

ANTICHE E MODERNE TECNOLOGIE: L'APPLICAZIONE DELLE TECNICHE DI RILEVAMENTO TRIDIMENSIONALE PER LA RAPPRESENTAZIONE E L'ANALISI DEI MANUFATTI LITICI

1. INTRODUZIONE

L'utilizzo delle tecnologie digitali in campo archeologico ha registrato uno sviluppo crescente nelle ultime due decadi, conseguenza della maggiore accessibilità di strumenti e applicazioni. L'adozione di queste tecniche offre prospettive stimolanti e ha contribuito a trasformare le metodologie convenzionali del lavoro dell'archeologo che sono diventate componenti talvolta indispensabili, svolte da neo-figure specifiche formatesi nell'archeologia computazionale, digitale e virtuale. L'archeologia preistorica, da sempre attenta agli sviluppi metodologici della ricerca archeologica a causa della estrema parzialità e precarietà delle informazioni ricavabili dai contesti, ha adottato le tecniche digitali all'interno dei protocolli di documentazione degli scavi. Ad esempio, l'integrazione di diverse tecniche di documentazione 3D, con il lavoro condotto sia *in situ* (sulla paleosuperficie) che in laboratorio (sui reperti), può permettere di ricostruire virtualmente la complessità microstratigrafica di contesti "distrutti" dallo scavo archeologico, conservandone intatte le informazioni (ZANGROSSI *et al.* 2019) (Fig. 1).

Di pari passo, il rilevamento tridimensionale è stato applicato con crescente consapevolezza anche ai manufatti litici, resto archeologico tra i più abbondanti per gran parte della storia dell'umanità. I motivi del suo utilizzo sono molteplici e vanno ancora una volta dalla documentazione alla facilità di declinare analisi computazionali e statistiche qualitative e quantitative, fino all'impiego per ragioni di divulgazione e musealizzazione. Diversi laboratori e centri di ricerca in campo accademico stanno adottando queste tecnologie rivolte a diversi obiettivi e finalità scientifiche. Questo articolo vuole rappresentare uno stato dell'arte utile ad orientarsi nella produzione scientifica, una rassegna di quello che è stato finora prodotto che comprenda una riflessione riguardante le prospettive che ci aspettano nel prossimo futuro.

2. TECNICHE DI RILEVAMENTO 3D APPLICATE AI MANUFATTI IN PIETRA SCHEGGIATA

2.1 *Registrazione passiva a distanza: fotogrammetria*

Dispositivi di registrazione "a contatto", come digitalizzatori manuali tridimensionali o calibri trasversali collegati talvolta ad hardware, sono utilizzati

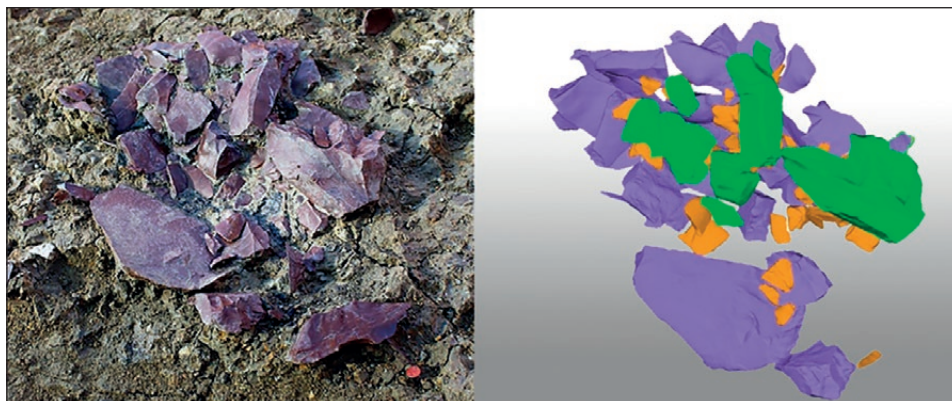


Fig. 1 – Concentrazione di pietre scheggiate ritrovate nel sito di Piovesello. Sulla destra, si evidenziano le fasi microstratigrafiche di formazione dell'accumulo, rese possibili dall'integrazione dei singoli elementi (scansionati in laboratorio) all'interno della documentazione fotogrammetrica della struttura a più livelli (modificato da ZANGROSSI *et al.* 2019).

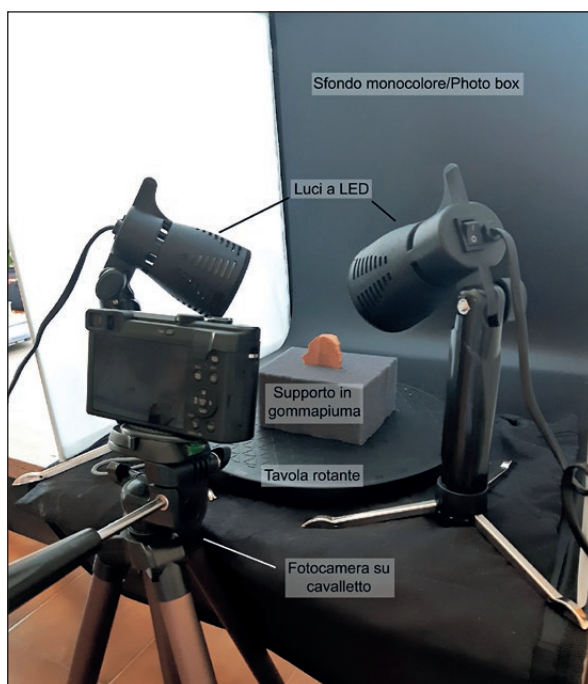


Fig. 2 – Setup per l'applicazione fotogrammetrica al rilevamento di manufatti litici.

molto raramente per registrare punti isolati in spazi tridimensionali. Per le scansioni di manufatti, infatti, si preferiscono generalmente le metodologie di registrazione a distanza, che consistono in opzioni sia passive che attive (AHMED *et al.* 2014). Quelle passive, come la fotogrammetria, catturano la luce ambientale che viene riflessa da un oggetto, permettendo il calcolo di misure e dati metrici di un oggetto attraverso fotografie e immagini digitali sovrapposte e prese da una varietà di angolature.

