

IL RILIEVO FOTOGRAMMETRICO DI DOCLEA

1. INTRODUZIONE

La fotogrammetria è un metodo di rilievo che permette di ottenere informazioni metriche tridimensionali di un oggetto o di un territorio, a partire dall'analisi di riprese fotografiche (da diapositive o pellicole) o da una serie di immagini digitali acquisite da differenti punti di vista. È evidente come la fotogrammetria, nelle sue varie applicazioni, abbia assunto un ruolo di primaria importanza nell'ambito specifico del rilievo e della rappresentazione dedicati alla documentazione, alla conservazione e al restauro del patrimonio culturale (HISTORIC ENGLAND 2017)¹.

Occorre inoltre sottolineare come l'aerofotogrammetria di prossimità, intesa come l'evoluzione degli strumenti per il rilievo territoriale, consenta di superare proficuamente le problematiche legate al lavoro svolto su aree di vaste dimensioni o avendo a disposizione tempi e mezzi limitati. I progressi tecnologici hanno spinto gli operatori in ambito archeologico e della conservazione dei beni culturali ad adottare tecniche speditive per il rilievo e la restituzione di manufatti e siti, a cui si accompagnano nuove opportunità di gestione e archiviazione dei dati digitali raccolti (cfr. da ultimo GALLI *et al.* 2019; VILICICH, MORIGI, RINALDI 2019). Oltre alla velocità di esecuzione, i nuovi strumenti di rilevamento permettono di raggiungere un ottimo livello di accuratezza, in special modo nel caso di utilizzo, per l'acquisizione dei dati, di un drone equipaggiato con una telecamera ad alta risoluzione, in grado di fornire inquadrature, tempi e modi di ripresa altrimenti impensabili (CAMPANA 2017).

Le elevate caratteristiche dei programmi Structure from Motion (SfM), unite alle potenzialità di realizzazione di modelli tridimensionali coerenti, desunti da collezioni di immagini digitali (LAFARGE, MALLET 2012; HAALA 2013), garantiscono la completezza e la scientificità dell'intervento di rilievo. Lo sviluppo tecnologico ha favorito inoltre l'integrazione tra il rilievo fotografico e la resa grafica della rappresentazione cartografica, grazie al rilascio di una grande quantità di programmi atti a risolvere problematiche di diversa natura, come i vettorializzatori, i raddrizzatori di immagini fotografiche, i

¹ La bibliografia relativa all'applicazione delle tecniche fotogrammetriche in archeologia è oggi molto ampia e ha subito un'evoluzione esponenziale grazie alla diffusione di nuovi e sofisticati strumenti di acquisizione ed elaborazione dei dati. Facendo riferimento a quanto pubblicato su questa rivista, il primo contributo sui metodi di fotogrammetria per l'archeologia risale al 1992 (PICCARRETA 1992). Come risulta dallo strumento "Search" messo a disposizione nel sito web della rivista (<http://www.archcalc.cnr.it/pages/search.php>), gli articoli dedicati a questa specifica tecnica di rilievo archeologico sono oltre 70.

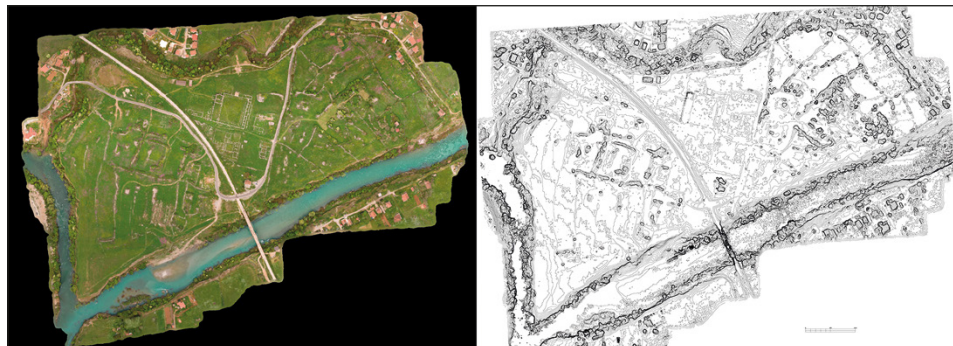


Fig. 1 – Ortofoto dell'area e isolinee del terreno ricavate dal modello tridimensionale.

foto-modellatori e i modellatori tridimensionali. Data la quantità di strumenti disponibili, sta alle competenze e all'impegno del ricercatore la scelta della migliore applicazione e l'impostazione dei parametri per l'interpretazione dei dati visivi al fine di ottenere una corretta restituzione (CARDONE 1999).

In questa sede si vogliono illustrare i metodi e i dispositivi usati per il rilievo e l'elaborazione dei dati raccolti durante le attività sul territorio di Doclea, una città di fondazione romana divenuta *municipium* nel I secolo d.C., i cui resti si trovano presso la città di Podgorica, capitale del Montenegro (Fig. 1).

2. IL CASO-STUDIO: LA CITTÀ ROMANA DI DOCLEA

Le campagne di rilievo si sono svolte nel triennio 2017-2019, grazie a una serie di accordi e progetti bilaterali fra l'Istituto di Studi sul Mediterraneo Antico del Consiglio Nazionale delle Ricerche (oggi Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale-ISPC) e l'Istituto Storico del Montenegro-Università del Montenegro (HIM-UoM)². Ai risultati della prima campagna di studio e di ricognizioni, svoltasi a Doclea nel 2017, è stato dedicato il Supplemento 11 della rivista «Archeologia e Calcolatori» (ALBERTI 2019). Come si evince dagli articoli raccolti in questo volume, prima di avviare la ricerca sul terreno è stato svolto un consistente lavoro di raccolta dei dati storici e archeologici relativi al sito, per ricostruire, nella maniera più sistematica possibile, il quadro delle conoscenze sulla natura del paesaggio e sulle tracce della vita della città. Ne è emerso come, dopo i primi scavi condotti tra la fine dell'Ottocento e i primi anni del Novecento (MUNRO *et al.* 1896; ROVINSKI 1909; STICOTTI 1913),

² Per il quadro istituzionale in cui si è dato avvio al *Joint Archaeological Laboratory Italia Montenegro* e sui successivi sviluppi cfr. ALBERTI, KOPRIVICA 2017 e ALBERTI 2019.

in tempi più recenti non vi sono stati studi archeologici condotti in maniera organica sull'intera area urbana.

