

MODELLARE LO SCAVO ARCHEOLOGICO: ESPERIENZE E TECNICHE A CONFRONTO

1. INTRODUZIONE

Sul piano della metodologia scientifica la catena documentaria, indipendentemente dalle sue finalità e articolazioni in strati di complessità, racchiude un processo di gestione della conoscenza che implica il possesso di due attitudini: una preparazione specialistica, che permette di assegnare un oggetto (tangibile/intangibile) ad una categoria nota del mondo reale, e una competenza, altrettanto settoriale, necessaria per descrivere l'oggetto sulla base di un linguaggio tecnico-scientifico condiviso. Il primo livello ha uno scopo prevalentemente interpretativo, mentre il secondo appare circoscritto all'ambito della comunicazione. In realtà le due azioni non sono indipendenti l'una dall'altra; esse sono parte di una catena in cui ogni anello si inserisce in quello adiacente e la loro reale successione può essere adeguata in rapporto alle esigenze e alle opportunità: per interpretare un oggetto è necessario descriverlo analiticamente, ma senza una corretta conoscenza del mondo al quale l'oggetto appartiene non è possibile fornire alcuna comprensibile e condivisa forma di rappresentazione.

Nel corso degli ultimi 20 anni, l'impiego delle tecnologie informatiche ha reso più articolato il formarsi della catena documentaria mettendo a disposizione del ricercatore nuove fonti informative e, soprattutto, nuovi sistemi di estrazione e formalizzazione della conoscenza. Su di un piano logico-formale solo una corretta gestione e comprensione del potenziale informativo offerto dai nuovi documenti digitali può contribuire ad un processo conoscitivo ampio, completo ed esaustivo, mentre la semplice omissione anche di uno solo degli anelli che compongono la fase documentativa può condurre a risultati insufficienti e parziali.

Nonostante il largo uso dei computer in campo archeologico poca attenzione è stata dedicata alla comprensione del rapporto tra qualità e potenziale informativo dei dati digitali. Ancora oggi numerosi archeologi manifestano nei confronti delle nuove tecnologie un atteggiamento passivo caratterizzato dalla semplice constatazione che il passaggio dalla penna al notebook, dalla matita al disegno vettoriale e dalla pellicola fotografica all'immagine digitale sia solo il risultato dei tempi, di una evoluzione degli strumenti e delle procedure che non ha alcun riflesso sull'origine e sull'informazione che il dato veicola. Questo atteggiamento di "sottomissione" ad un velleitario potere tecnologico neutrale non favorisce la valutazione del ruolo che la tecnologia può avere nello sviluppo di una nuova metodologia archeologica.

Facendo un paragone tra documentazione e fisica, quando nei primi anni Ottanta cominciava ad affacciarsi l'uso del computer, P. BISOGNO (1980) ha affermato che nella documentazione, come in fisica, vale il principio che le entità che compongono la teoria e la prassi sono in quantità tali che non è possibile definirne singolarmente i loro attributi e il loro individuale e "disordinato" comportamento. In questa prospettiva la semplice sopravvalutazione di uno solo dei due elementi del binomio interpretazione/descrizione determina la creazione di domini incompleti e incompiuti.

L'articolo che segue, scaturito da alcune esperienze sul campo, ha l'ambizione di contribuire ad una corretta valutazione del potenziale offerto dal rilievo archeologico digitale e delle sue inevitabili conseguenze sul piano della conoscenza. È certamente oltre l'obiettivo del presente contributo, anche a causa del background di tipo archeologico degli autori, entrare nel merito di una teoria dell'errore archeologico, ma alcune cautele possono e devono essere sottolineate per comprendere in che modo sia possibile gestire l'errore strumentale e ridurre le imprecisioni prodotte dall'impiego di una qualsiasi strumentazione per l'acquisizione di informazioni a connotazione spaziale.

Innanzitutto va segnalato che anche in campo archeologico vale il principio che «Una scienza si dice esatta non perché basata su informazioni infinitamente esatte, ma perché la sua metodologia consente di conoscere il valore dell'indeterminazione associata ad esse, ovvero di conoscere il limite del contenuto di informazioni che esse portano» (AGNOLO 2004, 354). Coerentemente con questa premessa dobbiamo riconoscere che il concetto di grandezza fisica e precisione del dato non può, né deve, essere considerato dagli archeologi un tabù dietro il quale nascondere una insofferenza verso le problematiche della registrazione dei dati spaziali. La metodologia archeologica deve quindi confrontarsi con questi postulati e accettare che una grandezza fisica non sia il risultato di una semplice misurazione, ma l'esito di un gruppo di operazioni che includono gli strumenti adoperati e l'analisi della successione temporale delle azioni che determinano la misura.

I dati presi in esame nel presente lavoro sono quelli per il rilievo digitale tridimensionale ottenuti con strumentazioni ottiche (laser scanner, stazione totale, GPS) e tecniche di image-based modeling. La differente tipologia di acquisizione impone al ricercatore una analisi accurata della pipeline prescelta per l'elaborazione e la restituzione delle informazioni spaziali. Non è quindi sufficiente valutare l'errore strumentale connesso al tipo di tecnologia utilizzata, ma occorre soffermarsi sulle modalità di acquisizione del dato, sulla accuratezza e/o precisione dell'informazione registrata e soprattutto sugli scopi scientifici e di documentazione per i quali il rilevamento tridimensionale è stato eseguito. Questo approccio consentirebbe di superare l'erroneo concetto del dato "vero", in quanto prodotto da uno dispositivo neutrale, per giungere al dato scientifico in cui la stima dell'errore strumentale è associata ad una

pipeline metodologica prescelta sulla base di una valutazione scaturita dal rapporto tra tecnologia utilizzata e contesto applicativo da documentare.

