

Ercolano. Documentare e studiare siti archeologici storici: il contributo delle tecnologie digitali

A. D'Andrea – A. Bosco – A. Coralini – A. Fiorini – R. Valentini

In the last few years, the use of 3D reality-based techniques in Cultural Heritage has grown significantly. Laser scanner and aerial or close-range photogrammetry have become the new tools for many experts and professionals in the field of documentation and restoration. As it is fundamental to integrate old and new datasets, a common topographical framework is frequently required to guarantee the perfect fusion of data originating from different sensors or acquired in different periods. Integrating the scans with high-resolution images allows to document and evaluate the state of art and conservation of archaeological structures quickly. New methods and approaches are tested to check the reliability and accuracy of the 3D objects, particularly if these digital replicas are the final product of the alignment of separate data-acquisition campaigns (4D). The paper deals with the implementation of a network for the Insula III of Herculaneum, an area greater than 4.000 sqm, since 2005 main case-study of the second research projet of the University of Bologna in Vesuvian region, the Domus Herculaneensis Rationes (DHER). The topographical grid, obtained through the alignment and roto-translation of over than 300 scans, has been used to geo-reference and scale the high-resolution images taken during a parallel photogrammetric campaign of the painted and decorated walls of the Insula, in the framework of the Atlante degli Apparati Decorativi di Ercolano, a complete photogrammetric and graphic catalogue of the wall paintings and decorated floors of Herculaneum. The contribution deals with the workflow making the documentary basis of a research on decorations in context (as part of a research in household archaeology, insula based) and mainly on the tests carried out to evaluate the accuracy of the network.

L'importanza dei dati 3D nella ricerca archeologica, oltre che nella gestione del patrimonio, è una realtà acquisita, così come la necessità di adottare, per la loro acquisizione e il loro trattamento, metodi sempre più efficienti ed efficaci e tecnologie sempre più evolute. Si tratta di una sfida aperta, il cui obiettivo principale devono essere la sperimentazione di buone pratiche e la definizione di linee guida, per la realizzazione, l'uso e, soprattutto, il riuso, di rilevamenti 3D. A questa sfida ha cercato di rispondere anche la collaborazione fra le Università di Bologna e di Napoli l'Orientale, che dal 2016 condividono interessi di ricerca e siti di intervento. Fra questi, un ruolo di primo piano spetta al Parco archeologico di Ercolano, caso di studio per la sperimentazione di un approccio integrato al rilievo e alla restituzione di strutture, rivestimenti e contesti.

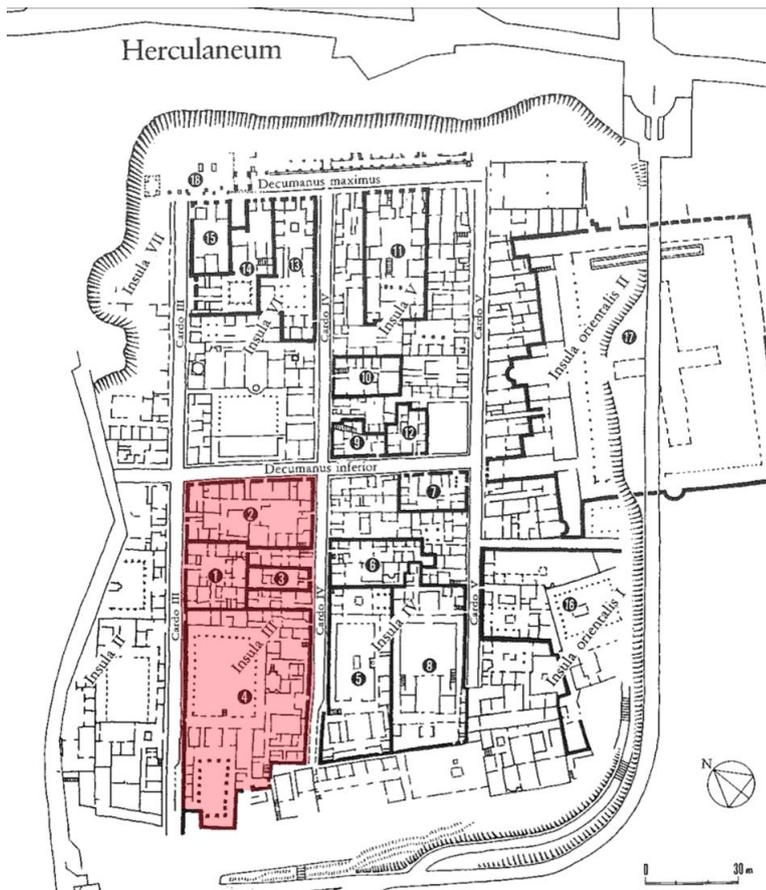


Fig. 1. Ercolano: in rosso, l'insula III.

Grazie a questo percorso condiviso¹, il progetto DHER (*Domus Herculensis Rationes*) ha acquisito la solida base su cui fondare l'indagine e la rilettura diacronica della cultura abitativa di Ercolano, attraverso la documentazione, l'analisi e lo studio degli spazi costruiti e decorati, arredati e vissuti, dai più antichi interventi edilizi ad oggi.

Le domande archeologiche: dal rilievo alla cultura abitativa (A.C.)

Più piccolo e meno noto del sito archeologico di Pompei, quello di Ercolano offre anche per questi motivi migliori possibilità a ricerche a scala di sito che mirino alla completezza dell'indagine. Così è per lo studio degli apparati decorativi nei loro contesti: a Ercolano un programma di documentazione sistematica e di restituzione grafica degli ornati pavimentali e parietali può ambire all'eshaustività. È questo uno degli obiettivi che si è dato, dai primi anni Duemila, il progetto ercolanese dell'Università di Bologna, *Domus Herculensis Rationes*, nel quadro di un più ampio programma di lavoro.

Finalizzato all'indagine della cultura abitativa di Ercolano, questo programma mira alla migliore conoscenza degli spazi vissuti della città antica, attraverso la ricognizione, l'analisi e lo studio di ogni sua componente materiale, dal contenitore ai contenuti: strutture, rivestimenti, arredi, suppellettili².

A tal fine il progetto DHER, in stretta collaborazione con l'ente per la tutela (prima la Direzione dell'Ufficio Scavi di Ercolano, nella persona di Maria Paola Guidobaldi, per la Soprintendenza archeologica di Pompei; poi, dal 2016, il Parco archeologico di Ercolano, diretto da Francesco Sirano) e in sinergia con l'Herculaneum Conservation Project³, ha adottato una strategia di intervento a due binari, rispettivamente a scala di *insula* e a scala di sito. Il primo ha come obiettivo lo studio di dettaglio di un intero isolato, con un approccio, a differenza di Pompei, mai sperimentato ad Ercolano (fig. 1)⁴. L'obiettivo del secondo, invece, consiste nello studio integrato della pittura parietale di provenienza ercolanese, uno studio in precedenza solo parzialmente affrontato e comunque mai intrapreso su una base documentale sistematicamente rivista e validata, né, soprattutto, su una base iconografica (fotografica e grafica) realizzata *ad hoc* e metricamente corretta⁵. Risultato atteso, un *Atlante degli Apparati Decorativi di Ercolano* (AtlADE), che ai rilievi fotogrammetrici associi schede di catalogo e restituzioni grafiche, ambiente per ambiente e edificio per edificio⁶.

¹ Sulla sinergia fra scienze esatte ed archeologia, BUXEDA I GARRIGÓS, MADRID I FERNANDEZ 2017.

² CORALINI 2009, 2011a, 2011b, 2017, 2020b.

³ Sull'Herculaneum Conservation Project, GUIDOBALDI 2016.

⁴ Sulle ricerche a scala di *insula* a Pompei, CORALINI 2018.

⁵ A conferma di come i tempi fossero maturi per una ripresa a scala di sito degli studi sulla pittura parietale di Ercolano, iniziava negli stessi anni il progetto di ricerca di dottorato di D. Esposito presso l'Università di Napoli Federico II, la cui tesi sarebbe stata discussa nel 2006, per poi vedere la luce come monografia nel 2014 (ESPOSITO 2014). Ottimo lavoro di rassegna di tutta l'evidenza materiale a quel momento attribuibile ad Ercolano, non ha potuto, come quelli che lo hanno preceduto, fondarsi su una adeguata documentazione archeografica e archeometrica.

⁶ CORALINI 2020.

La peculiarità del progetto DHER sta, infatti, proprio nell'intento di contribuire a sanare la lacuna che più nella storia delle ricerche e degli studi differenzia il campione ercolanese da quello pompeiano: l'assenza di repertori e di progetti editoriali equiparabili rispettivamente, a *Pompei. Pitture e Pavimenti* e *Haueser in Pompeji*.

Non mancavano, prima del 2005, nella letteratura su Ercolano, contributi volti ad indagare aspetti specifici dell'edilizia residenziale, dall'edizione di singoli complessi (quali le Case dell'Atrio a mosaico, del Colonnato Toscanico, dei Cervi⁷), spesso attenta quasi esclusivamente agli apparati decorativi, all'analisi di temi trasversali, a scala di *insula* (quale il lavoro sulla metrologia delle *insulae* III, IV e V)⁸ o a scala di sito (quali le monografie sulle tecniche edilizie e sugli arredi in legno)⁹. Ercolano, però, non era mai stata interessata da un progetto organico di studio ed edizione scientifica di una selezione di complessi abitativi, come invece era accaduto con il progetto Haueser in Pompeji¹⁰.

Non era diverso lo stato dell'arte sulla pittura parietale¹¹. All'edizione degli apparati decorativi di alcuni edifici si erano affiancati lavori di sintesi e ricerche puntuali, fra le quali quelle, pioniere dell'archeologia *alibi*, di A. Alroggen Bedel, che, muovendosi fra archivi e depositi, sin dagli anni Settanta aveva cercato di individuare nelle collezioni del Museo Archeologico Nazionale di Napoli i *disiecta membra* ercolanesi riconducibili a complessi riportati alla luce e ancora visibili in situ¹². A Ercolano, però, non era mai stata realizzata una campagna di documentazione fotografica equiparabile alla Campagna Speciale che negli anni 1978-1980 era stata dedicata a Pompei¹³. Né gli apparati decorativi degli edifici ercolanesi erano mai stati oggetto di un progetto di edizione sistematica quale quello della serie *Pompei. Pitture e Mosaici* (1990-1998).

Mancava, quindi, in entrambi i settori (cultura dell'abitare e cultura decorativa), un approccio sistematico e integrato, su cui fondare una ricerca di household archaeology, pur nei limiti imposti dalla natura dell'oggetto e dai modi della sua formazione¹⁴.

Per contribuire a colmare queste lacune, sin dal 2005 il progetto DHER ha attivato più linee di azione: geomatica per il rilievo delle strutture e del rilevamento; scienza delle costruzioni per le valutazioni della statica del costruito antico e dei restauri moderni; tecnologie digitali per la Virtual Reality; archeometria del costruito e del colore per la ricostruzione del *modus operandi* e della tavolozza dei *pictores*¹⁵.

A scala di sito: AtlADE. Atlante degli Apparati Decorativi di Ercolano (A.C.)

Dal 2005 ad oggi l'Alma Mater, grazie al *Laboratorio di Rilievo e Restituzione della Pittura Antica (LaRPA)* del Dipartimento di Storia Culture Civiltà (DISCI) e ad una rete transdisciplinare di collaborazioni intra-e inter-universitarie, ha messo a punto anche sul campione ercolanese, così come già, dal 1998, su quello pompeiano, un modello di intervento su contesti complessi e pluristratificati, articolato in tre linee di indagine:

- **l'archeologia degli archivi e dei depositi**, alla ricerca dei *disiecta membra* (fonti primarie dimenticate; fonti secondarie non valorizzate; reperti decontestualizzati);

- **l'archeometria dell'esistente**, *in situ et alibi*, attraverso sistematiche campagne di rilievo fotogrammetrico dell'evidenza materiale e di analisi e campionamenti finalizzati alla caratterizzazione di supporti e rivestimenti;

- **l'archeografia dei manufatti antichi**, fondata sulla collazione di tutti i dati disponibili (dalla documentazione storica alla verifica autoptica, dal rilievo diretto e manuale a quello indiretto e strumentale) e sulla loro rielaborazione in contesto, e funzionale anche alle proposte di restauro virtuale (figg. 2.A-D).

⁷ CERULLI 1971; CERULLI IRELLI, POZZI PAOLINI 1974; MANNI 1974; TRAN TAM TINH 1988.

⁸ DE KIND 1998.

⁹ GANSCHOW 1989; MOLS 1999.

¹⁰ STROCKA 1987.

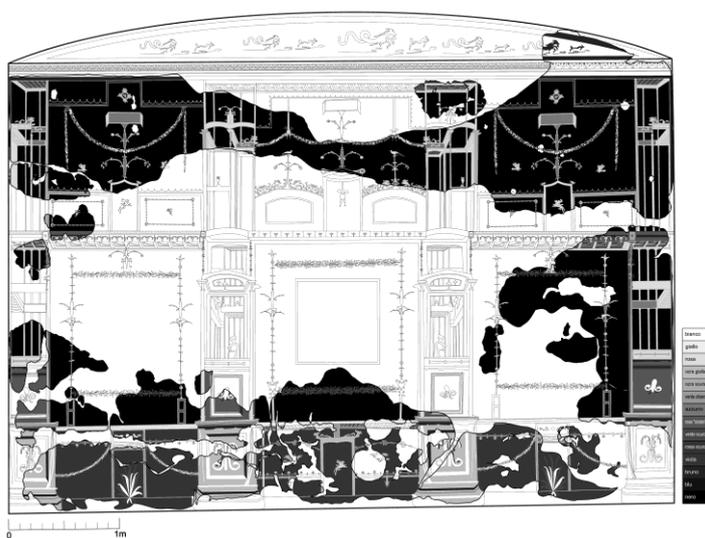
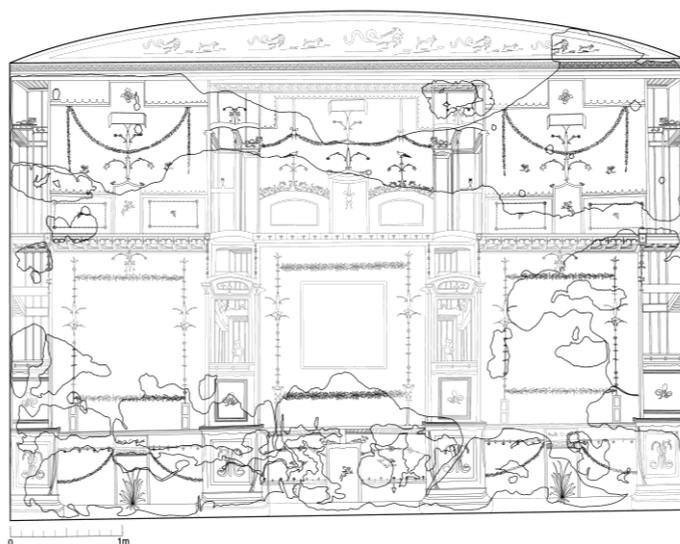
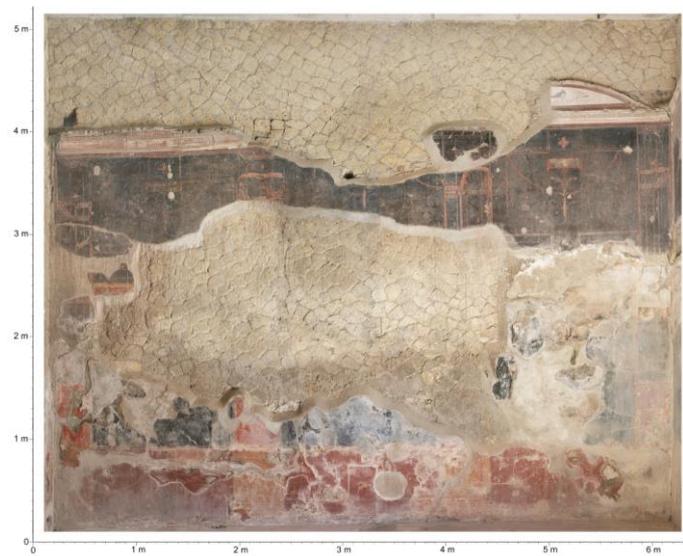
¹¹ MANNI 1980; CORALINI 2005, 2011c, 2020.