Nonostante si abbiano scarse testimonianze del periodo che precede la fondazione del municipio romano in epoca flavia, Doclea è stata la seconda città, per dimensioni, della provincia romana della Dalmazia (RINALDI TUFİ 2000). Si hanno notizie di distruzioni successive dovute ai Goti e di danni provocati da un terremoto nel 518 d.C. La città venne poi ricostruita dall'imperatore Giustiniano, per essere di nuovo distrutta da Avari e Slavi nel 609 d.C. Doclea ha avuto comunque una vitalità successiva, testimoniata da tre chiese, ritrovate e studiate anch'esse alla fine dell'Ottocento (MUNRO *et al.* 1896). Questi resti, se pure limitati, sembrano indicare una fase tardoantica e suggeriscono che la città continuò a vivere anche dopo le distruzioni del VII secolo d.C.

Le condizioni orografiche e idrografiche conferiscono al territorio che circonda la città un carattere peculiare: colline spoglie emergono improvvisamente dalla pianura, in cui gli alvei dei fiumi formano canali repentinamente scoscesi. Il perimetro dell'insediamento ha forma di trapezio irregolare ed è circondato su tre lati da corsi d'acqua (fiume Morača, fiume Zeta e torrente Širaljia), che configurano la città come una sorta di promontorio parzialmente isolato. Sono anche presenti tracce di robuste mura perimetrali, datate alla fine del IV sec. d.C., che concorrono alla delimitazione dell'area di interesse archeologico; tali resti seguono la sagoma del pianoro e conferiscono a Doclea l'aspetto di una città fortificata, effetto rafforzato dalle rive assai ripide dei fiumi, che la rendono un bastione naturale.

La porzione di territorio oggetto dell'indagine è un'area di circa 30 ettari su cui giacciono i resti della città: il Foro, un grande impianto termale, due templi, il Capitolium, alcuni edifici di tipo residenziale e testimonianze di epoca tardoantica (le cosiddette Basilica A, Basilica B e la piccola chiesa cruciforme: GELICHI *et al.* 2012; SFAMENI, D'EREDITÀ, KOPRIVICA 2019).

Dal punto di vista archeologico, il mero dato dimensionale costituito dal rilievo topografico è stato analizzato con spirito critico e con conoscenza approfondita sia del territorio, sia dell'ambito storico di riferimento, al fine di ottenere risultati storiograficamente corretti. Il lavoro metodologico di elaborazione è infatti finalizzato, attraverso l'interpretazione dei dati raccolti, alla restituzione grafica in pianta e alla ricostruzione di un modello tridimensionale che si ponga quale sintesi di considerazioni diverse:

- storiche (trattandosi di reperti spesso di datazione incerta e che quindi necessitano di un raffronto con esempi coevi dello stesso carattere tipologico e stilistico);
- costruttive (sia in senso tecnico che strutturale, parametri anch'essi che non possono evitare il paragone con altre realizzazioni similari);
- infrastrutturali (trattandosi di un insediamento di dimensioni non trascurabili, le reti viaria e idrica influenzano, ovviamente, lo sviluppo dell'edificato).

Il terreno su cui insistono le emergenze archeologiche possiede una certa regolarità ed è fondamentalmente privo di asperità, eccezion fatta per la presenza di una zona rilevata che sostiene la massicciata del tratto ferroviario che attraversa il sito, deturpandone l'integrità. Un altro evidente segno moderno è la strada carrabile che attraversa l'area, dividendo la parte delle emergenze romane da quella tardoantica (in cui sono presenti gli edifici di culto cristiano), collocata nella zona orientale della città. Su tutta l'estensione dell'area in esame, oltre ai resti più evidenti delle singole costruzioni, vi sono allineamenti murari distintamente riconoscibili, ma non ancora approfonditamente studiati, poiché scarsamente visibili e facilmente confondibili con mucchi di pietrame derivanti da crolli e successivi accumuli risalenti ad epoca moderna. I rilievi aerofotogrammetrici effettuati durante le campagne di ricognizione mostrano come vi siano allo stato attuale zone di potenziale interesse non ancora oggetto di indagine archeologica.

3. LE TECNOLOGIE APPLICATE NELLE CAMPAGNE DI RILIEVO

Le campagne sono state svolte tra marzo 2017 e ottobre 2019 e l'esecuzione delle misurazioni non ha presentato particolari difficoltà tecniche, per lo meno per la parte più esplorata, cioè quella di età romana, che contiene le emergenze meglio conservate. Le problematiche riscontrate durante le operazioni di raccolta dei dati sono imputabili soprattutto alla scarsa manutenzione del sito: durante le missioni lo stato rigoglioso della vegetazione spontanea ha talvolta influenzato la qualità del materiale raccolto.

L'acquisizione di dati con metodi diversi (aerofotografie da UAV, fotografie da terra, punti rilevati tramite stazione totale e punti rilevati con GPS) è stata fondamentale sia per avere riscontri altimetrici delle emergenze variamente collocate sul terreno, sia per ottenere qualche ulteriore punto di riferimento dove non se ne avevano di evidenti, a causa di parti dell'edificio non raggiungibili da terra o di angoli ciechi non rilevabili mediante riprese dal drone. Acquisendo immagini fotografiche da terra, da drone in volo e rilevando punti notevoli a terra mediante ricevitore GPS differenziale, è stato possibile georeferenziare e definire le tracce archeologiche in tempi speditivi e con risorse contenute (COLOSI, MEROLA, MOSCATI 2019).

Nello specifico le immagini fotografiche acquisite sul campo con macchine ad alta risoluzione (Nikon D300 e D700) hanno prodotto una serie di fotogrammi in sequenza lineare che sono stati poi di ausilio nel ricostruire gli alzati con notevole accuratezza. Per una verifica metrica sono stati individuati punti di riscontro riconoscibili a terra e sulle strutture murarie, misurati poi con stazione totale topografica (Agatec MTS650) sia tramite rilievo ottico con prisma, per evidenziare i tracciati a terra, che con presa diretta su punti notevoli in quota delle strutture emergenti. Tali dati sono stati integrati con