La facilità di acquisizione della strumentazione necessaria (un laptop e una fotocamera digitale) ha consentito l'ampia diffusione di questo metodo nel campo della documentazione archeologica, compresa la registrazione di strumenti litici (SUMNER, RIDDLE 2008). Solo negli ultimi anni si è sviluppata una discussione attorno alla creazione di un protocollo standardizzato e ripetibile (MAGNANI *et al.* 2016; PORTER *et al.* 2016). La fotogrammetria è solitamente concepita con l'oggetto stabile al centro della scena e il fotografo che vi gira attorno. Questo meccanismo serve per non variare i rapporti tra l'oggetto e la luce ambientale, ma può influire sulla qualità delle fotografie, specialmente se orientate a registrare piccoli oggetti. Tale problema viene risolto con l'utilizzo di un setup apposito atto ad isolare l'oggetto nel suo ambiente ponendolo su un supporto rotante, mentre la fotocamera, stabilizzata su di un cavalletto, permette scatti di maggiore qualità (Fig. 2). Il numero di foto necessarie per la creazione del modello può variare da poche decine ad oltre un centinaio per manufatto, a seconda della complessità (OLSON *et al.* 2014; PORTER *et al.* 2016).

2.2 Registrazione attiva a distanza: dispositivi scanner

Le opzioni di scansione attive consistono nella proiezione di radiazioni o luce sui modelli al fine di rilevarne il contorno. Questi si dividono in impulsi laser/radar (indicati per usi esterni e manufatti di grandi dimensioni), triangolazione e luce strutturata. La registrazione delle geometrie attraverso triangolazione è una delle tecniche più comuni per la scansione di oggetti: consiste in una emissione di laser e si basa sulla misurazione precisa della distanza tra l'emettitore e un sensore ricevitore attraverso l'oggetto scansionato e dell'angolo tra di essi. Attraverso queste semplici informazioni si calcolano la distanza e la posizione di una serie di punti nello spazio tridimensionale. La tecnologia forse più utilizzata per i manufatti litici è la digitalizzazione attraverso frange di luce strutturata, il cui processo operativo è descritto in diversi lavori dedicati (GROSMAN *et al.* 2008; BARONE *et al.* 2018). La registrazione comincia proiettando pattern di strisce verticali sull'oggetto, la cui deformazione, indotta dall'irregolarità della superficie, viene catturata da fotocamere poste a diverse angolazioni rispetto all'oggetto e alle frange di luce. In questo modo, in pochi secondi viene calcolata una nuvola di punti (Fig. 3). Modelli completi vengono ottenuti allineando le nuvole di punti

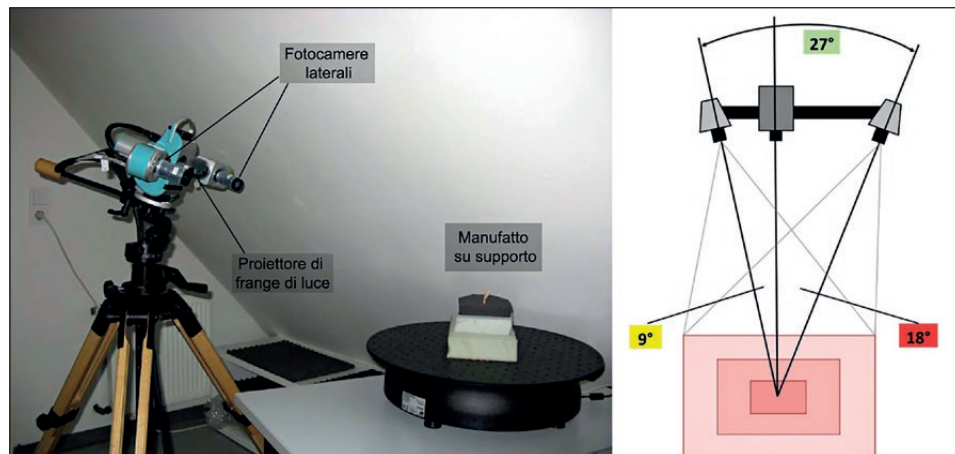


Fig. 3 – Scanner a luce strutturata Breuckmann SmartSCAN. Sulla destra, il funzionamento del dispositivo con le due fotocamere laterali asimmetriche e il proiettore di frange di luce centrale (modificato da DELPIANO *et al.* 2017).

prese ad angolature diverse; la loro fusione in un reticolo tridimensionale si basa su algoritmi come l'Iterative Closest Point (ICP) (BARONE *et al.* 2018).

Un'altra tecnologia utile è la tomografia micro-computerizzata a raggi X (CT ad alta risoluzione), particolarmente utilizzata in campo medico, biologico e antropologico perché capace di registrare la struttura interna degli oggetti e le loro variazioni di densità, utili per segmentare le diverse parti che li compongono. Tale capacità generalmente non occorre nel campo della tecnologia litica, con eccezioni come nei casi di manufatti incorporati in concrezioni (WARD *et al.* 2016).

2.3 Scelta della tecnica più adatta

Come confermato da studi comparativi, i manufatti in pietra scheggiata rappresentano una delle tipologie di reperti la cui scansione genera maggiori difficoltà, a causa principalmente della loro superficie riflettiva che tende ad assorbire gran parte della luce proiettata, specialmente in selci vetrose e scure, ossidiane o rocce cristalline (quarzi e quarziti) (SLIZEWSKI, SEMAL 2009). Queste problematiche sono evidenti nella registrazione di elementi di dettaglio, come il ritocco, o nei margini particolarmente sottili. In questi casi, il laser attraversa la superficie creando incomprendimenti nella profondità dell'immagine. Al fine di risolvere questo problema, si tende ad applicare sull'oggetto un sottile strato di polvere o spray volatili.

Il limitato spessore dei bordi causa problemi anche nell'allineamento delle singole scansioni: il già citato ICP non sempre restituisce buoni risultati



Fig. 4 – Modelli 3D di schegge ricavati con fotogrammetria: in alto, le geometrie e la texture sono perfettamente acquisite e gli attributi tecnologici ben visibili. In basso, sono evidenti problemi di allineamento, come il caratteristico “rumore” sulle superfici, aspetto rugoso e granuloso derivato da nuvole di punti irregolari.

perché le due superfici possono essere erroneamente considerate come la stessa. Alcuni scanner manuali con meccanismo di misurazione delle coordinate permettono la scansione all'interno di un sistema calcolato al momento, evitando fraintendimenti nella registrazione e negli algoritmi di fusione (LORIOT *et al.* 2007). La scelta della tecnica di acquisizione deve tenere conto di diversi elementi qualitativi e di logistica. Un grande pregio della fotogrammetria è l'accessibilità degli strumenti richiesti e la semplicità nella realizzazione di un setup come quello descritto in PORTER, ROUSSEL and SORESSI (2016). Software di allineamento sono disponibili anche in versione open source o a costi limitati per licenze educational.