¹² ALLROGGEN-BEDEL 2009.

¹³ Per una sintesi, SAMPAOLO 2008.

¹⁴ Sull'*household archaeology* possibile per il caso ercolanese, così come per quello pompeiano, CORALINI 2017.

¹⁵ ESPOSITO 2014.



Figg. 2. a-d. Ercolano, Casa dell'Atrio Corinzio (V 30), ambiente 2, parete nord: a. fotopiano, b-c. restituzione grafica, lineare e in scala di grigi; d. pavimento, fotopiano (Programma Vesuviana, DHER, a, d. C. Pascucci, 2008; b-c. V. Bollini, 2011).



Fig. 3. Ercolano. Progetto DHER, AtlADE (2005-): stato di avanzamento delle attività (rilievo e restituzione grafica) del Laboratorio di Rilievo e Restituzione della Pittura Antica (2005-) dell'Università di Bologna. In tonalità più scura, le unità edilizie per le quali sono già state realizzate, oltre al rilievo fotogrammetrico, anche la restituzione grafica, lineare e in scala di grigi, e la catalogazione delle superfici decorate.

Il risultato dei primi tre lustri di attività è un ricco corredo di fotopiani, ortofoto e restituzioni grafiche, integrate dai dati forniti dalle analisi chimiche e fisiche.

L'Atlante degli Apparati Decorativi, esteso all'evidenza *in situ* e a quella *alibi*, offre una nuova base su cui fondare sia la rilettura della cultura decorativa, ed abitativa, dell'antica Ercolano, sia la gestione di una componente (gli apparati decorativi) di fondamentale importanza per il patrimonio del Parco archeologico di Ercolano: strumento di lavoro aperto, è accessibile a tutta la comunità scientifica, frutto della collaborazione dell'Alma Mater con più soggetti della ricerca e della tutela, dal Parco, con l'Herculaneum Conservation Project, al Museo archeologico Nazionale di Napoli, MANN; dall'Università di Modena e Reggio Emilia e Parma all'Università di Napoli L'Orientale, con il suo CISA, Centro Interdipartimentale di Servizi per l'Archeologia¹⁶.

Sono tredici le unità edilizie per le quali è già stato possibile completare il rilievo fotogrammetrico, dall'acquisizione dei dati alla loro rielaborazione, e per otto di queste si è già proceduto anche alle due azioni successive, di restituzione grafica e di catalogo: le Case dell'Albergo (III 1.19), annessa alla Casa dell'Albergo (III 18), dello Scheletro (III 3), del Tramezzo di Legno (III 4.11), dell'Erma di Bronzo (III 16), dell'Ara Laterizia (III 17), dell'Atrio Corinzio (V 30), del Salone Nero (VI 13) (fig. 3)¹⁷.

¹⁶ CORALINI 2020.

¹⁷ Nel quadro delle attività del progetto DHER e del Laboratorio di Rilievo e Restituzione della Pittura Antica (LaRPA) sono state elaborate più tesi di diploma: fra queste, in ordine cronologico, BOLLINI 2010; GALVAGNI 2012; CORDONI 2016.

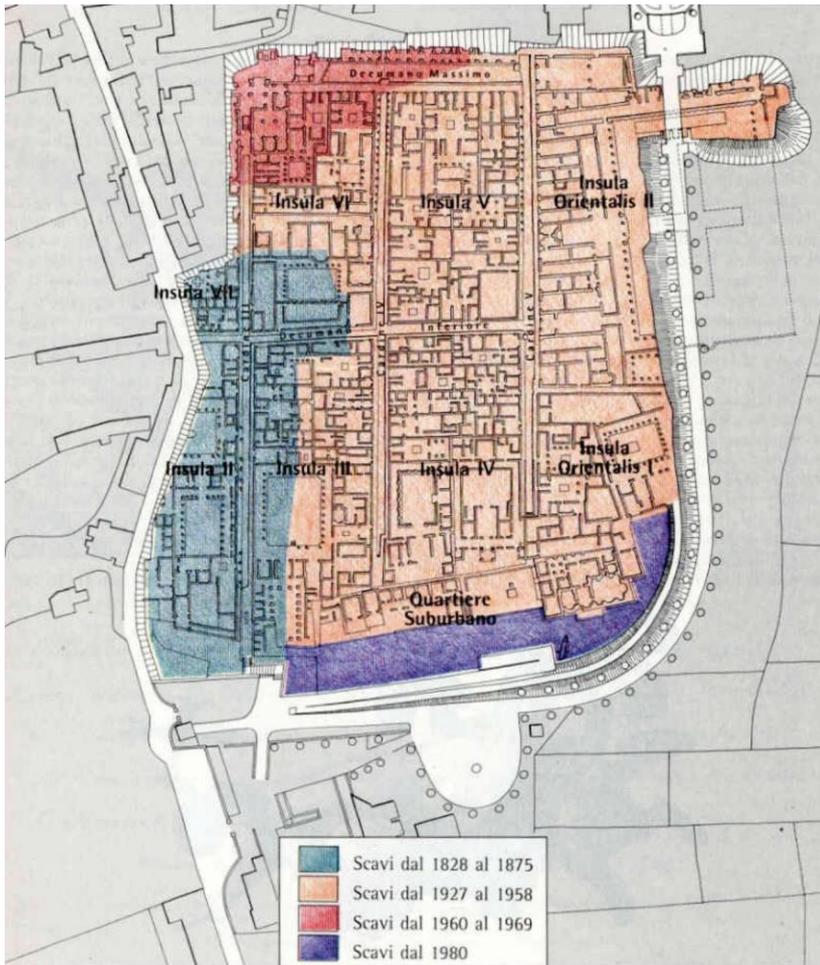


Fig. 4. Ercolano, planimetria: in evidenza, le principali fasi degli scavi nell'area urbana (da Manfredi 2005, fig. 2).

A scala di insula: Ercolano, insula III (A.C.)

Le ragioni della scelta dell'*insula* III come caso di studio per la linea di azione a scala di *insula* del progetto DHER risiedono sia nelle peculiarità di questo isolato come oggetto archeologico sia nel suo ruolo nella storia degli Scavi di Ercolano. Le vicende del suo recupero interessano, infatti, dal 1740 ad oggi, tutti i capitoli della lunga storia di formazione del sito archeologico, dalle esplorazioni in cavo cieco, per pozzi, cunicoli e gallerie, sino alla grande campagna di scavi e restauri diretta da Amedeo Maiuri¹⁸. (fig. 4). L'*insula* venne infatti riportata alla luce in più tappe, fra 1740 e 1929, come ben dimostra la vicenda della Casa dello Scheletro (III 3), il primo edificio ad essere intercettato dai cunicoli borbonici, nel novembre 1740, quando R.J. De Alcubierre segnala il rinvenimento di una nicchia decorata a mosaico, che gli studi successivi hanno correttamente attribuito al ninfeo di questa abitazione¹⁹ (figg. 5-6).

L'*insula* si segnala per la varietà sia delle soluzioni abitative adottate negli edifici che nel 79 ne occupavano la superficie, sia degli apparati decorativi, soprattutto parietali, riferibili al Se-

condo, Terzo e Quarto Stile. Al momento dell'eruzione ben sette unità edilizie si dividevano lo spazio disponibile al pianoterra, quasi tutte ricorrendo ad un piano superiore, di minore o maggiore estensione. Nessuna presentava un sistema atriense completo, con ambienti su tutti i lati, e alcune sperimentavano formule nuove, ora estendendosi sulle mura della città (la Casa dell'Albergo, III 1.19), ora articolandosi in più unità abitative e utilizzando tecniche più corsive ed economiche (la Casa a Graticcio, III 13.15)²⁰.

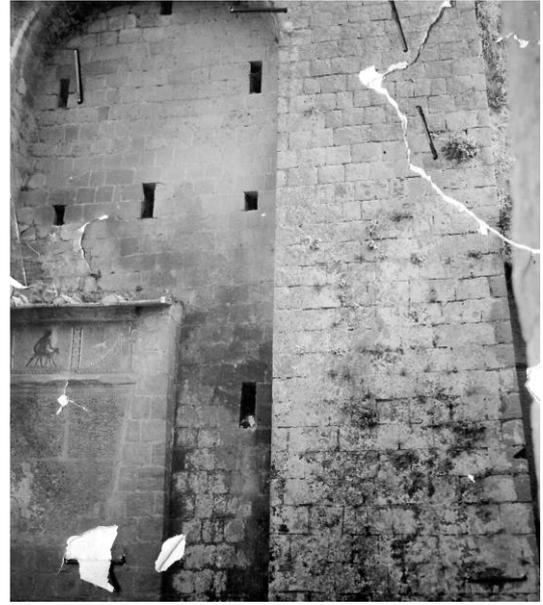
Lo stato attuale è in parte cospicua il risultato dei modi del recupero e degli interventi di conservazione che si sono succeduti dal 1740 ad oggi, e, in particolare, della prassi di lavoro del Maiuri, nella quale scavi e restauri procedevano di pari passo: "Occorre sottofondare, raddrizzare muri malfermi alla base, richiudere brecche spaventose prima di liberare i piani superiori dall'involucro del terreno, ricomporre con frammenti minuti intere pareti dipinte, devastate dalla furia demolitrice dello scavo inconsulto e tenebroso dei cavamonti, sostituire a volte cortine murarie, che, marcite dall'umido, non hanno più alcuna possibilità di sostenersi e collegarsi con le altre strutture superstiti della casa"²¹. (figg. 7-8).

¹⁸ Su questo aspetto, oltre che sul ruolo dell'*insula* nella storia degli studi, già MANFREDI 2005, seguita da MUNGARI 2011.

¹⁹ RUGGIERO 1885: 595 (1/7/1869).

²⁰ MAIURI 1958: 407-420; CAMARDO, NOTOMISTA 2017a.

²¹ MAIURI 1958: 21. Sull'impresa di Maiuri, CAMARDO, NOTOMISTA 2017b: in particolare, per l'*insula* III, 184-194. Sugli interventi di conservazione e restauro, anche i *Giornali dei lavori* (sulle cui potenzialità. SORBO 2013 e CORALINI I 2017).

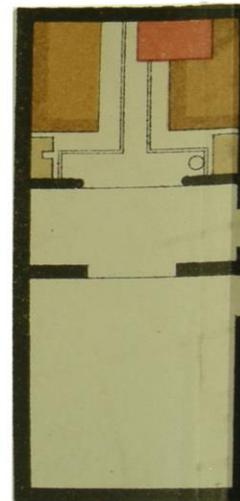


PROGETTO DI INTERNO RESTAURATO
della Stanza N° 60 Casa dello Scheletro



Scala di 0.02 p.m.

STANZE N° 28 e 60
della Casa dello Scheletro



Scala di 0.005 p.m.

Fig. 5. Ercolano, Casa dello Scheletro (III 3), viridario con ninfeo: il cunicolo borbonico che nel 1740 aveva intercettato il ninfeo, così come riportato alla luce nel 1928.

Fig. 6.a-b. (a) Il muro di contenimento, costruito dopo le esplorazioni del 1876, nel 1927, all'avvio delle campagne di A. Maiuri (b), e nella planimetria degli Scavi realizzata da G. Tascone e pubblicata da M. Ruggiero nel 1885.



Fig. 7. Ercolano, cardo IV: lavori di scavo e restauro in corso (1929). A destra, la facciata della Casa del Tramezzo di Legno (III 4.11) (Archivio fotografico Parco archeologico di Ercolano, C2393).



Fig. 8. Ercolano. Casa del Tramezzo di legno (III 4.11), triclinio (6). Scavi in corso e opere di restauro (1928): la parete, tagliata nella zona inferiore dai cunicoli borbonici, è assicurata alle murature di restauro (Archivio fotografico Parco archeologico di Ercolano, C2365).

Per distinguere, in questo palinsesto, la parte antica da quella moderna, di fondamentale importanza è, accanto alla verifica dei *legacy data*, dalle fonti testuali a quelle iconografiche, l'analisi dell'evidenza materiale *in situ*²². Entrambe le azioni costituiscono la base indispensabile per la lettura e la restituzione degli alzati e dei rivestimenti: nel determinare la qualità del risultato ha un ruolo primario la qualità della base documentale, dal rilievo dei volumi a quello delle superfici.

Ad oggi, ad eccezione delle pagine loro dedicate in quella che resta l'opera principale per Ercolano²³, né l'*insula* III né le unità edilizie che la compongono sono mai state fatte oggetto di uno studio di dettaglio e di una edizione scientifica monografica. Molte sono, invece, le ricerche e le pubblicazioni che le hanno attraversate, prendendone in considerazione singole componenti: gli

aspetti metrologici, le tecniche edilizie, gli arredi lignei, i piani superiori, le decorazioni parietali e quelle pavimentali²⁴.

Il risultato è un mosaico di dati, anche molto importanti, che attendono di essere ricondotti ad unità e di venir utilizzati per una lettura d'insieme: lettura che può essere correttamente condotta solo sulla base di una documentazione quanto più possibile completa ed oggettiva.

²² CORALINI 2017. Sulla valorizzazione dei *legacy data*, anche MONTEIX 2009, 2016, 2017.

²³ MAIURI 1958: 208-221 (Casa del Tramezzo di Legno); 266-275 (Casa dello Scheletro); 323-334 (Casa dell'Albergo); 407-420 (Casa a Graticcio); 420-422 (Casa dell'Ara Laterizia).

²⁴ Nell'ordine, GANSCHOW 1989; MOLS 1999; DE KIND 1998; ANDREWS 2006 e LOSANSKI 2015; ESPOSITO 2014; GUIDOBALDI, GRANDI, PISAPIA 2014.

Condicio sine qua non è il rilievo dell'esistente, tanto a scala di sito, per l'Atlante degli Apparatî Decorativi, quanto a scala di *insula*, per l'*insula III*.

Sin dalle sue origini il progetto DHER ha molto investito su questa azione: già nel 2005 avviando un piano di lavoro specifico, che produceva un primo rilievo delle strutture della Casa dello Scheletro (III 3), utilizzato per la sperimentazione di modelli tridimensionali interrogabili²⁵, sperimentava soluzioni per il rilievo delle superfici curve²⁶, e, per la prima volta nella storia degli Scavi di Ercolano, la caratterizzazione statica della facciata della Casa del Tramezzo di Legno (III 4.11)²⁷.

