reale.

L'immersività dell'esperienza è un fattore fondamentale per accrescere l'apprendimento, poichè richiede al partecipante di essere parte integrante dell'esperienza stessa (B.J. Pine, J.H. Gilmore, 1999).

Inoltre la capacità di apprendimento del visitatore non si relaziona solamente all'immersività dell'esperienza formativa, ma anche all'assorbimento di informazioni (Y.H. Yuan, C. Wu, 2008). In campo formativo, nell'ambiente VR, immersività e assorbimento si manifestano nello stesso momento, a differenza di un'esperienza reale, dove l'assorbimento delle informazioni avviene prima dell'immersione, poichè un individuo è in grado di immergersi in un'esperienza solamente quando possiede minime nozioni o interesse riguardo l'argomento (H.J. Song, C.K. Lee, J.A. Park, Y.H. Hwang, Y. Reisinger, 2015). Infatti grazie all'esperienza di virtualizzazione immersiva, il visitatore diviene attore attivo all'interno dell'esperienza formativa, migliorando il proprio apprendimento.

Tuttavia i progetti di virtualizzazione in campo culturale, non sostituiscono una visita reale ma anzi fungono da efficace strumento propedeutico alla visita in situ (J.M. Dewailly, 1999).

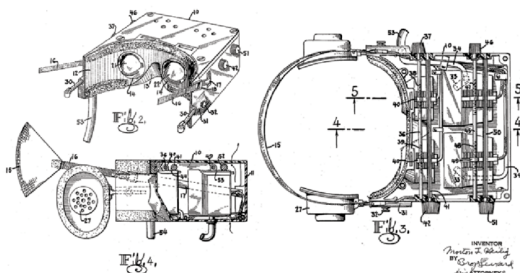
In questo capitolo verrà trattato il tema della *Virtual reality* poichè il progetto di digitalizzazione dei due Ninfei di Apollo e dei Tritoni si sviluppa interamente all'interno di un ambiente virtuale, esso infatti consiste, come trattato nei capitoli precedenti, in un modello multiscala in cui l'utente ha sia la possibilità di navigare

all'interno dell'area circostante dei due monumenti sia di analizzare i due manufatti nel dettaglio.

5.2 Gli strumenti della Virtual Reality

Il primo apparecchio VR si deve a Morton Heilig¹ che nel 1960 inventa il primo *headset* dotato di schermo stereoscopico con audio stereo, chiamato *Telesphere Mask*, tuttavia sprovvisto di sistemi di tracciamento (L. Lescop, 2017).

Fig. 5.2: Disegni tecnici del *Telesphere Mask*



Dagli anni 2000 si ravviva l'interesse verso la realtà virtuale, complice lo sviluppo tecnologico e l'accessibilità dei prezzi, che porta il mercato dei visori AR/VR a una capitalizzazione di un miliardo di dollari e, secondo gli studi di *Goldman Sachs*, nel 2025 il suo mercato raggiungerà un valore di 80 miliardi di dollari (S.J. Barnes, 2016). Questo incremento di capitalizzazione di mercato è legato anche alla grande accessibilità economica di questi dispositivi per il consumatore. Infatti vengono sviluppate soluzioni *low-cost* come il *Google Cardboard* e versioni *consumers* come l'*Oculus Rift CV1*.

Fig. 5.3: *Google Cardboard*



Fig. 5.4: *Oculus Rift CV1*



Il *Google Cardboard* è un supporto per smartphone a tutti gli effetti in grado di simulare le *features* dei visori VR. Risulta quindi una soluzione estremamente economica in grado di avvicinare un vasto pubblico al mondo della realtà Virtuale. (D. Macisaac, 2015).

Il secondo, l'*Oculus Rift CV1*, è anch'esso indirizzato a un mercato *consumer*, a differenza del *Google Cardboard* presenta un doppio display integrato che, oltre a migliorare l'esperienza di utilizzo, consente di adattare la distanza interpupillare meccanicamente. Inoltre possiede un proprio sistema di tracciamento, chiamato *Constellation Tracking System*, che consente di determinare la posizione e rotazione del visore grazie alla presenza di dispositivi a infrarossi, installati sul visore, calcolati da sensori posizionati

1: Morton Heilig (22 Dicembre 1926 - 14 Maggio 1997) è un regista, filosofo e inventore statunitense, considerato pioniere della Virtual Reality.

all'interno della stanza. Inoltre questo visore è accessorizzato con due *controllers* che permettono di interagire con oggetti digitali presenti all'interno della scena virtuale, aumentando l'immersività e l'interazione (A. Nafees, 2016).

5.3 I campi applicativi della Virtual Reality

Lo svilupparsi delle nuove tecnologie, come citato precedentemente, ha permesso a molte discipline di implementare la realtà virtuale all'interno dei loro *modus operandi*. Infatti oltre alla sfera del gaming, che è il campo applicativo dove il VR è maggiormente utilizzato, vi sono ambiti di applicazione in cui viene largamente sfruttato (H. Bellini, W. Chen, M. Sugiyama, M. Shin, S. Alam, D. Takayama, 2016):

- *Esercizio*
- *Sanità*
- *Moda*
- *Business*
- *Sport*
- *Visualizzazioni scientifiche*
- *Edilizia*
- *Programmazione informatica*
- **Formazione**
- **Intrattenimento**
- **Patrimonio culturale**
- *Ingegneria*
- *Media*

- *Telecomunicazione*
- *Cinema*

Il progetto di virtualizzazione che vedremo successivamente interessa nello specifico gli aspetti legati alla formazione, intrattenimento e Patrimonio culturale.

Il VR a scopi formativi

La formazione è un aspetto indispensabile per la crescita personale. L'utilizzo della realtà virtuale in questo ambito permette agli studenti di relazionarsi tra loro all'interno di un ambiente tridimensionale, dentro il quale si visualizzano dati complessi rappresentati in modo accessibile e si interagisce con questi per migliorarne l'apprendimento.

Nella medicina, ad esempio, si utilizza per simulare operazioni chirurgiche e per visualizzare modelli tridimensionali del corpo umano utili al miglioramento dell'apprendimento senza causare alcun pericolo per i pazienti. In Inghilterra questa tecnologia è attualmente utilizzata (VRS, 2017).

Un ulteriore esempio si riscontra nell'insegnamento dell'astronomia, nel quale gli studenti si immergono all'interno di un ambiente tridimensionale artificiale dentro il quale interagiscono con il sistema solare visualizzando e seguendo, ad esempio, il progresso temporale di una cometa (VRS, 2017).

Il VR a scopo d'intrattenimento

Il gaming, come citato precedentemente, è il settore che domina all'interno della realtà virtuale a scopi di intrattenimento. Tuttavia vi sono altri rami dell'intrattenimento in cui il VR è utilizzato per migliorare l'immersività, come ad esempio il teatro e i parchi a tema virtuale. Inoltre durante la quarantena forzata del 2020 a causa della pandemia di Covid19, molti eventi hanno sfruttato piattaforme digitali per la loro realizzazione. Ad esempio l'azienda *Illusorr*, ha organizzato nel 2020 un evento all'interno della piattaforma *Sansar*¹. Durante questo evento sono state realizzate esposizioni interattive di *computational design* e relativi seminari a riguardo, sfilate di moda, conferenze e mostre. Infatti gli utenti potevano interagire direttamente con le guide della mostra, ponendo loro domande, e avere un'esperienza ravvicinata con il surrogato digitale dell'oggetto di studio in questione.

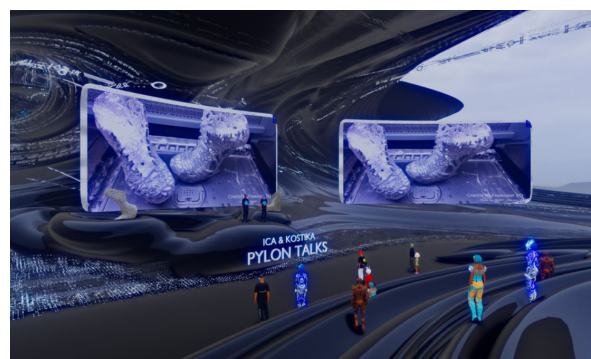
Fig. 5.5: Mostra espositiva all'interno di Sansar



1: Sansar è una piattaforma social in realtà virtuale, sviluppata da Linden Lab. La piattaforma consente di importare modelli 3D sui quali gli utenti possono creare e condividere esperienze social interattive, come giocare, guardare video e avere conversazioni in VR

Inoltre era possibile, esattamente come nella vita reale, acquistare all'interno della piattaforma i prodotti esposti, scattare fotografie e interagire con gli altri visitatori. (Illusorr, 2020)

Fig. 5.6: Conferenza all'interno di Sansar



Il VR per il Patrimonio culturale

Infine il principale campo di applicazione della realtà virtuale che interessa il nostro progetto di virtualizzazione è il Patrimonio Culturale. Lo studio del Patrimonio all'interno di un ambiente digitale avviene grazie agli strumenti della geomatica, che documentano con valenza scientifica le condizioni dei manufatti da proteggere e salvaguardare. Infatti non si limitano alla documentazione del Patrimonio (F. Remondino, 2011) ma forniscono anche operazioni di monitoraggio nella fase di restauro e di promozione (E. Donadio, A. Spanò, L. Sambuelli, D. Picchi, 2018), attraverso piattaforme di condivisione sociale.

Al giorno d'oggi questi contributi vengono apportati grazie a modelli 3D digitali e ambienti immersivi virtuali e permettono la digitalizzazione del Patrimonio culturale traducendolo in *Virtual Heritage* (G. Bruder, F. Steinicke, D. Valkov, K. Hinrichs, 2010).

La Virtual Heritage

La *Virtual Heritage* si basa sui principi di accuratezza metrica e di qualità di visualizzazione. Per poter soddisfare questi requisiti si sviluppano ambienti virtuali collaborativi (CVE) che si basano sui prodotti della geomatica, come le nuvole di punti, e sui motori grafici ¹ (*Game Engine*). In tal modo non si sacrifica la qualità grafica in favore della accuratezza dimensionale, infatti si richiede un grande contributo multidisciplinare dal momento che sarebbe impossibile raggiungere tali requisiti utilizzando unicamente software di modellazione architettonica (J. Moloney and L. Harvey, 2004).