In estrema sintesi, obiettivo dello studio qui presentato è stimolare negli archeologi da campo una valutazione meno superficiale e più ragionata del dato tridimensionale, della sua acquisizione e della successiva gestione.

Questa eccessiva – oppure ossessiva – riaffermazione del tema del proprio statuto epistemologico, che spesso compare negli articoli che si occupano di informatica e archeologia, sembra alimentata da una inconscia considerazione del carattere strutturalmente debole della disciplina che si pratica, una sorta di sindrome di “marginalizzazione” evocata costantemente. Tuttavia il rischio di essere “derubati/espropriati” da altre discipline è sempre presente e trova facile presa proprio in quel mondo, composto in larga misura da archeologi, che avversano il nuovo o lo riducono ad elettrodomestico e che vorrebbero marginalizzare la metodologia a vantaggio dell’archeologia, come se la prima fosse “ancella” della seconda e come se la relazione strumento/osservatore alla base della fisica moderna fosse solo un “accidente” della storia della scienza che ha poca attinenza sulle pratiche degli archeologi.

2. CASI DI STUDIO

I contesti scelti per questo studio derivano da scavi e altre ricerche in corso; essi sono localizzati in diverse aree geografiche e appartengono a periodi cronologici, culture, tipologie insediative e condizioni logistiche assolutamente differenti le une dalle altre. L’estrema eterogeneità dei casi esaminati assicura che i risultati proposti possano essere valutati e criticati indipendentemente dagli elementi che qualificano le diverse aree archeologiche indagate.

Le considerazioni, ancora ad un livello preliminare, proposte al termine dell’articolo includeranno anche alcune attività di misurazione e di rilievo eseguite in altri contesti consentendo di allargare la sfera delle osservazioni e delle relative stime e di suggerire alcune metodologie di impiego per l’acquisizione dei dati spaziali tridimensionali (D’ANDREA 2011).

Il 3D data-capture è stato realizzato con il laser scanner e/o con tecniche di fotogrammetria sviluppata con algoritmi di structure from motion che permettono di restituire una nuvola di punti 3D dell’oggetto a partire da una sequenza di immagini fotografiche non ordinate e non calibrate.

Le strumentazioni e i software sono stati impiegati secondo un comune processo operativo; nei due scavi è stata preliminarmente impiantata, con l’aiuto di una stazione totale, una rete topografica locale necessaria alla successiva roto-traslazione delle nuvole di punti e alla conseguente mosaicatura delle varie riprese. Nel sito abruzzese di Aveia il sistema topografico è stato geo-riferito attraverso l’impiego di un GPS utilizzato in modalità differenziale,

mentre nello scavo situato in Etiopia il confronto proposto si basa sulla comparazione di differenti metodologie di elaborazione e restituzione dei dati.

2.1 Aveia (L'Aquila)

Situata nella Valle dell'Aterno, tra il massiccio del Gran Sasso e il gruppo montuoso del Sirente-Velino, Fossa (AQ) è un luogo ricco di storia e di cultura le cui prime tracce di un insediamento sul territorio si concentrano a partire dall'età del Ferro fino a tutto il II secolo a.C. Alla frequentazione vestina si sovrappone, non senza traumi, la romanizzazione del territorio con la creazione della *praefectura* di Aveia nel III secolo a.C. Della città romana sono ancora visibili i resti della cinta muraria in opera incerta, risalente al I secolo a.C., e un grande nucleo murario in cementizio identificabile con uno dei contrafforti laterali (*analemmata*) del teatro.

A partire dal 2007, l'Università di Napoli "L'Orientale", sotto la direzione scientifica del prof. F. Pesando, ha avviato, in accordo con la Soprintendenza Archeologica dell'Abruzzo, un piano di interventi caratterizzati dall'esecuzione di una serie di rilevamenti geofisici e da sondaggi stratigrafici. I danni provocati dal terremoto del 2009 hanno reso più urgente un intervento finalizzato all'identificazione e al recupero di tutte le evidenze archeologiche sconvolte dal sisma anche attraverso una campagna di scavi localizzati nel settore sud-orientale della città antica (PESANDO 2011). Nello stesso periodo è stato avviato il rilievo digitale di un punto particolarmente delicato dell'intera fortificazione dove il sistema difensivo della città bassa si collegava a quello della città alta, dopo aver superato un sensibile balzo di quota. Dopo una prima campagna di rilevamenti eseguiti con il laser scanner nel luogo dove le mura formavano un angolo ottuso, probabilmente condizionato dalle particolari condizioni orografiche del territorio, nel 2011 si è proseguito il lavoro utilizzando tecniche di fotogrammetria non calibrata. In questo modo si sono potuti confrontare i risultati ottenuti nel corso delle tre campagne di rilievo.

2.1.1 Il rilievo tridimensionale

Nel periodo 2009-2010, in concomitanza con le indagini archeologiche, è stato avviato il rilievo con il laser scanner di parte delle mura perimetrali della città alta ancora esistenti e delle quali si vedeva, nel 2009, soltanto parte del paramento esterno coperto dalla fitta vegetazione. A causa delle estese lacune non si disponeva di una visualizzazione ottimale delle mura e pertanto non è stato possibile ottenere un rilievo accurato e completo di questa porzione delle fortificazioni con la prima campagna di acquisizione. L'anno successivo, al termine di una estesa pulizia e livellamento di una ampia fascia in corrispondenza dell'angolo nel sistema murario, il rilevamento con il laser scanner è stato ripetuto con risultati maggiormente confortanti.