Nel 2016, grazie al coinvolgimento di Andrea D'Andrea e dell'équipe del CISA dell'Università di Napoli L'Orientale, nonché alla collaborazione di Andrea Fiorini, per il Laboratorio di Archeologia dell'Architettura dell'Università di Bologna, è stato realizzato il rilievo integrale della planimetria, dei volumi e delle superfici dell'*insula III*²⁸, procedendo, come sempre, d'intesa con il Parco archeologico di Ercolano e con l'Herculaneum Conservation Project²⁹.

Questo prototipo di intervento *insula based* è caratterizzato da un approccio integrato, che combina le potenzialità del rilievo tridimensionale con quelle del rilievo fotogrammetrico: il primo definisce i volumi, mentre il secondo fornisce il materiale per *textures* fotografiche qualitativamente superiori a quelle ottenibili con una acquisizione laser-scanner e, sulla base di queste, per *textures* di restituzione grafica quanto più possibile filologiche.

L'archeometria del costruito: problemi e soluzioni

Il rilievo 3D (A. D'A.)

Nel campo della documentazione e, più in generale, della conoscenza del patrimonio archeologico, numerose e differenti tecniche (*image o range-based*) sono oggi utilizzate per creare ambienti virtuali 3D il cui obiettivo può variare tra la registrazione, più o meno dettagliata di strutture e oggetti antichi, e l'*edutainment*, l'intrattenimento ed il *gaming*. I laser scanner o la fotogrammetria "ravvicinata" (*close-range photogrammetry*) sono diventati strumenti indispensabili per molti archeologi attivi nello studio e nella conservazione del patrimonio archeologico³⁰. Approcci innovativi, basati su dati *digital-born*, sono utilizzati per progettare e gestire restauri architettonici nonché per realizzare anastilosi virtuali di monumenti e siti complessi³¹.

Le tecnologie 3D sono diventate facili da usare e consentono l'acquisizione e la raccolta in breve tempo di un'accurata rappresentazione geometrica degli oggetti mediante nuvole di punti ottenute con scanner laser o fotogrammetria e con un livello di precisione spesso millimetrico. Dopo l'acquisizione dei dati, i set di punti vengono elaborati e visualizzati in uno spazio tridimensionale, mentre la superficie dell'oggetto fisico riprodotto viene presentata con informazioni aggiuntive, come il colore dei materiali, che arricchiscono il contenuto informativo della replica digitale³².

Le metodologie di rilevamento e modellazione basate sulle nuove tecnologie 3D sono state applicate principalmente con l'obiettivo di supportare un approccio multidisciplinare volto a documentare e monitorare lo stato dell'arte degli edifici storici, nonché a sostenere l'interpretazione scientifica.

Le strumentazioni, facilmente trasportabili, sono particolarmente utili quando risulta complicato esaminare i monumenti o le strutture archeologiche con metodi tradizionali o quando gli edifici sono grandi e composti da molti ambienti sviluppati su diversi livelli, a volte sotterranei. La possibilità di ottenere rapidamente la copertura completa e geometricamente corretta di una qualsivoglia struttura, ha cambiato l'approccio abituale alle indagi-

²⁵ BITELLI *et al.* 2011. Per la Casa dello Scheletro, GIORGI 2009: 579-586, MUNGARI, ZANFINI 2010. Sui modelli 3D come strumento di presentazione di dati, metadati e paradatai, CORALINI *et al.* 2010.

²⁶ CAPRA, DUBBINI, PASCUCCI 2011.

²⁷ COLLA, DE MIRANDA, UBERTINI 2011.

²⁸ D'ANDREA *et al.* 2018.

²⁹ I rilievi in questione sono opera di Ascanio D'Andrea per Akhet e HCP.

³⁰ REMONDINO *et al.* 2018.

³¹ BOSCO *et al.* 2019.

³² STYLIANIDIS, REMONDINO 2016.

ni architettoniche, aprendo allo stesso tempo nuove sfide nella gestione e nella manutenzione del patrimonio culturale.

Al momento, le tecnologie 3D, sia laser scanning che fotogrammetriche aeree e terrestri, sono mature e stabili. La maggior parte dei ricercatori appare concentrata a migliorare la tecnologia (qualità delle foto e calibrazione geometrica, tempo di acquisizione, riduzione del rumore, registrazione automatica, ecc.) e all'implementazione della qualità grafica del rendering in rapporto alla estrema accuratezza geometrica delle nuvole di punti³³. Particolare attenzione è rivolta all'integrazione o alla fusione di dati provenienti da diversi sensori (4D), mentre una nuova sfida si apre nei settori della segmentazione semantica e della classificazione automatica per identificare oggetti e caratteristiche modellabili in altre applicazioni, come i BIM (Building Information Modeling)³⁴. Un'area specifica di ricerca si occupa dell'impatto del processo di registrazione sulla qualità della documentazione grafica finale, principalmente per evidenziare il divario esistente tra le specifiche tecniche dei dispositivi e il loro utilizzo, precisione e livello di automazione in casi di studio reali³⁵. Altri interventi si concentrano sull'annotazione 2D o 3D³⁶ e sull'implementazione di metadati standard per tenere traccia del ciclo di vita di un oggetto tridimensionale³⁷.

Anche nel settore dello scavo archeologico, numerosi contributi hanno dimostrato l'affidabilità di queste nuove tecnologie per migliorare e supportare il processo di registrazione dei dati sul campo³⁸. Più di recente, grazie al drone in grado di montare telecamere di vario tipo e risoluzione (sensori RGB, infrarossi, termici e LIDAR), è facile volare su aree, anche inaccessibili, e scattare foto che producono orto-fotopiani di dettaglio³⁹.

Negli ultimi anni l'industria dei laser scanner si è dedicata a semplificare la fase di acquisizione sul campo, anche attraverso algoritmi che allineano in tempo reale scansioni contigue e consentono all'operatore di verificare, già in campo, la qualità del lavoro realizzato; un capitolo particolare è dedicato ai formati di interscambio che contribuiscono a rendere l'intervento di rilievo svincolato dall'uso di formati proprietari che non comunicano con altri software.

Il riutilizzo dei dati 3D per scopi diversi è recentemente diventato un argomento delicato, in assenza di repositories liberamente accessibili e utilizzabili. La sfida oggi è quella di creare archivi 3D centralizzati per la pubblicazione e la distribuzione di modelli 3D⁴⁰; alcune soluzioni sono state già implementate per migliorare la pubblicazione e la visualizzazione dei dati e per rendere disponibili online modelli ad alta risoluzione arricchiti con dettagli realistici e descrizioni correlate⁴¹. La semplificazione della pubblicazione online di completi dataset 3D richiede che i modelli a disposizione non siano soltanto "belli", ma anche geometricamente corretti e topograficamente accurati, e, soprattutto siano corredati da descrizioni, anche non strutturate, che registrino le modalità di acquisizione e processamento dei dati.

Uno degli aspetti certamente più importanti per il riutilizzo dei dati è la valutazione della precisione del rilievo, un presupposto di fondamentale importanza soprattutto nell'ambito delle ricerche che comportano l'uso di differenti sensori e che si basano sull'integrazione di acquisizioni multi-temporali (4D). Alcune semplici misure possono essere acquisite per accertare in post-processing la precisione geometrica dell'intervento di rilievo anche dopo la roto-traslazione dell'intera replica 3D su coordinate cartografiche.

Il presente contributo illustra le attività di rilievo laser scanning e fotogrammetrico realizzate nell'*insula III* di Ercolano per documentare strutture e rivestimenti. Per scalare e geo-riferire i rilievi eseguiti con la tecnica della *close-range photogrammetry* sono stati utilizzati punti 3D estratti dalla griglia topografica creata con il laser scanner e successivamente agganciata alla rete del Parco Archeologico di Ercolano; per verificare la correttezza geometrica del prodotto finale, in funzione di una restituzione a scala architettonica delle parti decorate, alcune misure sono state prese a campione.

³³ REMONDINO *et al.* 2018; STYLIANIDIS, REMONDINO 2016.

³⁴ GRILLI *et al.* 2018.

³⁵ KEDZIERSKI *et al.* 2015; MANDELLI *et al.* 2017; WUJANZ *et al.* 2019.

³⁶ MANUEL *et al.* 2013.

³⁷ D'ANDREA 2016.

³⁸ D'ANDREA, BARBARINO 2012; DE REU *et al.* 2014; WAAGEN 2019.

³⁹ CAMPANA 2017.

⁴⁰ KOLLER *et al.* 2009.

⁴¹ POTENZIANI *et al.* 2015.

Materiali e metodi (A. D'A.)

Negli ultimi anni, gli archivi archeologici tradizionali stanno diventando sempre più complessi, poiché includono mappe 3D e diversi set di dati tridimensionali. Al fine di gestire correttamente i riferimenti spaziali di queste fonti eterogenee, è indispensabile creare un'infrastruttura 3D, una griglia topografica tridimensionale, per geo-referenziare con precisione e facilmente tutti i tipi di informazioni archeologica. Questo approccio si può definire 4D sebbene la variabile temporale non descriva tanto l'oggetto dell'archivio (la differente cronologia delle fonti archeologiche) quanto la successione nel tempo dei vari interventi di documentazione che registrano spesso differenti informazioni ad una scala di rappresentazione diversa. Per rendere omogenei vari dataset (cartacei e *digital-born*) almeno sul piano della registrazione spaziale, risulta particolarmente utile disporre di una griglia di punti 3D necessari alla geo-referenziazione di mappe e/o disegni storici 2D o 3D acquisiti con tecniche diverse e, spesso, senza coordinate. Una rete 3D geometricamente precisa può essere facilmente riutilizzata, anche in forma remota, per controllare l'accuratezza delle acquisizioni nuove e vecchie o, soltanto, per poter visualizzare differenti risorse in un unico ambiente. Uno dei vantaggi di questo metodo è quello di non richiedere rilievi aggiuntivi per ogni nuova campagna di acquisizione sul campo, evitando così il rischio di duplicare gli sforzi e i dati e di accumulare gli errori, particolarmente possibili nei grandi siti archeologici. In questo modo è possibile non solo integrare la documentazione pregressa, ma anche altri oggetti 3D derivanti da nuovi rilevamenti laser scanner o con fotogrammetria ravvicinata. Poiché la scansione finale è una nuvola di punti colorata, il compito del rilevatore, che deve geo-riferire un'altra risorsa digitale, è facilitato, in quanto risulta più semplice identificare, all'interno della scansione, i punti 3D indispensabili per un corretto processo di geo-referenziazione di altre informazioni spaziali.

Lo studio dell'accuratezza dell'allineamento delle nuvole di punti e la qualità della registrazione sta diventando un campo di ricerca significativo, volto ad evitare la propagazione degli errori e la presenza di lievi distorsioni nell'integrazione o fusione dei dati 3D⁴²; la strategia di acquisizione dei dati riveste un ruolo centrale nella progettazione dell'intervento, poiché la sequenza di ripresa delle scansioni può, in determinati contesti, influenzare l'allineamento e la geo-referenziazione finale.

A partire da queste premesse metodologiche, è stato realizzato nel 2016 un accurato rilievo 3D dell'*insula III* di Ercolano (figg. 1, 9).

Questo articolo illustra il flusso di lavoro messo a punto durante l'acquisizione dei dati, l'elaborazione e la roto-traslazione di oltre 320 scansioni. In particolare, vengono qui evidenziati non solo la strategia di acquisizione dei dati adottata con gli algoritmi selezionati per registrare le scansioni e controllarne l'accuratezza finale, ma anche la verifica *ex post* della griglia 3D, eseguita dopo aver completato l'allineamento di tutte le nuvole di punti e come dalla rete topografica tridimensionale siano state estratte coordinate per geo-referenziare i fotogrammi delle pareti e dei pavimenti decorati ottenuti con il rilievo fotogrammetrico.

Il rilievo 3D dell'insula III di Ercolano (A. B.)

In siti archeologici di grandi dimensioni e pluristratificati, come Ercolano e Pompei, tutte le strutture sono oggetto, nel tempo, di innumerevoli interventi di documentazione, analisi e restauro. Foto, appunti, schizzi, disegni e mappe, associati ai monumenti, devono essere conservati e resi accessibili, in quanto rappresentano una risorsa indispensabile per la corretta manutenzione e per lo studio di queste aree archeologiche. A causa della dispersione e frammentazione degli archivi non è facile tenere traccia degli interventi e individuare la relativa documentazione. Spesso i dati vengono archiviati in più raccolte, salvati da diverse istituzioni e le informazioni vengono posizionate o registrate spazialmente secondo una varietà di metodi. Nell'area vesuviana, ad esempio, le mappe storiche presentano un orientamento rispetto al Vesuvio, un tempo identificato come il Nord, e misurato in un vecchio sistema, i Palmi Napoletani. Pertanto, per creare un archivio geo-referenziato 3D aggiornato e dettagliato, è necessario, innanzitutto, implementare un'infrastruttura 3D, una griglia topografica, per roto-traslare e geo-referenziare tutti i tipi di risorse digitali e cartacee disponibili. Diventa, quindi, fondamentale verificare l'accuratezza di questa rete tridimensionale, poiché essa può essere riutilizzata come immensa fonte di punti topografici 3D, utili per georeferenziare archivi cartografici vecchi e nuovi.

⁴² SOUDARISSANANE *et al.* 2011; KEDZIERSKI *et al.* 2015; WUJANZ *et al.* 2019.