Tecnica generalmente “economica”, la fotogrammetria prevede tempistiche che dipendono notevolmente dalla pratica personale. Per ottenere gli scatti possono bastare tra i 10 e i 15 minuti; il post-processing è più complesso, ma si è notevolmente ridotto nel tempo benché dipenda dall'hardware a disposizione e può durare da 30 minuti a diverse ore. La qualità dei modelli ottenuti è aumentata anch'essa con il progredire dei software di allineamento e della standardizzazione del processo operativo: da tecnica alternativa allo scanner, più versatile ma meno accurata nei piccoli dettagli (SUMNER, RIDDLE 2008), la fotogrammetria è passata a produrre modelli di strumenti litici

aventi qualità geometriche pari a quelle degli scanner di alta qualità (Fig. 4) (MAGNANI *et al.* 2016).

D'altra parte, i dispositivi a scansione comprendono una gamma variegata di prodotti di diverse qualità e fasce di prezzo. I dispositivi più economici (come il Nextengine laser scanner) faticano talvolta nella registrazione di elementi di dettaglio e sono piuttosto lenti nelle fasi di post-processing (SHOTT 2014), ma possono essere perfezionati per analisi orientate anche al ritocco sui manufatti (MALONEY 2020). L'accuratezza del dettaglio e l'alta risoluzione non sono un problema per gli scanner a luce strutturata di gamma più elevata, come i prodotti della Breuckmann e della Polymetric, caratterizzati anche da una buona velocità di acquisizione: in pochi minuti le geometrie vengono registrate e la fabbricazione del modello texturizzato impiega dai 15 ai 30 minuti a seconda della complessità del pezzo (GROSMAN *et al.* 2008; DELPIANO *et al.* 2017). Infine, tra i dispositivi più veloci e versatili, si ricordano gli scanner a mano prodotti della casa di produzione Artec3D, che possono rappresentare un buon compromesso tra costo e comodità di utilizzo, velocità e trasporto, permettendo di produrre un modello finito in 10-15 minuti. Utilizzabili per documentazione di siti e reperti, questi scanner presentano tuttavia evidenti limiti nella registrazione delle caratteristiche di dettaglio dei manufatti litici (DELPIANO *et al.* 2021).

Pertanto, la scelta della tecnica di acquisizione deve essere adeguata agli obiettivi:

- Per scopi di archiviazione e disseminazione virtuale del modello, in cui la restituzione deve essere quanto più realistica, la fotogrammetria si rivela solitamente la tecnica più adeguata. In alternativa, una copertura fotografica può essere applicata a geometrie registrate con scanner ad alta risoluzione.
- Per una documentazione quanto più precisa della geometria tridimensionale finalizzata ad analisi specifiche anche di dettaglio o alla lettura tecnologica virtuale, gli scanner a luce strutturata di gamma elevata rappresentano solitamente lo strumento più adatto.
- Per analisi quantitative specifiche come la morfometria geometrica, laser scanner veloci o poco onerosi, così come la fotogrammetria, possono rappresentare le tecniche più efficienti al fine di registrare grandi quantità di modelli di sufficiente qualità con costi e/o tempistiche limitate.

3. FUNZIONALITÀ DEI MODELLI 3D

3.1 Documentazione grafica

I benefici della registrazione tridimensionale dei manufatti litici sono molteplici, a partire dalla capacità di documentare graficamente gli oggetti al fine della rappresentazione in articoli e pubblicazioni (PASTOORS, WENIGER

2011; BARONE *et al.* 2018). Il modello 3D può essere in grado di sostituire il disegno o le fotografie, solitamente usati per veicolare contenuti tecno-morfologici. Le mesh poligonali possiedono elevato valore scientifico essendo una registrazione oggettiva e accurata dell'oggetto senza intermediari e senza perdita di informazioni. La mancanza della lettura e interpretazione tecnologica (prerogativa dei disegni) crea una separazione tra la documentazione e l'analisi scientifica, minimizzando l'impatto individuale (PASTOORS, WENIGER 2011). Se a questo si unisce la proprietà del modello 3D di poter essere veicolato online, è teoricamente possibile svolgere analisi da remoto sui modelli, cosa impossibile con disegni e fotografie.

Le scansioni sono state sfruttate anche per creare documentazioni grafiche semi-automatizzate evitando il notevole impiego di tempo necessario al disegno realistico. A partire dai modelli, è possibile raggruppare in cluster geodesici le curvature delle superfici, coincidenti solitamente con le nervature registrate nelle illustrazioni, sviluppando così rappresentazioni schematiche dei manufatti (BARONE *et al.* 2018).

3.2 Processi analitici secondari e analisi quantitative

Alcuni dei vantaggi più notevoli ed evidenti dell'approccio digitale sono la capacità di estrarre informazioni altrimenti impossibili da registrare manualmente, un facile calcolo di metriche complesse (volumi, superfici, centri di massa), oltre alla possibilità di gestire e analizzare enormi quantità di dati. Per questo i modelli 3D si prestano particolarmente ad analisi quantitative e statistiche; la registrazione tridimensionale dei manufatti può essere così integrata nelle metodologie standard al fine di ampliare gli orizzonti della ricerca (GROSMAN *et al.* 2014).

Le registrazioni dei dati morfometrici, dimensionali e tecno-funzionali dei manufatti possono essere svolte direttamente sui modelli 3D ovviando a problemi di inaccuratezza e fraintendimento di protocolli, grazie al posizionamento manuale o semi-automatico dei modelli lungo gli assi richiesti secondo le convenzioni (GROSMAN *et al.* 2008). Allo stesso modo, è possibile analizzare virtualmente le caratteristiche tecnologiche: le onde di frattura, che indicano la direzionalità della forza, sono evidenti nei modelli di buona qualità, specialmente se analizzati con software che permettono di manovrare le fonti di luce. Il pattern dei negativi che si leggono sulle superfici, particolarmente importante nella tecnologia litica, può essere così ricavato.