La *Virtual Heritage* non nasce soltanto per scopi di ricerca e studio, rivolti ai professionisti, ma anche con la finalità di promuovere, educare e sensibilizzare un pubblico generico nei confronti dei valori del Patrimonio culturale. Infatti un metodo efficace per approcciarsi alla *Virtual Heritage* è l'*Edutainment*, ovvero il connubio tra educazione e intrattenimento,

grazie al quale l'utente è in grado di imparare divertendosi all'interno di un ambiente immersivo e interattivo sviluppato in un contesto culturale (D. Charsky, 2010). Le esperienze di *Edutainment* si possono realizzare attraverso progetti di *Gamification*, ovvero utilizzare elementi appartenenti alla sfera del *gaming* in un contesto non ludico (S. Deterding, D. Dixon, R. Khaled, and L. Nacke, 2011). La collaborazione tra *Edutainment* e *Gamification*, nel settore culturale, dà luce al tema del *Serious Games*, ovvero giochi a scopo formativo. Nello specifico i *Serious Games* sfruttano la componente di intrattenimento per accrescere la motivazione dell'utente a imparare (D. Charsky, 2010). I *Serious Games* vengono utilizzati per allestire ad esempio, nel campo della *Virtual Heritage*, musei virtuali e *virtual tour*, sfruttati per coinvolgere l'utente con contenuti culturali durante il percorso di visita (M. Mortara, C.E. Catalano, F. Bellotti, G. Fiucci, M. Houry-Panchetti, P. Petridis, 2014).

1: "Il motore grafico è il nucleo software di un videogioco o di qualsiasi altra applicazione con grafica in tempo reale. Esso fornisce le tecnologie di base, semplifica lo sviluppo, e spesso permette al gioco di funzionare su piattaforme differenti come le console o sistemi operativi per personal computer. La funzionalità di base fornita tipicamente da un motore grafico include un motore di rendering ("renderer") per grafica 2D e 3D, un motore fisico o rilevatore di collisioni, suono, scripting, animazioni, intelligenza artificiale, networking, e scene-graph." (Wikipedia)

I musei virtuali

La prima idea di *virtual museum* si associa a André Malraux, che nel 1947 la descrive come un museo senza pareti e un luogo senza limiti spaziali dove gli oggetti e le loro informazioni sono accessibili da ogni parte del mondo: “*a collection of digitally recorded images, sound files, text documents and other data of historical, scientific, or cultural interest that are accessed through electronic media*” (A. Malraux, 1996).

Nel 2004 l'ICOM (*International Council of Museums*) divide i musei virtuali in tre categorie: *brochure museum*, *content museum* e il *learning museum*. Tre tipologie di musei accessibili online con diverso grado di informazioni restituite e coinvolgimento, con lo scopo comune di invogliare il visitatore a recarsi personalmente nel museo fisico. (M. McDonald, 2005).

L'avanzamento tecnologico e l'introduzione dei visori VR, hanno permesso di apportare l'interattività all'interno dell'esperienza museale. Un esempio di virtual reality con un alto livello di immerisività si individua per esempio nel progetto “Modigliani VR: the ochre atelier” presente all'interno della TATE Modern Art Gallery di Londra, nel quale è stato realizzato un modello 3D dell'atelier dell'artista dentro il quale sono collocate

alcune sue opere pittoriche famose. È quindi possibile immergersi totalmente all'interno dell'ambiente tridimensionale e navigare al suo interno esplorando le sue opere esposte. Inoltre è aggiunta una voce narrante all'interno della scena VR che guida la visita e descrive l'ambientazione circostante e la vita dell'artista (Modigliani VR, 2017).

Fig. 5.7: Museo virtuale “Modigliani VR: The ochre atelier”



Fig. 5.8: Museo virtuale “Modigliani VR: The ochre atelier”



I virtual tour 360

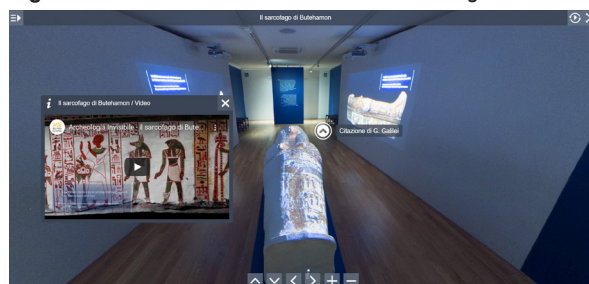
Il secondo utilizzo dei *Serious Games* sono i *virtual tour*, percorsi caratterizzati dall'unione di una serie di foto sferiche a 360°, scattate a una data distanza tra loro affinché sia simulato un percorso di visita. Generalmente i tour virtuali sono realizzati con fotocamere a 360° che sfruttano la tecnica dello *stitching*¹ per realizzare fotografie sferiche, che consentono al visitatore, posto al centro della foto 360°, di poter orbitare all'interno di queste (G. Ward, 2006).

Per aumentare l'interattività all'interno dei *virtual tour* sono spesso presenti degli *hotspot*, questi identificano aree all'interno del fotogramma 360° grazie ai quali è possibile attivare delle azioni come ad esempio l'apparizione di infografiche e lo spostamento dell'utente da un fotogramma all'altro. (A.Osman, N.Abdul Wahab, M.H. Ismail, 2009).

Un esempio celebre è il virtual tour della mostra del 2019, allestita nel Museo Egizio di Torino, nel quale, mediante una sequenza di foto sferiche a 360°, è possibile visitare le sale espositive del Museo. Questo progetto di virtualizzazione del reale è avvenuto grazie alla collaborazione tra studenti del Politecnico di Torino lo studio creativo Robin Studio (Archeologia invisibile, 2019). Il livello di immersività del suddetto

esempio è limitato alla visualizzazione sferica dei vari ambienti con infografiche annesse, non vi è infatti la possibilità di navigare liberamente all'interno degli ambienti, poichè questi non sono modelli tridimensionali ma sono immagini statiche sferiche a 360°.

Fig. 5.9: Screenshot del virtual tour nel Museo Egizio



Il progetto “Archeologia invisibile” è un esempio di strumento di marketing in grado di attrarre i visitatori verso la mostra reale (N. Chung, H. Lee, S.J. Lee, C. Koo, 2015).

Secondo gli studi di Y.C. Huang, K.F. Backman, S.J. Backman e L.L. Chang è emerso che il VR facilita il processo di decisione della meta turistica, garantendo un'anteprima di esperienza di alta qualità (Y.C. Huang et al, 2016).

A comprova della circolarità con cui oggi si utilizzano diverse tecnologie e alla luce delle strette interrelazioni tra metodi applicati in ambiti diversi, si può citare che nei progetti di documentazione con tecniche geomatiche si è recentemente diffuso l'utilizzo di camere sferiche per usi fotogrammetrici. (L.Teppati Losè, 2019)

1: Lo *stitching* è una tecnica che permette di realizzare foto panoramiche o sferiche mediante l'unione di due o più fotogrammi (G. Ward, 2006)

5.4 Il Progetto VR

L'elaborazione dei dati provenienti dagli strumenti della geomatica è stata gestita con l'ottica di generare un modello fotogrammetrico compatibile con software di Realtà Virtuale. In questi termini, il modello virtuale fornisce dati geometrici conservando la qualità grafica e permettendo all'utente navigare all'interno di un ambiente digitale nel quale può vivere esperienze di *edutainment* immersive.

L'utilizzo di soli software per la geomatica non permette l'elaborazione di un progetto simile, infatti, dopo aver generato il modello fotogrammetrico, è necessario affidarsi a specifici motori grafici che sono più adatti per adempiere a questi scopi, come ad esempio Unity3D e Unreal Engine.

Inizialmente sono state valutate le caratteristiche di entrambi i motori grafici e infine la scelta è ricaduta su quest'ultimo poichè dispone di un'interfaccia *user friendly* che non richiede competenze nel campo della programmazione informatica. Infatti il linguaggio di programmazione C++ è gestito da Unreal Engine sottoforma di *blueprints*, ovvero un metodo di programmazione visuale basato su nodi piuttosto che sulle righe di codice.

Il Virtual Tour nel Ninfeo dei Tritoni

Il progetto di virtualizzazione del Ninfeo dei Tritoni consiste nel realizzare un *virtual tour* in cui l'utente possa immergersi all'interno del sito archeologico e venire a conoscenza della sua storia attraverso un percorso interattivo. La peculiarità della visita è la possibilità di navigare liberamente all'interno del sito archeologico alla ricerca di infografiche esplicative. Durante il percorso di visita l'utente può quindi raggiungere alcuni *hotspot* tematici che possono mostrare descrizioni audiovisive riguardo un elemento architettonico in particolare o vivere una simulazione di un determinato evento storico, come ad esempio il crollo del muro di fondo avvenuto durante il VII sec d.C.

Preparazione del modello per il motore grafico

Come evidenziato nel capitolo precedente la generazione del modello fotogrammetrico è stata gestita in un'ottica di compatibilità con il software Unreal Engine sin dall'inizio¹: è stato infatti necessario dividere la mesh in modo tale che le singole porzioni avessero dimensioni tali da rendere una qualità grafica accettabile delle texture in 8K, ovvero la massima risoluzione supportata dal motore grafico.

1: Per la gestione del modello fotogrammetrico in vista della compatibilità con i vincoli dettati dal motore grafico cfr. p. 87

Dopo avere eseguito l'operazione suddetta in 3DReshaper, sono state esportate le singole mesh all'interno di Rhinoceros7, poichè non risultava possibile un passaggio diretto da 3DReshaper al motore grafico per due motivi principali: Unreal Engine supporta mesh texturizzate in formato *.fbx* e utilizza la propria unità di misura UU (1UU=1cm). Poichè in 3D Reshaper non è possibile convertire il modello in cm e esportarlo in formato *.fbx* è stato quindi necessario esportare i modelli in *.obj* e importarli in Rhinoceros7. Con questo software è stato possibile quindi cambiare il sistema di riferimento dei modelli in locale, convertirli in cm, ed esportarli in formato *.fbx*. Dopo questi procedimenti è quindi possibile importare le mesh all'interno di Unreal Engine senza incorrere in problemi dovuti alla scarsa navigabilità (grazie al sistema di riferimento locale), errati rapporti dimensionali (grazie all'unità di misura del modello in cm), scarsa leggibilità della texture (grazie al formato *.fbx*).