Poiché uno degli scopi dell'intervento consisteva nella produzione di una documentazione – sebbene parziale – del tratto visibile, si è prescelta per le riprese una linea delle fortificazioni lunga circa 17 m. Non potendo eseguire il rilievo su entrambe le facciate, l'acquisizione si è limitata alla sola facciata esterna. Il profilo prescelto è quello *medium* con un margine di campionamento della superficie inferiore a 1 cm, ad una distanza dello strumento rispetto all'oggetto non superiore a 10 m; l'allineamento delle scansioni è stato eseguito utilizzando target piani, mentre la campagna fotografica è stata eseguita con fotocamere digitali. La presenza della boscaglia e un parziale riuso del manufatto utilizzato, probabilmente in tempi recenti con l'alloggiamento di barre e fili metallici, hanno reso ulteriormente complessa la ripresa e la successiva fase di elaborazione delle scansioni.

Nel 2009 per le riprese venne utilizzato uno stretto camminamento parallelo al tracciato delle mura. La distanza media di ripresa tra il laser scanner e le mura era inferiore ai 2 m, mentre per le foto, essendo impossibile eseguire delle riprese perpendicolari all'oggetto, vennero realizzate delle immagini con vista quasi parallela alle mura per riprendere la maggior porzione possibile della struttura. A causa della ridotta distanza tra il laser scanner e la struttura muraria, l'acquisizione delle parti alte delle mura non risultò soddisfacente essendo l'angolo di incidenza troppo obliquo. Analogamente, considerata la vista delle foto parallela in larga misura all'oggetto, anche la campagna fotografica si rivelò assolutamente insufficiente e inadatta per la texturizzazione del modello. La Fig. 1 mostra la sovrapposizione di una immagine sul modello 3D, mentre la Fig. 2 rappresenta una parziale elaborazione dell'oggetto tridimensionale con l'estrazione di un profilo di sezione.

Nel 2010, dopo aver deciso di ampliare l'area prospiciente l'angolo delle mura rilevate nell'anno precedente anche al fine di eseguire alcuni sondaggi stratigrafici, è stata ripetuta la campagna di acquisizioni con il laser scanner. Avendo rimosso gli ostacoli che avevano determinato il parziale “insuccesso” del primo rilevamento, i risultati ottenuti nel 2010 sono stati alquanto soddisfacenti. La Fig. 3 mostra il modello finale con la texturizzazione limitata alla parte emersa dell'oggetto; manca, infatti, la parte di paramento venuta alla luce nel saggio di approfondimento al di sotto dell'attuale piano di calpestio per la quale non è stato possibile eseguire idonee fotografie.

Nel 2011 il lavoro di rilevamento è proseguito sperimentando, come già menzionato, una tecnica di fotogrammetria non calibrata. L'area rilevata è la stessa acquisita nelle precedenti campagne con il laser scanner. Il lavoro sul campo ha richiesto una sola giornata di acquisizione durata circa 3 ore. Le dimensioni del tratto della cinta muraria, una superficie di circa 20 m di lunghezza per un'altezza di oltre 5 m a cui si aggiungono i due saggi di scavo, e il livello di dettaglio richiesto hanno suggerito la ripartizione dell'intera area in diversi parti acquisite indipendentemente l'una dall'altra. La suddivisione



Fig. 1 – Nuvola di punti texturizzata, campagna 2009.

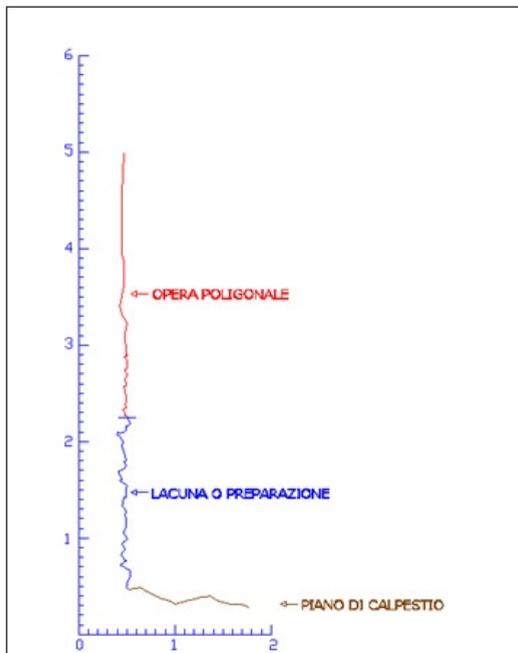


Fig. 2 – Sezione della facciata.

e la delimitazione dei settori sono state determinate in base alla necessità di effettuare scatti fotografici da più angolazioni possibili, secondo il metodo structure for motion, e all'esigenza di garantire un rapporto ottimale tra risoluzione e tempi di elaborazione. Sono stati considerati complessivamente sei settori di ripresa la cui area nell'insieme corrisponde approssimativamente alla porzione di fortificazioni illustrata in Fig. 3. Per il riallineamento dei diversi settori di ripresa in ogni scena sono stati posizionati quattro target che sono stati successivamente rilevati con la stazione totale. Per ogni settore è stata eseguita una campagna fotografica realizzata con scatti ripresi ad una distanza massima di 3-4 m; alcuni dettagli della struttura e le irregolarità della superficie sono stati documentati con immagini ravvicinate in modo da poter catturare meglio ogni particolare essenziale alla successiva fase di estrazione dei dati.

Ogni set di foto è stato successivamente elaborato con il software Agisoft Photoscanner Professional. Per ciascuna scena, elaborata in modo indipendente, il software ha prodotto una nuvola di punti trattata poi con il software Geomagic Studio 11 per eliminare il rumore. Successivamente la nuvola ripulita è stata processata con il software Meshlab che, tramite il



Fig. 3 – Area della fortificazioni. Modello finale, campagna 2010.