Il rilevamento automatico nei negativi appartiene al campo della segmentazione dell'immagine digitale, più in particolare del tipo superficiale; algoritmi costruiti su diversi attributi (curvature della superficie, distanze geodesiche) sono in grado di segmentare la superficie dell'oggetto in "fazzoletti" che, ottimizzati, tendono a corrispondere ai negativi (Fig. 5). Aree, curvature, concavità, forme e altre caratteristiche possono essere gestite e analizzate a

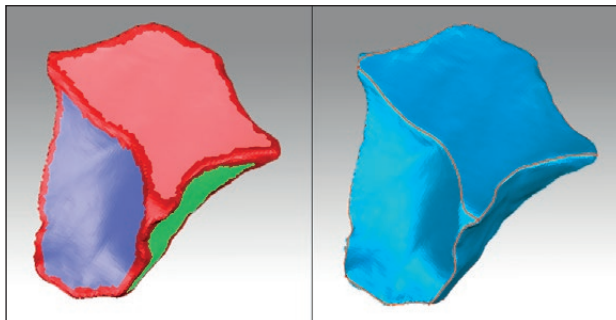


Fig. 5 – Segmentazione superficiale svolta attraverso il calcolo della convessità; si evidenziano negativi e nervature della scheggia.

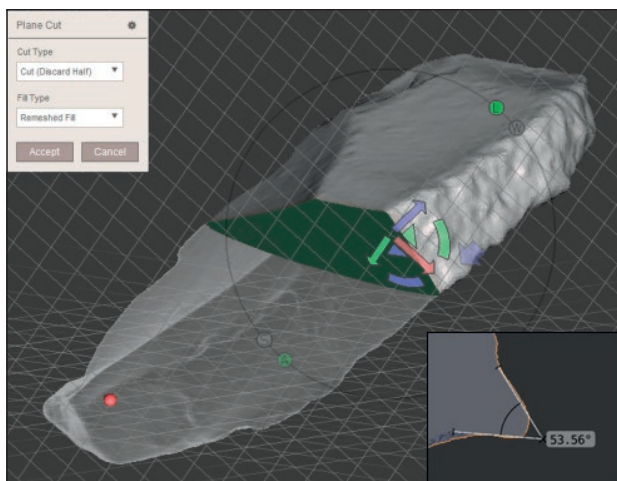


Fig. 6 – Sezionamento virtuale di uno strumento su scheggia e registrazione dell'angolo tagliente e della profondità di taglio.

partire da questa segmentazione (RICHARDSON *et al.* 2014). L'analisi quantitativa dei negativi è stata sfruttata negli ultimi anni per calcolare le riduzioni di nuclei e strumenti, indicatori importanti di mobilità e utilizzo del sito; ad esempio, i negativi possono essere registrati come vettori aventi proprietà di georeferenziazione, inclinazione, direzione, misure, rendendo possibile l'analisi del loro pattern anche in confronto alla volumetria del nucleo, sviluppando indici di riduzione come lo Scar Density Index (SDI), creato per stimare la riduzione di nuclei rapportando i negativi con l'area residua calcolata sul 3D (CLARKSON 2013).

La stima della riduzione degli strumenti ritoccati è invece stata calcolata con l'apporto di metodi statistici, rapportando la massa finale dello strumento con la stimata massa iniziale del supporto prima del ritocco, calcolata attraverso la regressione lineare a partire dall'area 3D del tallone (CLARKSON, HISCOCK 2011). Altri metodi usano i modelli 3D stimando l'estensione originale dei bordi estendendo virtualmente le ultime superfici non ritoccate del bordo stesso (MORALES *et al.* 2015). Attraverso calcoli geometrici viene così quantificata la riduzione del margine. Infine, LIN *et al.* (2010) hanno cercato di stimare la riduzione dell'insieme litico sulla base della quantificazione assoluta del cortice sulle superfici, applicando in maniera quantitativa un metodo che si basa sul calcolo della differenza tra le quantità previste di cortice determinate dalla geometria solida, e quelle invece osservate e misurate nell'insieme litico. L'obiettivo è quello di determinare se la frazione corticale sia sotto o sovrarappresentata nell'insieme, e se pertanto i manufatti venissero introdotti nel sito o da esso esportati.

L'analisi virtuale dei modelli può inoltre adattare lo studio delle volumetrie, svolto nella tecnologia litica classica, ai metodi quantitativi, anche al fine di confermare o confutare concetti e teorie: ad esempio, le conclamate differenze volumetriche tra nuclei Levallois e Discoidi teorizzate da BOËDA (1993) sono state confermate con l'applicazione tridimensionale che ha permesso la costruzione di piani di intersezione e il calcolo preciso di volumi e angoli di distacco (RANHORN *et al.* 2019). Analogamente, differenze volumetriche sono state registrate nei nuclei laminari di due culture di transizione tra Paleolitico Medio e Paleolitico Superiore in Europa, il Castelperroniano e il Protoaurignaziano (PORTER *et al.* 2019).

Allo stesso modo l'angolo dei margini taglienti dei manufatti, indicativo del loro potenziale funzionale, può essere misurato e calcolato con precisione assoluta: diversi software permettono il calcolo a partire dalle sezioni trasversali facilmente ottenibili sui modelli virtuali (Fig. 6) (DELPIANO, UTHMEIER 2020). In più, l'angolo medio dei bordi può essere ricavato con algoritmi sviluppati appositamente, capaci di evidenziare il variare dell'angolo tagliente a seconda dello spostamento sul bordo (WEISS *et al.* 2018; VALLETTA *et al.* 2020)

3.3 *Morfometria geometrica*

La crescente disponibilità di modelli digitali ha facilitato lo sviluppo di analisi morfologiche che coinvolgono la statistica multivariata. L'analisi della forma è stata inizialmente sviluppata a partire dal contorno dell'oggetto ("outline method") per quantificare attributi come la simmetria, la standardizzazione o la variabilità morfologica di alcune categorie di manufatti (GROSMAN *et al.* 2011a). La forma, integrata con la tecnologia e la tipologia dei manufatti, può essere infatti indicativa di entità tassonomiche distinte, soprattutto in epoche recenti della preistoria. Lo studio bidimensionale della forma si basa