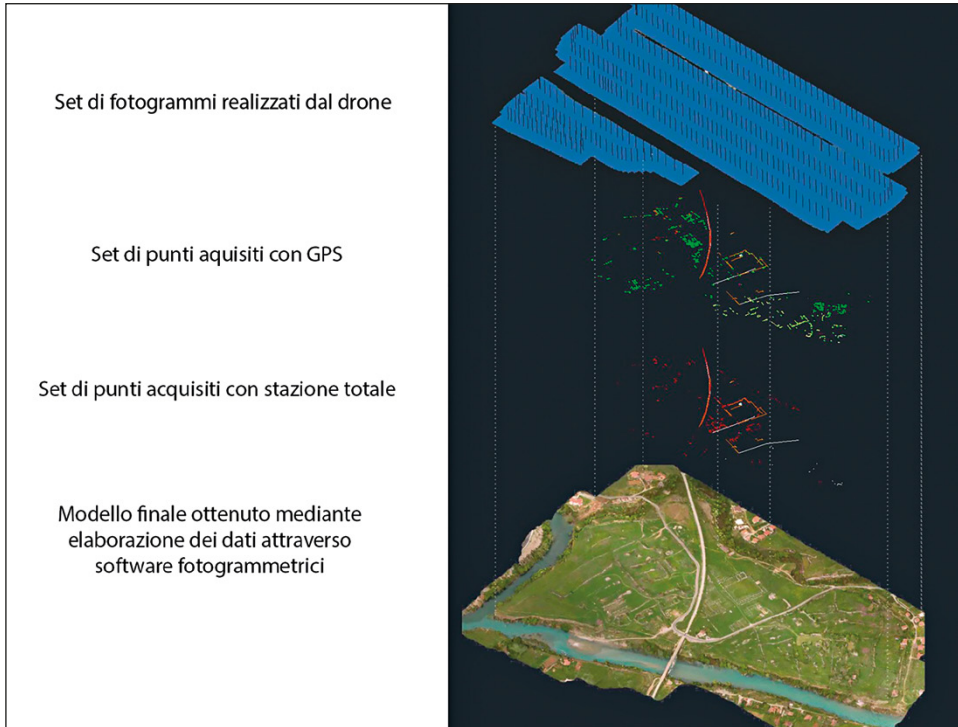


Fig. 2 – Sovrapposizione dei punti raccolti con modalità diverse per la verifica dimensionale del modello tridimensionale (elaborazione di Elisa Fidenzi).

quelli rilevati con il ricevitore GPS differenziale (Topcon GR-5), in maniera da creare uno schema di verifica della congruenza geometrica della cartografia in vista degli studi successivi ed ottenere una maglia di riferimento (Fig. 2). Sono state poi effettuate foto da drone in volo, attraverso passaggi successivi, per avere una copertura sequenziale di tutto il territorio interessato dall'analisi. Il grado di sovrapposizione dei fotogrammi, pari all'80% lungo la direzione di sorvolo e pari al 60% tra passaggi contigui, ha raggiunto quasi sempre la copertura ideale del terreno interessato.

L'elaborazione delle immagini è stata effettuata tramite la tecnica di imaging SfM che, attraverso algoritmi di computer vision (SZELISKY 2010), analizza e confronta immagini digitali fotografiche, aeree o da terra, individuando al loro interno punti notevoli, di cui trova riscontro anche in altre immagini del medesimo dataset fotografico. È così possibile far collimare punti riconoscibili su più foto, di cui almeno due con orientamento diverso, per consentire di collocare il punto collimato nello spazio, calcolandone le

coordinate e generando una nuvola di punti che costituisce la base su cui sarà costruito il modello. Da questa procedura scaturiscono tutte le informazioni utili alla creazione della nuvola densa, in base alla quale realizzare modelli topografici tridimensionali del sito rilevato.

Nel caso di studio di Doclea è stato utilizzato Metashape della Agisoft (<http://www.agisoft.ru>), un software in grado di orientare nello spazio e abbinare automaticamente grandi set di dati di immagini. L'algoritmo di ricostruzione stereoscopica utilizzato è della tipologia SGM (Semi-global matching). Il software fornisce in output una mesh completa il cui grado di precisione è relativo alla qualità dei dati di input e alla calibrazione dei correttivi delle distorsioni, a cui si aggiunge la realizzazione di una texture esportabile di notevole precisione. Gli algoritmi utilizzano principalmente parametri inerenti al tipo di ripresa, come la lunghezza focale, la dimensione del sensore, i correttivi delle distorsioni e le proporzioni del pixel, purché venga contemporaneamente rilevata, sull'oggetto o nell'ambiente, almeno una misura che possa servire per il dimensionamento della nuvola di punti.

Per Doclea si è utilizzato lo schema di riferimento basato sul tracciato del tessuto murario per continui riscontri metrici, che sono stati impiegati per la calibrazione usando un metodo di approssimazione successiva per l'affinamento dei parametri finali.

Gli strumenti SfM rientrano nella categoria black-box (termine che identifica un sistema il cui funzionamento interno non è noto e che risulta definito sulla base dei risultati forniti in output, perciò le caratteristiche dinamiche interne sono descrivibili solo in fase di test, ovvero a posteriori) in cui si possono verificare divergenze nella regolazione del fascio o deformazioni geometriche (REMONDINO *et al.* 2012). I punti ricavati sono stati importati, in base alle necessità e al tipo specifico di analisi richiesta, in un ambiente CAD e in un sistema GIS per ricavare DSM, DTM, curve di livello, sezioni e profili, scegliendo successivamente le tecniche di rappresentazione utili.

4. METODOLOGIA E APPROCCIO TEORICO-PRATICO

Nel caso studio in esame, il materiale raccolto per la documentazione di partenza è il frutto di una dozzina di campagne di rilievo autonome, svolte da soggetti diversi, in tempi diversi, con strumenti di rilievo, metodologie e finalità molto differenti tra loro. I dati catalogati durante le campagne sono nel complesso:

- riprese aeree effettuate con droni a 20 m, 40 m e 100 m, ottenendo 7619 fotogrammi in formato NEF poi convertiti e riutilizzati per comporre i modelli;
- 4858 immagini da terra, utilizzando fotocamere Nikon D300 e D700 full frame ad alta risoluzione;
- 977 punti ottenuti dal rilievo mediante GPS differenziale e stazione totale.



Fig. 3 – Modello territoriale con sovrapposte le curve esplicite che, insieme alle informazioni cromatiche, evidenzia geometricamente le tipologie dei rilievi presenti sul terreno.

Si è quindi intrapresa una lunga e laboriosa opera preliminare di analisi dei dati documentali disponibili; tutte le informazioni sono state raccolte, vagliate, catalogate e suddivise per ambiti omogenei di argomento (aree territoriali) e qualità del dato, definendo una gerarchia utile per l'elaborazione della modellistica. La catalogazione ha distinto:

- modelli da più quote di volo;
- modelli da foto diversamente orientate;
- ricostruzioni mediante sequenze di immagini.