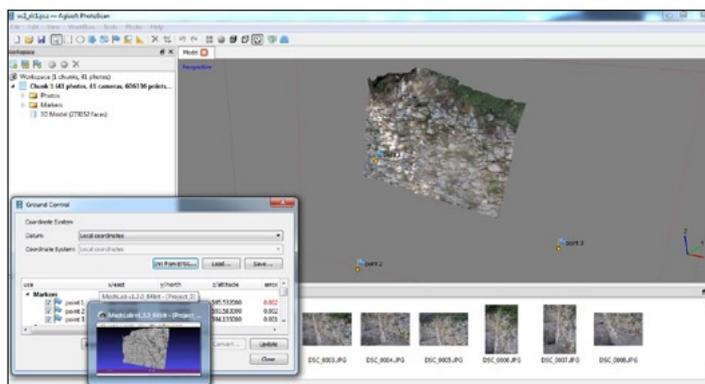


Fig. 4 – Georeferenziazione delle singole scene.

filtro Poisson Surface Reconstruction, ha consentito di ottenere delle mesh per l'intera scena. A questo punto, per mosaicare tutte le scene, ogni mesh è stata importata nuovamente all'interno del software Agisoft Photoscanner Professional per l'allineamento e la registrazione sulla base delle coordinate assegnate tramite la stazione totale a ciascuno dei quattro punti selezionati per ogni settore (Fig. 4). Al termine delle operazioni di mosaicatura l'errore medio risultato nell'allineamento oscilla tra 3-10 mm (Fig. 5). L'intera elaborazione di ogni scena ha richiesto in media 60-90 minuti di lavorazione tra processamento e importazione/esportazione nei diversi software adoperati.

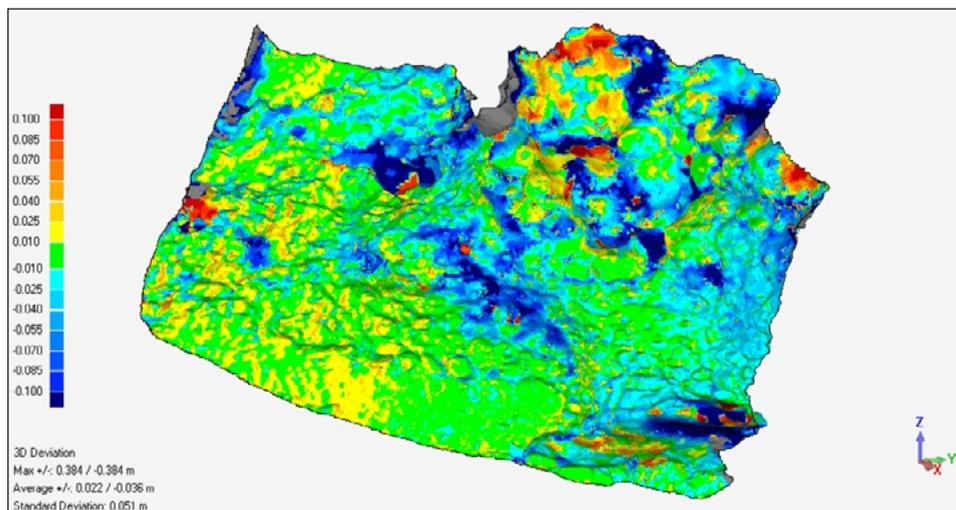


Fig. 7 – Sovrapposizione dei modelli ottenuti con laser scanner e con tecniche di fotogrammetria. A sinistra il range dell'errore massimo e medio generato.

due sistemi di fortificazione laddove formavano un angolo. La Fig. 7 mostra la sovrapposizione tra i diversi rilevamenti e il valore di scostamento medio e massimo tra i due modelli. Il range medio è di 2-3 cm, mentre il valore più alto si attesta intorno a circa 4 cm di differenza tra le due superfici ottenute con il laser scanner o con il sistema structure from motion.

Per quanto riguarda invece le aree scavate negli anni 2010 e 2011 e non riprese con il laser scanner, il confronto è stato eseguito tra il rilevamento ottenuto con la fotogrammetria e il disegno prodotto da una misurazione tradizionale convertita in CAD. In particolare sono analizzate le restituzioni del muro in opera reticolata rinvenuto nel saggio eseguito al di sotto dell'attuale piano di calpestio in corrispondenza del tratto di muro di cinta che veniva dalla città bassa, e di una calcara ricavata in prossimità del punto di incontro tra le due linee delle fortificazioni. La sovrapposizione dei prospetti e delle sezioni relative all'*opus reticulatum* e alla calcara (Figg. 8 e 9) mostra, al semplice confronto visivo, una evidente difformità tra le differenti restituzioni, in modo particolare per quanto riguarda il profilo della calcara.

2.2 Seglamen (Etiopia)

Dal 2010 la Missione archeologica italiana ad Aksum, diretta dal prof. R. Fattovich, ha avviato, in collaborazione con il Dipartimento di Archeologia



Fig. 8 – Sovrapposizione del disegno in CAD sul foto-ortopiano ricavato dalla nuvola di punti.

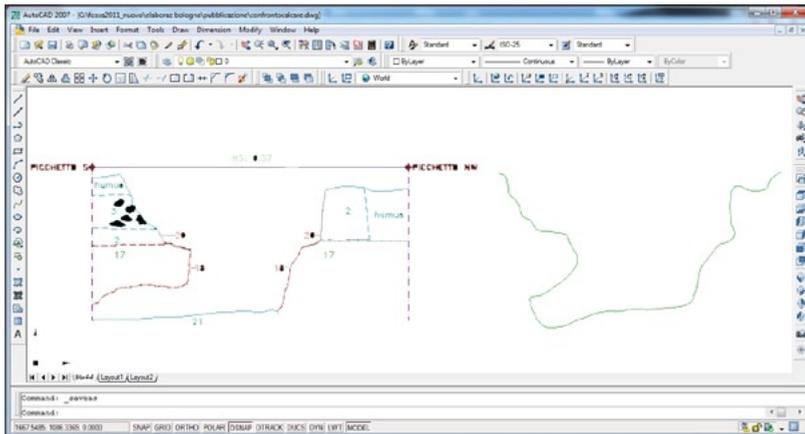


Fig. 9 – Sezioni della calcaria. A sinistra la sezione ottenuta in modo tradizionale, a destra quella estratta dal modello 3D.

dell'Aksum University College, un progetto di ricerca nell'area della valle del Mai Nigus/Haselo nella regione del Tigrai. Obiettivi dell'indagine sono la ricostruzione della storia culturale e ambientale della regione a S-O di Aksum e la creazione di una dettagliata mappa archeologica della regione.

