

L'USO DELLA TECNOLOGIA DEM
NELLA DOCUMENTAZIONE ARCHEOLOGICA.
ALCUNE APPLICAZIONI IN CASI DI SCAVO STRATIGRAFICO
E NELLO STUDIO DELL'EDILIZIA STORICA

1. INTRODUZIONE

Con questo contributo si intende rendere note alcune procedure di documentazione archeologica basate sulla tecnologia DEM (Digital Elevation Models) e sviluppate in occasione di diverse attività di scavo e studio stratigrafico degli elevati di architetture storiche pluristratificate. Si tratta di casi di diverse epoche, in differenti contesti funzionali e insediativi, che coprono un periodo compreso tra i secoli VI e XIII d.C. I casi di studio sono, nello specifico, due scavi stratigrafici¹ e due studi archeologici degli elevati².

I DEM sono stati utilizzati in contesti stratigrafici particolarmente complessi con la finalità di produrre uno strumento interpretativo archeologico derivato dal rilievo indiretto dei profili degli strati di terreno scavati. Attraverso la gestione dei modelli digitali in ambiente GIS (software QGIS_v.2.16.3) è stato possibile utilizzare tali prodotti per realizzare rilievi archeologici indiretti generalmente di difficile realizzazione (ad esempio sezioni “volanti” di interi settori di scavo in *open area* o sezioni e planimetrie di dettaglio) con livelli di errore residuo ininfluenti agli scopi archeologici e con notevole risparmio di tempo nell'economia del cantiere.

Nelle pagine che seguiranno si farà un breve bilancio degli studi sull'uso dei DEM in archeologia, si descriveranno le applicazioni in contesto di scavo con le relative potenzialità e limiti, le applicazioni in archeologia dell'architettura e, infine, alcune considerazioni conclusive e proposte per possibili prospettive future.

¹ Gli scavi archeologici ai quali si fa riferimento sono il sito del “Complesso Paleocristiano di Capo Don” (responsabilità scientifica prof. Philippe Pergola, direttore di cantiere dott. Alessandro Garrisi), il cui scavo è stato condotto, tra il 2009 e il 2016, in concessione ministeriale al Pontificio Istituto di Archeologia Cristiana su finanziamento della Fondazione Nino Lamboglia ONLUS, e il sito del Castello di Castel Pizigolo, scavato tra il 2015 e il 2016, in concessione ministeriale all'Università di Bologna (responsabile scientifico dott. Nicola Mancassola). Si ringraziano tutti i responsabili per la disponibilità a pubblicare alcuni dei dati dei singoli scavi.

² Gli studi di archeologia dell'architettura sono due. Il primo è un caso di edilizia residenziale medievale dell'isola croata di Rab, il cui rilievo è stato realizzato in occasione di una Summer School dell'Università di Padova (*Digital recording, study and public sharing of historical architectures*, direttori scientifici prof. Gian Pietro Brogiolo e prof.ssa Alexandra Chavarria Arnau). Il secondo è la chiesa di S. Giusto a Marlia (LU), un edificio di culto pluristratificato con fasi comprese tra l'alto medioevo e l'età moderna. Il rilievo dell'edificio è stato condotto in occasione di una ricognizione territoriale dell'edilizia lucchese altomedievale svolta in collaborazione col dott. Gabriele Castiglia. Si ringraziano tutti i responsabili scientifici per la disponibilità.

2. I DEM IN ARCHEOLOGIA: BREVE STATO DEGLI STUDI

I DEM sono la rappresentazione grafica digitale della distribuzione delle quote di un territorio o di una determinata superficie. I DEM, esportati in formato raster, consentono di associare a ogni singolo pixel dell'immagine un dato di elevazione rappresentato da un preimpostato grado colorimetrico (HUTCHINSON, GALLANT 1999, 2000).

La loro applicazione in archeologia è stata abbondantemente sperimentata per contesti territoriali, come l'analisi geomorfologica a scala topografica, finalizzata, ad esempio, alla valutazione predittiva del potenziale archeologico (cfr. da ultimo DE GUIO 2015). Per tali ambiti applicativi oggi è possibile collegarsi ai servizi nazionali open access di telerilevamento per ottenere dei modelli digitali del terreno con varie scale di dettaglio, comprese tra i 20 e i 75 m³. Questi prodotti sono ottenuti attraverso la digitalizzazione delle curve di livello dell'archivio IGM e la loro successiva interpolazione per la creazione delle superfici vere e proprie⁴. Anche le singole regioni, spesso, offrono un servizio cartografico che comprende dei DEM a risoluzioni maggiori (fino a 5 m) e, in alcuni casi, dei veri e propri DTM a scala regionale ottenuti tramite nuove tecnologie di telerilevamento come il LIDAR, la cui applicazione in campo archeologico è ormai abbondantemente nota alla letteratura scientifica (cfr. CRUTCHLEY 2015 e, in parte, anche BROGIOLO 2015 su interpretazione archeologica e LIDAR).

Le applicazioni pratiche di questi strumenti sono note dai primi anni '90 e si sono inizialmente concentrate soprattutto sulla ricostruzione virtuale del paesaggio antico (GUIDAZZOLI, FORTE 1992; FORTE 1993). Ben presto si iniziò invece a produrre dei modelli "locali" con scale di precisione via via maggiori in funzione dell'accuratezza degli strumenti di rilevamento topografico impiegati, finalizzati alla ricostruzione digitale delle superfici di singoli siti o contesti archeologici (CREMASCHI, FORTE 1999; SCARDOZZI 2007; sul rapporto tra DEM e interpretazione archeologica cfr. anche CAVADA, RAPANÀ 2010; SIAFI 2010 e GARCIA-LÁZARO, SALA-BALLESTER, FARJAS-ABADÍA 2010). Solo in un periodo relativamente recente le tecniche di rilievo fotogrammetrico nei cantieri archeologici hanno introdotto la possibilità di registrare con sempre maggiore facilità dati tridimensionali nella documentazione digitale di scavo vero e proprio (sull'applicazione del rilievo fotogrammetrico e sul confronto tra diverse tipologie di intervento cfr. da ultimo GABRIELLI, ANGELINI, PORTARENA 2015). La possibilità di creare modelli digitali di contesti spazialmente

³ <http://www.pcn.minambiente.it/GN/accesso-ai-servizi/servizi-di-download/wcs/>.

⁴ Le tipologie principali di interpolazione sono l'interpolazione triangolare (TIN, nota anche come Triangolazione Delaunay) e la distanza inversa ponderata (IDW). Sulle differenze tra queste due e sull'argomento in generale cfr. MITAS, MITASOVA 1999.

molto limitati ha portato così all'applicazione dei DEM anche nello studio e nella rappresentazione di bacini archeologici micro-stratigrafici (sul tema della fotogrammetria in ambito archeologico, cfr. FIORINI 2013; per l'uso dei DEM intra site cfr. HAGEMANN, BENNET 2000; per un esempio di applicazione anche in contesto microstratigrafico cfr. PUTZOLU, VICENZUTTO 2013).

Per quanto riguarda l'archeologia dell'architettura, invece, il rapporto tra modelli digitali (in questo caso DSM, Digital Surface Models) e interpretazione archeologica risulta meno battuto nella bibliografia specialistica. Buona parte dei contributi che hanno esposto i risultati di lavori sul patrimonio artistico e architettonico sono infatti incentrati sui temi della valorizzazione e della qualità della restituzione virtuale dei manufatti. Da qualche anno a questa parte, tuttavia, non mancano casi di applicazione dei modelli digitali in archeologia dell'architettura, con la finalità di ottenere un'interpretazione quanto più "olistica" della complessità stratigrafica di un edificio, che, dopo alcune prime applicazioni sperimentali, sono diventati veri e propri standard procedurali (FIORINI 2008; FIORINI, ARCHETTI 2011; FIORINI, URCIA, ARCHETTI 2011).