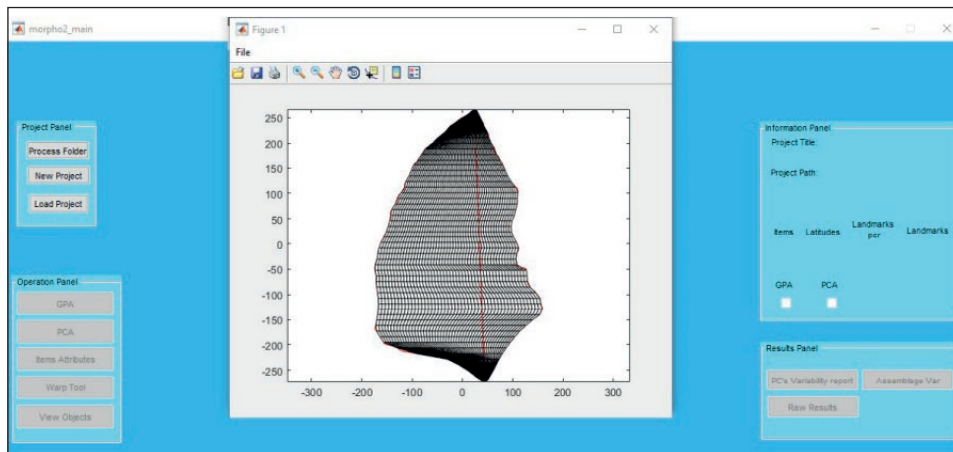


Fig. 7 – Assegnazione semi-automatica dei semi-landmark sulla superficie dei modelli 3D attraverso la griglia di meridiani e paralleli (software AGMT3D).

tendenzialmente sull'analisi di Fourier, che può essere però applicata in diversi modi a modelli tridimensionali: sulle isometrie calcolate sulle superfici di strumenti litici (GINGERICH *et al.* 2014), oppure integrando la terza dimensione direttamente sul contorno del manufatto (CHACÓN *et al.* 2016).

Il metodo principale di morfometria geometrica tridimensionale si basa invece sul posizionamento dei landmark, elemento problematico nel caso dei manufatti litici. Solitamente, sugli oggetti antropici mancano landmark omologhi e identificabili, che sono essenziali per ogni analisi comparativa. Punti individuali che descrivano efficientemente la forma dei manufatti sono di complessa individuazione e la loro omologia intrinseca è difficilmente condivisa da tutti gli oggetti. Per i manufatti si utilizzano solitamente semi-landmark, privi di questa omologia e identificati con diversi protocolli di posizionamento (DRYDEN, MARDIA 1992; LYCETT *et al.* 2006). La lettura e l'interpretazione tecnologica o tecno-funzionale sono essenziali nel caso si scelgano landmark geometricamente omologhi; data la mancanza di protocolli condivisi, le modalità di estrazione sono diverse: manualmente, attraverso i già citati calibri e digitalizzatori a contatto, oppure virtualmente attraverso l'interazione con software di modellazione 3D (SHOLTS *et al.* 2012; ARCHER *et al.* 2018; WEISS *et al.* 2018). Landmark anatomici con valore tecno-funzionale possono essere scelti su punte, diedri, talloni; dalla connessione di questi, semi-landmark formanti curve vengono fabbricati ad esempio lungo i bordi funzionali, mentre toppe di semi-landmark sulle superfici dorsali e ventrali. Nei lavori citati, la scelta dei landmark dipende dalla morfo-tecnica dei manufatti ma anche dalle analisi specifiche a cui gli studi sono indirizzati.

La registrazione più comune di semi-landmark, tuttavia, avviene come già anticipato attraverso procedure semi-automatiche. In particolare, un meccanismo di registrazione è stato recentemente sviluppato attraverso il software AGMT3-D (Fig. 7). Si tratta di un metodo veloce e semplice, basato su una griglia di linee meridiane e parallele equidistanti, al fine di acquisire dati che possono essere gestiti dal punto di vista statistico per descrizioni e analisi quantitative (HERZLINGER, GROSMAN 2018). Una volta registrate le coordinate dei landmark, il metodo standard della morfometria geometrica prevede diversi step (SHOTT, TRAIL 2010), che cominciano con la Generalized Procrustes Analysis (GPA), che rimuove le differenze di scala e orientamento nel campione e focalizza l'attenzione sulla sola dimensione della variazione morfologica. Questa verrà poi interrogata con l'Analisi delle Componenti Principali (PCA) ed espressa graficamente su un piano cartesiano attraverso le due PC che estrinsecano la variabilità maggiore.

3.4 L'analisi morfometrica applicata alla litica: strumento efficace o ambiguo?

La forma degli strumenti litici non è che una conseguenza di innumerevoli variabili (funzione, supporti di partenza, metodi di scheggiatura e riduzione, potenziale di ripristino e ritocco), la cui interpretazione è complicata e necessita dell'applicazione di diverse metodologie. Inoltre, c'è la possibilità che la forma possa essere stata concepita a seguito di un modello o schema mentale correlato a un elemento formale simbolico o dal valore culturale. Per questo la morfologia da sola non è in grado di rispondere a questioni archeologiche complesse; il principale beneficio della morfometria 3D è la registrazione oggettiva della variabilità dei manufatti. Pertanto, l'analisi morfologica può concorrere, assieme ad altri approcci (tecnologico, funzionale, sperimentale), al fine di comprendere se tali prodotti variassero a seconda di ragioni ecologico/funzionali o biologico/culturali.

Un modo per rispondere a questioni generali di tale portata può essere quello di confrontare prodotti dalla tecno-funzionalità simile e incrociare dati provenienti da questi diversi approcci, cercando di ricostruire le fonti della variabilità morfologica (WEISS *et al.* 2018; DELPIANO, UTHMEIER 2020). I risultati di alcuni studi confermano il successo del metodo nell'identificazione di diversi attributi come il livello di abilità degli scheggiatori preistorici (HERZLINGER *et al.* 2017) o di distinti obiettivi tecnologici correlati a schemi di funzione (HERZLINGER, GOREN-INBAR 2020). Fonti ricorrenti di variazione morfometrica possono anche essere l'applicazione sistematica di specifiche strategie di riduzione e la disponibilità di materia prima adatta (ARCHER, BRAUN 2010), oppure cluster geografici e dal valore tecno-culturale (ARCHER *et al.* 2016), fino a coinvolgere elementi culturali, simbolici e funzionali nel caso di armi composite (SHOTT, TRAIL 2010). A partire da ciò, è stato possibile arrivare ad identificare gruppi diversi su base etnica (THULMAN 2012).

4. ALTRE ANALISI

4.1 *Tracceologia e applicazioni GIS*

Le prospettive riguardanti l'analisi morfometrica e superficiale applicata al 3D vengono amplificate nel momento in cui si integrano le applicazioni dei sistemi GIS. Procedure sviluppate su questa base sono state presentate in DAVIS *et al.* (2015) con un approccio chiamato GLIMR: il software basato su ArcGIS estrae dati topografici e morfometrici che possono essere gestiti con l'analisi statistica multivariata per elaborazioni su landmark e attributi chiave come modelli digitali di elevazione (DEM). A questo proposito, un'applicazione molto comune di queste analisi, soprattutto negli ultimi anni, riguarda il rilevamento e la quantificazione di tracce superficiali su strumenti litici percussivi o macine, attraverso l'analisi in ambiente GIS di attributi topografici (CARUANA *et al.* 2014; CARICOLA *et al.* 2018).