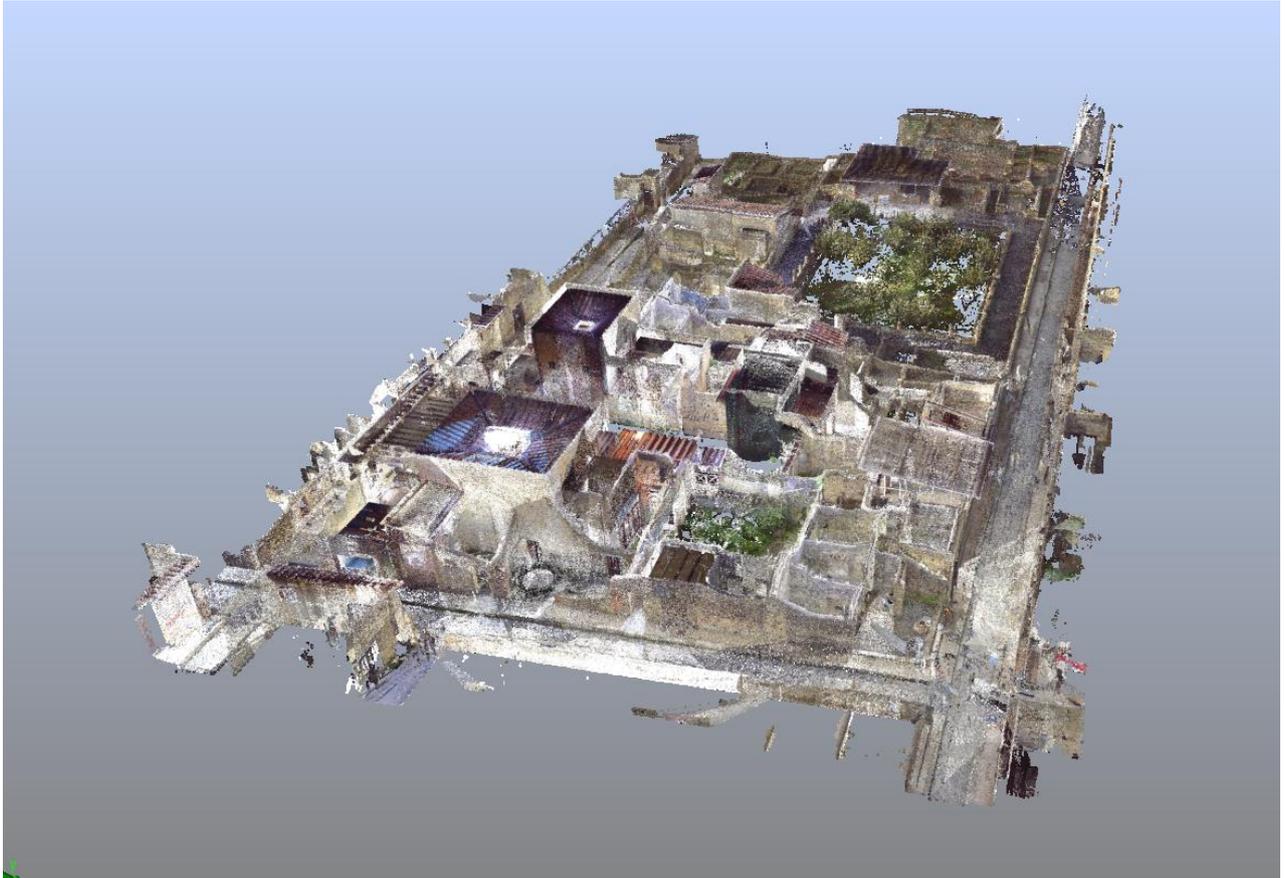


Fig. 9. Ercolano, insula III. Modello tridimensionale (Programma Vesuviana, DHER; Università di Napoli L'Orientale, CISA, 2017).

Nel nostro caso di studio, l'*insula* III di Ercolano, l'area è estremamente complessa, con numerosi ambienti dalle pareti alte e decorate. Pertanto, per il rilievo sono stati adoperati differenti sensori e tecniche: il laser scanner è stato utilizzato per rilevare gli edifici, mentre la fotogrammetria è stata impiegata per acquisire immagini di pareti, tetti e marciapiedi decorati. L'area da rilevare comprendeva 13 UA (Unità Archeologiche) ed era costituita da 243 ambienti, che occupavano una superficie di poco più di 4.000 mq. Al momento del rilevamento 3 UA erano inaccessibili per motivi di sicurezza.

Il lavoro sul campo è stato realizzato con uno scanner laser FARO FOCUS 3D X130, uno strumento leggero ed affidabile basato sulla misurazione della differenza di fase, predisposto per riprese esterne con una risoluzione di 3 mm sul piano orizzontale e 6 mm su quello verticale.

Al fine di impostare una procedura accurata per semplificare il successivo allineamento delle scansioni, sono stati attivati tutti i sensori del dispositivo: la bussola, la misurazione dell'altezza strumentale e il compensatore a doppio asse. Per colorare le scansioni, è stata selezionata la modalità RGB considerando una luce orizzontale, piuttosto che dall'alto, prevedendo una acquisizione nelle prime ore della mattinata.

Particolare attenzione è stata dedicata alla fase di pianificazione delle riprese per garantire una buona qualità di registrazione e, al contempo, evitare errori di propagazione. La strategia di acquisizione dei dati è stata scelta in relazione agli obiettivi del progetto e in particolare alla geometria del sito e alla sua scena operativa, che, in questo caso specifico, era limitata da tre strade rettilinee e strette. L'acquisizione dei dati è stata effettuata in due diverse fasi: la prima mirava a ricreare il layout generale del rilievo, mentre la seconda era finalizzata alla acquisizione completa di ogni singola UA.

Indipendentemente dal metodo di registrazione scelto, l'allineamento di più scansioni generalmente introduce un errore intrinseco: spostare lo scanner lungo una linea retta può restituire una non corretta buona

configurazione geometrica e il risultato finale rischia di essere compromesso dalla propagazione di minimi errori strumentali. Al fine di minimizzare i rischi, è stata adottata una specifica strategia di acquisizione dei dati ed è stato scelto un metodo combinato di registrazione delle scansioni per l'elaborazione dei dati e la successiva, finale, georeferenziazione. Per verificare la correttezza della registrazione delle nuvole dopo la roto-traslazione, sono stati eseguiti alcuni test per misurare lo scostamento tra le differenti registrazioni elaborate con metodi basati sui target e *targetless*.

Sul campo: l'acquisizione dei dati (A.B., R.V.)

Un primo gruppo di 23 scansioni è stato effettuato lungo il perimetro che circonda l'*Insula III*; le scansioni sono state eseguite sulle strade posizionando lo scanner ad intervalli regolari o cercando di far coincidere la ripresa con l'ingresso delle diverse UA per semplificare la successiva fase di integrazione delle singole *domus* nell'inquadramento generale. Per ridurre la propagazione degli errori nella successiva fase di allineamento e registrazione, le scansioni di questo primo gruppo di riprese sono state suddivise in due sottogruppi che, partendo dagli estremi opposti dell'area di intervento, si incontravano nel mezzo del decumano inferiore, che chiude l'*insula* sul lato settentrionale (fig. 2): un primo sottogruppo di 11 scansioni ha ripreso l'area a partire dalla parte meridionale del cardo III inferiore, un secondo, comprendente 12 scansioni, dalla parte sud del cardo IV inferiore.

Per roto-traslare il dataset e verificare la correttezza della geo-referenziazione sono stati misurati con la stazione totale 10 target piatti a scacchiera inseriti nella scena delle prime scansioni di entrambi i sottogruppi (fig. 10). I punti di controllo (GCP) sono stati misurati con la stazione totale Trimble M3 5" inquadrati utilizzando due vertici della rete topografica del Parco di Ercolano registrate in coordinate Gauss-Boaga. I punti, distribuiti correttamente sulla scena, per evitare la collinearità, sono stati acquisiti in modalità *reflectorless*.

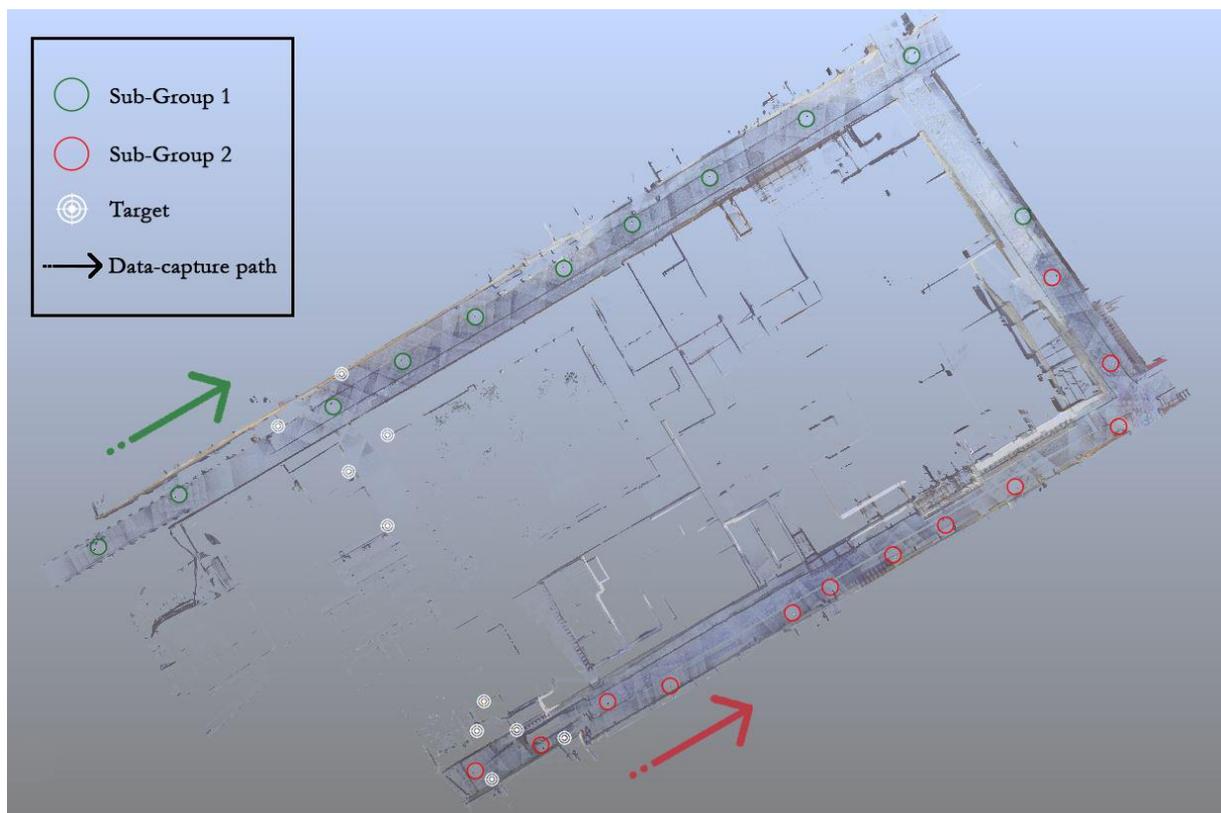


Fig. 10. Ercolano, insula III. La strategia della fase di acquisizione-dati: i due sottogruppi di scansioni (in verde e rosso) per l'inquadramento generale, con il posizionamento (in bianco) dei 10 target. Le frecce indicano il percorso di acquisizione.

Successivamente sono state eseguite 306 scansioni per rilevare le 13 UA. Le riprese sono state organizzate per singole UA per garantire il giusto allineamento di tutte le scansioni appartenenti ad una unica *domus* ed il successivo posizionamento dell'intera UA nell'inquadramento generale; le riprese di ciascuna UA sono state eseguite a partire dalla rete stradale esterna per migliorare la registrazione del singolo edificio nella rete 3D generale. Particolare cura ha richiesto l'acquisizione dell'UA 10 (Casa dell'Albergo, III 1.19), che presentava passaggi ai vari livelli dell'edificio. La fase di lavoro sul campo è durata circa tre settimane.

In laboratorio: l'elaborazione dei dati (A. D'A.)

Per eseguire l'elaborazione e l'allineamento delle scansioni, secondo un noto e ben sperimentato flusso di lavoro, è stato utilizzato il software Scene. I due sottogruppi relativi al perimetro dell'*insula* sono stati allineati singolarmente in base agli algoritmi di "vista dall'alto" e, successivamente, "nuvola a nuvola" per migliorare la registrazione finale. Per il rilievo di architetture, più o meno con forme regolari, generalmente si consiglia di eseguire un primo allineamento "grezzo" con "vista dall'alto" e, poi, se la qualità è accettabile, migliorare il valore della registrazione con un algoritmo "nuvola a nuvola". Entrambi i procedimenti appartengono al metodo di registrazione basato sulla superficie che consente di ridurre la quantità di lavoro sul campo se le scansioni adiacenti hanno un buon livello di sovrapposizione e geometria affidabile; nel caso di Ercolano, le strade dritte e le forme regolari degli edifici favoriscono il corretto allineamento delle riprese senza ricorrere alla identificazione manuale di punti in comune tra le scansioni contigue. Al termine di questa prima fase i due sottogruppi sono stati registrati con una precisione compresa tra 0,19 e 0,21 cm per ciascuna serie di scansioni con una sovrapposizione di circa il 75,5% per le scansioni contigue.

Per roto-traslare e unire i due sottogruppi si è successivamente adoperato un metodo basato su target. L'approccio basato su target è generalmente considerato più accurato per la registrazione di più scansioni, ma richiede che la maggior parte dei target rimanga fissa sul terreno durante l'intero rilievo. Tra le principali difficoltà che un tale sistema implica, soprattutto in un sito archeologico molto frequentato, è il flusso costante di turisti. Nel nostro caso di studio, l'area presentava più unità edilizie aperte al pubblico e, pertanto, le strade che delimitano l'*insula* erano continuamente percorse da gruppi di visitatori. Era quindi necessario pianificare la collocazione e misurazione dei target, in modo da non impedire le normali attività del Parco. Si è cercato, pertanto, di collocare i target in aree marginali facilmente misurabili con la stazione totale, ma senza ostacolare il percorso dei turisti.

Avendo posizionato e misurato 10 target piani, la roto-traslazione è stata eseguita per ciascun singolo sottogruppo allo scopo di verificare, successivamente il livello finale di allineamento tra i due distinti dataset. Al termine della procedura l'errore medio è risultato di 0,3 cm (fig. 11a), quindi, superiore a quello dei singoli sottogruppi (0,19-0,21 cm), ma del tutto compatibile con l'accuratezza richiesta per una restituzione in scala 1:100. Analizzando i risultati (fig. 3) è stato osservato che l'errore massimo corrispondeva al T2 (0,78 cm). Per migliorare la geo-referenziazione complessiva delle nuvole sono stati rimossi dalla procedura di registrazione i target T2 e T3b (errore massimo di 0,46 cm). In questo modo l'errore medio ottenuto per l'unione delle 23 scansioni è stato ridotto a 0,15 cm (fig. 11b).

Diversi tipi di verifiche sono state eseguite per controllare l'accuratezza e la qualità geometrica della procedura di registrazione realizzata da Scene. In primo luogo, è stata esaminata in modo autoptico la sovrapposizione dei due sottogruppi, soprattutto nel punto di intersezione, all'altezza della parte mediana del decumano (fig. 12). L'analisi della vista 3D delle scansioni (A) nonché quella dall'alto (B) mostra che l'integrazione, lungo la strada che chiude l'*insula* a nord, è precisa; la verticalità delle pareti e l'orizzontalità della pavimentazione stradale sono corrette e non si evidenzia alcun disallineamento.

Il modello georeferenziato è stato poi esportato in ReCap per consentire la sovrapposizione in AutoCad della nuvola di punti 3D sulla mappa fornita dal Parco (fig. 13); per realizzare questo passaggio è stato necessario convertire la nuvola dapprima nel formato di interscambio *.E57 per visualizzarla in Recap e, poi, in formato RCP per consentirne la lettura in AutoCad⁴³. Anche in questo caso l'accuratezza della roto-traslazione

⁴³ Il formato E57 è più generale e adatto per l'archiviazione dei dati in una varietà di domini applicativi. Inoltre, supporta dati organizzati in matrici regolari, gestisce sistemi di coordinate cartesiani e sferici), conserva le immagini incorporate da fotocamere. Infine, ha una dimensione di file e un numero di record sostanzialmente illimitati.