3. IL DEM IN CONTESTO DI SCAVO STRATIGRAFICO: CASI DI APPLICAZIONE PRATICA

Le prime applicazioni che si intendono esporre sono due esempi di scavi stratigrafici nei quali i prodotti DEM, gestiti in ambiente GIS, hanno permesso di facilitare le operazioni di rilievo archeologico. I modelli digitali sono stati prodotti mediante tecniche di rilievo Structure for Motion, una tecnologia da anni ben nota alle discipline archeologiche, il cui rapporto qualità/costi ha ormai determinato la loro massiccia diffusione nelle più varie possibilità applicative (per un confronto qualitativo sui diversi software nel rilievo Structure for Motion, cfr. GREEN, BEVAN, SHAPLAND 2014).

Per realizzare i rilievi ci si è appoggiati a dei punti topografici battuti in posizioni visibili durante tutte le fasi di scavo stratigrafico, tali da non richiedere una nuova battuta per ogni fase di documentazione. I tempi necessari alla realizzazione del post processing sono inoltre stati ulteriormente abbattuti tramite l'utilizzo di mire con riconoscimento automatico da parte del software impiegato (Agisoft PhotoScan Professional v.1.2.6). L'agilità nella realizzazione delle battute fotografiche ha infine permesso di registrare e rilevare lo scavo archeologico in ogni unità stratigrafica che componeva il contesto indagato.

3.1 *Castel Pizigolo (Toano, RE), scavo del castello e dell'abitato*

Il sito di Castel Pizigolo si colloca nella montagna della provincia di Reggio Emilia, nel comune di Toano, in prossimità del confine con la provincia di Modena, sulla sinistra orografica del torrente Dolo a circa 550 m s.l.m. Il toponimo è attestato nelle fonti archivistiche a partire dalla prima

metà dell'XI secolo, in un diploma dell'imperatore Corrado II, e ricordato nuovamente durante il regno di Federico I e nelle contese territoriali del XIII secolo che coinvolsero le truppe dei comuni di Modena e Reggio Emilia. Dopo la distruzione del castello fra XIV e XV secolo, rimase in vita solo l'edificio di culto, dedicato a S. Tommaso, che sopravvisse almeno fino all'anno 1624.

L'area in questione è stata oggetto di due campagne di scavo archeologico tra agosto 2015 e agosto 2016, da parte dell'Università di Bologna, durante le quali sono state riportate alla luce alcune strutture architettoniche relative alla chiesa, alla torre e a parte dell'abitato del castello⁵.

La natura orografica del sito ha richiesto come primo passo la realizzazione di un rilievo topografico complessivo, effettuato mediante una Stazione totale TCR 407 Leica. L'interpolazione triangolare dei punti così ottenuti ha permesso di ottenere un DTM generale sul quale rappresentare l'organizzazione interna del sito (Fig. 1). La realizzazione dei modelli digitali del terreno non ha interessato esclusivamente la scala topografica, ma è stata anche eseguita sui modelli tridimensionali delle singole aree di scavo e, in queste, su ogni modello digitale realizzato successivamente alla rimozione di ogni singola unità stratigrafica. È stato così possibile ricreare nel formato digitale un modello "in negativo" del bacino stratigrafico indagato.

L'utilità di tale metodologia è quella di poter registrare la complessità stratigrafica nella sua interezza. Tutti i modelli, creati all'interno dello stesso sistema di coordinate locali, possono essere gestiti contemporaneamente in qualsiasi GIS attraverso l'esportazione dei dati geometrici in DEM (gestiti attraverso il formato raster GeoTiff). In tal modo, oltre ai limiti planimetrici e a generiche quote di profondità, ogni strato può essere registrato nel suo volume totale.

Gestire insieme e contemporaneamente tutti questi volumi è possibile proprio grazie al formato di esportazione dei DEM, molto leggero e maneggevole agilmente da pressoché qualsiasi macchina, a differenza di altri formati contenenti informazioni tridimensionali.

Tra i vari campi di applicazione all'interno del sito di Castel Pizigolo si è scelto di descrivere quello relativo allo scavo di un edificio abitativo basomedievale. La struttura è stata individuata nell'area di scavo denominata "Area 7000", all'estremità occidentale del sito archeologico, probabilmente nella zona che anticamente costituiva un piccolo agglomerato residenziale a ridosso del castello. Il bacino stratigrafico individuato risulta molto mal conservato a causa della natura instabile e franosa del sottosuolo: di tutto

⁵ Il sito archeologico è ancora pressoché inedito. Si ringrazia il dott. Nicola Mancassola (direttore scientifico del progetto) per la disponibilità a usare alcuni dei dati di scavo nel presente articolo. Per un primo inquadramento del sito si veda la pagina Internet della Soprintendenza Archeologia, belle arti e paesaggio per la città metropolitana di Bologna e le province di Modena, Reggio Emilia e Ferrara (SABAP-BO): http://www.archeobologna.beniculturali.it/re_toano/castel_pizigolo_2015.htm.

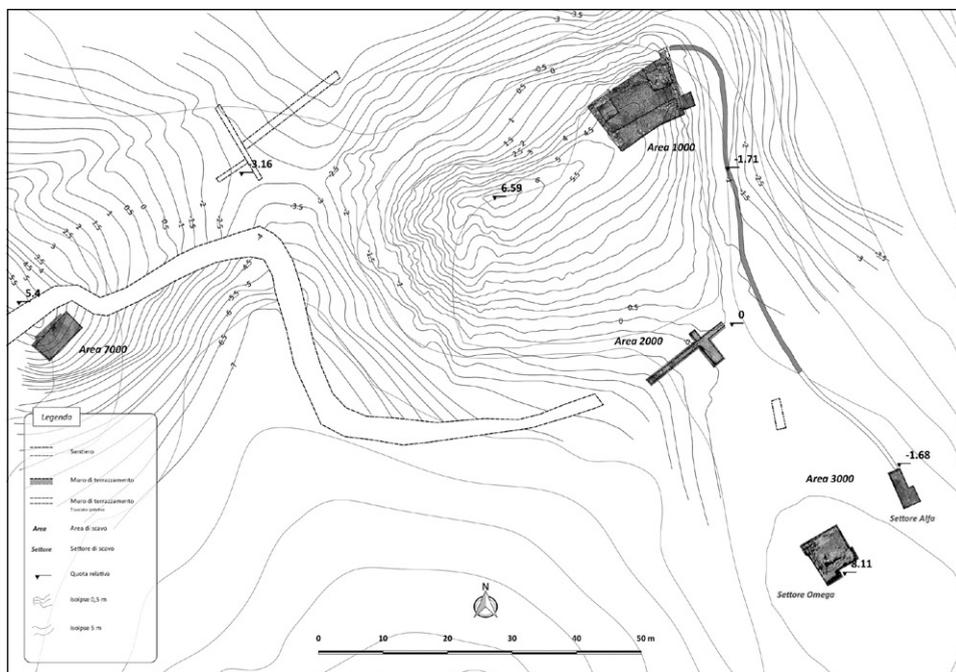


Fig. 1 – L'area archeologica di Castel Pizigolo (Toano, RE).

l'edificio si sono conservate solamente parte del perimetrale O e un'area interna di poco meno di 20 m². Quel che si è conservato del bacino stratigrafico ha però restituito materiali che testimoniano una chiara frequentazione del sito tra XIII e XIV secolo, compreso un piccolo tesoretto monetale rinvenuto in una nicchia murata della casa. Questi ritrovamenti sono stati possibili grazie ad un abbandono traumatico dell'edificio, probabilmente causato da un incendio che ne determinò il crollo.