Il 3D è stato applicato anche per quantificare il danneggiamento subito dai manufatti in eventuali movimenti post-deposizionali, grazie all'integrazione con strumenti sperimentali sottoposti a un processo di simulazione controllata di danneggiamento. La registrazione di modelli allo stato fresco e dopo diverse fasi di usura indotta ha permesso l'applicazione del metodo a insiemi archeologici fino ad inferire sulla possibile età degli stessi (GROSMAN *et al.* 2011b).

4.2 *Il 3D e i rimontaggi litici*

Uno degli elementi più rilevanti dell'analisi degli insiemi litici è rappresentato dai rimontaggi, ovvero dal raccordo di più manufatti che ricostituiscono parte del blocco di materia prima. I rimontaggi più complessi forniscono informazioni puntuali sulle azioni tecniche e concettuali dello scheggiatore, illustrando i metodi di lavorazione e la fabbricazione dei prodotti. Tuttavia, questo potenziale informativo non è sempre sfruttato a causa di limiti di analisi e interazione, che possono essere superati con l'approccio tridimensionale (DELPIANO *et al.* 2017). La difficile manipolazione fisica viene superata rimontando virtualmente i manufatti, evitando inoltre il rischio di danneggiamenti dovuti al contatto tra i diversi elementi o all'applicazione di paste e colle (Fig. 8) (DELPIANO, PERESANI 2017). È in questo modo possibile svolgere analisi volumetriche e interattive altrimenti impossibili con metodi tradizionali, volte persino a indagare la morfometria dei vuoti interni attraverso sezioni e calchi virtuali, inferendo sui possibili obiettivi tecnici e sulla loro funzionalità (ABEL *et al.* 2011; DELPIANO *et al.* 2019). La quantificazione precisa della riduzione e delle sue modalità topologiche è altresì possibile, dato che, se integrata all'analisi dell'insieme litico al completo, è utile per interpretare il comportamento umano associato all'occupazione del sito (DELPIANO *et al.* 2019).

Una problematica comune dei rimontaggi è correlata al fatto che la loro ricerca, all'interno del sito, rappresenta una pratica dispendiosa in termini

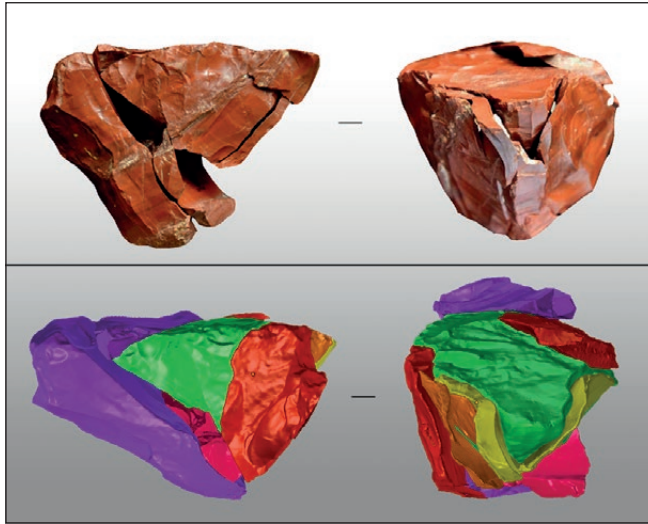


Fig. 8 – Rimontaggio litico di un nucleo con diversi prodotti laminari, anche in uno spazio virtuale 3D (modificato da DELPIANO *et al.* 2019).

di tempo. Fin dal principio dell'utilizzo di tecniche computazionali applicate all'archeologia, ci si è chiesti come sviluppare una metodologia basata sulla ricerca automatizzata di rimontaggi nell'insieme litico (RIEL-SALVATORE *et al.* 2002; SCHURMANS *et al.* 2002). Si è tentato, attraverso la segmentazione delle superfici, lo sviluppo di un processo che ricerca, in un insieme litico sperimentale registrato virtualmente, le superfici di maggiore corrispondenza tra nuclei e prodotti della scheggiatura, arrivando a risultati positivi che fanno sperare per la prossima applicazione a insiemi archeologici (YANG *et al.* 2016).

5. ARCHIVIAZIONE E STAMPA DEI MODELLI

Riproduzioni e calchi fedeli ai reperti originali sono sempre stati utilizzati, nell'archeologia, sia per scopi di musealizzazione che al fine di rendere possibili analisi e comparazioni a distanza. Il crescente utilizzo di strumenti digitali e modelli virtuali è stato sfruttato anche per sostituire gradualmente le tecniche tradizionali di riproduzione, il cui difetto era la possibilità di inquinare o danneggiare gli originali durante il procedimento. Il modello 3D offre la possibilità, come già accennato, di svolgere da remoto indipendenti analisi metriche, comparative o quantitative/statistiche. Inoltre, i modelli virtuali permettono un'accessibilità potenzialmente illimitata, che poggia le fondamenta sull'esistenza di database e piattaforme online, da quelle libere (Sketchfab) ad archivi

legati a progetti di ricerca tesi a catalogare imponenti quantità di informazioni e modelli (GRÖNING *et al.* 2007; AHMED *et al.* 2014). La libera diffusione può essere, in questi casi, un motore stesso della discussione, che può portare alla parziale revisione e al miglioramento delle classificazioni “tradizionali”.

In parallelo, i musei archeologici di tutto il mondo hanno cominciato a utilizzare strumenti digitali per registrare e rendere fruibile parte delle proprie collezioni ai visitatori virtuali, processo particolarmente necessario negli anni correnti, in cui anche le istituzioni museali sono coinvolte in sfide inedite e necessità di rivoluzionare la fruizione degli spazi. I modelli virtuali, non da meno quelli di manufatti litici, possono raggiungere qualità comunicative enormi: la creazione di video e animazioni complesse o l'integrazione in ambienti immersivi di realtà aumentata potranno diventare, in un futuro forse non troppo lontano, la prassi di un nuovo linguaggio museografico.