A conclusione delle numerose campagne di rilievo si è avuta pertanto a disposizione una vasta collezione di immagini fotografiche di diverse zone della città e del territorio circostante, con una buona copertura stereoscopica lungo le sequenze lineari di immagini da drone, e sufficiente copertura trasversale tra le stesse. Le diverse ricognizioni terrestri e aeree, come si è detto, sono state condotte da gruppi di lavoro diversi, con un'ottica procedurale e obiettivi specifici a volte differenti, con conseguente disomogeneità nella copertura dei punti a terra. Data la natura dell'impianto urbanistico e della zona circostante da rilevare, le fotografie sono state scattate sia con camera nadirale (puntata verticalmente verso il terreno) che con macchina inclinata rispetto all'orizzontale. Questo ha permesso di definire bene gli elementi a prevalente sviluppo verticale: filari di muri, elementi isolati, cumuli di materiale, vegetazione sviluppata (Fig. 3).

Le riprese effettuate con il drone hanno coperto aree più ampie di territorio, mentre i punti GPS non sono uniformemente distribuiti, in quanto raccolti dagli archeologi con il principale obiettivo di definire sul terreno

l'esatta posizione dei resti identificati durante le ricognizioni. Anche le campagne di misurazione aerea sono state eseguite in tempi diversi e con droni attrezzati con camere diverse; ciò ha reso necessario effettuare per ogni camera il procedimento di calibrazione e calcolo SfM, al fine di ottenere la nuvola densa di punti. Questo doppio procedimento ha raddoppiato i tempi della calibrazione, ma ha permesso di confrontare tra loro i risultati dei modelli ottenuti da riprese effettuate sulle stesse zone con modalità e altezze diverse, consentendo di validare le impostazioni di elaborazione dati o correggere le calibrazioni, sino a confermare i risultati ottenuti.

Come noto in ambito SfM, l'efficacia della ricostruzione mediante modello 3D ottenuto da nuvola di punti dipende dall'accuratezza dei dati rilevati, ossia dalla qualità delle misure. Questa è legata a molti fattori, tra i quali, ad esempio, le caratteristiche del dispositivo di ripresa (essenzialmente la qualità dell'ottica) e le condizioni di volo del drone, che influenzano le modalità di ripresa (le condizioni meteorologiche e di illuminazione, la copertura GPS, la velocità di crociera, la stabilità durante il volo). Parametro importantissimo di un rilievo aerofotogrammetrico è la Risoluzione Spaziale (RS) che è definita dalla distanza, misurata a terra, tra due pixel vicini nell'immagine digitale (Ground Sampling Distance-GSD). Essa dipende dalla risoluzione della macchina fotografica a bordo del drone, dalla lunghezza focale della sua ottica e dall'altezza di volo.

In generale, gli algoritmi di elaborazione fotogrammetrica possono quindi presentare problemi dovuti alla qualità iniziale dell'immagine (rumore, bassa qualità radiometrica, ombre, etc.) o ad alcuni materiali superficiali (oggetti lucidi o senza texture riconoscibili). Ciò può comportare nuvole di punti con forte interferenza e conseguente difficoltà del programma nell'attribuzione delle caratteristiche.

Per minimizzare gli effetti dovuti alla presenza di errori sistematici, definibili come lo scostamento (differenza) tra il valore sperimentale della media di un set di valori replicati e il valore reale della grandezza studiata, sono state introdotte alcune metodologie procedurali. Premettendo che l'errore sistematico è definito tale perché risulta costante al ripetersi della misura e che, per questo, non può essere eliminato con la semplice ripetizione della misurazione, l'unico modo per verificarne la presenza e determinarne l'entità consiste nell'attuazione di serie di confronti sui dati ottenuti tramite successive e differenti campagne di rilievo, attuate sul medesimo oggetto o area target, ma ricorrendo a metodi di rilevamento alternativi (SANSONI 2006). Le successive valutazioni di coerenza tra insiemi di dati di differente origine consentono l'individuazione e la correzione degli errori sistematici fino al raggiungimento, per step successivi, del livello di accuratezza desiderato. L'elaborazione fotogrammetrica deve essere eseguita in modo che le procedure di calibrazione, le correzioni sistematiche degli errori e le metriche degli errori siano esplicitamente dichiarate.

Nel caso di Doclea si è proceduto per approssimazioni successive dei parametri di elaborazione SfM, utilizzando riprese aeree effettuate a 20 m, 40 m e 100 m e immagini da terra, interpolando tali dati con quelli derivanti dal rilievo effettuato con GPS differenziale e stazione totale; si è così arrivati a soddisfacenti livelli di accuratezza, ovviamente differenti da zona a zona in base alla maggiore o minore densità di riprese e rilevamenti GPS disponibili. Parliamo di un'accuratezza di alcune decine di centimetri sull'intera estensione dei circa 30 ettari dell'area archeologica e dell'ambito territoriale di rispetto, per arrivare a valori massimi di 10 cm su 100 m per le zone altimetricamente omogenee (ossia fundamentalmente orizzontali), quali l'area delle Terme, del Foro e quella delle chiese tardoantiche.

È noto come gli algoritmi di elaborazione utilizzino correttivi dei percorsi dei raggi ottici; nel caso di insiemi di foto con livelli di ripresa a differente quota e con diversi orientamenti, in mancanza di un opportuno settaggio, si rischia di incorrere in errori tali da impedire la costruzione dei modelli (parti sfocate, deformazione delle mesh, etc.). Per garantire risultati accurati si è provveduto innanzitutto alla determinazione della focale effettiva dell'obiettivo fotografico attraverso il calcolo del dislivello tra punti posti a quote diverse su due o più strisciate di foto a diversa altitudine. Si è pertanto provveduto a parcellizzare alcune sequenze affiancate tra loro, ove erano presenti almeno 3 o 4 punti rilevati sul campo, ad elaborare e analizzare per confronto i modelli parziali con le loro misure e i coefficienti di correzione (restituiti dall'elaborazione automatica o arbitrariamente impostati), selezionando poi i valori correttivi che davano i risultati più accettabili in termini di accuratezza numerica del dato.

Questo lavoro, che ha richiesto molto tempo, è proceduto per approssimazioni successive: una volta raggiunto un risultato soddisfacente dalla combinazione tra i coefficienti correttivi e la focale ipotetica, si è passati alla correzione della focale, affinandola ulteriormente. In seguito sono stati affinati anche i coefficienti di correzione simmetrici e si è successivamente passati all'ottimizzazione del centro di distorsione.