Per la documentazione archeologica del settore si è scelto di usare control point esterni all'area di scavo. Tali punti sono stati utilizzati come base di appoggio per scalare e orientare i rilievi delle singole fasi di scavo, generalmente realizzati successivamente all'asportazione di ogni unità stratigrafica. Ciò è stato possibile grazie all'agilità delle tecniche di rilievo fotogrammetrico, che consentono di abbattere notevolmente i tempi di esecuzione rispetto ai metodi tradizionali. Per l'area 7000 di Castel Pizigolo si sono realizzati 5 rilievi, corrispondenti ad altrettante unità stratigrafiche positive. I DEM sono stati ottenuti sulla base di nuvole dense composte da 3 a 6,5 milioni di punti, con errori residui compresi tra un minimo di 2 e un massimo di 6 mm (Fig. 2). Il formato DEM ha consentito di tradurre in raster i dati relativi alle quote

di ogni singolo punto. Dunque, con questa metodologia, è possibile evitare di realizzare rilievi celerimetrici per le varie stratigrafie scavate, non essendo necessario registrare né i confini né le quote relative, potendo desumere tutti questi dati in fase di post processing, con i margini d'errore appena descritti che risultano ininfluenti per gli scopi del rilievo archeologico.

La maneggevolezza informatica del formato raster per i modelli di elevazione consente di poterne gestire una notevole quantità all'interno dello stesso ambiente GIS. Grazie a ciò è stato possibile importare in un unico progetto la complessità stratigrafica totale dell'area di scavo, rappresentata dalle cinque fasi di rilievo sopra descritte. A queste è stato sovrapposto uno strato vettoriale lineare con la funzione di sezione generale dell'area. Attraverso un qualsiasi plugin di interrogazione topografica è possibile infine intersecare il vettore lineare in contemporanea con tutti gli strati raster (e i relativi dati altimetrici) che questo intercetta e produrre così una visualizzazione cumulativa dei profili dell'area in ogni singola fase di scavo secondo le quote reali, ovvero, una sezione volante generata automaticamente mediante le tecniche di rilievo Structure for Motion e la loro rappresentazione DEM (Fig. 3). L'intero processo è ripetibile con qualsiasi strato vettoriale lineare, consentendo così di ricostruire i profili, le quote e gli ingombri (ovvero i volumi) dell'intera stratigrafia asportata in fase di scavo.

3.2 Riva Ligure (IM), Basilica paleocristiana di Capo Don

Il sito archeologico di Riva Ligure (IM) è un'area pluristratificata con frequentazioni comprese tra l'età romana tardo-repubblicana e il basso-medioevo. Le prime attività archeologiche iniziarono negli anni '40 del Novecento ad opera di Nino Lamboglia e furono riprese successivamente da diverse campagne eseguite dal Pontificio Istituto di Archeologia Cristiana (PIAC) e della Soprintendenza Archeologica della Liguria. In tempi recenti, a partire dal 2009 fino ad oggi, le attività hanno visto altre sei campagne di scavo ad opera del PIAC (sul sito e sulla storia degli scavi cfr. LAMBOGLIA 1942; MARTINO 1989; PERGOLA *et al.* 1989; FRONDONI, DE VINGO, GAMBARO 2013; CAGNANA, GAMBARO 2015; PERGOLA *et al.* 2015; PERGOLA, GARRISI, DELLÙ 2015).

L'evidenza principale è un grande edificio di culto, orientato liturgicamente, organizzato in tre navate e monoabsidato, emerso durante i lavori di costruzione dell'adiacente via Aurelia all'inizio del secolo scorso. L'edificio fu datato alla prima metà del VI secolo oltre che per la tipologia del fonte battesimale, anche grazie allo scavo archeologico concentrato nella zona del narcece e in quella absidale, nella quale furono individuate tre absidi concentriche relative ad altrettante fasi edilizie della basilica tra età paleocristiana e medioevo.

Solo nelle ultime campagne di scavo l'attività si è concentrata all'esterno della chiesa, dove, dal 2015, è iniziato lo scavo di un ambiente esterno a

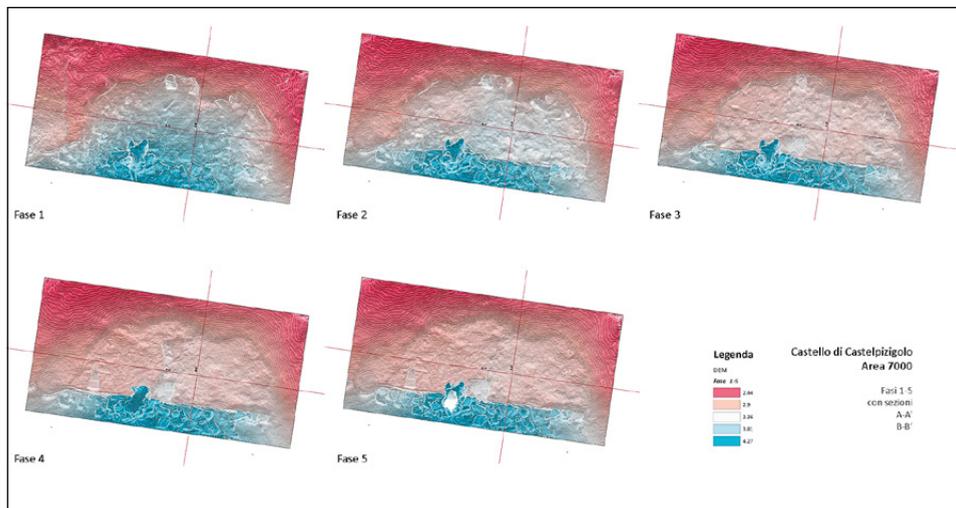


Fig. 2 – Area 7000, rappresentazione DEM delle varie fasi di scavo archeologico.

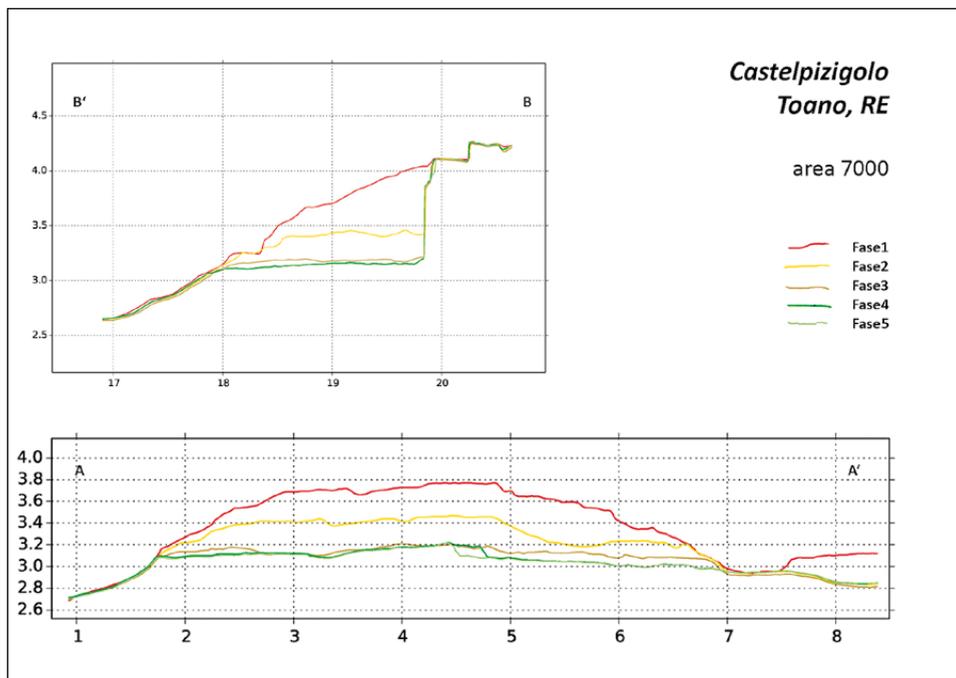


Fig. 3 – Area 7000, rappresentazione DEM delle varie fasi di scavo archeologico.