Nel frattempo, anche la riproduzione fisica dei modelli virtuali attraverso la stampa 3D rappresenta una modalità di esposizione comune per numerose finalità, come l'allestimento di percorsi tattili per ipovedenti, la progettazione di laboratori didattici o la creazione di prodotti per il merchandising museale. Per la stampa di manufatti litici sono disponibili diversi materiali (principalmente resine, polimeri plastici e polveri fissate con soluzioni minerali) con differenti gradi di restituzione qualitativa, fragilità e costi (OLSON *et al.* 2014). Solitamente, le stampe in plastica uniscono una qualità non eccelsa (con aspetto stratificato) a un basso peso e a un'ottima resistenza, risultando generalmente versatili e utilizzabili per diversi scopi. I modelli in resina presentano una qualità superiore per dettaglio e proprietà fisiche, dal momento che esistono diverse resine che simulano i diversi tipi di materiali.

6. CONCLUSIONI

La presente indagine è stata sviluppata per evidenziare l'utilità e le potenzialità di un approccio di acquisizione tridimensionale per lo studio della tecnologia litica, disciplina che nella sua storia ha saputo mettersi in discussione e reinventarsi più volte. La comunità scientifica si è progressivamente resa conto di queste prospettive: nelle ultime due decadi, i contributi che hanno riguardato l'acquisizione tridimensionale di manufatti litici sono passati da pochi e isolati studi di presentazione ad un ritmo di una decina (e oltre) di pubblicazioni l'anno nelle principali riviste internazionali (Fig. 9a). Per questo, si auspica che la documentazione tridimensionale possa diventare la prassi nel prossimo futuro all'interno dei processi di scavo e di studio del materiale, anche grazie all'accessibilità sempre maggiore di strumenti e tecniche di acquisizione. Tra questi, i dispositivi scanner sono tuttora gli strumenti più utilizzati, con un aumento, negli ultimi anni, di quelli a luce strutturata correlato probabilmente al buon adattamento di questi strumenti a tutti i tipi

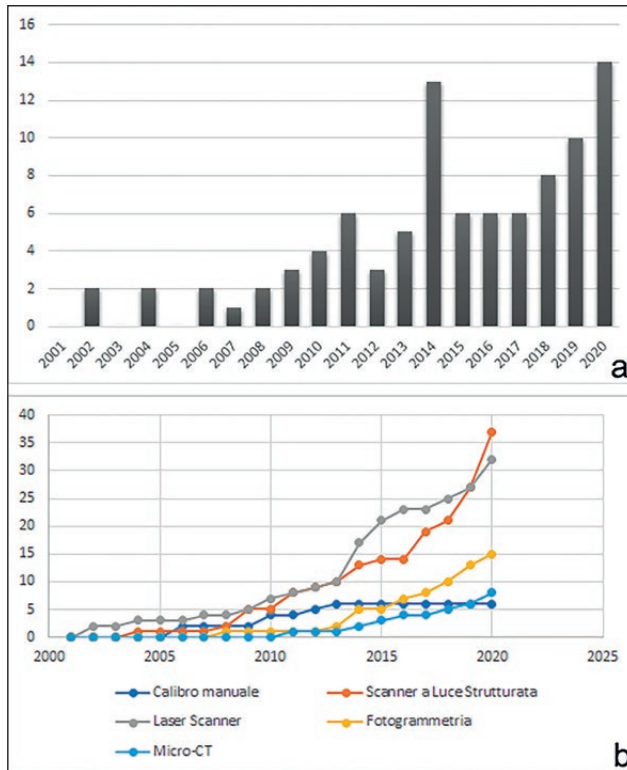


Fig. 9 – a) progressione delle pubblicazioni scientifiche riguardanti l'applicazione di tecniche di rilevamento 3D per la documentazione o lo studio dei manufatti litici dal 2000 ad oggi; b) diagramma cumulativo delle tecniche di acquisizione tridimensionale utilizzate nei suddetti lavori.

di manufatti con ottimi risultati qualitativi (Fig. 9b). Parallelamente, si assiste a una crescita nell'utilizzo della fotogrammetria, dovuta alla definizione di protocolli di acquisizione e al crescente sviluppo dei software di allineamento fotografico, oltre che alla facile accessibilità delle strumentazioni necessarie. Lo sviluppo di protocolli riproducibili è imprescindibile anche nella fase di analisi, per evitare la dispersione di approcci e uniformare la ricca produzione di questi anni: il primo passo in questo senso è stato svolto con la condivisione di codici e pacchetti sviluppati su R (POP 2019). Come abbiamo visto, la larga applicazione di queste tecniche sta progressivamente cambiando l'approccio di studio dei manufatti litici: la registrazione delle geometrie 3D sta diventando la prassi per i manufatti di un certo pregio, mentre in diversi casi, interi insiemi litici vengono sottoposti a documentazioni di questo tipo, mirate ad analisi

quantitative e statistiche. I progressi più evidenti si sono avuti nella geometria morfometrica e nella quantificazione di metriche complesse. In un prossimo futuro altri obiettivi potranno essere raggiunti, come le analisi tecnologiche da remoto e la ricerca automatizzata di rimontaggi, sempre ricordando la valenza complementare e non sostitutiva di questi tipi di approcci.

L'editoria scientifica ha compreso questo incremento di attività nell'uso del 3D e più in generale degli strumenti digitali applicati all'archeologia, replicando con la creazione di riviste scientifiche dedicate entro cui trovano spazio molti dei lavori citati nel presente articolo. La cosiddetta "rivoluzione digitale", difatti, sta coinvolgendo tutti i campi della ricerca archeologica, nessuno escluso. Solo sviluppando una riflessione metodologica ed epistemologica sul proprio valore etico e pratico, tali strumenti innovativi potranno essere integrati pienamente nella ricerca archeologica come è successo a suo tempo con le trasformazioni indotte dall'archeologia processuale e post-processuale.

Ringraziamenti

Si ringraziano il Prof. Marco Peresani e i Dr. Gianpiero Di Maida, Armando Falcucci e Filippo Zangrossi per le proficue discussioni che hanno contribuito a migliorare il presente lavoro; si ringrazia Gloria Cattabriga per la revisione inglese dell'abstract.