Elaborazione del Virtual Tour nel motore grafico

Unreal Engine è un motore grafico che permette lo sviluppo di videogiochi, progetti cinematografici e molto altro, ma non è un software di modellazione tridimensionale. Per questo motivo, è importante tenere presente che con esso

non è possibile editare i modelli 3D, ma è consentito solo svolgere tutte le operazioni atte a conseguire un rendering in *real time* e a gestire i parametri di interazione utente-modello.

Parametri di Real Time Rendering

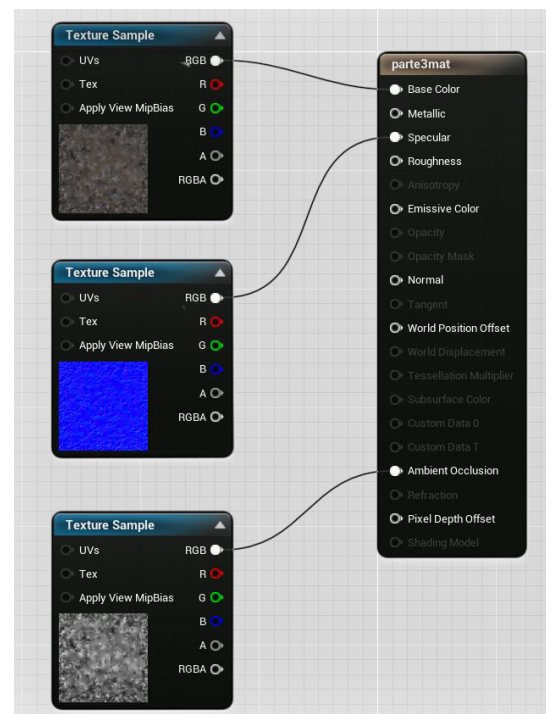
Il Rendering è il calcolo che esegue il motore grafico a partire da dati 3D archiviati al suo interno per produrre immagini bidimensionali. Quest'ultime sono ricavate da un processo che, similmente alla fotografia, mostra le interazioni tra l'oggetto e la luce. Quando la computer grafica è utilizzata per visualizzare scene che cambiano in base ai comportamenti dell'utente il motore grafico deve eseguire dei calcoli di rendering in tempo reale, da qui deriva il termine *Real Time Rendering*. In questo caso le immagini vengono calcolate con una velocità tale da far percepire all'occhio umano una scena in movimento e non una sequenza di fotogrammi. La minima velocità di elaborazione dei singoli fotogrammi che è in grado di far percepire all'occhio umano un movimento naturale è di 24 frames/secondo (Unity3D).

Per impostare il motore grafico in modo tale che possa eseguire un rendering in tempo reale è necessario quindi creare un materiale da attribuire alla mesh che reagisca in modo ottimale alla luce.

In Unreal Engine è possibile creare dei *physical materials*, ovvero materiali in grado di reagire in modo realistico alla luce. Essi infatti sono composti da diverse *textures*, ognuna delle quali conferisce una caratteristica fisica specifica al materiale. Come è mostrato in figura 5.10, per le singole mesh del Ninfeo dei Tritoni è stato creato un materiale composto da tre *textures* diverse: la più importante è definita come *base color*, essa contiene l'informazione radiometrica e coincide con la texture estrapolata dalla nuvola di punti in fase di elaborazione dei dati provenienti dalla fotogrammetria digitale UAV; con la *specular map* è possibile invece aggiungere caratteristiche di rugosità alla superficie, infatti essa contiene dei valori di direzione delle normali della superficie (rappresentati con uno spettro che spazia dal blu al rosso) che permettono di riflettere la luce secondo le caratteristiche di superficie di un determinato materiale. Nel settore Gaming questa texture è utilizzata con un'opacità del 100% in quanto, per alleggerire i calcoli del motore grafico, vengono importati modelli 3D estremamente semplici, i cui dettagli di superficie vengono delegati alla texture *specular* e non alla geometria della mesh. Nel caso del Ninfeo dei Tritoni, invece, il modello 3D è estremamente dettagliato dal punto di vista geometrico per cui la

specular map è stata utilizzata con un'opacità del 50%. Tale texture è stata ricavata a partire dalla *base color map* poiché il software Adobe Photoshop ne consente la conversione; L'ultima texture utilizzata per completare il materiale da attribuire alle mesh del Ninfeo dei Tritoni è la *ambient occlusion map*, essa ha uno spettro dal bianco al nero, che corrisponde alla quantità di illuminazione che ogni punto deve ricevere dall'ambiente esterno. Ne consegue che le zone d'ombra delle geometrie ricevono meno illuminazione dall'ambiente esterno, mentre quelle libere da ostacoli sono più esposte.

Fig. 5.10: *Physical material* di una mesh del Ninfeo dei Tritoni



I *physical materials* conferiscono un aspetto estremamente realistico alla scena durante la navigazione, ma per fare in modo che ciò avvenga è necessario inserire nell'ambiente virtuale delle sorgenti di luce. In particolare si è scelto di inserire delle sorgenti di luce omnidirezionali per simulare il Sole e altre sorgenti direzionali. Queste ultime, nonostante non siano presenti realmente nel sito archeologico in questione, servono per sovraesporre le zone d'ombra intrinseche nella texture *base color*. Infatti, l'orientamento del Sole durante il rilievo con drone per l'acquisizione dei dati UAV, ha comportato una successiva generazione della texture che conserva le zone d'ombra che erano presenti durante il rilievo. L'inserimento di luci direzionali per sovraesporre le zone d'ombra del modello è evitabile quando esso contiene un unico materiale, infatti è possibile ricorrere al Software *Agisoft De-Lighter* per ricalcolare i valori RGB della texture ricavata dalla nuvola di punti affinché si generi una nuova immagine con esposizione omogenea in tutti i suoi punti. Tuttavia nel progetto del Ninfeo dei Tritoni, la mesh contiene numerosi materiali, come il travertino, la pietra, il suolo, pertanto il Software, nel tentativo di uniformare l'esposizione, ha creato numerosi artefatti che rendevano illeggibile la natura dei materiali

L'introduzione di luci direzionali si è quindi confermato come il giusto compromesso tra leggibilità dei materiali e corretta esposizione della scena.

Fig. 5.11: *Interazione dei physical materials con le sorgenti luminose: confronto tra scena in assenza di fonti luminose esterne e risultato finale.*



Parametri di interazione utente-modello

La creazione dei materiali e di un sistema di illuminazione permette di ottenere una resa fotorealistica della scena, che risulta però navigabile ed interattiva solo dopo ulteriori accorgimenti. Affinchè l'utente possa esplorare il sito archeologico, infatti, è necessario attribuire delle proprietà fisiche non solo ai materiali, ma anche alle geometrie. E' necessario infatti gestire le collisioni del modello attraverso i *blocking volumes*.

Essi consistono in volumi geometrici invisibili che l'utente non può attraversare, pertanto si utilizzano per definire le superfici su cui l'utente può camminare e i volumi che non può varcare. In questo esempio sono stati infatti inseriti dei *blocking volumes* (indicati in figura 5.12 con i bordi gialli) in corrispondenza della via di Frontino e del suolo adiacente, tenendo in considerazione i dislivelli del terreno in modo tale che il visitatore possa esplorare il sito archeologico su una superficie che segue il reale andamento del terreno. Ulteriori volumi di blocco sono stati impostati sui fabbricati e sul perimetro esterno del modello affinché all'utente non sia consentito attraversare tali volumi o oltrepassare i confini del sito.

Fig. 5.12: Interazione dei *physical materials* con le sorgenti luminose



L'utilizzo dei *blocking volumes* è essenziale per gestire la navigabilità dell'utente all'interno di un ambiente virtuale, mentre i *blueprints* sono uno strumento efficace per controllare la componente interattiva del virtual tour.

Come accennato precedentemente i *blueprints* permettono di creare una serie di azioni senza conoscere il linguaggio di programmazione C++ poiché internalizzano in nodi alcuni comandi scritti proprio con questo codice. Essi sono stati utilizzati all'interno di Unreal Engine per attivare infografiche o simulazioni di terremoti durante il percorso quando l'utente raggiunge un *trigger volume*, ovvero un volume invisibile che, se attraversato dall'utente, permette di attivare un determinato evento.

Nello specifico la simulazione del terremoto sul Ninfeo dei Tritoni è generata da un *trigger volume* che innesca una serie di eventi quali: un *camera shake* accompagnato dalla riproduzione audio di un evento sismico e un piano invisibile che urta i blocchi per causare la loro caduta.

I blocchi del muro di fondo in analisi sono stati modellati partendo dal disegno di ricostruzione fornito dal Professor Campagna¹