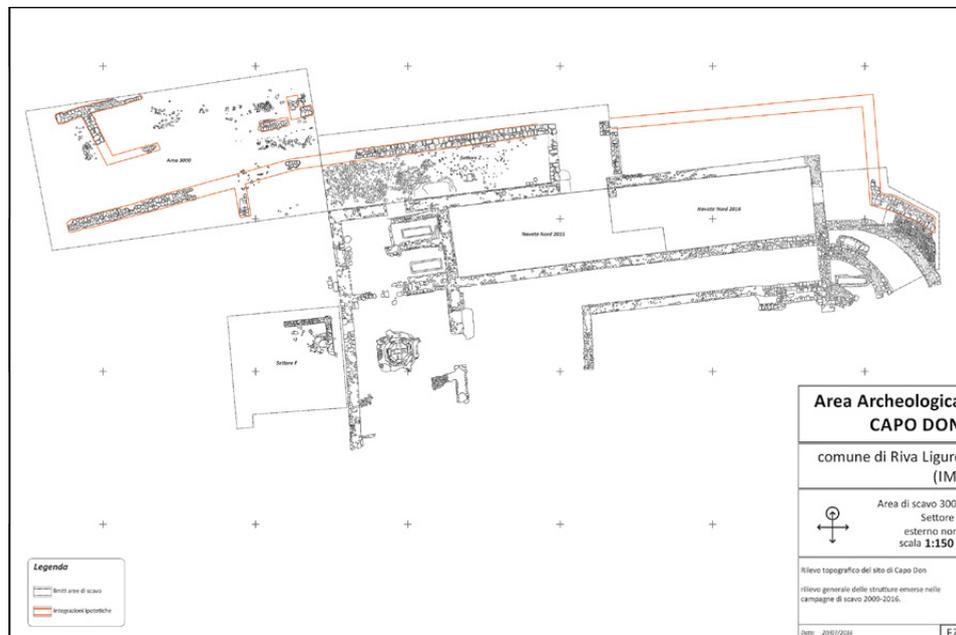


Fig. 4 – L’area archeologica di Capo Don (Riva Ligure, IM).

ridosso del perimetrale N (Settore Z) (Fig. 4). Questa struttura insisteva su un precedente percorso esterno alla basilica che fu rioccupato, in età altomedievale, da alcune aree produttive. In particolare, una calcara reimpiegava marmi e altri frammenti lapidei della chiesa per la produzione di calce necessaria, probabilmente, al primo significativo cantiere di restauro della chiesa. Successivamente, l’area fu convertita a una destinazione d’uso diversa, forse residenziale, e su quanto rimaneva del fondo della precedente calcara fu impostato un focolare domestico.

Le tecniche di rilievo finalizzate a produrre il DEM di ogni fase stratigrafica, oltre che in tutto il saggio di scavo, sono state applicate in particolar modo in questa struttura pluristratificata, denominata *focolare 1*. La continuità di frequentazione sopra descritta si concretizza in otto unità stratigrafiche (positive e negative) alle quali hanno corrisposto altrettante battute di rilievo fotogrammetrico (Fig. 5). I vantaggi nell’uso di questa tecnica di documentazione, già abbondantemente descritti, si sono rivelati particolarmente utili in questo contesto, dove un notevole risparmio in tempo esecutivo ha consentito uno scavo vero e proprio più agile e veloce.

Le battute fotogrammetriche hanno prodotto nuvole dense composte da 500 mila a 1 milione di punti, scalate e orientate con 4 punti topografici

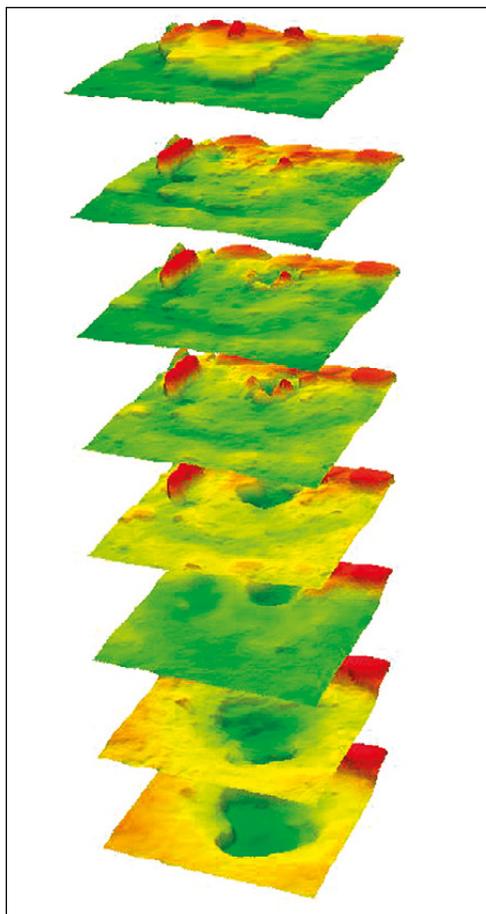


Fig. 5 – Settore Z, focolare 1, rappresentazione DEM delle varie fasi di scavo archeologico su diverse base heights.

di appoggio esterni all'area di scavo. La scala ridotta dell'oggetto rilevato ha consentito un maggiore controllo nella qualità dei modelli realizzati, per i quali l'errore residuo medio si è mantenuto su valori sub-millimetrici.

Come nel caso già descritto di Castel Pizigolo, ogni rilievo è stato finalizzato all'esportazione di DEM in formato raster che consentissero di gestire le informazioni tridimensionali direttamente in ambiente GIS. Anche per il focolare di Riva Ligure, l'intersezione di questi prodotti con uno shape lineare permette di ricreare *ex post* l'intero bacino stratigrafico in automatico, secondo ogni possibile linea di sezione (Fig. 6). Oltre all'evidente risultato

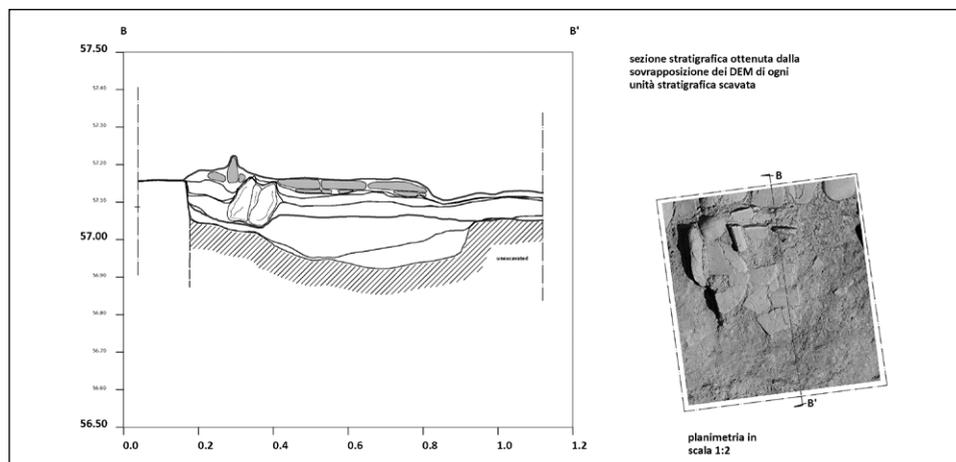


Fig. 6 – Settore Z, focolare 1, planimetria della prima fase ed elaborazione automatica (caratterizzata) delle varie fasi di scavo in relazione alla sezione B-B'.

nell'economia di cantiere, il prodotto finale generato dalla sovrapposizione dei profili di tutte le attività di scavo ha reso più facile l'interpretazione archeologica, facilitando l'associazione dei vari riempimenti scavati con la stratigrafia esterna associata, dividendo così le fasi caratterizzate da un uso domestico del punto di fuoco da quelle più antiche, propriamente produttive e databili grazie ai rinvenimenti emersi negli strati circostanti.