Intorno al villaggio di Seglamen, dove nei primi anni '70 era stata scoperta una iscrizione reale Pre-Aksumita e alcuni sondaggi preliminari avevano portato alla luce abitazioni rurali Post-Aksumite, è stato avviato uno scavo stratigrafico (FATTOVICH *et al.* 2010). Dopo l'esecuzione dell'inquadramento topografico dell'area di scavo con la stazione totale, la restituzione delle

evidenze archeologiche e della stratigrafia è stata ottenuta con un sistema di fotogrammetria non calibrata.

2.2.1 Il rilievo tridimensionale

La fotogrammetria terrestre è stata impiegata in modo intensivo e sistematico esclusivamente in due delle quattro aree indagate, interessando una ristretta fascia dell'antico insediamento (10×10 m) e della necropoli (5×5 m). Le due tecniche adoperate sono state testate contemporaneamente in primo luogo poiché esse avevano in comune la fase dell'acquisizione dati, eseguita con la stazione totale e con la fotogrammetria non calibrata, sia perché – ed è forse questo l'elemento più significativo – si voleva sperimentare questo approccio in una condizione reale di cantiere aperto e non in un "asettico" laboratorio valutando tutte le inevitabili conseguenze sull'operatività degli interventi sul terreno. Il fattore tempo è stato, infatti, una delle componenti più importanti, se non la più importante in assoluto, per una corretta valutazione dell'impiego sul campo di tecnologie speditive per il rilevamento digitale 3D.

I punti di quota significativi di ogni unità stratigrafica sono stati rilevati con la stazione totale e successivamente elaborati in Autodesk AutoCAD 2007 con l'obiettivo di tracciare l'area di estensione tridimensionale di ciascuna entità stratigrafica messa in luce. Gli oggetti sono stati poi importati in ArcGIS 10.0 per associare i dati alfanumerici ad ogni singola unità e per realizzare, tramite l'estensione 3D Analyst, il TIN (Triangular Irregular Network) di ogni superficie in base alle quote acquisite; con il tool Extrude Between è stato, infine, generato il modello 3D in formato Multipatch. Attraverso il modulo ArcScene (Fig. 10, Tav. X, a) è possibile sia visualizzare lo spazio tridimensionale effettuando misurazioni planimetriche e altimetriche delle unità stratigrafiche, sia esportare i dati in formati di interscambio per la pubblicazione dei modelli in formato PDF 3D (D'ANDREA, IANNONE, SAFFIOTTI 2009) o per l'esecuzione di ulteriori analisi con software dedicati per il controllo dei dati tridimensionali. Per questo ultimo specifico scopo è stato utilizzato il software Deep Exploration Cad Edition che si è rivelato particolarmente utile per la visualizzazione delle superfici, l'estrazione e l'analisi dei profili, e per la creazione di etichette che descrivono il modello o parti di esso.

Nonostante i tempi di rilievo siano rapidi, l'analisi di questa prima pipeline ha dimostrato come l'approccio risulti senza dubbio più vantaggioso in termini di durata di lavoro sul campo quando le superfici e i volumi da rilevare si presentino regolari; in casi di particolare irregolarità delle strutture o delle unità stratigrafiche – si pensi ad esempio ai crolli molto comuni in contesti abitativi – i tempi di acquisizione sono necessariamente allungati, poiché si deve procedere al rilevamento di un maggior numero di dati 3D. Il rischio è che una semplice generalizzazione o semplificazione della fase di misurazione possa produrre una non chiara e comprensibile restituzione

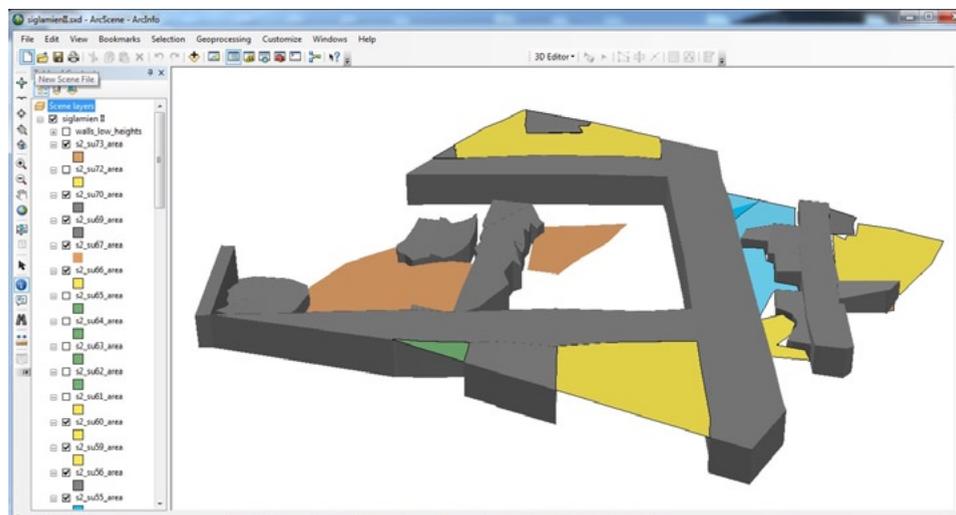


Fig. 10 – Visualizzazione delle unità stratigrafiche con il modulo ArcScene.

dell'area rilevata in termini planimetrici, altimetrici e soprattutto di relazione tra le diverse entità archeologiche.