Un primo metodo di approssimazione dei valori correttivi ha previsto l'utilizzo di strisciate ad altezze diverse: nella modellazione d'insieme, che comprendeva sia foto ravvicinate che foto a maggiore distanza, le zone centrali dei fotogrammi dovevano rispondere a criteri di approssimazione soddisfacenti. La correlazione tra immagini richiede infatti la creazione di corrispondenze tra le primitive estratte da due o più immagini (SCHENK 1999), insieme alla determinazione delle coordinate 3D dei punti caratteristici abbinati tramite una collinearità o un modello proiettivo. Nello spazio "immagine" questo processo genera una mappa che assegna profondità relative a ciascun pixel e il risultato corrispondente nello spazio "oggetto" è la nuvola di punti 3D.

Le informazioni predominanti ai fini della definizione della nuvola densa di punti sono state ricavate dai set di fotogrammi da riprese diversamente



Fig. 4 – Sovrapposizione dei layer in un software CAD per la verifica e la comparazione metrica tra i punti raccolti con varie metodologie.

orientate, confrontando, dove possibile, riprese ortogonali e inclinate. A questo scopo è risultata molto utile una serie di sequenze con inquadratura inclinata realizzate dove erano già state effettuate riprese ortogonali alle strutture. Ciò ha consentito di calcolare la differenza di parallasse tra le due visioni. La valutazione dell'accuratezza del dato metrico è stata effettuata tramite software CAD, confrontando, per sovrapposizione di layer diversi, i valori del modello ottenuto da nuvola di punti, i punti CAD importati in formato DXF da stazione totale e quelli derivanti da rilievo con GPS differenziale (Fig. 4).

La gerarchia del grado di precisione, cioè quella ricavabile dall'attendibilità del modello ottenuta dal confronto con altri metodi di rilevamento, costituisce la base su cui è possibile calibrare i coefficienti K (i coefficienti di distorsione radiale). Una volta raggiunti valori accettabili per i coefficienti simmetrici, si è determinato con una buona accuratezza il centro di distorsione utilizzando fotogrammi diversamente orientati non nadirali e a differenti quote di volo, e successivamente si è passati alla risoluzione delle distorsioni asimmetriche.

Alla fine dell'esperienza si è riusciti ad ottenere una modellazione unica dell'area in esame da un insieme di sequenze che accomuna più di 400 fotogrammi, con una buona corrispondenza tra i punti di controllo identificati sul territorio. Grazie a questa opera di ottimizzazione, è stata ottenuta una modellazione dell'area in esame nella sua interezza, mai raggiunta prima. Precedenti modellazioni eseguite con la correzione automatica, o con correzioni impostate manualmente, ma evidentemente non ottimali, avevano infatti portato a ricostruzioni parziali (buchi interpretativi) o deformate (Fig. 5).

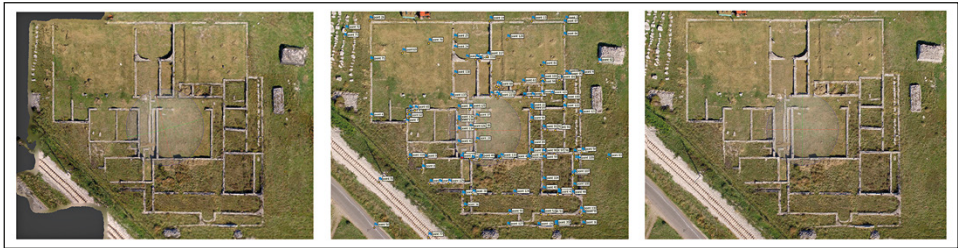


Fig. 5 – Confronto tra un'immagine generata con parametri automatici e con correzioni verificate in maniera empirica e aggiunte manualmente.

Dal momento che l'utilizzo di tecniche di imaging SfM non era stato pianificato fin dalle fasi iniziali delle campagne di rilievo, questo ha comportato un addensamento di informazioni eterogenee in alcune zone e una carenza di dati in altre aree del territorio, dove si sono riscontrate, a posteriori, alcune lacune che si prevede di colmare nelle prossime campagne di rilievo. Al momento le informazioni metriche mancanti sono state compensate tramite le suindicate impostazioni correttive degli algoritmi di interpretazione dei parametri visuali e, ove possibile, tramite modalità procedurali, ossia facendo ricorso, oltre che a punti di appoggio realmente misurati, anche a punti fittizi derivanti da modellazioni ben approssimate ottenute da voli ravvicinati e più particolareggiati. Tali punti fittizi, per garantire una sufficiente accuratezza delle coordinate, sono stati presi, ovviamente, solo su aree prevalentemente pianeggianti, come nella zona centrale dell'edificato romano. In caso di forti pendii o terreni accidentati, le relative coordinate non sarebbero, infatti, risultate sufficientemente attendibili.

Si è così riusciti ad ottenere modellazioni di ampie zone, per le quali non si disponeva che di pochi punti di controllo, ma per le quali invece era disponibile una gran quantità di fotogrammi, sia nadirali a differente quota di volo, sia variamente inclinati, da posizioni e distanze diverse. In tal caso si è verificata la sostanziale concordanza tra le misure prese sui modelli prodotti e le distanze prese sulle mappe e i punti rilevati sul campo. Il livello di precisione emerso dal confronto è nell'ordine di qualche decimetro, con approssimazione di circa mezzo metro su distanze valutabili in centinaia di metri, dato che si ritiene soddisfacente, anche in considerazione degli obiettivi specifici dello studio archeologico dell'area di età romana (Fig. 6).

Di particolare interesse applicativo è risultato il mantenimento delle informazioni cromatiche derivanti dalle immagini fotografiche, dato che i singoli punti della nuvola ereditano il colore dei pixel fotografici e che le mesh derivanti dall'elaborazione vengono texturizzate allineando le immagini originali ai poligoni tramite i punti vertice. Le applicazioni sono state praticamente



Fig. 6 – Il modello territoriale completo (elaborazione di Tommaso Leti Messina).