4. IL DEM NELLO STUDIO ARCHEOLOGICO DEGLI ELEVATI

Come s'è già detto, i prodotti DEM hanno avuto, rispetto all'archeologia da scavo, un'applicazione molto inferiore nello studio stratigrafico di edifici ancora in elevato, campo ancor oggi poco esplorato. A differenza degli strati di terreno, i prospetti degli edifici indagati sono stati caratterizzati con una simbologia a falso colore che rappresentasse il loro stato di fatto attuale rispetto a un piano esattamente verticale. È stato così possibile, a livello di interpretazione archeologica, ragionare oltre che sulle più tradizionali evidenze stratigrafiche, caratterizzate dai materiali impiegati e dalle tecniche costruttive (per i metodi e l'analisi archeologica degli edifici cfr. BROGIOLO 1988 e, da ultimo, BROGIOLO, CAGNANA 2012) anche sulla deformazione delle murature, spie in alcuni casi di mutamenti stratigrafici dell'edificio altrimenti poco leggibili, o sulle stratigrafie di rivestimento, come le fodere murarie. È emerso, attraverso questo sistema di analisi, uno stretto rapporto tra lo stato strutturale attuale degli edifici e la stratificazione archeologica che su di essi è andata accumulandosi, dato particolarmente importante in funzione, ad esempio, di

un cantiere di restauro o della valutazione sismica degli edifici pertinenti al patrimonio culturale (sul rapporto tra archeologia dell'architettura e rischio sismico cfr. BROGIOLO 2008; BROGIOLO, FACCIO 2010).

4.1 Rab (Croazia), edilizia residenziale del centro storico

Durante la summer school internazionale *Digital recording, study and public sharing of historical architectures*, organizzata dall'Università di Padova e svoltasi tra il 27 settembre e il 3 ottobre 2015, è stata avviata una campagna di censimento dell'edilizia residenziale del centro storico dell'isola di Rab⁶. Un edificio in particolare, in direzione del limite E della città, attribuibile cronotipologicamente a una delle prime fasi di espansione urbanistica dell'antico abitato, è stato documentato con le tecniche di rilievo Structure for Motion, con particolare attenzione per il prospetto affacciato sul fronte strada (Fig. 7).

Oltre all'analisi stratigrafica dell'elevato, che ha mostrato come l'edificio originale sia stato trasformato nel corso dei secoli attraverso l'apertura di nuove finestre, il tamponamento di altre e la ricostruzione di alcune porzioni di muratura, il prospetto è stato studiato proiettandolo su un piano "zero" rappresentato da una superficie ideale in perfetto squadro passante per la mediana del suo spessore. In tal modo è stato possibile rappresentare graficamente un'elevata criticità statica dovuta a un fenomeno di forte spianamento del muro (Fig. 8). Nell'angolo inferiore sinistro la deformazione era visibile di per sé a occhio nudo, mentre nella porzione centrale è stata enfatizzata dalla rappresentazione DEM del prospetto, mostrando così con maggior chiarezza la reale estensione del fenomeno. Tale strumento può risultare utile nella valutazione della statica generale dell'edificio finalizzata, ad esempio, ad un eventuale cantiere di restauro. Su un piano prettamente archeologico, invece, il dato è particolarmente significativo se messo in relazione all'analisi stratigrafica. Si può notare infatti come il punto di maggiore criticità statica si concentri in prossimità di un'unità negativa dovuta alla spogliazione degli stipiti di una finestra pertinente alla prima fase costruttiva dell'edificio, successivamente tamponata. Questa attività deve aver comportato un cedimento graduale, enfatizzatosi nel corso del tempo, che ha portato all'attuale stato di deformazione generale della struttura, estesosi successivamente a tutta la porzione centrale del prospetto.

All'opposto, un arretramento rispetto al piano ideale della parete nella porzione più elevata potrebbe testimoniare una fase di ricostruzione e di innalzamento della casa rispetto al progetto iniziale, in relazione al quale la muratura non risulta esattamente "a filo". Archeologicamente l'interpretazione

⁶ Si ringraziano per la disponibilità al trattamento dei dati gli organizzatori prof. Gian Pietro Brogiolo e prof.ssa Alexandra Chavarria Arnau.

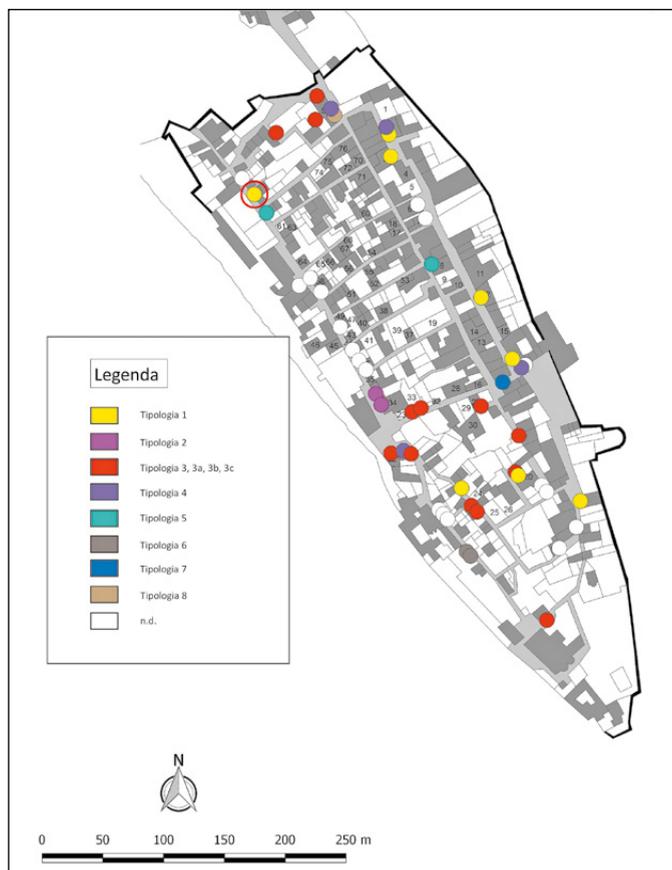


Fig. 7 – Rab (Croazia), centro storico con indicazione delle cronotipologie individuate e dell'edificio oggetto d'indagine (base GIS elaborata da F. Giacomello, rielaborata dall'autore).

sembra coerente se messa in relazione a un'unità stratigrafica caratterizzata da elementi costruttivi del tutto simili per forma e materiale a quelli della prima fase ma messi in opera con minor regolarità, con giunti e letti di posa di maggior spessore, il che potrebbe essere spiegato con una seconda fase edilizia che ha almeno parzialmente reimpiegato materiali della prima.