1: cfr p. 35

Fig. 5.13: Blueprint per la simulazione di una scossa di terremoto

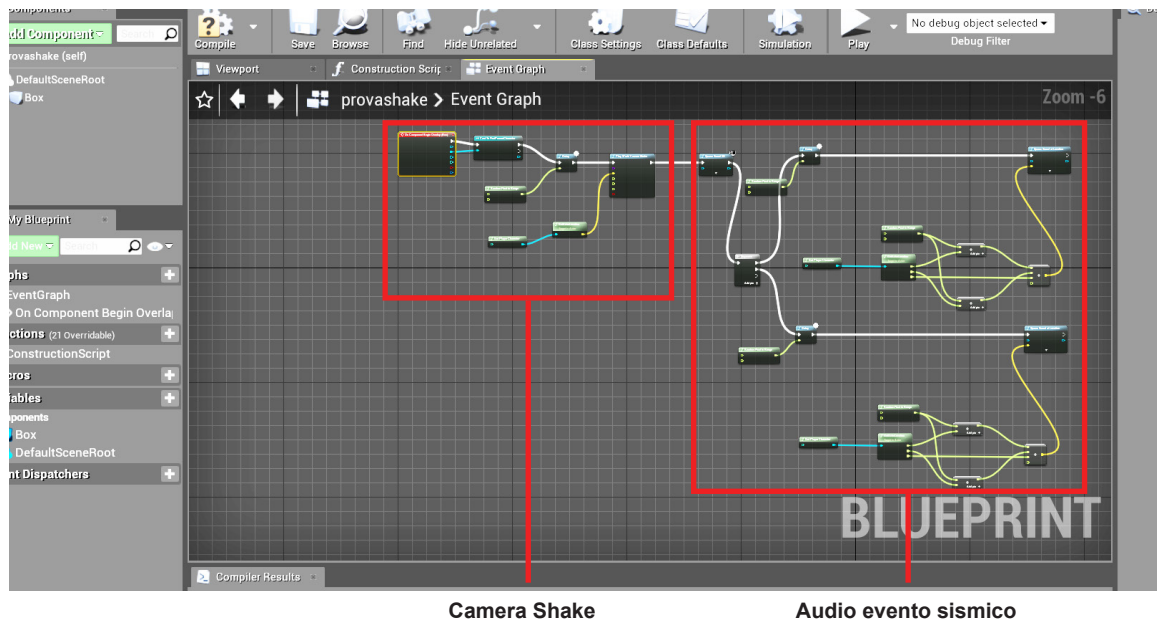


Fig. 5.14: Muro di fondo prima del crollo

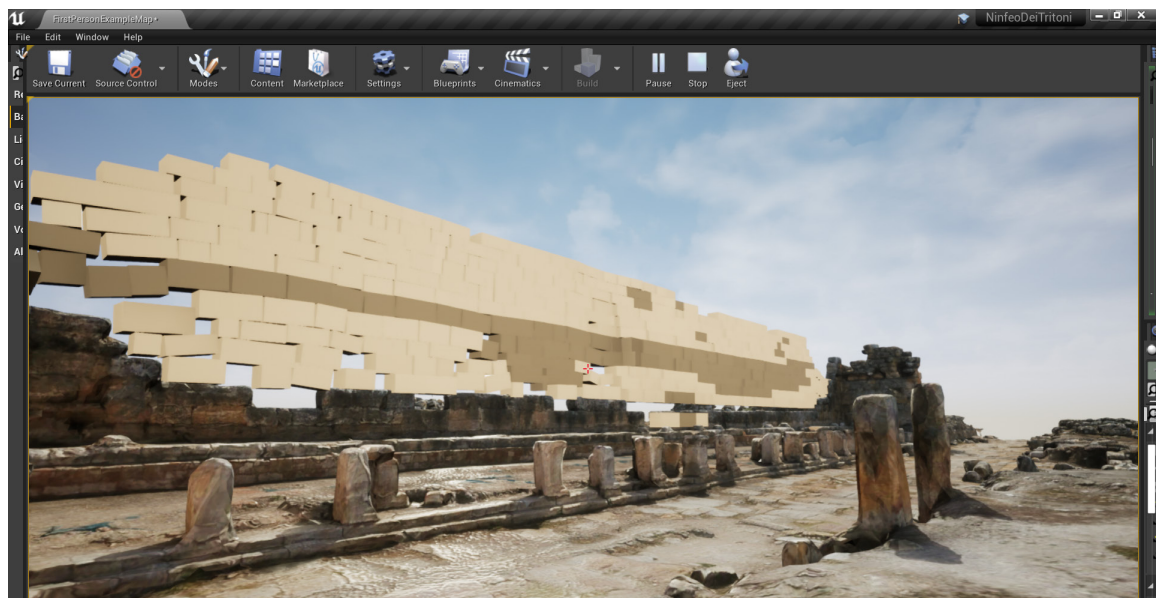


Fig. 5.15: Sequenza fotogrammi estrapolati dalla riproduzione del crollo del muro di fondo



Il Virtual Tour nel Ninfeo del Santuario di Apollo

Il progetto di virtualizzazione del Ninfeo del Santuario di Apollo consiste nel realizzare un *virtual tour* in cui l'utente possa immergersi all'interno del Ninfeo del Santuario di Apollo per conoscere la sua storia e il nostro progetto di anastilosi attraverso un percorso interattivo. Durante la visita è possibile navigare liberamente all'interno del sito archeologico alla ricerca di infografiche esplicative. Durante il percorso l'utente può quindi raggiungere alcuni *hotspot* tematici che posso mostrare descrizioni audiovisive riguardo un elemento architettonico in particolare o attivare la comparsa degli oggetti di anastilosi del primo ordine della facciata ipostila.

Preparazione ed elaborazione del modello

Le operazioni eseguite per ottenere un modello del Ninfeo del Santuario di Apollo compatibile con Unreal Engine sono simili a quelle svolte per il Ninfeo dei Tritoni¹: è stato infatti cambiato il sistema di riferimento e l'unità di misura rispettivamente in locale e in cm all'interno di Rhinoceros7. Una volta importati i modelli in formato *.fbx* all'interno del motore grafico è stato attribuito ad ogni mesh un *physical material* composto tra tre texture: la *base color map*, che coincide con la texture elaborata dalla nuvola di

punti, la *specular map* che influenza le modalità di riflessione del materiale definendo le normali delle superfici e la *ambient occlusion map* che determina il grado di accessibilità della luce in ogni punto delle superfici. Come per il Ninfeo dei Tritoni i *physical materials* sono stati resi visibili grazie all'introduzione nella scena di sorgenti luminose omnidirezionali per simulare il sole e direzionali affinché le zone d'ombra della *base color map* risultassero sovraesposte.

In maniera simile al Ninfeo dei Tritoni, in tutte le superfici di collisione del Santuario di Apollo sono stati inseriti dei *blocking volumes*² affinché venissero definite le superfici su cui l'utente può navigare e i volumi che non può attraversare. In particolare il visitatore è in grado di percorrere la gradinata del *theatron*, raggiungendo la quota del Ninfeo e della sua vasca, ma può anche visitare l'area circostante seguendo i dislivelli del terreno.

Interazione con i modelli di anastilosi

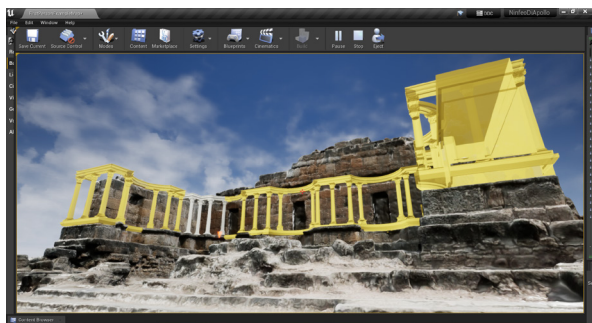
Durante il virtual tour l'utente è in grado di attivare la comparsa di infografiche audiovisive e degli oggetti di anastilosi. Questi ultimi hanno un materiale astratto per garantire la distinguibilità dell'anastilosi con le strutture in situ presenti nel modello fotogrammetrico ed inoltre hanno diverse colorazioni per far comprendere il grado di

1: Per il dettaglio delle operazioni di ottimizzazione del modello per il motore grafico crf. p. 72

2: Per la descrizione del *blocking volumes* e il loro utilizzo crf. p. 140

punti, la *specular map* che influenza le in corrispondenza dell'angolo nord, le tre colonne, insieme ai rispettivi blocchi fregio-architrave e cornici del podio, hanno un colore grigio chiaro che corrisponde al più alto livello di attendibilità, in quanto si riferisce agli elementi architettonici modellati sulla base delle piante ricostruttive ed eidotipi dei rinvenimenti archeologici¹. Il blocco fregio-architrave A1_65 e la rispettiva colonna con cornice del podio sottostante sono costituiti da un materiale con una colorazione più scura rispetto ai precedenti poichè, nonostante siano anch'essi ricostruiti sulle base delle fonti degli studiosi, consistono in una rielaborazione necessaria dovuta alle questioni emerse nel capitolo precedente². Infine gli elementi architettonici del resto del primo ordine della facciata ipostila sono illustrati con un colore ocra poichè non sono disponibili in quanto reimpiegati nel tempo o distrutti.

Fig. 5.16: Visualizzazione degli elementi di anastilosi in relazione al modello 3D fotogrammetrico illustrati in base al loro livello di attendibilità



1: cfr. cap. 4.4
2: cfr. cap. 4, p. 120

I *blueprints* elaborati per introdurre la componente interattiva all'interno del virtual tour sono stati impostati affinché gli elementi architettonici di anastilosi non siano immediatamente visibili, ma è necessario che l'utente segua le infografiche descrittive per raggiungere determinate zone, definite *trigger volume*, in grado di attivare la comparsa di tali oggetti. In particolare, una volta che l'utente attraversa il *trigger volume*, il *blueprint* agisce sull'opacità del materiale degli oggetti di anastilosi portandola da 0% al 100%. In questo modo l'utente partecipa attivamente alla composizione degli oggetti di anastilosi sul modello 3D fotogrammetrico, imparando il loro significato grazie alle proprie azioni e alle infografiche audiovisive.

Fig. 5.17: Blueprint per innescare la comparsa degli oggetti di anastilosi sul modello 3D fotogrammetrico