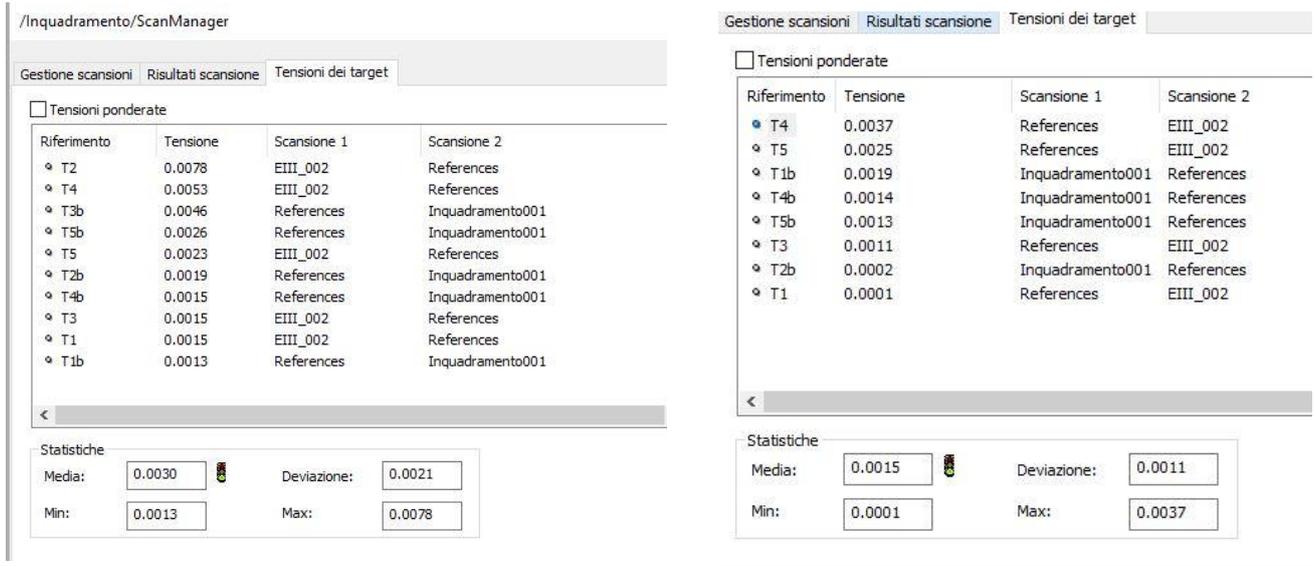


Fig. 11.a-b. Il report di scansione di allineamento di Scene: in alto, l'unione dei due sottogruppi dopo la rototraslazione sulla base dei target; in basso, il valore medio ottenuto dopo la rimozione dei target T2 e T3b dalla procedura di registrazione.



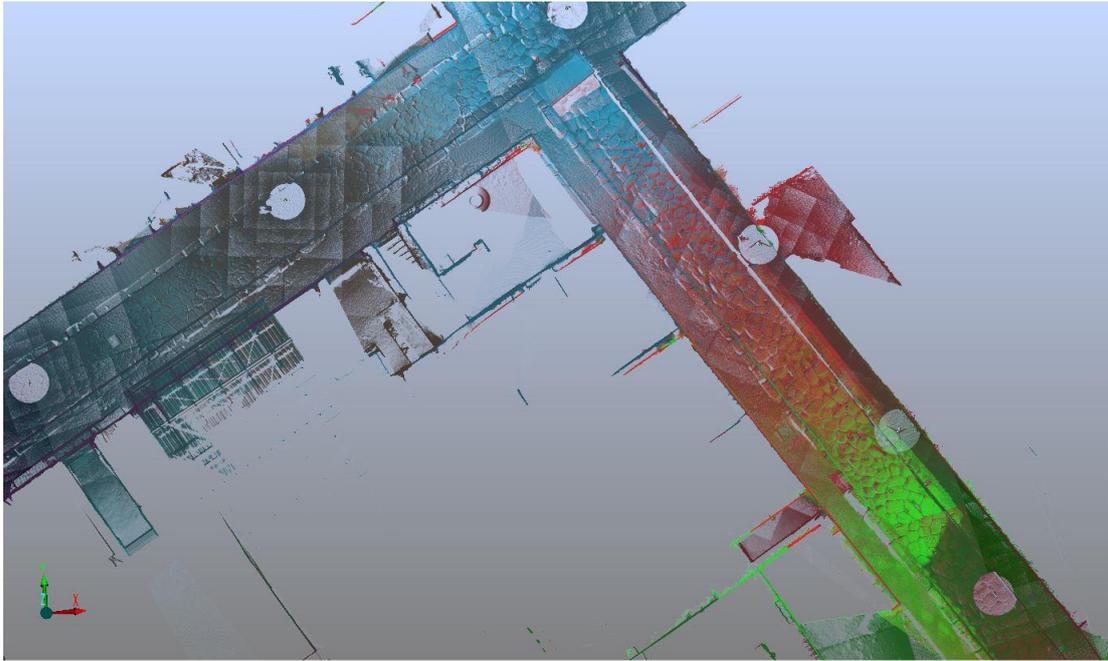


Fig. 12.a-b. Ercolano, decumano inferiore: l'integrazione dei due sottogruppi visualizzato all'interno del software Scene: a) le scansioni texturizzate e unite; b) nella vista dall'alto i differenti colori rappresentano le distinte scansioni.

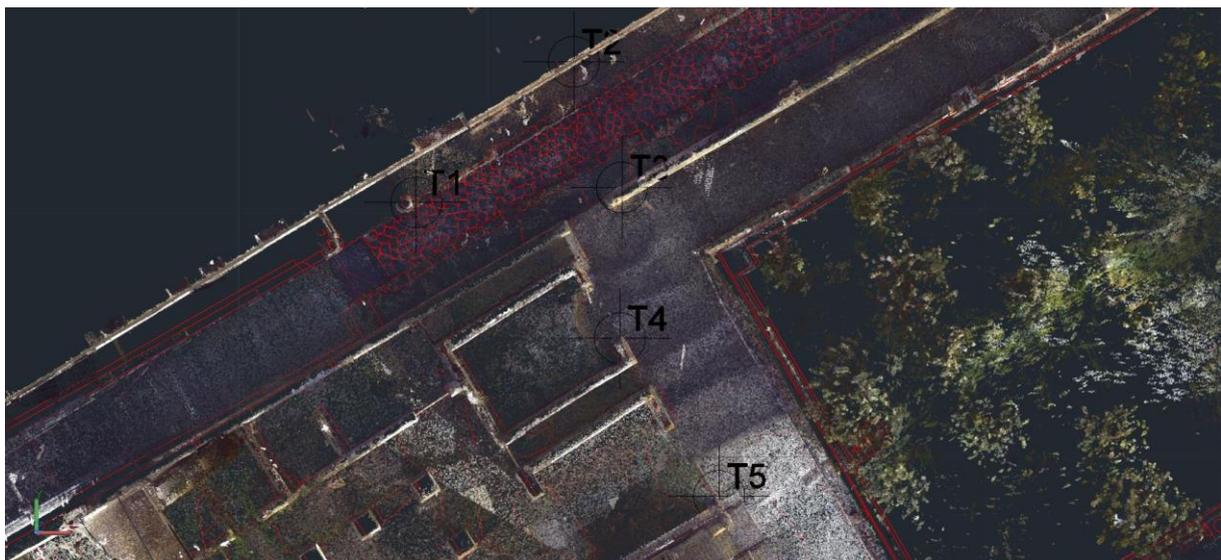


Fig. 13. Ercolano, decumano inferiore. La sovrapposizione del modello finale texturizzato sul fotogrammetrico (in rosso).

del rilievo è stata verificata visivamente; questo controllo è stato circoscritto alla verifica della sovrapposizione di alcuni piani orizzontali, poiché la pianta in CAD del Parco proiettava in 2D tutte le strutture, limitando l'indicazione dell'altezza a poche misure riportate manualmente e solo su alcune caratteristiche rilevanti delle pareti o dei marciapiedi. Anche il secondo controllo ha consentito di accertare la qualità della registrazione e la correttezza dell'integrazione dei due sottogruppi.

Per validare meglio l'accuratezza dei risultati finali, è stato eseguito, infine, un terzo test, basato sulla comparazione tra le misure lineari dei target ottenute prima e dopo la rototraslazione. La qualità della registrazione è stata definita confrontando alcune delle misurazioni prese dalla stazione totale con quelle estratte dal rilevamento 3D dell'*insula*. In particolare, è stata misurata la distanza dai target per ottenere valori relativi all'accuratezza in relazione ad uno scostamento delle misure ricavate dalla stazione totale e utilizzate come valore più preciso (*ground truth*), da quelle del laser scanner.

Scene utilizza un metodo statistico per identificare in che modo ogni scansione si adatta alla nuvola registrata. Questo metodo, denominato 'tensione target', non fornisce criteri di qualità esatti per la registrazione finale; è semplicemente un indicatore della proprietà di registrazione. Al contrario, le misurazioni tra diversi punti di scansione possono fornire valori più precisi sull'analisi dell'allineamento delle scansioni. La tabella 1 mostra i dati della misurazione della distanza dei target ottenuti dalla stazione totale (TS) e del laser scanner (TLS1-2) con le differenze relative tra le due serie di dati prima (TLS1) e dopo (TLS2) la roto-traslazione finale (fig. 11).

Il valore della deviazione standard per δ TS – TSL2 dimostra che la risoluzione media stimata fornita da Scene coincide con quella ottenuta dalle misurazioni delle distanze dopo la roto-traslazione mentre quello relativo alle misure prima delle geo-referenziazione appare superiore (0,4 cm) con punte di scostamento fino a poco meno di 1 cm. In generale, l'indice di dispersione tra le due serie di misurazioni appare più o meno lo stesso (fig. 14). Sembra quindi che non ci sia alcuna differenza significativa tra le misurazioni eseguite prima e dopo la roto-traslazione, anche se la tensione stimata, fornita da Scene dopo la registrazione finale, indica una maggiore precisione. I risultati finali nella comparazione TS-TSL2 sono stati migliorati eliminando i target T2 e T3b come già in precedenza evidenziato. L'alto valore di scostamento per i target T2 e T3b, rispetto agli altri 8 target, può derivare da un errore umano nella lettura del centro del target con la procedura *reflectorless* o dall'angolo di incidenza del target in relazione al posizionamento del laser scanner [15]. Probabilmente un mix di fattori, umani e non, ha contribuito all'origine di errori finali maggiori della media.

| Distance | TS | TLS1 | δ TS – TSL1 | TLS2 | δ TS – TSL2 |
|----------|--------------------|--------|--------------------|--------|--------------------|
| T1-T1b | 49,060 | 49,057 | 0,003 | 49,062 | -0,002 |
| T1-T2b | 49,619 | 49,615 | 0,004 | 49,619 | 0,000 |
| T1-T3b | 45,170 | 45,168 | 0,002 | | |
| T1-T4b | 42,172 | 42,167 | 0,005 | 42,171 | 0,001 |
| T1-T5b | 40,480 | 40,476 | 0,005 | 40,480 | 0,000 |
| T2-T1b | 51,409 | 51,407 | 0,002 | | |
| T2-T2b | 50,375 | 50,372 | 0,003 | | |
| T2-T3b | 46,576 | 46,575 | 0,001 | | |
| T2-T4b | 44,260 | 44,256 | 0,005 | | |
| T2-T5b | 42,247 | 42,243 | 0,004 | | |
| T3-T1b | 45,974 | 45,981 | -0,007 | 45,976 | -0,002 |
| T3-T2b | 45,052 | 45,056 | -0,004 | 45,051 | 0,001 |
| T3-T3b | 41,179 | 41,186 | -0,007 | | |
| T3-T4b | 38,823 | 38,827 | -0,004 | 38,821 | 0,002 |
| T3-T5b | 36,818 | 36,823 | -0,005 | 36,817 | 0,001 |
| T4-T1b | 40,395 | 40,403 | -0,008 | 40,401 | -0,006 |
| T4-T2b | 40,156 | 40,159 | -0,003 | 40,160 | -0,004 |
| T4-T3b | 35,963 | 35,970 | -0,007 | | |
| T4-T4b | 33,316 | 33,320 | -0,004 | 33,318 | -0,002 |
| T4-T5b | 31,432 | 31,437 | -0,005 | 31,435 | -0,003 |
| T5-T1b | 32,958 | 32,961 | -0,003 | 32,958 | 0,000 |
| T5-T2b | 32,696 | 32,692 | 0,004 | 32,694 | 0,002 |
| T5-T3b | 28,446 | 28,446 | 0,000 | | |
| T5-T4b | 25,850 | 25,851 | -0,001 | 25,848 | 0,003 |
| T5-T5b | 23,933 | 23,933 | 0,000 | 23,931 | 0,002 |
| | Standard Deviation | | 0,004 | | 0,002 |

Tab. 1. La tabella mostra il confronto tra le distanze tra i target misurate con la stazione totale (TS) e quelle con il laser scanner prima (TSL1) e dopo (TSL2) la roto-traslazione dei due sottogruppi sulle coordinate note.

I test eseguiti, di cui l'ultimo appare certamente più corretto, dimostrano che la precisione ricavabile dal laser scanner è paragonabile a quella ottenuta con la stazione totale e, quindi, conforme all'obiettivo del rilievo architettonico in scala 1:50 o 1: 100. La strategia di acquisizione delle scansioni, adottata in relazione allo sco-

po dell'indagine e, soprattutto, alle condizioni particolari del sito archeologico, ha fornito buoni risultati in termini di accuratezza e affidabilità. Ciò autorizza ad utilizzare il rilevamento 3D dell' *Insula III* come rete topografica per l'estrazione di coordinate necessarie alla geo-referenziazione successiva di mappe e/o foto.

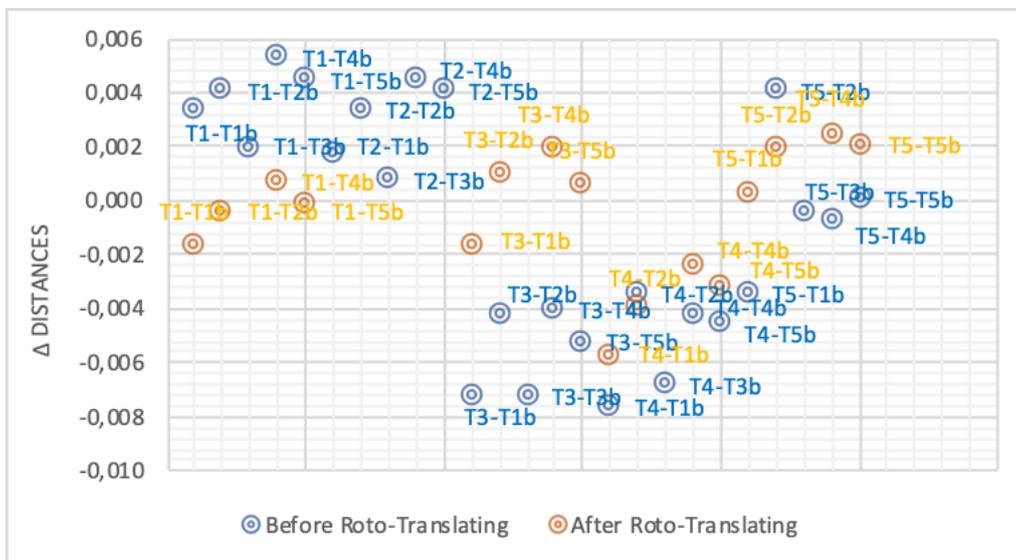


Fig. 14. Dispersione del Δ delle misurazioni prima e dopo la roto-traslazione delle nuvole di punti dell'inquadratura.