4.2 S. Giusto alla Caipiria (Marlia, LU), chiesa altomedievale

La chiesa di S. Giusto alla Caipiria è un piccolo edificio di culto che ricade nella diocesi di Lucca, all'interno del piviere di Marlia. La prima attestazione documentaria certa è dell'anno 987, quando venne rogato un atto



Fig. 8 – Rab (Croazia), edificio residenziale medievale: a) ortomosaico del prospetto E; b) analisi stratigrafica; c) rappresentazione DSM; d) curve di livello rispetto a un piano ideale esattamente verticale.

in loco et finibus Marilla ... prope eccl. S. Justi (BARSOCCINI 1837-1841, III, doc. n. 1184, p. 101.). Nella storia degli studi all'edificio sono state attribuite, in relazione alla sua fondazione, diverse cronologie comprese tra l'VIII e il X secolo (QUIROS CASTILLO 2002, 69-72, e, da ultimo, BIANCHI 2008, 31).

L'edificio attuale (Fig. 9) presenta una stratificazione architettonica compresa tra l'altomedioevo e l'età moderna. Dell'impianto più antico rimangono la planimetria generale, la maggior parte dei perimetrali N e S e un archetto reimpiegato nella monofora absidale, ricostruita nella seconda fase edilizia. Quest'ultima ha interessato la riedificazione dell'abside e della facciata con una tecnica costruttiva in *opus quadratum* che consente di datarla intorno al

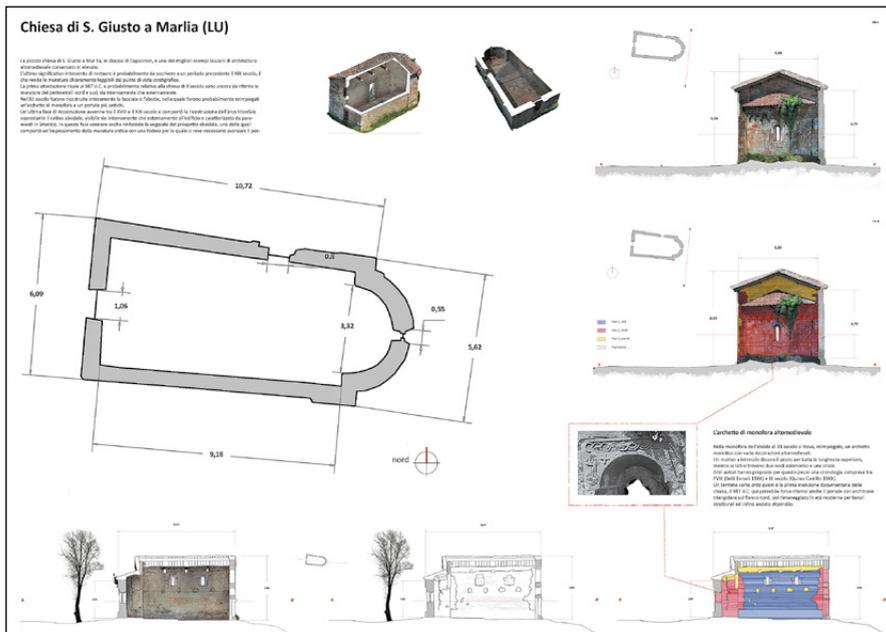


Fig. 9 – Chiesa di S. Giusto, Marlia (LU), tavola generale.

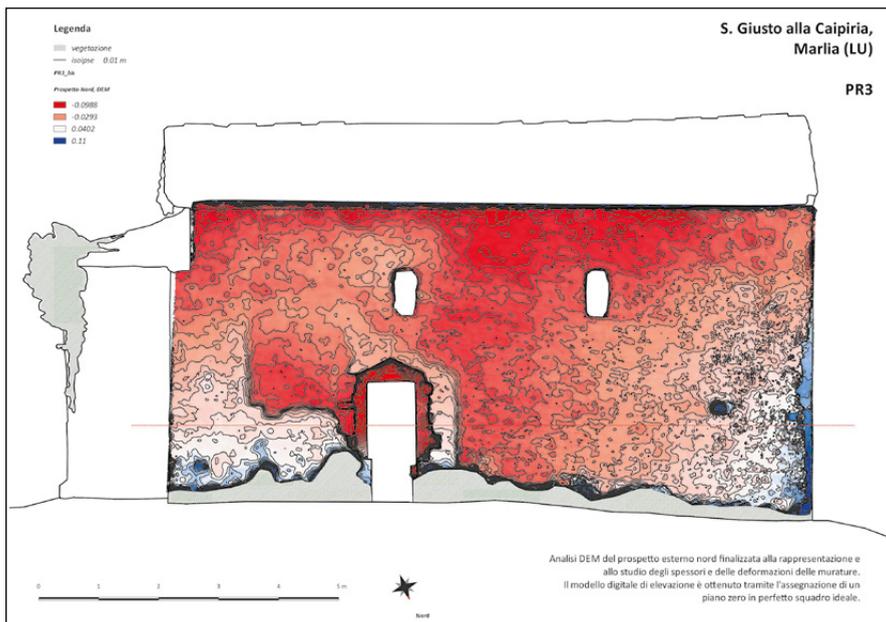


Fig. 10 – Chiesa di S. Giusto, Marlia (LU), rappresentazione DSM del prospetto esterno N.

XII secolo. Altri rifacimenti si riscontrano nella zona absidale dove alcuni rinforzi e rifacimenti di porzioni di muratura sono stati interpretati come restauri finalizzati a contenere le deformazioni dovute alle ricostruzioni d'età romanica. In relazione a questo rifacimento è stato interpretato anche il portale del prospetto N in direzione dell'abside, caratterizzato da un architrave definito "a timpano", oggi perduto e attribuito cronologicamente ai secoli XIV o XV.

Nell'estate 2016 è stato realizzato uno studio *ex novo* dell'edificio finalizzato ad un suo approfondimento monografico⁷. Un primo rilievo celerimetrico ha consentito di stabilire alcuni punti fissi sul monumento, rilevati tramite 26 checkboard utilizzati per scalare e orientare il modello tridimensionale realizzato con metodo fotogrammetrico. Il lavoro generale è stato organizzato secondo due battute, una esterna e una interna, allineate successivamente in un unico progetto così da ottenere un modello generale dell'edificio costituito da 6,6 milioni di punti con un errore residuo pari a 0,5 mm. Per analizzare la deformazione delle murature si è applicata una caratterizzazione a falso colore che rappresentasse le diverse distanze del paramento da un ideale piano esattamente verticale, passante per la mediana dello spessore del muro. In tal modo è stato possibile ragionare sugli spessori delle murature e porre in relazione tale dato con la lettura stratigrafica. Il prospetto sul quale è risultato particolarmente utile questo tipo di approccio è il prospetto esterno N (Fig. 10): in studi precedenti il portale che si apre su questo perimetrale è stato considerato in fase con la ricostruzione del paramento in direzione della zona absidale, interpretato come un restauro necessario a compensare i problemi statici causati dalla fabbrica romanica. In realtà, analizzando gli spessori, si può notare come questa stratigrafia non sia un vera e propria ricostruzione del paramento, bensì un'applicazione di una fodera muraria che solo in alcuni punti ha comportato lo smontaggio del precedente paramento.