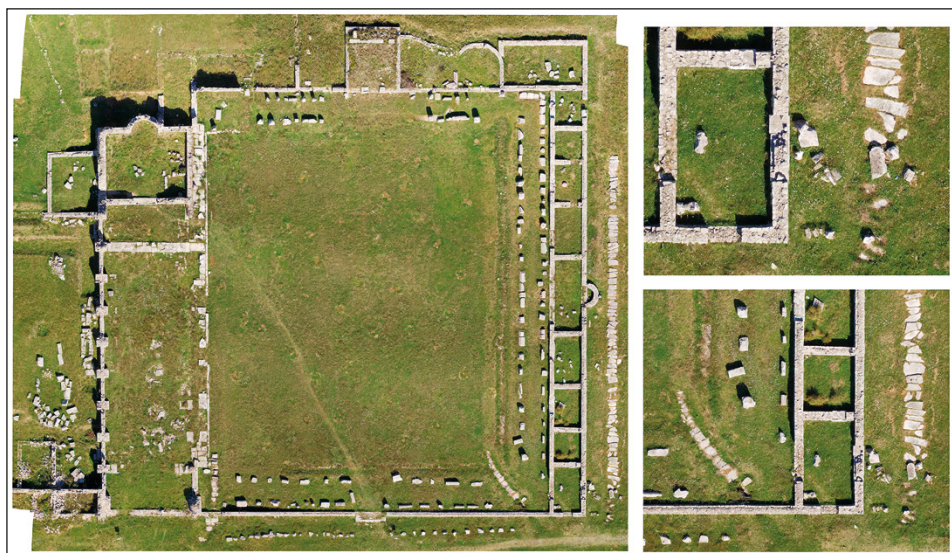


Fig. 7 – Ortofoto del Foro e della basilica romana: si nota il buon livello di dettaglio ottenuto dall'elaborazione delle aerofoto da drone.

illimitate: il dettaglio dell'immagine tridimensionale texturizzata, derivante dalla ricostruzione SfM ha permesso, nel caso dei principali monumenti dell'area urbana di Doclea, di leggere la texture muraria e riportarla in una vista zenitale con estrema precisione, sino al singolo elemento, consentendo al contempo una veduta d'insieme. La potenzialità di passare, tramite semplice

zoom, dal livello territoriale a quello di dettaglio ha consentito di valutare dati specifici in un'ottica globale, permettendo di ottenere informazioni trasversali di estremo interesse per analisi quali la consistenza muraria, che essendo piuttosto omogenea sembra suggerire un'edificazione coeva degli edifici di epoca romana (Fig. 7).

5. ANALISI DEI RISULTATI

La pratica archeologica si basa sugli studi di archivio e documentali, ma dipende in gran parte dalle possibilità offerte dal rilievo per la comprensione e la contestualizzazione delle informazioni. Lo sviluppo tecnologico delle telecamere e dei metodi di calibrazione ha ampliato l'uso della fotomodellazione (WESTOBY *et al.* 2012) anche agli utenti non professionisti e semi-professionisti. Va però ricordato che non è sufficiente il mero utilizzo di un software di modellazione per ottenere risultati soddisfacenti, perché la fotogrammetria 3D è una disciplina complessa che richiede lunghe fasi di elaborazione da parte degli specialisti.

A Doclea, la metodologia applicata ha consentito di ottenere risultati di estremo interesse su due differenti livelli interpretativi: uno dal punto di vista territoriale e urbanistico e uno di rilievo puntuale dei singoli edifici. In questa esperienza, infatti, si è fatto largo uso di metodi per la generazione di nuvole dense di punti, che sono alla base di applicazioni come la modellazione e mappatura 3D, con gli obiettivi principali di ottenere sia una visualizzazione speditiva del territorio sia un modello dei singoli resti metrologicamente affidabile.

In ambito territoriale, il fotopiano realizzato copre un'area coincidente approssimativamente con il perimetro riconosciuto della cinta muraria. Il livello descrittivo delle texture ottenute dai dati fotografici digitali arriva al singolo elemento murario. L'immagine, metricamente corretta e georeferenziata, costituisce la base del lavoro di aggiornamento cartografico di tutta la zona su cui si è individuato il perimetro dell'antica città, fatto che non avveniva in maniera organica dal rilievo di Piero STICOTTI (1913). Il materiale cartografico prodotto è stato redatto in scale diverse per i successivi studi e approfondimenti: la cartografia tecnica, in pianta e in prospetto, sarà essenziale per le analisi sulla consistenza muraria e l'individuazione delle fasi di evoluzione del costruito nei secoli.

Il modello tridimensionale ottenuto, essendo una riproduzione digitale geometricamente e metricamente fedele dell'area rilevata, è stato utilizzato per l'estrapolazione di ulteriori informazioni, quali ad esempio la stratigrafia di dettaglio, con sezioni e profili territoriali (Fig. 8). I quesiti di maggiore interesse, concernenti l'aspetto e la conformazione della città, sono stati alla base del confronto con esempi di colonie dello stesso periodo e geograficamente

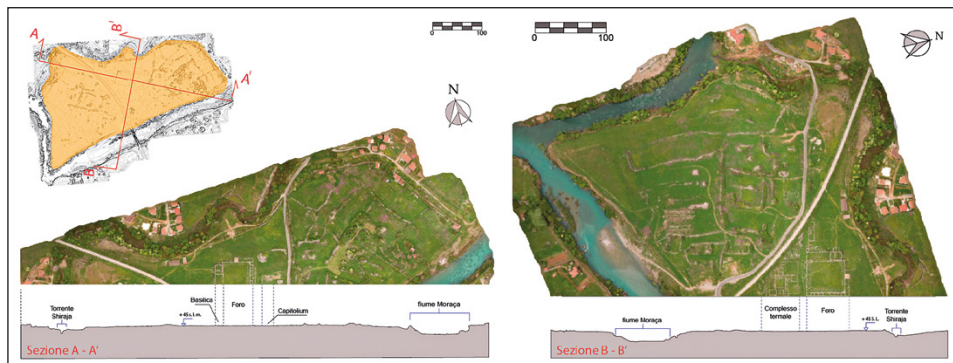


Fig. 8 – Profili dell'area con l'indicazione della posizione delle emergenze architettoniche.