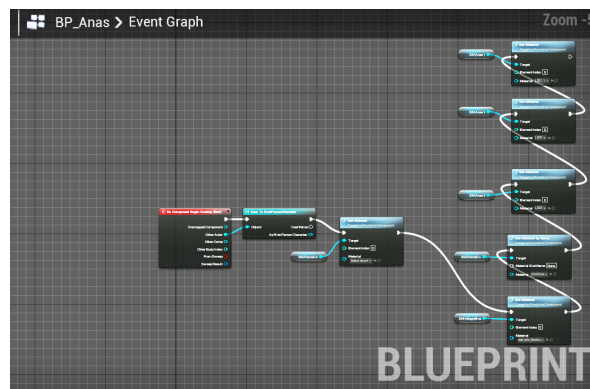
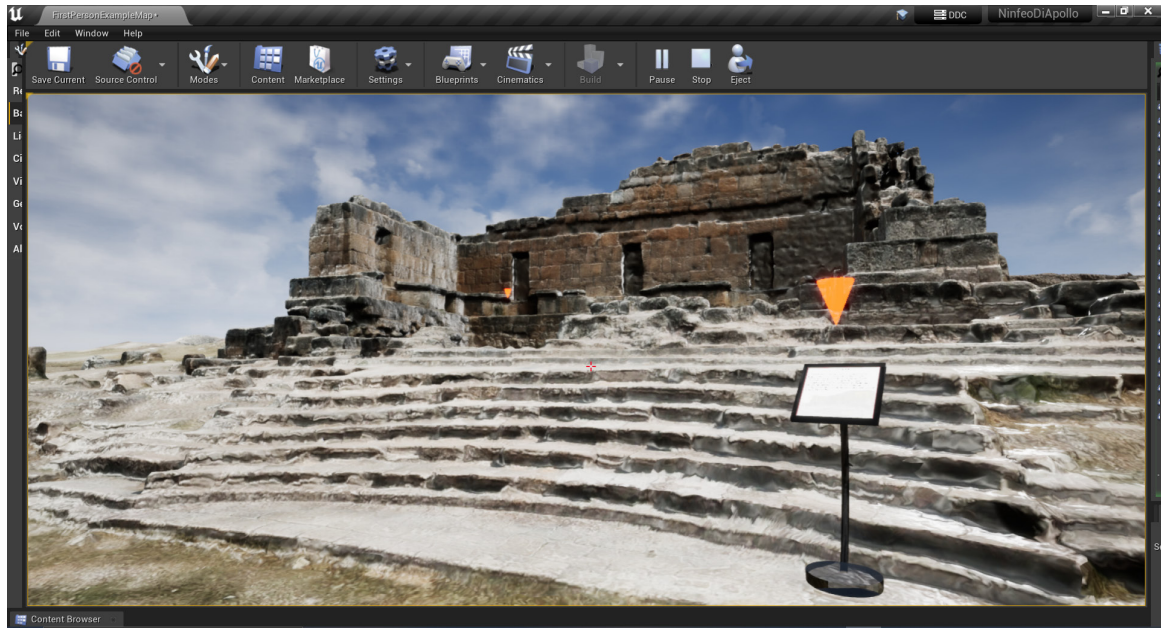
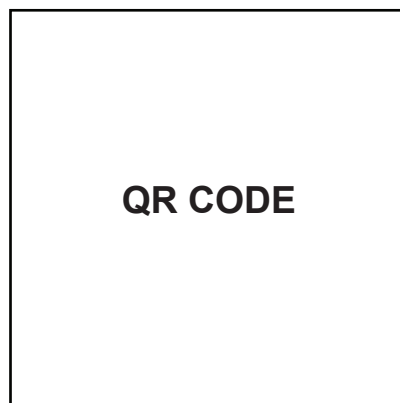


Fig. 5.18: Screenshot catturati durante il Virtual Tour nel Santuario di Apollo



Video dei virtual tour



6. CONCLUSIONI

La tesi si inserisce in un contesto di ricerca e studio per la documentazione e salvaguardia del patrimonio culturale nella città antica di Hierapolis. Nel campo della ricerca e della promozione museale i modelli digitali ed il loro uso come mezzo di sensibilizzazione ed educazione al patrimonio sono sempre più presenti; ne sono prova ad esempio i successi delle mostre come “archeologia invisibile” del museo egizio di Torino, o intere conferenze dedicate al patrimonio digitale come Euromed 2020, *Digital Heritage progress in Cultural Heritage* e CIPA 2021, *Great Learning & Digital Emotion*.

Per il patrimonio della città di Hierapolis possiamo considerare il primo Atlante di Hierapolis di Frigia¹, un traguardo importante nel rendere disponibili risorse conoscitive della città in formato digitale, in cui “le varie équipes potessero riconoscersi, per condividere strategie e percorsi di indagine” (F. D’Andria, et al, 2008). Oltre ad una seconda edizione dell’Atlante, non sono mancati a Hierapolis numerose ricostruzioni in forma di modelli virtuali dei principali edifici della città (M. Limoncelli, 2019)

L’approccio digitale è stato inoltre alimentato durante la pandemia del 2020 che ha accelerato lo sviluppo di strumenti per la collaborazione da remoto.

Il nostro piccolo contributo, in relazione agli studi italiani² che proseguono da più di cinquant’anni a Hierapolis, si concentra sull’elaborazione di un modello digitale a supporto delle ricerche archeologiche e del miglioramento dell’accessibilità alla documentazione storica. Il primo obiettivo è stato conseguito grazie agli strumenti della geomatica, con l’elaborazione di un modello 3D fotogrammetrico da UAV che contiene dati dimensionali di un’accuratezza maggiore rispetto a quella dei disegni architettonici ricavati da un rilievo tradizionale. La versatilità dell’oggetto digitale ha consentito di ricavare dal modello tridimensionale alcuni elaborati 2D, come disegni architettonici quotati e ortofoto che possono essere utilizzati per la comprensione della morfologia e struttura compositiva dei due ninfei.

In questo percorso di tesi l’accessibilità alla documentazione del patrimonio in formato digitale è indirizzata anche a un pubblico vasto, attraverso un *serious game* che accresce l’interesse del visitatore nei confronti del patrimonio culturale attraverso esperienze di *edutainment*. La digitalizzazione in questo contesto riesce quindi a farsi portavoce dell’oggetto reale, rappresentandolo con valenza scientifica, infatti la realizzazione di questo progetto fonda le proprie basi sui principi della

1: cfr. pp. 60-61

2: cfr. p. 60

fotogrammetria digitale UAV e sulle interpretazioni archeologiche derivate dallo scavo scientifico. Tuttavia la fase di digitalizzazione ha seguito un procedimento atipico, che non è sempre previsto durante una elaborazione tradizionale di dati fotogrammetrici. Il motivo è da identificarsi nella volontà di garantire un'interoperabilità tra il settore della geomatica e quello della realtà virtuale. Questa caratteristica ha condotto a una serie di considerazioni durante la fase conclusiva del progetto:

In primoluogo, i software di fotogrammetria digitale e quelli di realtà virtuale non sono concepiti per comunicare tra loro, pertanto è di fondamentale importanza progettare a priori tutte le operazioni da eseguire in modo tale che venga generato un output compatibile su entrambe le piattaforme. Il punto di forza dei software fotogrammetrici è la capacità di generare un modello estremamente dettagliato dal punto di vista topologico, ma questo aspetto, che comporta una grossa dimensione del file, entra in contrasto con i vincoli dettati dai software di realtà virtuale, che prediligono modelli di piccole dimensioni in virtù di una navigazione fluida. Ne consegue che il giusto compromesso per garantire sia una rappresentazione geometrica di valenza scientifica, sia una navigazione interattiva sufficientemente fluida,

è quello di eseguire una segmentazione della nuvola di punti per generare delle mesh a diversi gradi di dettaglio. Si ottiene quindi una mesh che complessivamente ha una percentuale di riduzione topologica maggiore del 90%, ma in corrispondenza delle aree di maggiore interesse analitico continua a preservare la topologia originale estremamente accurata.

Inoltre la comprensione dei principi teorici alla base dei processi tecnici è un elemento fondamentale per ottimizzare le tempistiche di lavoro e per ottenere un output ottimale: nella fase di trasferimento dati tra i diversi software utilizzati è importante utilizzare sistemi di riferimento e unità di misura univoci, affinché vi sia completa corrispondenza tra i modelli fotogrammetrici e gli elementi aggiuntivi modellati tridimensionalmente, come nel caso dell'anastilosi del Ninfeo del Santuario di Apollo.

Un ulteriore aspetto rilevante per la stesura della tesi è stata la collaborazione multidisciplinare: per la realizzazione dei modelli aggiuntivi, come il progetto di anastilosi e la ricostruzione del muro di fondo del Ninfeo dei Tritoni, è stata particolarmente significativa la collaborazione con il prof. Campagna, il quale ha messo a disposizione di questo progetto di tesi la profonda conoscenza sui principi compositivi dei fronti architettonici

antichi, oltre ad aver fornito materiale di studio in forma di disegni di rilievo.

In conclusione, essendo entrati in contatto con diversi campi del sapere e relativi studiosi, ci siamo resi conto come le attività di ricerca siano in continua evoluzione e sviluppo, pertanto auspichiamo che il nostro contributo venga utilizzato e continuato dagli studi futuri.

Bibliografia

Introduzione

Bibliografia

- B** - G.H. Brundtland, 1987. *Our Common Future*. Rapporto Brundtland, Oxford: Volker Hauff
- C** - Codice dei beni culturali e del paesaggio, art.10 Legge 6 luglio 2002, n. 137, Art2
- L** - LombardiaBeniCulturali. *Dopo la seconda guerra. Piani per una ricostruzione*. Disponibile in: <https://www.lombardiabeniculturali.it/percorsi/archivi-architetti/6.3/> - Consultato il: 28/08/2021
- M** - E. Morezzi. *Ricostruzioni Postbelliche*. Dispense di Teoria, Storia e Tecniche del Restauro Architettonico, 2016.
- P** - M.C. Pangallozzi. *La fruizione del patrimonio culturale nell'era digitale: quale evoluzione per il muse immaginario*. Il Mulino, Bologna, 2020.
- S** - A.Spanò. *Documentazione del Patrimonio*. Dispense Workshop, 2019.
- R. Strassoldo. *Le carte del restauro. I criteri per gli interventi di recupero dei beni architettonici*. Forum Edizioni, 2008.
- L. Solima, *Il museo in ascolto. Nuove strategie di comunicazione per i musei statali*. Quaderni della Valorizzazione, 1, Soveria Mannelli:Rubbettino, 2012.