Si tratta quindi di un ispessimento finalizzato a contenere il cedimento dell'angolo NE della struttura. Il portale, che come si è già detto fu interpretato in fase con questo cantiere, risulta in realtà coerente con la muratura sottostante. Dall'analisi stratigrafica del corrispettivo prospetto interno è infatti evidente come l'apertura fosse parte del primo edificio, in fase con una muratura a giunti stilati che pone in contemporaneità stratigrafica i perimetrali N e S, il portale Nord e le finestre a monofora con archetto monolitico. L'attribuzione di questa fase al cantiere più antico è possibile in quanto l'aggiunta di XII secolo taglia completamente questa rifinitura superficiale, che non si ritrova in nessuna delle fasi di

⁷ Il rilievo, realizzato da chi scrive, è stato fatto in occasione di una campagna di ricognizioni dell'edilizia altomedievale lucchese condotta insieme al dott. Gabriele Castiglia.

ricostruzione successive. Esternamente, oltre allo spessore aumentato della muratura, si nota, grazie alla spoliatura dell'architrave triangolare, come il portale sia stato avanzato rispetto al paramento antico tramite lo smontaggio e l'inserimento di zeppe in laterizio del tutto simili a quelle impiegate nel cantiere moderno. Sul lato sinistro è ancora possibile notare parte dell'antico stipite, defunzionalizzato dopo l'avanzamento finalizzato a raccordare armonicamente l'antico portale e la moderna fodera muraria. Probabilmente questa attività fu contemporanea alla ricostruzione in laterizi dell'arco trionfale soprastante il catino absidale, insistente negli stessi punti di criticità statica.

L'analisi DEM ha dunque consentito di trovare una conferma interpretativa riguardo all'applicazione della fodera muraria che ha determinato la necessità di avanzare un portale più antico, modificando così l'attribuzione cronotipologica di questo elemento architettonico, che trova riscontri in altri casi attualmente ancora oggetto di studio⁸.

5. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Lo standard procedurale applicato nei diversi casi di studio per la creazione dei modelli tridimensionali, finalizzati alla realizzazione dei modelli digitali di elevazione, ha mostrato diversi punti di forza nel facilitare la documentazione archeologica.

Nello scavo in open area, l'utilizzo di mire fisse esterne all'oggetto d'indagine consente di abbattere i costi di cantiere e le complessità logistiche, riducendo al minimo la necessità di strumenti di rilievo topografico. I punti battuti una prima volta, in modo da risultare evidenti in tutte le fasi di rilievo, consentono di risparmiare, ad esempio, su eventuali costi legati alla strumentazione, come il noleggio di stazioni totali o simili. Altre informazioni geometriche e topografiche dei singoli strati (come le quote e le dimensioni areali) possono essere estrapolate indirettamente in fase di post processing, con un grado di errore ininfluenza agli scopi archeologici. Viene così anche ad abbattersi la variabile umana dell'errore. Ciò che si rende necessario con questo approccio è una maggiore progettualità nell'apprestamento del cantiere archeologico.

Un altro punto particolarmente utile è quello della ricostruzione virtuale di tutto il bacino stratigrafico asportato. I vantaggi sono almeno due: un modello generale di tutte le unità stratigrafiche scavate può essere utilizzato per la comunicazione in fase di valorizzazione, in particolare in contesti

⁸ In questo senso, anche l'autore della precedente analisi stratigrafica Juan Antonio Quiros Castillo attribuisce una cronologia tarda con «una certa prudenza, giacché nel caso della lucchesia ancora non è nota la data iniziale della suddetta tipologia d'apertura» (QUIROS CASTILLO 2002, 72, nota 19).

che non presentano significative emergenze architettoniche in elevato e che risultano, dunque, di particolare difficoltà comunicativa a un pubblico non esperto. Inoltre, per scopi più propriamente archeologici, collegare il volume totale del terreno rimosso con la stratigrafia rilevata può risultare utile per aiutare a definire dei preventivi economici, soprattutto quando richiesti in funzione della complessità stratigrafica.

Infine, ciò che si ritiene un campo con ancora buone possibilità di sperimentazione è quello relativo all'uso dei DEM applicati allo studio degli elevati. Una prospettiva futura potrebbe essere quella della relazione dello stato rilevato (*as-built*) con lo stato ideale del bene culturale indagato o da restaurare. L'applicazione potrebbe essere particolarmente utile se correlata a un progetto esecutivo realizzato con tecnologia BIM, fornendo ulteriori dati desunti dalla lettura stratigrafica insieme alla deformazione generale di un edificio. Questo dato potrebbe essere paragonato allo stato ideale di progettazione al pari di come, ad oggi, viene monitorato il rapporto tra progettato e costruito nello stato reale (sull'utilizzo della fotogrammetria nella documentazione dello stato di fatto nei cantieri edilizi cfr. TUTTAS *et al.* 2014, 2015). La deformazione causata dalle lesioni accumulate su un edificio nel corso del tempo potrebbe essere del tutto paragonata a una difformità tra progettato e costruito, con la possibilità, per l'archeologo, di porsi come interprete nell'analisi delle cause (stratigrafiche) che ne hanno determinato lo stato attuale.

FEDERICO ZONI

Dipartimento di Storia Culture Civiltà
Alma Mater Studiorum - Università di Bologna
federico.zoni3@unibo.it

BIBLIOGRAFIA

- BARSOCCHINI D. 1837-1841, *Raccolta di documenti per servire all'istoria ecclesiastica lucchese*, in *Memorie e documenti per servire all'istoria del ducato di Lucca*, Lucca.
- BIANCHI G. 2008, *Costruire in pietra nella Toscana medievale. Tecniche murarie dei secoli VIII-inizio XII*, «Archeologia Medievale», 35, 23-38.
- BROGIOLO G.P. 1988, *Archeologia dell'edilizia storica*, Como, New Press.
- BROGIOLO G.P. 2008, *Procedure di documentazione e processi interpretativi dell'edilizia storica alla luce delle linee guida per la valutazione del rischio sismico del patrimonio culturale*, «Archeologia Medievale», 13, 9-13.
- BROGIOLO G.P. 2015, *Some principles and methods for a stratigraphic study of historic landscapes*, in A. CHAVARRIA ARNAU, A. REYNOLDS (eds.), *Detecting and Understanding Historic Landscapes*, Mantova, SAP Società archeologica, 359-386.
- BROGIOLO G.P., CAGNANA A. 2012, *Archeologia dell'architettura. Metodi e interpretazioni*, Firenze, All'Insegna del Giglio.
- BROGIOLO G.P., FACCIO P. 2012, *Stratigrafia e prevenzione*, «Archeologia dell'Architettura», 15, 55-63.