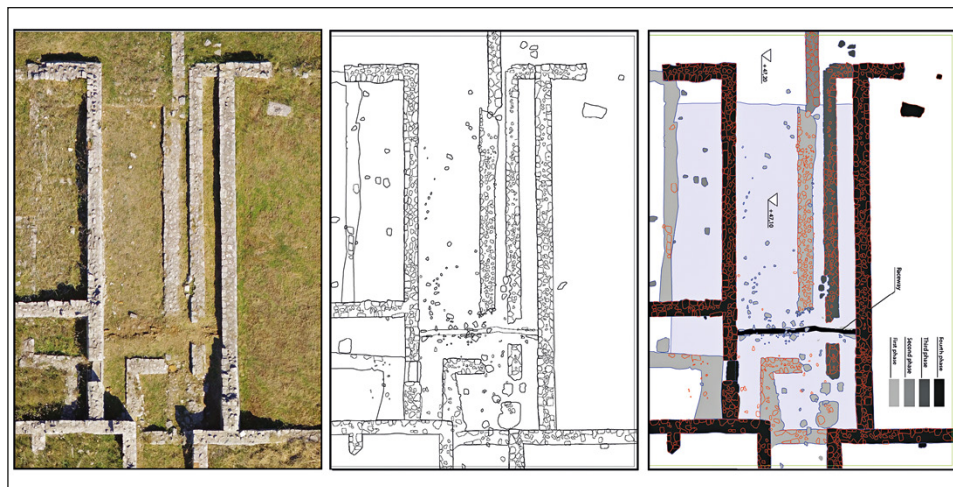


Fig. 9 – Vettorializzazione delle ortofoto e trattamento grafico per l'indicazione delle fasi costruttive dell'ingresso del complesso termale.

vicine (COLOSI, MEROLA, MOSCATI 2019), suggerendo riflessioni sull'utilizzo degli spazi e del territorio.

In una fase successiva al rilievo dell'esistente si è proceduto ad un'opera di ricostruzione virtuale ragionata: alla modellazione del terreno è stata sovrapposta la resa virtuale delle volumetrie e dei caratteri tipologici architettonici. Le ipotesi hanno avuto origine dalla consultazione del dato storico e, anche grazie all'inserimento di frammenti ritrovati *in loco*, hanno consentito di giungere ad elevati gradi di dettaglio, sino alla ricostruzione nel modello di

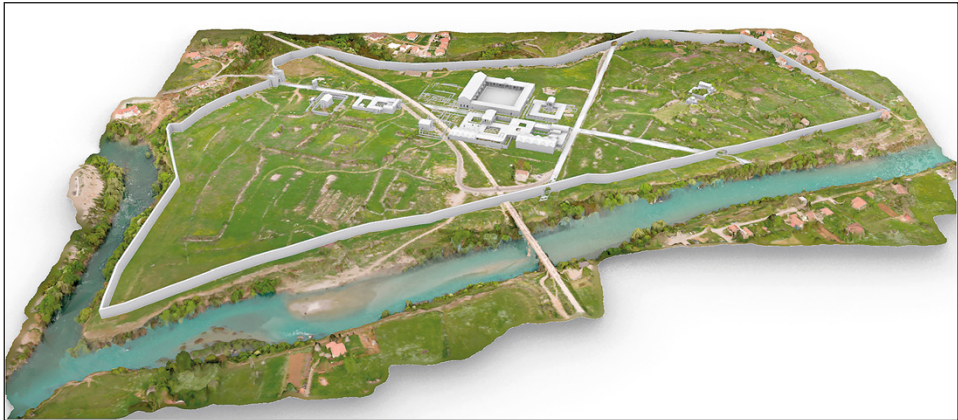


Fig. 10 – Modello generale del terreno allo stato attuale con l’inserimento del modello ricostruttivo della città.

elementi architettonici e motivi decorativi parietali e musivi filologicamente corretti. L’esempio in Fig. 9 riporta i passaggi di elaborazione di un dettaglio tratto dall’ortofoto del complesso termale, la sua vettorializzazione e il trattamento grafico per indicare le diverse fasi costruttive individuate.

La modellizzazione e le cartografie che si possono ricavare da un’analisi fotogrammetrica completa rappresentano la base comune su cui il gruppo di specialisti può pianificare e svolgere gli approfondimenti di ambito specifico all’interno di un più ampio approccio multidisciplinare. Lo studio di un insediamento antico, infatti, porta con sé innumerevoli quesiti e un approccio che faccia confrontare esperti di differenti specialità è sicuramente la modalità più efficace per trovare le risposte. Ad esempio la ricostruzione tridimensionale, sia quella del terreno dove giacciono i resti, ricavata dal rilievo dell’esistente, che quella virtuale con l’ipotetica ricostruzione degli edifici, offre la possibilità di restituire l’aspetto del costruito e consente l’analisi dei rapporti tra gli edifici, il tessuto stradale e il rapporto dell’edificato col territorio. Questo *modus operandi* ha permesso, a Doclea, di evidenziare la traccia del *decumanus maximus* e come esso connoti tutto l’insediamento, attraversandolo da O a E per circa 600 m e separando con una distanza costante di 15 m tutti gli edifici principali che vi si affacciano.

Le attività svolte hanno permesso di conseguire risultati di grande interesse scientifico e operativo, che si aprono a nuove soluzioni di valorizzazione del sito (ALBERTI, D’EREDITÀ 2019). A conclusione di questa esperienza, che ha portato alla definizione del modello ricostruttivo della città (Fig. 10), sono emerse la potenzialità delle tecniche di aerofotogrammetria e dell’organizzazione dei dati digitali in ambito archeologico (ZANGROSSI 2019); l’importanza

dell'integrazione attiva e sinergica da parte di tutte le figure scientifiche coinvolte nel progetto; la necessità di una programmazione congiunta per il reperimento e la riorganizzazione dei dati, previa la definizione di procedure e protocolli per ottimizzare le prossime campagne, coprendo eventuali vuoti documentali secondo procedimenti sperimentati, definiti congiuntamente e replicabili. Il fine ultimo è la riduzione dei tempi di elaborazione dei dati digitali, non solo nel territorio di Doclea, ma per le svariate campagne di studio, attuali e future, del gruppo di lavoro interdisciplinare coinvolto.

ANTONIO D'EREDITÀ

Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale – CNR
antonio.deredita@cnr.it

Ringraziamenti

Questo articolo è il frutto di un lavoro svolto sul campo e in laboratorio da un coeso gruppo di ricerca interdisciplinare italo-montenegrino coordinato da Lucia Alberti per la parte italiana e da Tatjana Koprivica per quella montenegrina. In particolare, si ringrazia Tommaso Leti Messina, per il prezioso lavoro svolto in fase di rilevamento e acquisizione dei dati sul campo per quanto attiene la fotogrammetria e la topografia di appoggio, nelle lunghe fasi di post-elaborazione dei dati e di restituzione delle nuvole di punti, oltre che nella definizione teorica e operativa di sperimentazioni, controllo e ottimizzazione del dato numerico prodotto automaticamente dal software utilizzato. Un sentito ringraziamento va a Elisa Fidenzi, che ha collaborato al rilievo diretto topografico e architettonico, ha elaborato e integrato i dati da GPS e stazione totale e ha restituito graficamente le planimetrie di alcuni monumenti.