Il rilievo fotogrammetrico (A.B., A.F., R.V.)

Nell'ottobre del 2016 e nel novembre del 2017 si sono svolti i rilievi fotogrammetrici delle superfici verticali (pareti) e orizzontali (pavimenti) dell'insula III della città di Ercolano. Lo scopo del lavoro era quello di fornire agli "specialisti di settore" immagini adatte al rilievo vettoriale e alla ricostruzione grafica degli apparati decorativi. Gli utilizzatori finali dei prodotti fotogrammetrici erano interessati a distinguere il maggior numero possibile di caratteri della superficie pittorica, in altre parole, si richiedeva che le immagini fossero ricche di dettagli. In funzione di tale richiesta si è proceduto con la pianificazione del rilievo fotogrammetrico.

In primis, si sono eseguiti alcuni test variando esclusivamente la "distanza di presa". In seguito – nelle varie immagini e nei relativi prodotti fotogrammetrici – si sono valutati il grado di nitidezza e la dimensione dei dettagli d'interesse (motivi decorativi e raffigurazioni iconografiche). Si è potuto stabilire che le fotocamere in dotazione (Nikon D90 con obiettivo Nikkor AF-S 18-55 e Nikon D7100 con obiettivo Nikkor AF-S 18-70) forniva immagini utili alle indagini archeologiche se la distanza di presa non superava i 2,5 m per le pareti e i 5 m per i pavimenti. A questa distanza le immagini erano estremamente ricche di particolari, in quanto ogni pixel "catturava" una porzione quadrata di parete grande solo 0,5 mm di lato (1 mm per i pavimenti). Questo valore, GSD (Ground Sampling Distance), viene calcolato considerando più parametri: la lunghezza del lato di un *photosite* del sensore (gli elementi hardware che catturano i dati poi trasformati in pixel), la *lunghezza focale* e la *distanza di presa*⁴⁴. Dividendo la distanza di presa (ad esempio 2,5 m ovvero 2500 mm) per la focale (18 mm) e moltiplicando il risultato ottenuto per il lato del *photosite* (0,0039 mm) si ottiene la grandezza di un pixel (0,5 mm) virtualmente proiettato sulla superficie reale⁴⁵.

La metodologia scelta segue le linee-guida messe a punto per il piano della conoscenza di Pompei. In primo luogo le superfici da rilevare sono state individuate sulla planimetria e associate a un codice alfanumerico univoco⁴⁶. Ad esempio, il codice "EIII UF11 10E" identifica la parete del muro Est, posta all'interno dell'ambiente 10, nell'Unità Funzionale 11 (la Casa dello Scheletro) dell'insula III di Ercolano (fig. 15). Per la codifica dei pavimenti si è anteposto il numero dell'ambiente alla lettera P (es. EIII UF11 7P). Per scalare e

⁴⁴ BIASION *et al.* 2017; RIGGIO, CARLUCCI 2015.

⁴⁵ GOMARASCA 2004; NEUMANN 2008.

⁴⁶ Si ringrazia HCP per aver gentilmente fornito l'anagrafica, da loro redatta, per l'identificazione delle varie unità abitative e strutturali del sito di Ercolano.

geo-riferire i rilievi fotogrammetrici sono stati utilizzati, come detto in precedenza, almeno tre coordinate 3D estratte dal rilievo eseguito con il laser scanner. Infine, per assicurare una omogeneità nella resa cromatica dei fotogrammi, si è utilizzata una ColorChecker Passport (X-Rite) messa a contatto dell'oggetto da rilevare e ripresa soltanto in uno scatto.

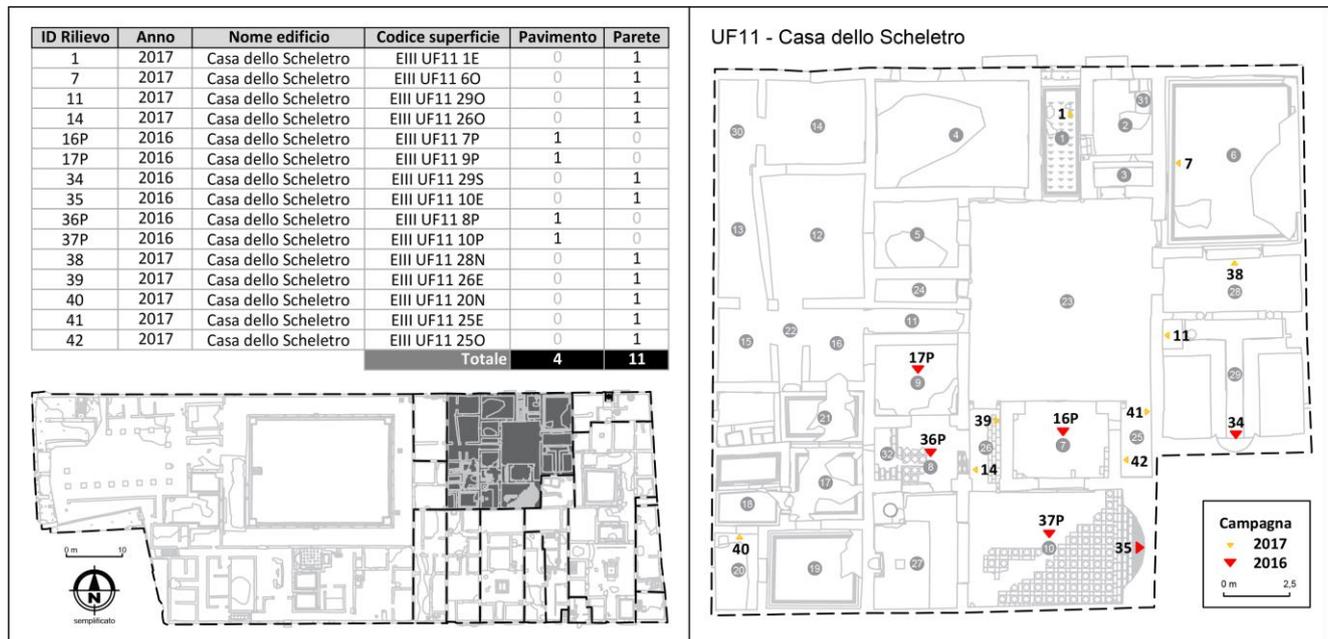


Fig. 15. Ercolano, Casa dello Scheletro (III 3). Riepilogo delle superfici rilevate.

Strumenti e procedure (A.F)

Stabilito che cosa rilevare, si è proceduto con un primo sopralluogo finalizzato alla valutazione delle condizioni di accessibilità, illuminazione, estensione e conservazione di ogni superficie. In questo modo è stato possibile precisare per ognuna di esse i necessari parametri: l'ora della giornata più consona alle riprese fotogrammetriche; la necessità o meno di eseguire operazioni di ripulitura da polvere e/o erbe infestanti; la necessità o meno di impiegare fonti di luce ausiliarie; la necessità o meno di posizionare la fotocamera sull'asta telescopica o sul semplice treppiede. Tutti i dati sono stati raccolti in apposite schede e gestiti con l'ausilio di un dispositivo portatile (iPad Pro 9,7" dotato di Apple Pencil).

La *fotografia è luce*. Mai come in questo contesto archeologico ci si è resi conto della veridicità di tale affermazione. Senza l'ausilio di luci artificiali molte superfici non si sarebbero potute rilevare, perché l'illuminazione naturale era troppo debole oppure poco uniforme. Per questo motivo, in molti casi, è stato necessario oscurare le finestre, impedendo così il passaggio della luce naturale, che presentava sempre una tonalità diversa rispetto a quella emessa dalle lampade. Inoltre, per garantire la fedeltà cromatica delle foto ci si è serviti del ColorChecker Passport (X-Rite), un accessorio che si apre a libro e comprende tre target fotografici: il Creative Enhancement (26 tasselli colorati posti nel retro della prima pagina); il Classic (una tavolozza di 24 colori); il White Balance (un riquadro di colore bianco posto nel retro della seconda pagina).

In genere, per rilevare le superfici dell'insula III si sono compiute le seguenti operazioni. In primo luogo, dopo aver organizzato le luci, è stato eseguito il bilanciamento del bianco "in-camera". Questa operazione – che consiste nell'inquadrare il target White Balance e premere il pulsante di scatto – migliora l'anteprima dei colori sul display della fotocamera, ma non ha alcun effetto sui dati registrati dalla fotocamera in formato RAW. Di conseguenza, il bilanciamento del bianco è stato ripetuto anche in post produzione. Successivamente è stata scattata una fotografia alla tavolozza di 24 colori (il target Classic) e infine si sono realizzate le diverse prese fotogrammetriche (fig. 16).

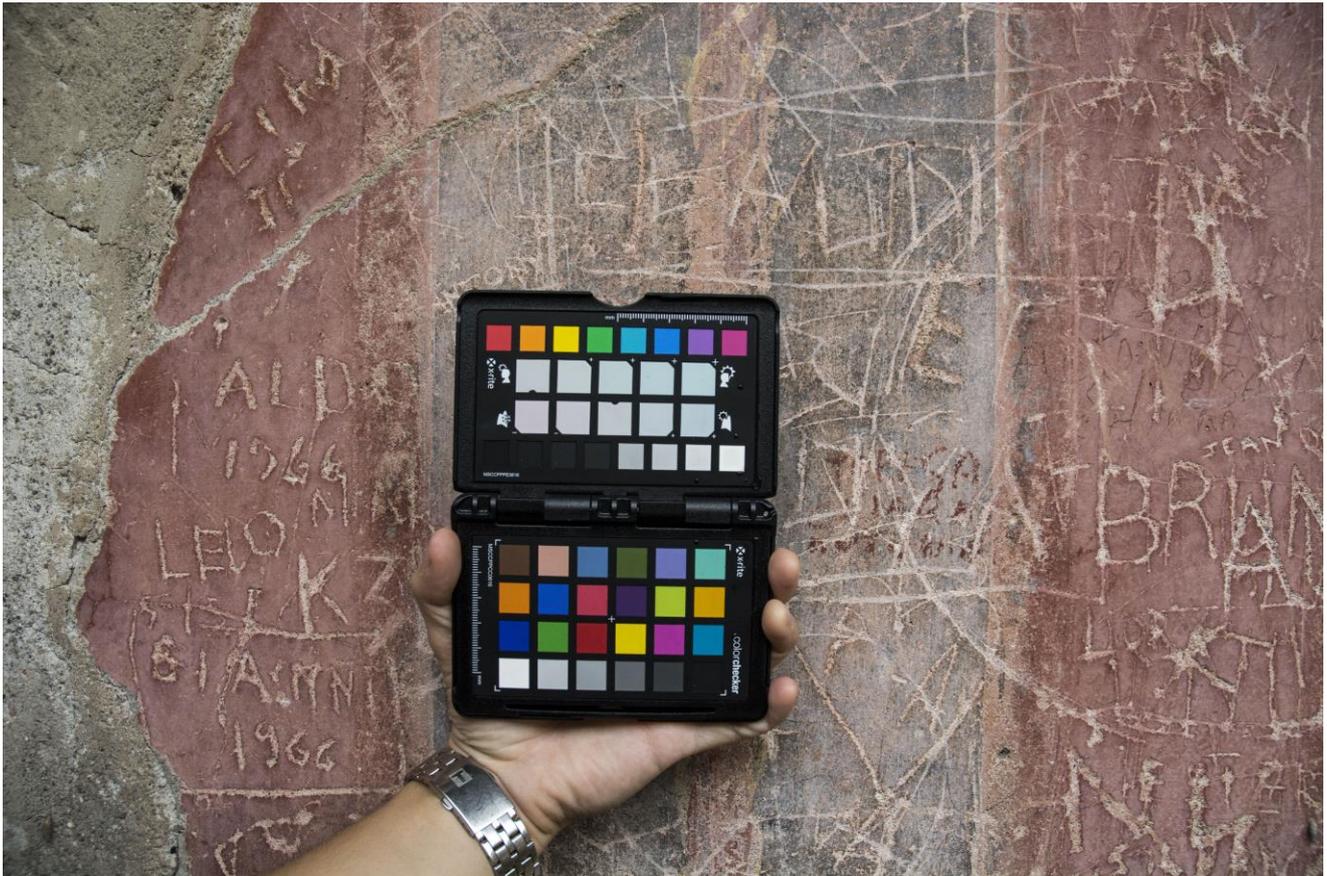


Fig. 16. ColorChecker Passport (X-Rite): in basso la tavolozza di 24 colori chiamata target Classic.

Per documentare le pareti dell'insula III ci si è serviti, in primo luogo, di inquadrature a piano verticale e il più possibile frontali. Per soddisfare questi requisiti è stato indispensabile l'uso di un treppiede. Ma non è tutto. Il rilievo delle porzioni di parete non raggiungibili dall'operatore ha richiesto l'impiego di un sistema di acquisizione più complesso. La fotocamera è stata fissata sulla cima di un'asta telescopica di alluminio (altezza massima 8 m) e connessa a uno smartphone dal quale verificare l'inquadratura, attivare lo scatto e il trasferimento delle immagini. Questo sistema, che è stato impiegato anche per il rilievo delle superfici pavimentali, ha velocizzato notevolmente la fase di acquisizione dei dati fotografici e migliorato la qualità metrica degli elaborati finali (fig. 17).

Per quanto riguarda la presa fotogrammetrica, gli elementi che sono stati considerati per pianificarla sono i seguenti:

- il vincolo della distanza massima dalle pareti (2,5 m) e dai pavimenti (5 m);
- ogni punto dell'oggetto da rilevare e rappresentare deve essere presente in almeno tre foto eseguite da punti di presa differenti (teoricamente ne basterebbero due ma per scalare il modello occorre poter individuare su almeno tre foto i punti di coordinate note);
- si eseguono prese "normali" (ovvero consecutive, con assi ottici ortogonali alla superficie e il meglio possibili paralleli tra di loro) e due foto oblique dove si inquadra l'intera superficie (una da sinistra e l'altra da destra, con assi della camera tra loro convergenti e fortemente inclinati rispetto alla superficie). Pertanto l'intero oggetto viene idealmente scomposto in tante porzioni, ciascuna ripresa in due foto consecutive e in quelle oblique (fig. 18).

Al termine del rilievo fotogrammetrico, per ogni superficie rilevata è stata prodotta una "foto d'archivio": in essa, anteposte alla parete o sopra il pavimento, compaiono la palina e una lavagna che riporta il giorno di esecuzione del rilievo e il codice identificativo della superficie rilevata.