Capitolo 1

Bibliografia e sitografia

- A** - S. Allegrezza. *L'affidabilità delle memorie ottiche per la conservazione a lungo termine dei documenti digitali*. Jlis.it, Florentina Studiorum Universitas, 2015.
-P. Amerio. *Persone e problemi umani nella società digitale*. Giornale italiano di psicologia. Fascicolo 1, 2018.
- B** - M. Ballarin, C. Balletti, P. Vernier. *Replicas in cultural heritage: 3D printing and the museum experience*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2. Riva del Garda, 2018.
- C. Barbiani, F. Guerra, T. Pasini. *Representing with light. Video projection mapping for cultural heritage*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2. Riva del Garda, 2018.
- K. B. Bradley. *Why museums hide masterpieces away- In major museums around the world, some truly great works of art are hidden away from public view. What are they – and why can't we see them? Kimberly Bradley finds out*. BBC, 2015.
- C** -J. Cao, H.Li, C. Chow, J.G. Watson, S. Lee, B. Rong, J. Dong, K. Ho. *Chemical Composition of Indoor and Outdoor Atmospheric Particles at Emperor Qin's Terra-cotta Museum, Xi'an, Cina*. 2010.
- R.Ceravolo,G. de Lucia,E. Lenticchia,G. Miraglia, A. Quattrone, F. Tondolo,E. Matta, G. Sammartano, C. Chiorino, G. Bruschi, P. Faccio, A. Nanni. *Challenges in the reuse and upgrade of Pier Luigi Nervi's structures*. In L. P. and C. M. (Eds. . P. Roca (Ed.), SAHC 2020 - 12th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, 2020.
- G** - M. Gaiani, B. Benedetti, F.I. Apollonio. *Teorie per rappresentare e comunicare i siti archeologici attraverso modelli critici*. SCientific RESearch and Information Technology. Vol 1, Issue 2, 2011.
- L. Gardner. *The Uses of Stored Collections in some London Museums*. Papers from the Institute of Archaeology, 18(S1), 2009.
- Grussenmeyer, P., Alby, E., Assali, P., Poitevin, V., Hullo, J.-F., & Smigiel, E. (2011). *Accurate documentation in cultural heritage by merging TLS and high-resolution photogrammetric data*. In F. Remondino & M. R. Shortis (Eds.), *Videometrics, Range Imaging, and Applications XI* (Vol. 8085, Issue 21, p. 808508). SPIE

- H** - J. Hindmarch. *Investigating the use of 3D digitisation for public facing applications in cultural heritage institutions*. University College London (UCL). 2015
- I** - ICOMOS. ISC20C. *Approaches to the conservation of Twentieth-century cultural heritage Madrid – New Delhi Document*, 2017. in: <http://www.icomos-isc20c.org/madrid-document/> - Consultato il 29/08/2021
- K** - V.T. King. *Sustainable Digitalization of Cultural Heritage*. Report on Initiatives and Projects in Brandenburg, Germany. MDPI, Potsdam, 2016.
- M** - A. Meschini. *Tecnologie digitali e comunicazione dei beni culturali. Stato dell'arte e prospettive di sviluppo*. Disegnarecon, 2011.
 - M. Morbe. *Alcune riflessioni a partire dall'Osservatorio sul Disagio Adolescenziale*. Redazione Psicologica Psicosomatica, 2012.
 - E. Morezzi. *Bene culturale. I territori del Restauro*. Dispense di Teoria, Storia e Tecniche del Restauro Architetonico, 2016.
- R** - Raccomandazioni NorMaL. -1/88. *Alterazioni macroscopiche dei materiali lapidei: lessico*. CNR-ICR, Roma, 1990.
 - Redazione Nove da Firenze. *Opera di Santa Maria del Fiore, 31 milioni di euro in restauri*. 2014.
- S** - G. Sammartano, G. Patrucco, S. Perri, R. Ceravolo, E. Lenticchia, A. Spanò. *Documenting complexity for the 20th century heritage: the enriched 3D models of the Turin exposition Nervi's halls digitization*. ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., 2021.
 - Scavi di Pompei. *E' possibile visitare Pompei con disabili?*. Disponibile in: <https://www.scavidipompei.net/visitare-pompei-con-disabili/>
- U** - L. Solima. *Nuove tecnologie per nuovi musei. Dai social network alle soluzioni*
- Z** *RFID*. Tafter Journal, n. 10, 2009.
 - Unesco. *Recommendation for the Protection of Movable Cultural Property*. The General Conference of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. Parigi, 1978.
 - K.Żyła, J.Montusiewicz, S.Skulimowski, R. Kayumov. *VR technologies as an extension to the museum exhibition: A case study of the Silk Road museums in Samarkand*. 2020.

Indice delle immagini

- Fig 1.1:** <https://slideplayer.it/slide/11774421/> - consultato il 27/04/2021
- Fig 1.2:** https://www.ansa.it/canale_scienza_tecnica/notizie/scienza_arte/index.shtml - consultato il 27/04/2021
- Fig 1.3:** <https://www.nove.firenze.it/opera-di-santa-maria-del-fiore-31-milioni-di-euro-in-restauri.htm> - consultato il 27/04/2021
- Figg 1.5-1.6:** C. Barbiani, F. Guerra, T. Pasini. Representing with light. Video projection mapping for cultural heritage. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2. Riva del Garda, 2018.
- figg 1.7-1.10:** G. Sammartano, G. Patrucco, S. Perri, R. Ceravolo, E. Lenticchia, A. Spanò. *Documenting complexity for the 20th century heritage: the enriched 3D models of the Turin exposition Nervi's halls digitization*. ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., 2021.

Capitolo 2

Bibliografia e sitografia

- A** - E. Altunel. *L'attività sismica a Hierapolis e nelle zone limitrofe*. In F. D'Andria, F. Silvestrelli. *Ricerche archeologiche Turche nella valle del Lycos, Congedo ed*, 2000.
- P. Arthur . *Hierapolis (Pamukkale) Bizantina e Turca*. Guida archeologica, Istanbul, 2006.
- C** - L. Campagna. *Hierapolis di Frigia XI. Il Ninfeo dei Tritoni*. Istanbul, Ege Yayınları, 2018
- G. Ciotta, L. Palmucci. *La Cattedrale di Hierapolis*. Saggi in onore di Paolo Verzone, 2002.
- D** - F. D'Andria F. *Hierapolis of Phrygia: its Evolution in Hellenistic and Roman Times*. in D. Parrish (ed.), *Urbanism in Western Asia Minor. New Studies on Aphrodisias, Ephesos, Hierapolis, Pergamon, Perge and Xanthos (JRA, Suppl. Series 45)*, 2001.
- F. D'Andria, *Hierapolis di Frigia (Pamukkale)*. Guida archeologica, Istanbul, 2003.
- F. D'Andria. *Le attività della MAIER - Missione Archeologica Italiana a Hierapolis: 2000-2003*, in D'Andria, Caggia 2007.
- Direttiva italiana. *Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14/01/2008'*. 9/02/2011
- S** - A. Spanò. *Archaeo-seismic trace mapping and raster analyses for risk reduction in archaeological sites*. In: *Geomatics for crisis management*, ISPRS (ITALIA), Gi4dm 2010 conference, Geomatics for crisis management,, Torino 2-4 February 2010, 2010.
- N. Sulfaro. *Le strutture in situ*. In : L. Campagna. *Hierapolis di Frigia XI. Il Ninfeo dei Tritoni*. Istanbul, Ege Yayınları, 2018
- G. Semeraro. *La ricerca archeologica nell'area del santuario di Apollo (Regio VII)*, in D'Andria, Caggia, 2007.
- G. Scardozi . *Hierapolis di Frigia. Applicazioni informatiche alle ricognizioni archeologiche e telerilevamento da satellite: l'esempio degli acquedotti della città*. In G. Scardozi (a cura di), *Il Mediterraneo antico e medievale come luogo di incontro tra Oriente e Occidente, Nord e Sud*. Atti della Giornata di studio sul tema "GIS e applicazioni informatiche alle ricerche archeologiche e storiche". Roma, 2007.
- G. Scardozi. *Il contributo delle riprese satellitari e aeree alla conoscenza dell'urbanistica di Hierapolis di Frigia*. *Archeologia Aerea. Studi di Aerotopografia Archeologica*, 2004.
- F. Silvestrelli. *Bibliografia topografica di Hierapolis di Frigia*, in D'Andria, Silvestrelli 2000.
- T** - F. Todesco. *Le strutture in situ*. in : L. Campagna. *Hierapolis di Frigia XI. Il Ninfeo dei Tritoni*. Istanbul, Ege Yayınları, 2018
- V** - P. Verzone P. *L'urbanistica di Hierapolis di Frigia. Tracciato viario e monumenti rimessi alla luce dal 1957 al 1972*. Atti del XVI Congresso di Storia dell'Architettura (Atene 1969), Roma, 1977.
- P. Verzone. *Hierapolis di Frigia nei lavori della Missione archeologica italiana*. Un decennio di ricerche archeologiche, (Quaderni de "La ricerca scientifica", CNR, 100), Roma, 1978a.
- P. Verzone. *Le ultime fasi vitali di Hierapolis di Frigia*. *Proceedings of the Xth International Congress of Classical Archaeology*, Ankara, Izmir, 1978b.

Indice delle immagini

-**figg 2.1-2.4**: F. D'Andria, G. Scardozi, A. Spanò. *Atlante di Hierapolis di Frigia*. Istanbul, Ege Yayınları, 2008

-**fig 2.5**: Rielaborazione da: fonte satellitare di Hierapolis. Disponibile in: <https://www.google.it/maps/search/hierapolis/@37.9182305,29.1101011,15z/data=!3m1!4>

- fig 2.6: L.Teppati Losè. Fotografia da drone DJI Spark, 2018.
- figg 2.9-2.17: L. Campagna. Hierapolis di Frigia XI. Il Ninfeo dei Tritoni. Istanbul, Ege Yayınları, 2018
- fig 2.18: materiale fornito dal Professore Campagna a supporto del progetto di anastilosi
- figg 2.19: L. Campagna, M. Venuti. Tav III, *Pianta dello stato attuale e pianta ricostruttiva*. In: Hierapolis di Frigia XI. Il Ninfeo dei Tritoni. Istanbul, Ege Yayınları, 2018
- figg 2.20: M. Limoncelli. *Ricostruzione 3D del Ninfeo dei Tritoni*. In: Hierapolis di Frigia XI. Il Ninfeo dei Tritoni. Istanbul, Ege Yayınları, 2018.
- figg 2.21-2.23: L. Campagna. Hierapolis di Frigia XI. Il Ninfeo dei Tritoni. Istanbul, Ege Yayınları, 2018
- fig 2.26-2.28: L.Teppati Losè. Fotografia da drone DJI Spark, 2018.
- fig 2.29: L. Campagna. Hierapolis di Frigia XI. Il Ninfeo dei Tritoni. Istanbul, Ege Yayınları, 2018
- fig 2.30: L.Teppati Losè. Fotografia da drone DJI Spark, 2018.
- fig 2.31: L. Campagna. Hierapolis di Frigia XI. Il Ninfeo dei Tritoni. Istanbul, Ege Yayınları, 2018