BIBLIOGRAFIA

- ALBERTI L. (ed.) 2019, *The ArcheoLab Project in the Doclea Valley, Montenegro (Campaign 2017). Archaeology, Technologies and Future Perspectives*, «Archeologia e Calcolatori», Suppl. 11.
- ALBERTI L., D'EREDITÀ A. 2019, *The future of the past: First perspectives for Doclea today*, in ALBERTI 2019, 105-111 (<https://doi.org/10.19282/ACS.11.2019.09>).
- ALBERTI L., KOPRIVICA T. 2017, *Joint Archaeological Laboratory Italia Montenegro: The Doclea Valley*, «Archeologia e Calcolatori», 28.1, 311-313 (<https://doi.org/10.19282/AC.28.1.2017.18>).
- CAMPANA S. 2017, *Drones in archaeology. State-of-the-art and future perspectives*, «Archaeological Prospection», 24, 4, 275-296.
- CARDONE V. 1999, *Modelli grafici dell'architettura e del territorio*, Napoli, CUEN.
- COLOSI F., MEROLA P., MOSCATI P. 2019, *The urban planning of Doclea: Remote sensing and topographical survey*, in ALBERTI 2019, 59-75 (<https://doi.org/10.19282/ACS.11.2019.06>).
- DI GUARDO D. 2007, *Architettura e segno digitale. Esperienze e visioni radicali*, Roma, Aracne Editrice.
- GALLI M., GRIFFO M., INGLESE C., ISMAELLI T. 2019, *Vecchi scavi e nuove tecnologie: primi risultati del progetto Basilica Iulia*, «Archeologia e Calcolatori», 30, 229-249 (<https://doi.org/10.19282/ac.30.2019.14>).

- GELICHI S., NEGRELLI C., LEARDI S., SABBIONESI L., BELCARI R. 2012, *Doclea alla fine dell'antichità. Studi e ricerche per la storia di una città abbandonata della Prevalitanial/Duklja na kraju antickog doba. Studije i istraživanja istorije jednog napuštenog grada Prevalitanije*, «Nova Anticka Duklja/New Antique Doclea», 3, 10-40.
- HAALA N. 2013, *The landscape of dense image matching algorithms*, in D. FRITSCH (ed.), *Photogrammetric Week '13*, Berlin-Offenbach, Wichmann, 271-284.
- HISTORIC ENGLAND 2017, *Photogrammetric Applications for Cultural Heritage. Guidance for Good Practice*, Swindon, Historic England.
- LAFARGE F., MALLET C. 2012, *Creating large-scale city models from 3D-point clouds: A robust approach with hybrid representation*, «International Journal of Computer Vision», 99, 1, 69-85.
- MUNRO J.A.R., ANDERSON W.C.F., MILNE J.G., HAVERFIELD F. 1896, *On the Roman town Doclea in Montenegro*, «Archeologia», 55, 1-60.
- RINALDI TUFİ S. 2000, *Archeologia delle province romane*, Roma, Carocci.
- RINALDI TUFİ S. 2012, *Doclea, città romana del Montenegro*, in DE MARINIS G., FABRINI G.M., PACI G., PERNA R., SILVESTRINI M. (eds.), *I processi evolutivi della città in area adriatica*, BAR International Series 2419, Oxford, Archeopress, 477-490.
- RINALDI TUFİ S., BARATIN L., PELOSO D. 2008, *Valorizzazione del sito archeologico di Doclea, città romana in Montenegro*, «Bollettino di Archeologia on line», 1, 71-77.
- ROVINSKI P. 1909, *Cernogorija v jejo prošlom i nastojašem*, *Geografija.-Istorija.-Etnografija.-Arheologija*, tom II, cast 4 [Montenegro in the Past and Present, Geography-History-Ethnography-Archaeology, vol. II, part 4], S. Peterburg (republished in Cetinje-Novi Sad 1994).
- SANSONI G. 2006, *Misure ottiche. Modelli di telecamere che tengono conto delle distorsioni*, Laboratory of Optoelectronics, Università di Brescia (http://www.optolab-bs.it/VISIONE_3D/Modelli_con_distorsioni.pdf).
- SFAMENI C., D'EREDITÀ A., KOPRIVICA T. 2019, *The main public buildings of Doclea: Archival, archaeological and architectural research*, in ALBERTI 2019, 85-103 (<https://doi.org/10.19282/ACS.11.2019.08>).
- STICOTTI P. 1913, *Die römische Stadt Doclea in Montenegro*, Schriften der Balkankommission Antiquarische Abteilung Heft 6, Wien, in Kommission bei A. Hölder.
- SZELISKI R. 2010, *Computer Vision: Algorithms and Applications*, London, Springer Science & Business.
- VILICICH R., MORIGI A., RINALDI E. 2019, *Ricerche nell'area della villa di Teoderico a Galeata (FC): un "dialogo" fra nuove tecnologie e tradizionali metodi di scavo*, «Archeologia e Calcolatori», 30, 183-204 (<https://doi.org/10.19282/ac.30.2019.12>).
- WARD-PERKINS J.B. 1970, *Roman Imperial Architecture*, Yale, Yale University Press, 246-254.
- WESTOBY M.J., BRASINGTON J., GLASSER N.F., HAMBREY M.J., REYNOLDS J.M. 2012, *Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications*, «Geomorphology», 179, 300-314.
- ZANGROSSI F. 2019, *3D visual technology applied for the reconstruction of a Paleolithic workshop*, «Journal of Archaeological Science: Reports», 28, 102045.

ABSTRACT

This paper deals with the practical application of photogrammetry in the study of the Roman city of Doclea in Montenegro, with particular reference to the use of Structure from Motion (SfM) techniques. Among the various research areas, archaeology of architecture and settlement archaeology make today an increasing use of photogrammetry for the in-field documentation of archaeological features. This method has an essential role in obtaining a reliable geometric survey that in turn forms the basis for the structural assessment of the

architectural heritage thanks to consolidated methods such as archaeological stratigraphy and direct examination. In recent years, digital photogrammetry and the implementation of data processing technologies have made it possible to create three-dimensional models using images acquired through high-definition cameras. In addition to an accurate topographical survey, the aforementioned methods offer the opportunity to obtain a faithful representation of the real world, providing a basis for subsequent architectural and territorial studies. The use of drones equipped with cameras has proved to be particularly effective and capable of detecting large areas quickly and with good results. Due to its versatility and relative ease of use, photogrammetry could actually be deemed as an essential tool for the study and conservation of cultural heritage.