Considerato che i casi “anomali” o “irregolari” costituiscono certamente la maggioranza in archeologia in rapporto alle strutture regolari, si è proceduto a rilevare sistematicamente ogni unità stratigrafica (oltre cinquanta) anche con la fotogrammetria non calibrata.

Dopo l'individuazione e la definizione dell'estensione di ciascuna unità stratigrafica sono stati posizionati 4 target, successivamente rilevati con la stazione totale, e si è proceduto alla acquisizione di una serie di fotografie. Il numero di scatti minimo e massimo per ogni entità da rilevare è stato valutato in base a una serie di fattori legati ai limiti e alle tolleranze dell'algoritmo usato dal software di elaborazione, alle dimensioni e forma dell'oggetto del rilievo e al grado di risoluzione richiesta. Nel nostro caso il limite minimo è stato di 20 fotografie sino ad arrivare ad un massimo di 200; nella maggior parte dei casi tuttavia sono stati ritenuti sufficienti 50-60 scatti. I tempi di acquisizione delle foto e delle coordinate dei target sono attestati tra i 5 e i 15 minuti per ciascuna unità stratigrafica e quindi sono abbastanza compatibili con le normali attività di scavo se si pensa che il disegno tradizionale richiede l'impostazione del sistema di riferimento, spesso realizzato con cordini mobili e quindi poco precisi, il rilevamento dei punti con il sistema a squadra e il disegno in scala eseguito direttamente sul terreno ai margini dell'area da rilevare.

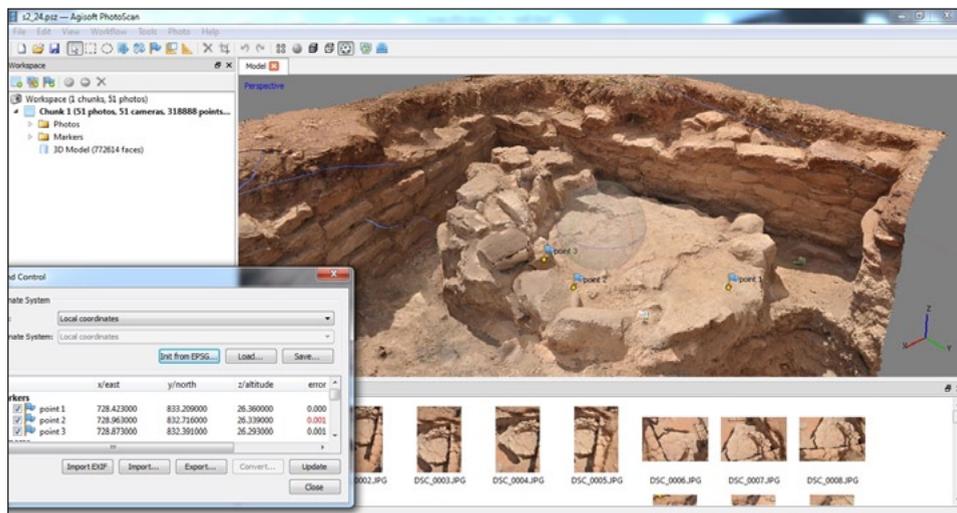


Fig. 11 – Ricostruzione del modello e georeferenziazione.

Come già descritto nel caso di Aveia, ogni set di foto è stato elaborato con il software Agisoft Photoscanner Professional che ha prodotto nuvole di punti con tempi di processamento tra i 20 e i 60 minuti per ciascuna scena. Le nuvole sono state successivamente trattate con il software Meshlab per la costruzione della mesh attraverso il filtro Poisson Surface Reconstruction. Ottenuta la mesh ogni singolo file, corrispondente alla ricostruzione tridimensionale di ciascuna unità stratigrafica, è stato importato nuovamente in Agisoft Photoscanner per la texturizzazione e la georeferenziazione in base ai target rilevati (Fig. 11, Tav. X, b). I modelli sono poi ulteriormente trattati con il software Geomagic Studio 11 per ritagliare e definire in modo ottimale l'estensione e il volume dell'entità archeologica rilevata.

Al termine del processo di elaborazione sono stati prodotti 50 modelli che corrispondono al totale delle unità stratigrafiche rilevate. Con il software Geomagic Studio 11 ogni modello può essere analizzato singolarmente o in forma aggregata; attivando o disattivando semplicemente la visualizzazione dei livelli informativi relativi a ciascuna unità è possibile simulare in laboratorio il processo di scavo dell'area. Per eseguire elaborazioni più complesse, come le analisi di tipo statistico-spaziale, i modelli possono essere importati in un sistema GIS, mentre grazie al software Deep Exploration Cad Edition i file possono essere convertiti nello standard PDF 3D oppure visualizzati direttamente on-line tramite moduli di tipo Web Viewer.