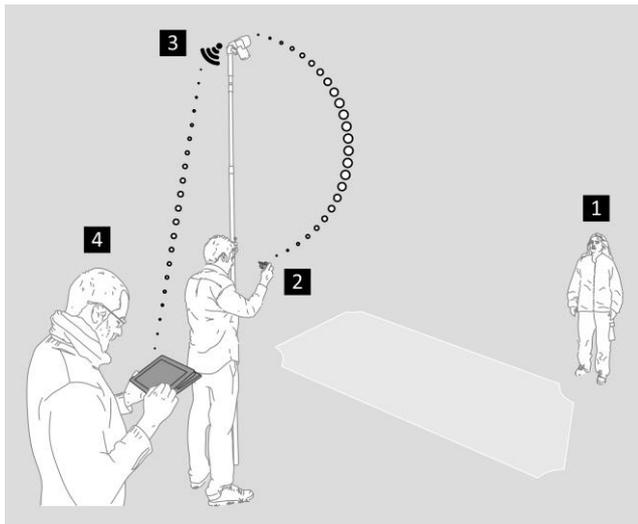


Fig. 17. Gli elementi del sistema di ripresa fotogrammetrica con asta telescopica (disegno A. Fiorini): un operatore (2) osserva l'immagine trasmessa allo smartphone dalla fotocamera (3), per ottenere la migliore inquadratura possibile; un altro (1) verifica che l'asse ottico della fotocamera sia perpendicolare alla pavimentazione; un terzo (4) controlla su tablet PC la qualità delle riprese.

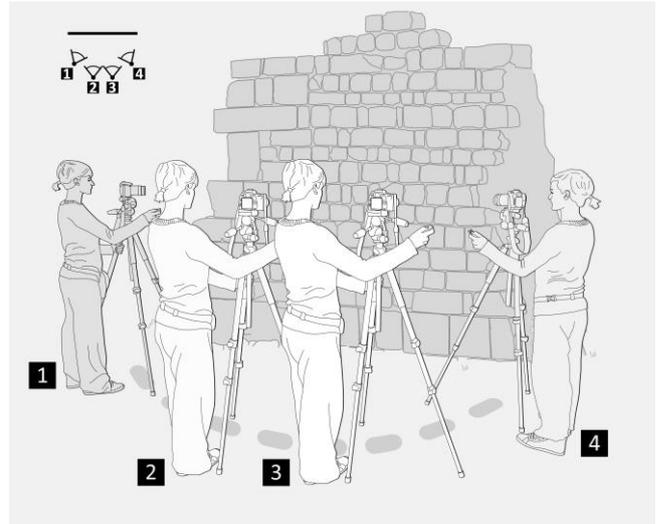


Fig. 18. La ripresa fotogrammetrica di una superficie verticale pseudo-planare (disegno A. Fiorini). In questo caso l'intera parete viene rilevata da una camera che riprende l'oggetto in tempi diversi, dalle posizioni, in sequenza, 1, 2, 3 e 4. Per la documentazione di pareti più estese si è fatto ricorso a un numero maggiore di prese "normali" (posizioni 2 e 3). In questo modo, l'intero oggetto viene scomposto in tante porzioni, ciascuna delle quali ripresa in due fotogrammi consecutivi.

Elaborazione dei dati e risultati (A.F.)

Come noto, attraverso il trattamento informatico delle immagini fotografiche si possono ricavare informazioni corrette circa la forma, la posizione e le dimensioni degli oggetti rappresentati. Tale processo elimina le deformazioni (radiali e prospettiche) e produce una nuova immagine metricamente corretta, detta ortofoto⁴⁷.

L'ortofoto viene ricavata da un modello 3D che è tanto più simile all'oggetto reale quanto più elevata è la qualità delle immagini fotografiche. Per questo motivo, prima di elaborare la "replica" digitale, è fondamentale ottimizzare le foto tramite programmi specifici. L'obiettivo è quello di ottenere colori fedeli (a quelli percepiti) e soprattutto dettagli più nitidi. Infatti, lavorando sui dettagli si riescono ad evidenziare quelle irregolarità superficiali che PhotoScan Professional (Agisoft) usa per ricercare i punti comuni nella fase di allineamento delle immagini (creazione della nuvola sparsa) e nella fase di creazione della nuvola densa. Il workflow che è stato implementato a Ercolano si può suddividere in due momenti fondamentali. Il primo riguarda il colore: la foto del target Classic viene convertita in formato DNG (Digital NeGative) e caricata nel software ColorChecker Passport per ottenere un file in formato DCP (DNG Camera Profile) che contiene i dati correttivi sul colore; poi, tramite lo strumento "Bilanciamento del Bianco" di Camera Raw, si corregge la dominante cromatica della fonte di luce e infine si applica il "profilo colore" precedentemente elaborato (DCP). Nel secondo step operativo si evidenziano le irregolarità superficiali regolando l'esposizione, il contrasto, le luci, le ombre, la chiarezza e la rimozione della foschia.

Completato il lavoro di ottimizzazione delle immagini si è passati al trattamento fotogrammetrico dei dati in PhotoScan. L'elaborazione fotogrammetrica ha fornito dapprima il modello tridimensionale della superficie e poi la corrispondente ortofoto. Si fornisce, a titolo esemplificativo, un particolare della parete EIII UF20 60 (Casa dell'Erma di bronzo, III 16) al termine dell'elaborazione (fig. 19). Il flusso di lavorazione adottato ha seguito una metodologia di processamento oramai ben definita.

⁴⁷ NEUMANN 2008.



Fig. 19. Ercolano, Casa dell'Erma di bronzo (III 16), ambiente 6, parete ovest (EIII UF20 60).

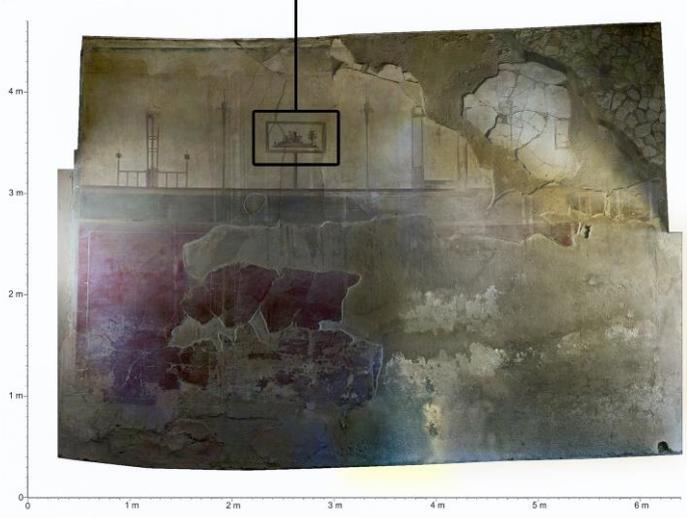


Fig. 20. Ercolano, Casa dell'Erma di bronzo (III 16), ambiente 6, parete est (EIII UF20 6E).



Complessivamente sono stati eseguiti 73 rilievi, di cui 50 da parte dall'Ateneo di Bologna (33 nel 2016 e 17 nel 2017), in più unità dell'insula, e 23, nella Casa del Tramezzo (III 4.11), da parte del CISA. L'ortofoto generata con il maggior numero di riprese fotografiche (107) riguarda una parete della Casa dell'Erma di bronzo (III 16; EIII UF20 6E) (fig. 20), mentre, fra i pavimenti, quello che ha richiesto il maggior

numero di foto (54) appartiene all'ambiente 23 della Casa dell'Albergo (III 1.19; EIII UF8 23P). Nella stessa unità edilizia, nell'ambiente 55, si trova anche il pavimento più esteso che è stato rilevato (EIII UF8 55P) (59 mq) (fig. 21). Fra le pareti documentate, invece, quella delle maggiori dimensioni è la parete nord dell'ambiente 8 della Casa dell'Erma di bronzo (34 mq) (EIII UF20 8N) (fig. 22).

Fig. 21. Ercolano, Casa dell'Albergo (III 1.19), ambiente 55, pavimento (EIII UF8 55P).



Fig. 22. Ercolano, Casa dell'Erma di bronzo (III 16), ambiente 8, parete nord (EIII UF20 8N).

La geo-referenziazione dei foto-ortopiani (A.B., A.F.)

Per scalare e orientare il modello della superficie, le coordinate necessarie alla corretta realizzazione della procedura sono state estratte dal rilievo completo 3D eseguito con il laser scanner. Osservando le foto della superficie e la parte corrispondente nella scansione laser è stato possibile identificare almeno tre punti omologhi. Le coordinate, inserite nel progetto di PhotoScan, hanno permesso di georeferenziare e scalare il modello e da questo derivare l'ortofoto della superficie.

L'errore medio, per le singole pareti ottenute dopo il processo di geo-referenziazione, risulta inferiore a 0,5 cm con un GSD compatibile con la scala per la realizzazione di un disegno dettagliato e accurato del motivo decorativo. Per verificare l'accuratezza del rilievo estratto da alcuni progetti fotogrammetrici di Agisoft sono stati realizzati alcuni test in CloudCompare: in particolare, sono stati sovrapposti l'ortofoto con il rilievo laser scanner per misurare la corrispondenza planare tra i due oggetti. L'errore medio di distanza, calcolato da CloudCompare, è di circa 0,2-0,3 cm e risulta in gran parte localizzato lungo i bordi delle immagini, laddove, con grande probabilità, il foto-ortopiano era stato ritagliato, per registrare soltanto la parte decorata.

La scelta di estrarre dalla nuvola di punti georiferita i punti per orientare e scalare i modelli nasce da alcune esigenze: in primo luogo per ridurre l'impiego della stazione totale in un'area ampia, caratterizzata dalla presenza di flussi costanti di visitatori e principalmente per l'impossibilità di posizionare eventuali target sulla superfici decorata.

Il metodo scelto si è rivelato non solo più rapido, eliminando i tempi per il posizionamento e inquadramento delle varie stazioni topografiche, ma anche più preciso, in quanto riduce i possibili errori generati dallo "spostamento" dello strumento per l'inquadramento di ciascuna struttura da rilevare. Inoltre, poiché il laser scanner impiegato dispone di una macchina fotografica interna, la visualizzazione delle immagini acquisite dal laser scanner può essere facilmente utilizzata per estrarre le coppie di punti omologhi necessari alla georeferenziazione del rilievo fotogrammetrico (fig. 23).

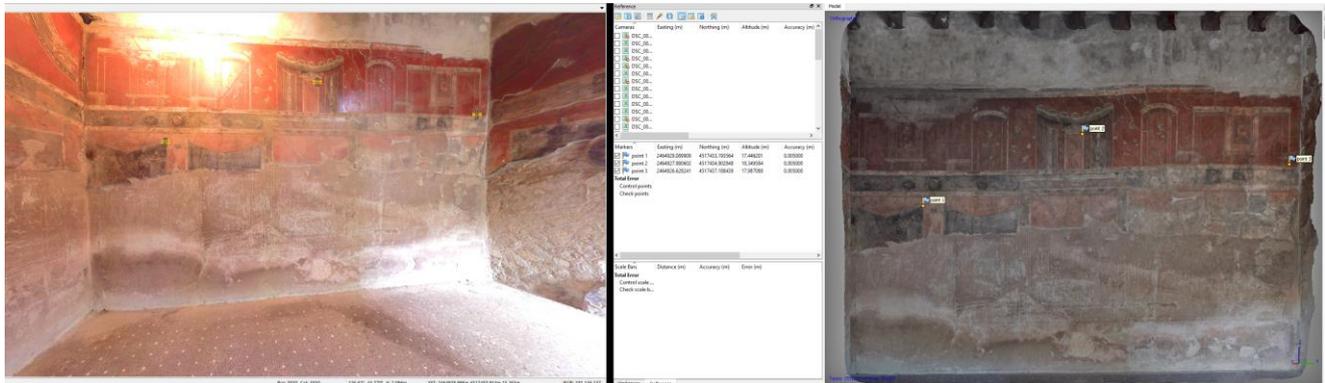


Fig. 23. Ercolano, Casa del Tramezzo (III 4.11), triclino 6. Sulla sinistra, l'individuazione dei punti di riferimento sulla nuvola da laser scanner (in visualizzazione fotografica).
Le coordinate xyz estratte sono poi inserite nel progetto fotogrammetrico (a destra) per scalarlo e riferirlo.

Conclusioni (A. D'A., A.C.)

Il lavoro presentato in questo contributo si basa sull'applicazione di tecniche standard per la documentazione analitica di strutture murarie decorate, tale da essere funzionale alle esigenze della ricerca, ed in particolare a tutte le azioni di valutazione e analisi dell'esistente, prima, e poi alle proposte di interpretazione e di restituzione su quelle fondate. Gli strumenti utilizzati, come le metodologie di ripresa e gli stessi software di elaborazione, appartengono ad una metodologia stabile e ben definita, che ha già dimostrato di saper dare risposte efficaci alle domande della ricerca archeologica. L'obiettivo dell'articolo non si limitava all'esposizione di un caso di studio, per quanto complesso, ma consisteva piuttosto in un doppio intento, a scala diversa:

1. offrire alcune indicazioni per la valutazione della correttezza finale del rilievo archeologico: un aspetto, questo, ancora più delicato se si pensa che il rilevamento 3D può essere riutilizzate per successivi monitoraggi o per l'estrazione di coordinate utili alla geo-referenziazione di ulteriori risorse digitalizzate o *digital-born*.
2. mostrare attraverso un esempio concreto le potenzialità di un approccio integrato allo studio di siti archeologici pluristratificati, come il sito di Ercolano, che costituiscono realtà di riferimento in tutta la letteratura scientifica, ma che nella realtà della ricerca attendono ancora azioni sistematiche non solo di documentazione, ma anche di studio e di edizione scientifica.

Per questo motivo, abbiamo voluto fornire ai lettori anche i dati utili per la contestualizzazione del lavoro svolto: non fine a sé stesso, ma funzionale ad un progetto di ricerca e valorizzazione che riguarda un sito pluristratificato, coinvolge più soggetti e si muove in una prospettiva di *longue durée*.

La scansione è un modo efficace per documentare il patrimonio culturale. In un progetto che includa più scansioni, è importante scegliere un metodo di registrazione adeguato e, soprattutto, identificare la migliore strategia per l'acquisizione dei dati in base al contesto circostante e garantire, nel contempo, una precisione dell'ordine di pochi millimetri. Nel caso di studio presentato l'accuratezza della griglia 3D è stata analizzata anche utilizzando misure di controllo ottenute da due distinti sensori, il laser scanner e la stazione totale. La differenza assoluta media tra le distanze misurate prima e dopo la traslazione su coordinate geografiche note è di circa 0,3 cm. Di fondamentale importanza è stata la scelta di un approccio combinato *surface-based* ("nuvole a nuvole") e *target-based*; mentre il primo ricostruisce un oggetto 3D basandosi su criteri locali che uniscono un punto con i suoi vicini, il secondo orienta le singole scansioni in base alla misurazione eseguita con la stazione totale di un numero sufficiente di GPC. La funzione di registrazione fonde le scansioni in un unico modello che non contiene né vertici ridondanti, né rumore. La *scan integration* è una fase delicata del processo di rilevamento, perché è soltanto in questa parte dell'intero workflow che è possibile verificare la densità dei punti acquisiti. Nella strategia di acquisizione dei dati risulta fondamentale pianificare il posizionamento dello scanner laser, per ridurre al minimo la propagazione degli errori e migliorare la registrazione automatica finale.

Queste indicazioni risultano ancora più significative se il rilievo tridimensionale è utilizzato per estrarre coordinate 3D necessarie a scalare o geo-referenziare altre risorse cartografiche e/o fotografiche. Un tale approccio favorisce la creazione di archivi georeferenziate 2D o 3D che permettono di confrontare facilmente lo stato di conservazione di un monumento nel tempo e di pianificare la manutenzione necessaria o di analizzare le cause del decadimento delle decorazioni. L'esistenza di una rete 3D affidabile è vantaggiosa non solo per l'acquisizione di dati fotogrammetrici, ma anche per ulteriori campagne laser scanner per confronti multi-temporali.