Capitolo 3

Bibliografia e sitografia

- A** -C. Achille, C. Monti, Nuove metodologie di rilievo, in Tecniche di rilevamento. Nuove frontiere delle tecnologie, R. A. Genovese (a cura di), Napoli.
- B** - S. Bertocci, M. Bini, Manuale di Rilievo Architettonico e Urbano, Città Studi Edizioni, de Agostini Scuola Spa, Novara, 2012;
- M.Bianchini. in Manuale di rilievo e documentazione digitale in archeologia. Roma, Aracne editrice, 2008.
- A. Biasion, E.B. Mondino, L Bornaz, F.G. Tonolo, A.Lingua, F.Rinaudo. Utilizzo delle tecniche della geomatica per la modellazione del territorio. Relazione Finale. Politecnico di Torino, 2015.
- C.Borriello. From point cloud based models to VR visualization for Cultural Heritage at risk: St. Nicola Church in Tolentino. Tesi di Laurea Magistrale. Politecnico di Torino, a.a. 2017-2018. Relatori A. Spanò, F. Chiabrando.
- C** - F. Chiabrando, F. D'Andria, G. Sammartano, A. Spanò. *UAV photogrammetry for archaeological site survey. 3D models at the Hierapolis in Phrygia (Turkey)*. Virtual archaeology review, 2017
-F. Chiabrando and A. Spanò. Points clouds generation using tls and densematching techniques. a test on approachable accuracies of different tools. pages 67–72, July 2013.
- F.Chiabrando, A.Lingua, M.Piras. Direct photogrammetry using UAV: test and first results. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Germany, 2013.
- A.Cina. Dal GPS al GNSS (Global Navigation Satellite System) per la Geomatica. Celid, Torino, 2014.
- D** - F. D'Andria, G. Scardozzi, A. Spanò. *Atlante di Hierapolis di Frigia*. Istanbul, Ege Yayınları, 2008
- G** - F. Guerra.(2015). Utilizzo del drone per rilievi di piccole e medie dimensioni- esempi pratici. Disponibile in: <https://www.dronebase.it/wp-content/uploads/2016/04/Guida-rilievo-con-drone.pdf> - Consultato il 5/5/2021
- K** - K. Kraus, Fotogrammetria, Vol. 1-Teoria e Applicazioni, Libreria Universitaria Levrotto & Bella Editrice, Torino, 1994.
- L** - A.Lingua, D. Marenchino. La visione stereoscopica naturale e artificiale, la restituzione fotogrammetria. Dispense di fotogrammetria applicata, 2007.
- D.G. Lowe. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. Paper Accademico. University of British Columbia, Vancouver, 2004.
- M** - P. Meli. La ricostruzione 3D in ambito archeologico e possibile utilizzo nel campo delle infrastrutture stradali: analisi delle potenzialità delle tecniche image-based. Tesi di Dottorato. Università degli studi di Palermo. a.a. 2014-2015. Relatori O. Giuffrè, M. Lo Brutto.

- P** - S. Perri. Metodi di Rilievo metrico 3D multiscala per il patrimonio costruito. Applicazioni aeree e terrestri in differenti scenari. Tesi di Laurea Magistrale. Politecnico di Torino. a.a. 2017/2018. Relatori A.Spanò, F. Chiabrando.
- S** - G. Sammartano, A. Spanò. Point clouds by SLAM-based mobile mapping systems: accuracy and geometric content validation in multisensor survey and stand-alone acquisition. 2018
- V.Scocca. *Saepinum, San Pietro di Cantoni, Terravecchia, un esperimento di archeologia digitale. Un'esemplare storia cantonale dall'antichità al medioevo attraverso lo scavo e la ricognizione. Vecchi e nuovi strumenti di indagine e di documentazione per la comunicazione e la valorizzazione espositiva.* Tesi di Dottorato. Università Ca'Foscari. a.a. 2018-2019, Relatore P. M. Vescovo.
- A.Spanò, F. Chiabrando, G. sammartano, L. Teppati Losè. Integrated imagin approaches supporting the excavation activities. Multi-scale geospatial documentation in Hierapolis (TK). The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2, Riva del Garda, 2018
- A.Spanò. *Misura degli angoli.* Dispense di Topografia. 2018.
- A.Spanò. *Principi di Fotogrammetria.* Dispense Workshop. 2019-2020.
- A.Spanò. *Rilievo metrico 3D-aspetti organizzativi.* Dispense Workshop. 2019-2020.
- L.Surace. *GPS sistemi di riferimento e cartografia.* Geomedia, 1998.
- L.Surace. *Perché WGS84.* Cartographica, Mondo GIS, n.6, 2004.
- V** - G. Verhoeven. *Taking computer vision aloft - archaeological three-dimensional reconstructions from aerial photographs with photoscan.* 18(1):67–73, January 2011.
- <http://geomatics.unipv.it/Home/cos-e-la-geomatica> Consultato il 6/5/2021.
- <https://www.microgeo.it/it/prodotti-e-soluzioni/20151-laser-scanner/laser-scanner-mobili.aspx> Consultato il 15/5/2021
- <https://www.microgeo.it/it/prodotti-e-soluzioni/20151-laser-scanner/laser-scanner-mobili/sistemi-mobile-con-tecnologia-slam/zeb-go-il-laser-scanner-mobile-alla-portata-di-tutti.aspx> Consultato il 15/5/2021

Indice delle immagini

- fig 3.1:** F. D'Andria, G. Scardozzi, A. Spanò. *Atlande di Hierapolis di Frigia.* Istanbul, Ege Yayınları, 2008
- fig 3.2:** Byung-Kyu Choi, Jeong-Ho Back. *Development of Precise Point Positioning Method Using Global Positioning System Measurements.* Journal of Astronomy & Space Sciences, 2011
- fig 3.3:** <http://www.jaworski.ca/utmzones.htm> - Consultato il 06/06/2021
- figg 3.4-3.5:** A.Cina. Dal GPS al GNSS (Global Navigation Satellite System) per la Geomatica. Celid, Torino, 2014.
- fig 3.6:** <https://rivistageomedia.it/> - Consultato il 06/06/2021
- figg 3.7-3-10:** A.Lingua, D. Marenchino. La visione stereoscopica naturale e artificiale, la restituzione fotogrammetria. Dispense di fotogrammetria applicata, 2007.
- fig 3.11:** F. Chiabrando, F. D'Andria, G. Sammartano, A. Spanò. *UAV photogrammetry for archaeological site survey. 3D models at the Hierapolis in Phrygia (Turkey).* Virtual archaeology review, 2017
- fig 3.12:** A.Spanò. *Fotogrammetria digitale e scansioni 3D.* Dispense Workshop. 2019-2020.
- fig 3.13:** A. Biasion, E.B. Mondino, L. Bornaz, F.G. Tonolo, A.Lingua, F.Rinaudo. Utilizzo delle tecniche della geomatica per la modellazione del territorio. Relazione Finale. Politecnico di Torino, 2015.
- fig 3.14:** A.Spanò. *Fotogrammetria digitale e scansioni 3D.* Dispense Workshop. 2019-2020.
- fig 3.15:** <https://docplayer.it/> - Consultato il 27/05/2021

- fig 3.16:** <https://brewminate.com/> - Consultato il 27/05/2021
- fig 3.17:** <https://catsr.vse.gmu.edu/SYST460/DroneComponents.pdf> - Consultato il 27/05/2021
- fig 3.18:** <https://findmefpv.wordpress.com/2017/01/25/beginner-drone-guide-types-quality-applications/> - Consultato il 06/06/2021
- fig 3.19-3.20:** <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/204272989-Offline-Getting-Started-and-Manual-pdf> - Consultato il 21/06/2021
- fig 3.21:** https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_5_en.pdf - Consultato il 21/06/2021
- fig 3.22:** <https://www.propelleraero.com/blog/collect-quality-drone-data-part1-bare-earth/> - Consultato il 06/06/2021
- fig 3.23:** <https://catsr.vse.gmu.edu/SYST460/DroneComponents.pdf> - Consultato il 27/05/2021
- fig 3.24:** F. Guerra.(2015). Utilizzo del drone per rilievi di piccole e medie dimensioni- esempi pratici. Disponibile in: <https://www.dronebase.it/wp-content/uploads/2016/04/Guida-rilievo-con-drone.pdf> - Consultato il 5/5/2021
- fig 3.25:** <https://it.wikipedia.org/wiki/Laser> - Consultato il 25/05/2021
- fig 3.26:** <https://it.wikipedia.org/wiki/Laser> - Consultato il 25/05/2021
- fig 3.27:** <https://www.microgeo.it/it/prodotti-e-soluzioni/20151-laser-scanner/laser-scanner-aereoelicottero-lidar.aspx> - Consultato il 27/05/2021
- fig 3.28:** <https://www.microgeo.it/it/prodotti-e-soluzioni/20151-laser-scanner/laser-scanner-terrestri/faro-focus-s-70.aspx> - Consultato il 27/05/2021
- fig 3.29:** <https://www.microgeo.it/it/prodotti-e-soluzioni/20151-laser-scanner/laser-scanner-mobili.aspx> - Consultato il 15/5/2021
- fig 3.30:** <https://www.microgeo.it/it/prodotti-e-soluzioni/20151-laser-scanner/laser-scanner-mobili/sistemi-mobile-con-tecnologia-slam/zeb-go-il-laser-scanner-mobile-alla-portata-di-tutti.aspx> - Consultato il 27/05/2021
- fig 3.31:** <https://pregeo.altervista.org/breve-glossario-topografico/> - Consultato il 06/06/2021
- fig 3.32:** <https://landsurveyorsunited.com/photo/possible-instrument-errors> - Consultato il 06/06/2021
- fig 3.33:** <https://www.gaetanoesposito.org/wp-content/uploads/2015/05/Stazione-Totale-e-Laser-Scanner.pdf> - Consultato il 06/06/2021
- fig 3.34:** Fotografia da Drone DJI Spark. L. Teppati Losè, 2018
- figg 3.35-3.36:** F. D'Andria, G. Scardozzi, A. Spanò. Atlante di Hierapolis di Frigia. Istanbul, Ege Yayınları, 2008
- fig 3.37:** www.sensefly.com - Consultato il 10/07/2021
- fig 3.38-3.40:** F. Chiabrandò, F. D'Andria, G. Sammartano, A. Spanò. *UAV photogrammetry for archaeological site survey. 3D models at the Hierapolis in Phrygia (Turkey)*. Virtual archaeology review, 2017
- fig 3.41-3.42:** A.Spanò, F. Chiabrandò, G. sammartano, L. Teppati Losè. Integrated imagin approaches supporting the excavation activities. Multi-scale geospatial documentation in Hierapolis (TK). The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2, Riva del Garda, 2018