3. CONCLUSIONI

Alcuni recenti test eseguiti a Cipro in due distinti cantieri di scavo consentono di allargare il campo delle osservazioni (D'ANDREA 2011) e di fornire ulteriori spunti di riflessione sull'impiego e l'utilità del rilevamento digitale 3D in campo archeologico. Le aree si riferiscono ad un contesto di scavo stratigrafico (Pasydy - Nicosia) nel quale differenti tecnologie sono state impiegate per riprendere la stessa porzione di area indagata con l'obiettivo di confrontare i risultati finali (HERMON *et al.* 2010), e al teatro greco di Paphos nel quale strumentazioni e metodologie diverse – tra cui anche la fotogrammetria aerea da pallone – sono state sperimentate per l'acquisizione di parti distinte del monumento (AMICO *et al.* 2010). Nel primo caso alle riprese con laser scanner sono stati associati fotogrammi trattati con il software Arc3D, sviluppato con approcci structure from motion. Nell'altro, invece, le riprese ad alta risoluzione realizzate con il laser scanner hanno interessato il *parodos* a sinistra della scena e uno dei *vomitoria* conservati, mentre la fotogrammetria aerea è stata utilizzata per la ripresa dell'intero teatro e della collina circostante nella quale era stata ricavata la cavea. In entrambi i casi esaminati l'integrazione dei modelli 3D ha registrato un livello di precisione, misurata da una comune griglia di riferimento, di circa 0,6-2 cm. Considerando che nel primo caso lo scavo aveva restituito strati di accumulo, tagli e i resti di qualche struttura conservata soltanto a livello delle fondazioni, l'errore ottenuto al termine del test è risultato accettabile e compatibile con l'evidenza archeologica da documentare. Anche per il teatro l'integrazione delle differenti tecniche ha prodotto ottimi risultati in quanto i modelli parziali coincidono con uno scarto minimo dovuto certamente alla risoluzione meno accurata della fotogrammetria aerea.

I test hanno dimostrato che ognuna delle tecnologie adottate appare di grande utilità se messa in relazione alla acquisizione di una specifica parte del modello. L'esperimento ha anche consentito di comprendere i limiti di ciascuna tecnica: la fotogrammetria aerea è certamente di costo minore rispetto al laser scanner, ma è condizionata dalle raffiche di vento, che creano problemi nella stabilità del pallone, e dalla eccessiva illuminazione solare che determina una notevole perdita di dati nelle aree sovraesposte. Con la fotogrammetria aerea si possono riprendere ampie parti del territorio in poco tempo e con scarso peso in termini di pesantezza del file rendendo più spedito il processo di acquisizione e post-processing. La preparazione e l'assemblaggio del sistema da pallone richiedono però tempi più lunghi rispetto alla messa in stazione del laser scanner; mentre non sempre è facile il reperimento dell'elio necessario al gonfiaggio del pallone.

I risultati emersi dalla valutazione delle tecniche speditive utilizzate nelle aree archeologiche cipriote consentono di convalidare le verifiche presentate in questo lavoro.

Sebbene il laser scanner costituisca una tecnologia oramai largamente stabile, ampiamente sperimentata e di facile impiego, le tecniche di 3D data-capture, che sfruttano algoritmi shape from motion, risultano straordinariamente utili nei contesti di scavo per la loro accuratezza e rapidità di impiego; l'errore, stimabile in 1-2 cm rispetto al laser scanner, è bilanciato dai costi contenuti di questa tecnologia, dalla sua semplicità di impiego e dalla sua adattabilità a qualsiasi contesto archeologico, sia esso uno scavo stratigrafico, caratterizzato da crolli e manufatti costruiti, una struttura muraria o un teatro. Le condizioni ambientali come il sole o il vento possono rallentare la fotogrammetria aerea, mentre non intralciano quella terrestre. L'unico limite è rappresentato dalla impossibilità di acquisire informazioni in assenza di luce, come nelle caverne o in ambienti sotterranei o scarsamente illuminati dove, al contrario, il laser scanner mostra le maggiori potenzialità di impiego grazie anche alla possibilità di eseguire particolari riprese a 360° per quanto prive spesso di una adeguata copertura fotografica per la successiva texturizzazione della nuvola di punti.

Il test realizzato per l'acquisizione e la ricostruzione del teatro greco di Paphos suggerisce che in alcune circostanze i due metodi di 3D data-capture piuttosto che alternativi debbano essere considerati complementari quando gli oggetti da riprendere, per le loro proprietà strutturali e le finalità di una documentazione composta da rilevamenti a differente risoluzione e ricchezza di dettagli, richiedano metodologie e strumenti integrati.

Il lento passaggio al rilievo digitale per lo scavo archeologico si è arricchito negli ultimi anni di strumentazioni di acquisizione e metodologie di elaborazione sempre più precise e accurate. I laser scanner di ultimissima generazione possiedono una velocità di ripresa che, negli strumenti con tecnologia a tempo di fase, può superare il milione di punti al secondo, mentre il peso e le dimensioni sempre più contenute li rendono nel contempo adeguati al trasporto in aree non facilmente accessibili. La disponibilità di potenti macchine fotografiche (in alcuni casi oltre i 70 MegaPixel) integrate nei laser scanner rende l'intero processo di acquisizione e restituzione facilitato rispetto anche ad un recente passato. Lo sviluppo di software (anche open source) con interfacce di semplice utilizzo dà all'archeologo la possibilità di controllare in modo completo e agevole il workflow. Nonostante una positiva evoluzione, anche in termini di riduzione dei costi di acquisto della strumentazione e formazione del personale, la tecnologia laser scanning resta ancora appannaggio di un numero molto ristretto di gruppi di ricerca.

La disponibilità di sistemi di fotogrammetria non calibrata, i cui margini di precisione come si è tentato di dimostrare nell'articolo sono soddisfacenti e compatibili con le esigenze di una documentazione accurata e scientifica dello scavo archeologico, potrà invece spingere i ricercatori ad adottare in modo sistematico tecniche di rilievo digitale di tipo speditivo

integrate con l'uso della stazione totale o di altri dispositivi per assicurare la roto-traslazione delle nuvole di punti. La portabilità della strumentazione, ridotta sul campo ad una macchina fotografica digitale, associata a tempi di ripresa molto ragionevoli e costi esigui renderà nel futuro la fotogrammetria non calibrata una tecnologia insostituibile per la documentazione dello scavo archeologico.