I principali contributi di questo articolo sono così sintetizzabili:

- i. una buona strategia di acquisizione dei dati influenza la risoluzione finale;
- ii. l'integrazione del laser scanner e della stazione totale minimizza il lavoro sul campo senza ridurre la qualità della replica 3D finale;
- iii. alcuni semplici test, confrontando le misurazioni ottenute da diversi sensori, possono essere eseguiti per validare rapidamente l'affidabilità della registrazione e la precisione dell'allineamento.

Il lavoro presentato esamina uno scenario archeologico caratterizzato da un insieme complesso di ambienti, elementi architettonici e decorazioni in un contesto pluristratificato e visitato giornalmente da un vasto numero di turisti. Per risolvere alcuni di queste criticità si è fatto ricorso all'impiego di diversi sensori (scanner laser, fotocamera digitale e stazione totale) e differenti procedimenti di unione delle scansioni; il risultato finale ottenuto mostra una risoluzione inferiore al centimetro perfettamente compatibile con un disegno in scala 1:50 o 1: 100. Il prodotto così ottenuto offre al progetto di ricerca archeologica un'ottima base documentale per l'analisi, lo studio e le proposte di ricostruzione di strutture, rivestimenti e contesti.

A. D'Andrea* - A. Bosco* - A. Coralini - A. Fiorini** - R. Valentini***

* Università di Napoli "L'Orientale", Centro Interdipartimentale di Servizi di Archeologia

** Università di Bologna, Dipartimento di Storia Culture Civiltà

BIBLIOGRAFIA

- ALLROGGEN-BEDEL A., 2009, 'Ercolano. Dal sito agli archivi, dal museo al sito', in CORALINI: 167-179.
- ANDREWS J.N., 2006, *The use and development of upper floors in houses at Herculaneum*, voll. 1-3, Ph.D. Thesis, Department of Archaeology, University of Reading.
- BIASION A., BORGOGNO MONDINO E., BORNAZ L., TONOLO F.G., LINGUA A., RINAUDO F. (a cura di), *Utilizzo delle tecniche della geomatica per la modellazione del territorio*, (http://www.risknat.org/projets/riskydrogeo/docs/guide_pratique/RELAZIONE_FINALE_VDA.pdf; ultimo accesso 24/02/2017).
- BITELLI G., MARZIALI M., GIRELLI V.A., ZANUTTA A., 2011, 'Rilievo e documentazione dei beni culturali: gli Scavi di Ercolano', in CORALINI: 137-144.
- BOLLINI V., 2010, *La Casa dell'Atrio corinzio a Ercolano. Rilievo e ricostruzione dell'apparato decorativo*, Tesi di Diploma, Laurea Magistrale in Archeologia e Culture del Mondo Antico, Università di Bologna, Relatrice: prof. D. Scagliarini.
- BOSCO A., D'ANDREA A., NUZZOLO M., ZANFAGNA P., 2019, 'A BIM approach for the analysis of an archaeological monument', in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W9, p. 165-172.
- BRAGANTINI I., 2010 (a cura di), *Atti del X Congresso Internazionale dell'Association Internationale pour la Peinture Murale Antique (AIPMA)* (Napoli, 17-21 settembre 2007), "AIONArch" Quaderni 18, Napoli.
- BUXEDA I GARRIGÓS J., MADRID I FERNANDEZ M., 2017, 'Designing Rigorous Research: Integrating Science and Archaeology', in A. Hunt (ed.), *The Oxford Handbook of Archaeological Ceramic Analysis*, Oxford: 19-47.
- CAMARDO D., NOTOMISTA M., 2017a, 'La Casa a Graticcio di Ercolano (III, 13-15). La struttura dell'edificio ed i suoi restauri', in *Vesuviana* 9: 9-41.
- CAMARDO D., NOTOMISTA M. (a cura di), 2017b, *Ercolano. 1927 - 1961. L'impresa archeologica di Amedeo Maiuri e l'esperienza della città museo*, Roma.
- CAMPANA S., 2017, 'Drones in archaeology. State-of-the-art and future perspectives', in *Archaeological Prospection* 24, (4): 275-296.
- CAPRA A., DUBBINI M., PASCUCCI C., 2011, 'Il rilievo delle superfici curve decorate nelle architetture ad Ercolano', in CORALINI: 163-177.
- CERULLI IRELLI G., 1971, *Le pitture della Casa dell'atrio a mosaico* (Monumenti della pittura antica scoperti in Italia, 3. La pittura ellenistico-romana, Ercolano, 1), Roma.
- CERULLI IRELLI G., POZZI PAOLINI E., 1974, *La Casa del Colonnato Toscanico ad Ercolano. Con una appendice sulle monete*, Memorie dell'Accademia di archeologia, lettere e belle arti di Napoli 7, Napoli.
- COLLA C., DE MIRANDA S., UBERTINI F., 2011, 'Indagini in sito per la diagnostica strutturale dell'elevato: la Casa del Tramezzo di Legno ad Ercolano', in CORALINI: 145-162.
- CORALINI A., 2005, 'La pittura parietale di Ercolano: i temi figurati', in *Ocnus* 13: 169-198.
- CORALINI A., 2009a, 'Domus Herculaneensis Rationes (2005-)', in CORALINI: 41-56.
- CORALINI A., 2009b (a cura di), *Vesuviana. Archeologie a confronto. Atti del Convegno Internazionale (Bologna, 14-16 gennaio 2008)*, Bologna.
- CORALINI A. (a cura di), 2011a, *DHER. Domus Herculaneensis Rationes. Sito archivio museo*, Bologna.
- CORALINI A., 2011b, 'Ercolano Resina Herculaneum', in CORALINI: 11-46.
- CORALINI A., 2011c, 'Figure dalle pareti di Ercolano. Un repertorio di sito?', in CORALINI: 183-218.
- CORALINI A., 2017, 'In situ et alibi. Dallo scavo integrato alla cultura dell'abitare: Vesuviana-DHER a Ercolano', in *Anabases*, 26: 67-102.
- CORALINI A., 2018, 'A scala di insula. Pompei, IX 8', in CAVALIERI M., BOSCHETTI C. (a cura di), *Multa per aequora. Il polisemico significato della moderna ricerca archeologica. Omaggio a Sara Santoro*, Louvain: 473-525.
- CORALINI A., 2020, 'Pitture e contesti: per un Atlante degli Apparati Decorativi di Ercolano', in GIULIERINI P., CORALINI A., SAMPAOLO V. (a cura di), *Picta fragmenta. La pittura vesuviana. Una rilettura*, Le Archeologie 3, Milano.
- CORALINI A., GUIDAZZOLI A., SCAGLIARINI D., TOFFALORI E., 2010, 'ViSMan-DHER: a VirtualArchaeology Application for Visualization and Management of Archaeological Data Related to ancient Herculaneum (NA), Italy', in *VAST 2010. 11th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology, and Cultural*

- Heritage, The 8th Eurographics workshop on graphics and Cultural Heritage, Short and Project Paper (Paris, 21-24/09/2010)*, Goslar: 71-74.
- CORDONI C., 2016, *Pitture e mosaici delle abitazioni di Ercolano. Rilievo, analisi, ricostruzione, contestualizzazione*, Tesi di Diploma, Scuola di Dottorato in Storia, critica e conservazione dei beni culturali, Università di Padova. Tutors: proff. A. Coralini, M. Salvadori
- D'ANDREA A., 2016, 'Providing 3D Content to Europeana', in CAMPANA S., SCOPIGNO R., CARPENTIERO G., CIRILLO M. (a cura di), *Keep the Revolution Going*, Proceedings of the 43rd Annual Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology, Archaeopress Archaeology, Oxford: 269-274.
- D'ANDREA A., BARBARINO M., 2012, 'Modellare lo scavo archeologico: esperienze e tecniche a confronto', in *Archeologia e Calcolatori*, 23: 229-245.
- D'ANDREA A., CORALINI A., BOSCO A., FIORINI A., VALENTINI R., 2018, 'A 3D topographic network for the study and maintenance of the Insula III of Herculaneum', in *Proceedings of 2018 IEEE International Workshop on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage (MetroArchaeo 2018)*, Cassino, Italy, October 22-24: 411-416.
- DE KIND R.R.L.B., 1998, *Houses in Herculaneum. A New View on the Town Planning and the Building of Insulae III and IV*, *Circumvesuviana* 1, Amsterdam.
- DE REU J., DE SMEDT P., HERREMANS D., VAN MEIRVENNE M., LALOO P., DE CLERQ W., 2014, 'On introducing an image-based 3D reconstruction method in archaeological excavation practice', in *Journal of Archaeological Science* 41: 251-262.
- ESPOSITO D., 2014, *La pittura di Ercolano*, Studi della Soprintendenza archeologica di Pompei 33, Roma.
- GALVAGNI M.L., 2012, *Il settore atrienese della Casa del Tramezzo di Legno ad Ercolano. Rilievo e ricostruzione della decorazione*, Tesi di Diploma, Corso di Laurea Magistrale in Archeologia e culture del mondo antico, Università di Bologna, Relatrice: D. Scagliarini.
- GANSCHOW TH., 1989, *Untersuchungen zur Baugeschichte in Herculaneum*, Bonn.
- GIORGI E., 2009, 'Indagini non invasive per l'archeologia. I casi di Ercolano e Burnum', in CORALINI: 577-595.
- GOMARASCA M.A., 2004, *Elementi di Geomatica*, Firenze.
- GRILLI E., DININNO M., MARSICANO L., PETRUCCI G., REMONDINO F., 2018 'Supervised segmentation of 3D cultural heritage', in *IEEE Proceeding of Digital Heritage 2018 3rd International Congress & Expo*, San Francisco (USA).
- GUIDOBALDI M.P., 2016, Qualche riflessione sull'esperienza dell'Herculaneum Conservation Project, in BONETTO J., SALVADORI M., GHIOTTO A.R., ZANOVELLO P., BUSANA M.S. (a cura di), *I mille volti del passato. Scritti in onore di Francesca Ghedini*, Roma: 1009-1016.
- GUIDOBALDI F., GRANDI, M., PISAPIA M.S., 2014, *Mosaici antichi in Italia. Regione prima. Ercolano*, I-II, Pisa.
- KEDZERSKI M., FRYSKOWSKA A., WIERZBICKI D., DABROWSKA M., GROCHALA A., 2015, 'Impact of the method of registering Terrestrial Laser Scanning data on the quality of documenting cultural heritage structures', in *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-5/W7: 245-248.
- KOLLER D., FRISCHER B., HUMPHREYS G., 2009, 'Research Challenges for Digital Archives of 3D Cultural Heritage Models', in *ACM Journal on Computing and Cultural Heritage*, 2, 3, December 2009, 7.
- LOSANSKI G., 2015, *Die Obergeschossareale der Stadthäuser in Herculaneum. Architektonische Anlage, raumkontextuelle Einordnung und häusliches Leben*, Wiesbaden.
- MAIURI A., 1958, *Ercolano. I nuovi scavi (1927-1958)*, Roma.
- MANFREDI M., 2005, *Herculaneum, insula III restituta (1830-2004)*, Tesi di Diploma, Corso di Laurea in Lettere, Università di Bologna, Relatrice: prof. A. Coralini.
- MANNI M., 1974, *Ercolano, 2. Le pitture della Casa del colonnato tuscanico*, Roma.
- MANNI M., 1980, 'Per la storia della pittura ercolanese', in *Cronache Ercolanesi* 20: 129-143.
- MANDELLI A., FASSI F., PERFETTI L., POLARI C., 2017, 'Testing different survey techniques to model architectonic narrow spaces', in *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W5: 505-511.
- MANUEL A., GATTET E., DE LUCA L., VÉRON P., 2013, 'An approach for precise 2D/3D semantic annotation of spatially-oriented images for in situ visualization applications', in *2013 Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage)*, Marseille: 289-296.
- MOLS S.T.A.M., 1999, *Wooden furniture in Herculaneum. Form, technique and function*, *Circumvesuviana* 2, Amsterdam.

- MONTEIX N., 2009, 'Inventio Herculaneis. Per la rilettura dei Giornali degli Scavi di Ercolano', in CORALINI: 181-196.
- MONTEIX N., 2016, 'Exploiting excavation archives. Herculaneum from 1927 to 1961 as a case-study', in *Journal of Roman Archaeology* 29: 423-437.
- MONTEIX N., 2017, 'Les archives des fouilles d'Herculanum au XXe siècle. Analyse critique et pistes d'exploitation', in *Anabases* 26: 143-154.
- MUNGARI M., 2011, 'Ercolano, Insula III (1830 - 2004). Appunti', in CORALINI: 107-134.
- MUNGARI M., ZANFINI M., 2010, 'Ercolano, Casa dello scheletro. Rilievo fotogrammetrico e analisi degli apparati decorativi', in BRAGANTINI: 903-906.
- NEUMANN K.J., 2008, 'Trends for Digital Aerial Mapping Cameras', in CHEN J., JIANG J., BAUDOIN A. (edd.), *ISPRS Archives - Volume XXXVII Part B1*, Beijing: 551-554.
- POTENZIANI M., CALLIERI M., DELLEPIANE M., CORSINI M., PONCHIO F., SCOPIGNO R., 2015 'DHOP: 3D Heritage Online Presenter', in *Computers & Graphics*, 52, November 2015, 129-141.
- REMONDINO F., GEORGOPOULOS A., GONZÀLES-AGUILERA D., AGRAFIOTIS P. (edd.), 2018, *Latest Developments in Reality-Based 3D Surveying and Modelling*, Basel.
- RIGGIO A., CARLUCCI R., 2015, *Topografia di base. Fondamentali della geomatica per la misura e la rappresentazione del territorio*, Roma.
- RUGGIERO M., 1885, *Storia degli scavi di Ercolano ricomposta sui documenti superstiti*, Napoli.
- SAMPAOLO V., 2008, "In ricordo di Franca Parise Badoni", in *Archeologia Classica* 59: 455-457.
- SEAR F.B., 1977, *Roman wall and vault mosaics*, RM. 23, Heidelberg.
- SOUDARISSANANE S., LINDENBERGH R., MENENTI M., TEUNISSEN P., 2011, 'Scanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points', in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 66 (4): 389-399.
- STROCKA M.V., 1987, 'Case di Pompei: un progetto scientifico internazionale dell'Istituto Archeologico Germanico', in *Rivista di Studi Pompeiani* 1: 203-208.
- STYLIANIDIS E., REMONDINO F. (edd.), 2016, *3D Recording, Documentation and Management of Cultural Heritage*, Whittles Publishing.
- TRAN TAM TINH V., 1988, *La Casa dei Cervi a Herculaneum*, *Archaeologica* 74, Roma.
- WAAGEN J., 2019, 'New technology and archaeological practice. Improving the primary archaeological recording process' in *excavation by means of UAS photogrammetry*, in *Journal of Archaeological Science* 101: 11-20.
- WUJANZ D., BARAZZETTI L., PREVITALI M., SCAIONI M., 2019, 'A Comparative Study among three registration algorithms: Performance, Quality Assurance and Accuracy', in *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W9: 779-786.