- CAGNANA A., GAMBARO L. 2015, *La basilica funeraria e battesimale di Capo Don (Riva Ligure-IM). Nuove ipotesi sulla sequenza delle fasi costruttive dalla tarda età imperiale all'età post-medievale*, in R. MARTORELLI, A. PIRAS, P.G. SPANU (eds.), *Atti dell'XI Congresso Nazionale di Archeologia Cristiana (Cagliari 2014)*, Cagliari, PFTS University Press, 847-852.
- CAVADA E., RAPANÀ M. 2010, *Ruderi riletti: approccio e problemi di modellazione tridimensionale nel sito archeologico di Monte San Martino (progetto SMA LL-Trentino sudoccidentale)*, «Archeologia e Calcolatori», 21, 145-165.
- CREMASCHI M., FORTE M. 1999, *Reconstructing a fossil landscape by Remote Sensing and GIS applications: Sites, virtual models and territory during the Middle Bronze Age in the Po Plain (Northern Italy)*, «Archeologia e Calcolatori», 10, 207-225.
- CRUTCHLEY S. 2015, *Using airborne Lidar in interpreting archaeological landscapes*, in A. CHAVARRIA ARNAU, A. REYNOLDS (eds.), *Detecting and Understanding Historic Landscapes*, Mantova, SAP Società archeologica, 67-92.
- DE GUIO A. 2015, *Nuove linee di ricerca fra archeologia pre-dittiva e post-dittiva*, in A. CURCI, A. FIORINI (eds.), *Documentare l'archeologia 4.0: Strumenti e metodi per la costruzione di banche dati territoriali (Bologna 2014)*, «Archeologia e Calcolatori», 26, 301-313.
- FIORINI A. 2008, *Esperienze di fotomodellazione e stereofotogrammetria archeologica*, in G. VOLPE, G. DE FELICE, M.G. SIBILANO (eds.), *L'informatica e il metodo della stratigrafia, Atti del Workshop (Foggia 2008)*, Bari, Edipuglia, 175-186.
- FIORINI A. 2013, *Nuove possibilità della fotogrammetria. La documentazione archeologica del nuraghe di Tanca Manna (Nuoro)*, in A. CURCI, A. FIORINI (eds.), *Documentare l'archeologia 3.0 (Bologna 2013)*, «Archeologia e Calcolatori», 24, 341-354.
- FIORINI A., ARCHETTI V. 2011, *Fotomodellazione e stereofotogrammetria per la creazione di modelli stratigrafici in archeologia dell'architettura*, «Archeologia e Calcolatori», 22, 199-216.
- FIORINI A., URZIA A., ARCHETTI V. 2011, *The digital 3D survey as standard documentation of the archaeological stratigraphy*, in M. DELLEPIANE, F. NICCOLUCCI, S. PENA SERNA, H. RUSHMEIER, L. VAN GOOL (eds.), *VAST 2011. The 12th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage (Prato 2011)*, Goslar, Eurographics Association, 145-152.
- FORTE M. 1993, *Un esperimento di visualizzazione scientifica per l'archeologia del paesaggio: la navigazione nel paesaggio virtuale*, «Archeologia e Calcolatori», 4, 137-152.
- FRONDONI A., DE VINGO P., GAMBARO L. 2013, *La basilica paleocristiana e l'area archeologica di Riva Ligure (IM): gli ultimi risultati di scavo*, in S. CRESCI, J. LOPEZ QUIROGA, O. BRANDT, C. PAPPALARDO, *Atti del XV Congresso Internazionale di Archeologia Cristiana (Toledo 2008)*, Città del Vaticano, PIAC, 1279-1302.
- GABRIELLI R., ANGELINI A., PORTARENA D. 2015, *Strategie innovative di elaborazione e restituzione dati del castello crociato di Wu' Ayra*, «Archeologia e Calcolatori», 26, 209-227.
- GARCIA-LÁZARO F.J., SALA-BALLESTER P., FARJAS-ABADÍA M. 2012, *Morphometric analysis of engravings from photogrammetric point cloud data*, «Archeologia e Calcolatori», 23, 135-150.
- GREEN S., BEVAN A., SHAPLAND M. 2014, *A comparative assessment of Structure from Motion methods for archaeological research*, «Journal of Archaeological Science», 46, 173-181.
- GUIDAZZOLI A., FORTE M. 1992, *Archeologia e tecniche di eidologia informatica*, «Archeologia e Calcolatori», 3, 37-76.
- HAGEMANN J.B., BENNET D.A. 2000, *Construction of digital elevation models for archaeological applications*, in K.L. WESCOTT, R.J. BRANDON (eds.), *Practical applications of GIS for Archaeologists. A Predictive Modeling Kit*, London, Taylor & Francis, 111-127.

- HUTCHINSON M., GALLANT J.C. 1999, *Representation of terrain*, in P. LONGLEY, M.F. GOODCHILD, D.J. MAGUIRE, D.W. RHIND (eds.), *Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications*, New York, Wiley, 105-124.
- HUTCHINSON M., GALLANT J.C. 2000, *Digital Elevation Models and representation of terrain shape*, in J.P. WILSON, J.C. GALLANT (eds.), *Terrain Analysis: Principles and Applications*, New York, Wiley, 29-50.
- LAMBOGLIA N. 1942, *Nuovi scavi a Taggia e a Sanremo*, «Rivista di Studi Liguri», 8, 25-30.
- MARTINO G.B. 1989, *L'area archeologica di Costa Balenae*, in *Atti dell'XI Congresso Internazionale di Archeologia Cristiana (Lyone-Vienne-Grenoble-Genève-Aosta 1986)*, Città del Vaticano, PIAC, 2267-2269.
- MITAS L., MITASOVA H. 1999, *Spatial interpolation*, in P. LONGLEY, M.F. GOODCHILD, D.J. MAGUIRE, D.W. RHIND (eds.), *Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications*, New York, Wiley, 481-492.
- PERGOLA PH., GARRISI A., DELL'È E. 2015, *Il complesso paleocristiano di Capo Don a Riva Ligure (campagna di scavo in concessione al Pontificio Istituto di Archeologia Cristiana del 2014)*, «Rivista di Archeologia Cristiana», 90, 381-412.
- PERGOLA PH., BATTISTELLI P., COCCHINI F., GIACOBELLI M., LORETI E.M., MARTORELLI R. 1989, *Nuove ricerche sul complesso cristiano tardoantico ed altomedievale di Capo Don a Riva Ligure*, «Bollettino d'Arte», 55, 45-56.
- PERGOLA PH., GARRISI A., ROASCIO S., DELL'È E., CASTIGLIA G. 2015, *Presenze cristiane nella Liguria di Ponente: i casi di Capo Don (Riva Ligure) e San Calocero (Albenga)*, in P. ARTHUR, M. LEO IMPERIALE (eds.), *Atti del VII Congresso Nazionale di Archeologia Medievale*, Firenze, All'Insegna del Giglio, 158-163.
- PUTZOLU C., VICENZUTO D. 2013, *Il rilievo delle superfici tramite fotogrammetria 3D: dal microscavo dei complessi tombali agli scavi in open area*, «Archeologia e Calcolatori», 24, 355-370.
- QUIROS CASTILLO J.A. 2002, *Modi di costruire a Lucca nell'altomedioevo. Una lettura attraverso l'archeologia dell'architettura*, Firenze, All'Insegna del Giglio.
- SCARDOZZI G. 2007, *Hierapolis di Frigia. Applicazioni informatiche alle ricognizioni archeologiche e telerilevamento da satellite: l'esempio degli acquedotti della città*, «Archeologia e Calcolatori», 18, 331-353.
- SIAFI S. 2010, «*L'intervisibilità*»: *application à la région de la Tolfa-Allumiere*, «Archeologia e Calcolatori», 21, 167-183.
- TUTTAS S., BRAUN A., BORRMANN A., STILLA U. 2014, *Comparison of photogrammetric point clouds with BIM building elements for construction progress monitoring*, «The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», 40, 3, 341-345.
- TUTTAS S., BRAUN A., BORRMANN A., STILLA U. 2015, *Validation of BIM components by photogrammetric point clouds for construction site monitoring*, «ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», Suppl. W4, II.3, 231-237.

ABSTRACT

This paper describes a procedure of archaeological interpretation and representation based on DEM technology. Through different contexts of application the aim is to describe the potential of this procedure, useful for recreating all the stratigraphic complexity of an archaeological site. After an introduction and a short history of studies about the use of DEM in archaeological documentation, the Author illustrates two examples of archaeological excavation and two of archaeology of architecture. The first case study is the Castle of Castelpizigolo (Toano, RE): the DEM documentation was used for the production of automatic profile lines of every archaeological stratification. A similar result was obtained in

the documentation of the second archaeological context, the site of Capo Don (Riva Ligure, IM). The subject of this investigation was a fireplace dating from Late Antiquity to the early medieval period. The second part was focused on the use of DEM in the archaeological analysis of buildings. A preliminary investigation was focused on an example of household architecture from the island of Rab (Croatia). The DEM was used for the interpretation of the origins of some architectural instabilities, caused by stratigraphic changes which occurred in the original building. The last case study was the rural church of S. Giusto in Marlia (LU), where DEM analysis gave a new interpretation about the archaeological evolution of this building. The procedure described in this paper is an innovative method for producing a faster and more accurate archaeological documentation and for giving a new archaeological tool for the stratigraphic interpretation of historical buildings.