Questa apertura consentirà, ci si augura, di modificare quella strategia di indagini sul terreno che, per semplificare il processo di documentazione delle evidenze rinvenute, è costretta a prevedere in partenza l'impianto di una fitta e, spesso, scomoda maglia di cordini che attraversando l'intera area esaminata sia in grado di "coprire" qualsiasi settore di ricerca. Tuttavia, nonostante l'archeologo pianifichi correttamente la localizzazione della rete, l'evoluzione dello scavo mette di frequente in crisi questo impianto costringendo il ricercatore a ripensamenti ed estensioni. Il prolungamento della maglia rende inevitabilmente più problematica la realizzazione di sezioni cumulative, piante di strato e overlay e soprattutto introduce errori di calcolo e misurazione che possono compromettere il corretto svolgimento dell'intero procedimento di rilievo, mentre un'altra fonte di imprecisioni è originata dall'impostazione iniziale di un valore di scala adeguato all'estensione in larghezza e profondità delle indagini sul terreno.

Il quadro comparativo che emerge depone senza dubbio a favore dello sviluppo e del potenziamento dell'uso delle tecnologie digitali speditive anche nel campo particolare del rilievo stratigrafico, non solo per la naturale evoluzione e il progresso delle tecniche, ma anche per una documentazione più accurata e precisa. Indipendenza dalla scala, da una griglia di riferimento che attraversa lo scavo e, soprattutto, possibilità di estrazione dei profili e contorni delle unità stratigrafiche dopo la lettura dei rapporti e delle schede di scavo, rappresentano fattori di straordinaria efficacia per consentire di giungere ad una visione più ampia e più scientifica dell'intero processo di scavo e di documentazione della conoscenza archeologica.

ANDREA D'ANDREA, MARCO BARBARINO
Centro Interdipartimentale di Servizi di Archeologia
Università degli Studi di Napoli L'Orientale

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare il prof. R. Fattovich e il prof. F. Pesando dell'Università di Napoli "L'Orientale" per aver consentito di lavorare su una documentazione in gran parte ancora inedita. Un ringraziamento va anche ai numerosi collaboratori delle due missioni, in particolare alla dott.ssa Luisa Sernicola e al dott. Domenico Oione per aver gentilmente messo a disposizione degli autori piante e sezioni da loro elaborate e al dott. Giancarlo Iannone per l'elaborazione delle nuvole di punti acquisite a Fossa con le campagne 2009 e 2010.

BIBLIOGRAFIA

- AGNOLO P. 2004, *Il senso della misura. La codifica della realtà tra filosofia, scienza ed esistenza umana*, Roma, Armando Editore.
- AMICO N., ANGELINI A., D'ANDREA A., GABRIELLI R., IANNONE G. 2010, *Integrating 3D data acquisition techniques for comprehensive study for the ancient Hellenistic-Roman theatre of Paphos, Cyprus*, in F. JAVIER MELERO, P. CANO, J. REVELLES (eds.), *Fusion of Cultures*, Abstracts of the XXXVIII Annual Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology, CAA 2010 (Granada, Spain, 2010), 461-464.
- BISOGNO P. 1980, *Teoria della documentazione*, Milano, Franco Angeli.
- D'ANDREA A. 2011, *Il rilievo archeologico con il laser scanner: luci e ombre*, in «Vesuviana, An International Journal of Archaeological and Historical Studies on Pompeii and Herculaneum», 3, 193-218.
- D'ANDREA A., IANNONE G., SAFFIOTTI L. 2009, *Metodologie laser scanning per il rilievo archeologico: metodi operativi e standard di documentazione*, in G. DE FELICE, M.G. SIBILANO, G. VOLPE (eds.), *Digitalizzare la pesantezza. L'informatica e il metodo della stratigrafia. Atti del Workshop (Foggia 2008)*, Bari, Edipuglia, 123-134.
- FATTOVICH R., BERHE H., PHILLIPSON L., SERNICOLA L. et al. 2010, *Archaeological Expedition at Aksum (Ethiopia) of the University of Naples L'Orientale - 2010 Field Season: Seglamen. Rapporto tecnico*, Università degli Studi di Napoli L'Orientale (http://opar.unior.it/1294/1/IEAks_UNO_2010_final_report.pdf).
- HERMON S., PILIDES D., AMICO N., D'ANDREA A., IANNONE G., CHAMBERLAIN M. 2010, *Arc3D and 3D laser-scanning. A comparison of two alternate technologies for 3D data acquisition*, in F. JAVIER MELERO, P. CANO, J. REVELLES (eds.), *Fusion of Cultures*, Abstracts of the XXXVIII Annual Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology, CAA 2010 (Granada, Spain, 2010), 55-58.
- PESANDO F. 2011, *Un impegno per l'Abruzzo, comitato per le ricerche archeologiche a Fossa (Aq). Gli scavi dell'Università di Napoli L'Orientale (Luglio 2009)*, in *Il Fucino e le aree limitrofe nell'Antichità, III Convegno di Archeologia (Avezzano 2009)*, Avezzano, Archeoclub d'Italia - Sezione della Marsica, 470-475.

ABSTRACT

By examining the potential offered by the digital survey, the article aims at encouraging archaeologists to undertake a more rational approach towards three-dimensional data acquisition and management. Data was derived from excavations at Aveia (AQ – Italy) and Seglamen (Ethiopia). The 3D data-capture was achieved with the laser scanner and structure from motion techniques that make it possible to obtain a point cloud of an object from a sequence of photographic images, which are neither ordered nor calibrated. The conclusions reflect the role of digital technologies in the field of stratigraphic survey. Independence from scale and the ability to extract profiles and contours of stratigraphic units are factors of great importance for a virtual reconstruction of archaeological excavations.