Capitolo 4

Bibliografia e sitografia

- A** - Agisoft Metashape User Manual. Professional Edition, Version 1.5, 2019.
- B** - C. Balletti, M. Dabrowski, F. Guerra, P. Vernier. *Digital reconstruction of a lost heritage: the San Geminiano's church in San Marco's Square in Venice*. IMEKO TC-4 International Conference on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage, Trento, 2020.
- C** - L. Campagna. (2018). Hierapolis di Frigia XI. Il Ninfeo dei Tritoni. Istanbul, Ege Yayınları.
- F. Chiabrando, F. D'Andria, G. Sammartano, A. Spanò. (2017). UAV photogrammetry for archaeological site survey. 3D models at the Hierapolis in Phrygia (Turkey). Virtual archaeology review.
- D** - F. D'Andria, G. Scarrozzì, A. Spanò. (2008). Atlante di Hierapolis di Frigia. Istanbul, Ege Yayınları.
- L** - M. Limoncelli (2019). Hierapolis di Frigia XIII- Virtual Hierapolis. Virtual Archaeology and Restoration Project (2007-2015). Istanbul, Ege Yayınları.
- S** - A.Spanò, F.Chiabrando, G.Sammartano, L.T.Losè. (2018). Integrated imaging approaches supporting the excavation activities. Multiscale geospatial documentation in Hierapolis (TK). The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2.

Indice delle immagini

- figg 4.36-4.38:** materiale fornito dal Professore Campagna a supporto del progetto di anastilosi
- fig 4.41:** L. Campagna. *Hierapolis di Frigia XI. Il Ninfeo dei Tritoni*. Istanbul, Ege Yayınları, 2018
- fig 4.42:** materiale fornito dal Professore Campagna a supporto del progetto di anastilosi
- fig 4.43:** materiale fornito dal Professore Campagna a supporto del progetto di anastilosi
- fig 4.47-4.52:** Rielaborazioni del materiale fornito dal Professore Campagna a supporto del progetto di anastilosi
- fig 4.54:** Rielaborazioni del materiale fornito dal Professore Campagna a supporto del progetto di anastilosi
- fig 4.54:** L. Campagna. *Hierapolis di Frigia XI. Il Ninfeo dei Tritoni*. Istanbul, Ege Yayınları, 2018
- fig 4.58:** Rielaborazioni del materiale fornito dal Professore Campagna a supporto del progetto di anastilosi
- fig 4.62-4.63:** Rielaborazioni fornite dal Professore Campagna a supporto del progetto di anastilosi

Capitolo 5

Bibliografia e sitografia

- A** - Archeologia invisibile. Museo Egizio, 2019. Disponibile in: <https://museoegizio.it/esplora/mostre/archeologia-invisibile/> - Consultato il 12/08/2021
- B** - S.J. Barnes. *Understanding Virtual Reality in Marketing: Nature, Implications and Potential*. SSRN Electronic Journal, 2016.
- H. Bellini, W. Chen, M. Sugiyama, M. Shin, S. Alam, D. Takayama. Virtual & Augmented Reality: understanding the race for the next computing platform. *Profiles Innov*, 2016.
- G. Bruder, F. Steinicke, D. Valkov, K. Hinrichs. *Immersive virtual studio for architectural exploration*. IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI), 2010.
- C** - D. Charsky. *From edutainment to serious games: A change in the use of game characteristics*. Games and Culture, 2010.
- N. Chung, H. Lee, S.J. Lee, C. Koo. *The influence of tourism website on tourists' behavior to determine destination selection: a case study of creative economy in Korea*, Technol. Forecast, 2015.
- D** - S. Deterding, D. Dixon, R. Khaled, L. Nacke. *From game design elements to gamefulness: defining "gamification"*. Proceedings of the 15th International Academic MindTrek Conference, MindTrek, 2011.
- J.M. Dewailly. *Sustainable tourist space: from reality to virtual reality?* Tour. Geogr. 1 (1) (1999) 41–55.
- E. Donadio, A. Spanò, L. Sambuelli, D. Picchi. *Three-Dimensional (3D) Modelling and Optimization for Multipurpose Analysis and Representation of Ancient Statues*. In: Latest Developments in Reality-Based 3D Surveying and Modelling, (MDPI Eds.), 2018, DOI: 10.3390/books978-3-03842-685-1/6
- H** - Y.C. Huang, K.F. Backman, S.J. Backman, L.L. Chang. *Exploring the implications of virtual reality technology in tourism marketing: an integrated research framework*, Int. J. Tour, 2016.
- Illusorr, 2020. - Disponibile in: <https://www.illusorr.com/publications> - Consultato il 13/08/2021
- L** - L. Lescop. *360° vision, from panoramas to VR*. Researchgate, 2017.
- N** - A. Nafees. *Oculus Rift: a Rift in Reality*. Forman Christian College, 2016.
- M** - D. Macisaac. *Google Cardboard: a virtual reality headset for \$10?* SUNY-Buffalo State College, Buffalo, 2015.
- A. Malraux. *La Musée imaginaire*. Gallimard, Paris, 1996.
- M. McDonald. *The Museum and the Web: Three Case Studies*. Disponibile in: <http://xroads.virginia.edu/MA05/macdonald/museums/method.html>. - Consultato il 14/08/2021
- Modigliani VR: the Ochre Atelier, 2017. Disponibile in: <https://www.tate.org.uk/whats-on/tate-modern/exhibition/modigliani/modigliani-vr-ochre-atelier> - Consultato il 12/08/2021
- M. Mortara, C.E. Catalano, F. Bellotti, G. Fiucci, M. Houry-Panchetti, P. Petridis. *Learning cultural heritage by serious games*, 2014.
- J. Moloney and L. Harvey. *Visualization and 'auralization' of architectural design in a game engine based collaborative virtual environment*. Proceedings, Eighth International Conference on Information Visualisation, 2004.
- O** - A. Osman, N. A. Wahab, M. H. Ismail. *Development and Evaluation of an Interactive 360° Virtual Tour for Tourist Destinations*. Universiti Teknologi MARA Malaysia, Vol. 9, No. 3, 2009.
- P** - Paul Milgram, Haruo Takemura, Akira Utsumi, and Fumio Kishino. *Augmented reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum*. Telemanipulator and Telepresence Technologies, 2351, 1994.
- B.J. Pine, J.H. Gilmore. *The Experience Economy: Work Is Theatre and Every Business a Stage*. Harvard Business School Press, 1999.

- R** - F. Remondino. *Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning*. 3D Optical Metrology (3DOM) Research Unit, Bruno Kessler Foundation (FBK), Trento, 2011.
- S** - H.J. Song, C.K. Lee, J.A. Park, Y.H. Hwang, Y. Reisinger. *The influence of tourist experience on perceived value and satisfaction with temple stays: the experience economy theory*. J. Travel Tour. Mark, 2015.
- T** - D. Terra. *Virtual Reality in the Automotive Industry*. Disponibile in: <https://www.toptal.com/virtual-reality/virtual-reality-in-the-automotive-industry> - Consultato il 13/08/2021
- L. Teather. *A museum is a museum. Or is it?: Exploring museology and the web*. Proceedings of the Conference Museums and the Web, Pittsburgh, 1998.
- L. Teppati Losè. *Geomatics support to the metric documentation of the archaeological heritage. Tests and validations on the use of low-cost, rapid, image-based sensors and systems*. PhD thesis, Torino, 2019.
- U** - Unity3D. *Real-Time Rendering in 3D*. Disponibile in: <https://unity3d.com/real-time-rendering-3d> - Consultato il 17/08/2021
- V** - VRS, *Virtual Reality Society. Applications of Virtual Reality, 2017*. Disponibile in: <https://www.vrs.org.uk/virtual-reality-plications/> - Consultato il 13/08/2021
- W** - G. Ward. *Hiding seams in high dynamic range panoramas, in Proceedings of the 3rd symposium on Applied perception in graphics and visualization*. ACM International Conference Proceeding Series, vol. 153, ACM, 2006.
- Y** - Y.H. Yuan, C. Wu. *Relationships among experiential marketing, experiential value, and customer satisfaction*. J. Hosp. Tour. Res, 2008.

Indice delle immagini

- fig 5.1:** Paul Milgram, Haruo Takemura, Akira Utsumi, and Fumio Kishino. *Augmented reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum*. Telemanipulator and Telepresence Technologies, 2351, 1994.
- fig 5.2:** L. Lescop. *360° vision, from panoramas to VR*. Researchgate, 2017.
- fig 5.3:** <https://regiverse.com/blog/2018/google-cardboard-cose-funzionale/> - Consultato il 13/08/2021
- fig 5.4:** <https://it.m.wikipedia.org/wiki/File:Oculus-Rift-CV1-Headset-Front.jpg> - Consultato il 13/08/2021
- **figg 5.5-5.6:** - Illusorr, 2020. - Disponibile in: <https://www.illusorr.com/publications> - Consultato il 13/08/2021
- **fig 5.7:** H. Athanasiadis. *Virtual reality paints Modiglianti's Studio in a new light*. Disponibile in: <https://tahium.com/news/virtual-reality-paints-modiglianis-studio-in-a-new-light/> - Consultato il 14/08/2021
- **fig 5.8:** Modigliani VR: the Ochre Atelier, 2017. Disponibile in: <https://www.tate.org.uk/whats-on/tate-modern/exhibition/modigliani/modigliani-vr-ochre-atelier> - Consultato il 14/08/2021
- **fig 5.9:** Museo Egizio. *Archeologia Invisibile*. Disponibile in: <https://cdn-cache.museoegizio.it/static/virtual/ArcheologiaInvisibileITA/index.html> - Consultato il 14/08/2021

Conclusioni

Bibliografia e sitografia

- D** - F. D'Andria, G. Scarrozzi, A. Spanò. (2008). *Atlande di Hierapolis di Frigia*. Istanbul, Ege Yayınları.
- L** - M. Limoncelli (2019). *Hierapolis di Frigia XIII- Virtual Hierapolis*. Virtual Archaeology and Restauration Project (2007-2015). Istanbul, Ege Yayınları.