DAVIDE DELPIANO

Sezione di Scienze Preistoriche e Antropologiche
Dipartimento di Studi Umanistici

Università di Ferrara
davide.delpiano@unife.it

BIBLIOGRAFIA

- ABEL R.L., PARFITT S., ASHTON N., LEWIS S.G., SCOTT B., STRINGER C. 2011, *Digital preservation and dissemination of ancient lithic technology with modern micro-CT*, «Computers and Graphics», 35, 4, 878-884 (<https://doi.org/10.1016/j.cag.2011.03.001>).
- AHMED N., CARTER M., FERRIS N. 2014, *Sustainable archaeology through progressive assembly 3D digitization*, «World Archaeology», 46, 1, 137-154 (<https://doi.org/10.1080/00438243.2014.890911>).
- ARCHER W., BRAUN D.R. 2010, *Variability in bifacial technology at Elandsfontein, Western cape, South Africa: A geometric morphometric approach*, «Journal of Archaeological Science», 37, 1, 201-209 (<https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.09.033>).
- ARCHER W., POP C.M., GUNZ P., MCPHERRON S.P. 2016, *What is Still Bay? Human biogeography and bifacial point variability*, «Journal of Human Evolution», 97, 58-72 (<https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2016.05.007>).
- ARCHER W., POP C.M., REZEK Z., SCHLAGER S., LIN S.C., WEISS M., DOGANDŽIĆ T., DESTA D., MCPHERRON S.P. 2018, *A geometric morphometric relationship predicts stone flake shape and size variability*, «Archaeological and Anthropological Sciences», 10, 8, 1991-2003 (<https://doi.org/10.1007/s12520-017-0517-2>).
- BARONE S., NERI P., PAOLI A., RAZIONALE A.V. 2018, *Automatic technical documentation of lithic artefacts by digital techniques*, «Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage», 11, e00087 (<https://doi.org/10.1016/j.daach.2018.e00087>).

- BOËDA E. 1993, *Le débitage Discoïde et le débitage Levallois récurrent centripète*, «Bulletin de La Société Préhistorique Française», 90, 6, 392-404.
- CARICOLA I., ZUPANCICH A., MOSCONE D., MUTRI G., FALCUCCI A., DUCHES R., PERESANI M., CRISTIANI E. 2018, *An integrated method for understanding the function of macro-lithic tools. Use wear, 3D and spatial analyses of an Early Upper Palaeolithic assemblage from North Eastern Italy*, «PLoS ONE», 13, 12 (<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0207773>).
- CARUANA M.V., CARVALHO S., BRAUN D.R., PRESNYAKOVA D., HASLAM M., ARCHER W., BOBE R., HARRIS J.W.K. 2014, *Quantifying traces of tool use: A novel morphometric analysis of damage patterns on percussive tools*, «PLoS ONE», 9, 11, 1-18 (<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0113856>).
- CHACÓN M.G., DÉTROIT F., COUDENNEAU A., MONCEL M.-H. 2016, *Morphometric assessment of convergent tool technology and function during the Early Middle Palaeolithic: The case of Payre, France*, «PLoS ONE», 11, 5, e0155316 (<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0155316>).
- CLARKSON C. 2013, *Measuring core reduction using 3D flake scar density: A test case of changing core reduction at Klasies River Mouth, South Africa*, «Journal of Archaeological Science», 40, 12, 4348-4357 (<https://doi.org/10.1016/j.jas.2013.06.007>).
- CLARKSON C., HISCOCK P. 2011, *Estimating original flake mass from 3D scans of platform area*, «Journal of Archaeological Science», 38, 5, 1062-1068 (<https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.12.001>).
- DAVIS L.G., BEAN D.W., NYERS A.J., BRAUNER D.R. 2015, *Glimr: A Gis-based method for the geometric morphometric analysis of artifacts*, «Lithic Technology», 40, 3, 199-217 (<https://doi.org/10.1179/2051618515y.0000000007>).
- DELPIANO D., COCILOVA A., ZANGROSSI F., PERESANI M. 2019, *Potentialities of the virtual analysis of lithic refitting: Case studies from the Middle and Upper Paleolithic*, «Archaeological and Anthropological Sciences», 11, 4467-4489 (<https://doi.org/10.1007/s12520-019-00779-7>).
- DELPIANO D., GENNAI J., PERESANI M. 2021, *Techno-functional implication on the production of Discoid and Levallois backed implements*, «Lithic Technology», 46, 1, 1-21 (<https://doi.org/10.1080/01977261.2021.1886487>).
- DELPIANO D., PERESANI M. 2017, *Exploring Neanderthal skills and lithic economy. The implication of a refitted Discoid reduction sequence reconstructed using 3D virtual analysis*, «Comptes Rendus Palevol», 16, 8, 865-877 (<https://doi.org/10.1016/j.crpv.2017.06.008>).
- DELPIANO D., PERESANI M., PASTOORS A. 2017, *The contribution of 3D visual technology to the study of Palaeolithic knapped stones based on refitting*, «Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage», 4, 28-38 (<https://doi.org/10.1016/j.daach.2017.02.002>).
- DELPIANO D., UTHMEIER T. 2020, *Techno-functional and 3D shape analysis applied for investigating the variability of backed tools in the Late Middle Paleolithic of Central Europe*, «PLoS ONE», 15, 1-55 (<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236548>).
- DRYDEN I.L., MARDIA K.V. 1992, *Size and shape analysis of landmark data*, «Biometrika», 79, 1, 57-68 (<https://doi.org/10.1093/biomet/79.1.57>).
- GINGERICH J.A.M., SHOLTS S.B., WÄRMLÄNDER S.K.T.S., STANFORD D. 2014, *Fluted point manufacture in eastern North America: An assessment of form and technology using traditional metrics and 3D digital morphometrics*, «World Archaeology», 46, 1, 101-122 (<https://doi.org/10.1080/00438243.2014.892437>).
- GRÖNING F., KEGLER J.F., WENIGER G.C. 2007, *The digital world of Neanderthals - NESPOS, an online archive for Neanderthal research*, «Archaeologisches Korrespondenzblatt», 37, 3, 321-333.
- GROSMAN L., GOLDSMITH Y., SMILANSKY U. 2011a, *Morphological analysis of Nahal Zihor handaxes: A chronological perspective*, «PaleoAnthropology», 203-215 (<https://doi.org/10.4207/PA.2011.ART53>).

- GROSMAN L., KARASIK A., HARUSH O., SMILANKSY U. 2014, *Archaeology in three dimensions*, «Journal of Eastern Mediterranean Archaeology, Heritage Studies», 2, 1, 48 (<https://doi.org/10.5325/jeasmedarcherstu.2.1.0048>).
- GROSMAN L., SHARON G., GOLDMAN-NEUMAN T., SMIKT O., SMILANSKY U. 2011b, *Studying post depositional damage on Acheulian bifaces using 3-D scanning*, «Journal of Human Evolution», 60, 4, 398-406 (<https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2010.02.004>).
- GROSMAN L., SMIKT O., SMILANSKY U. 2008, *On the application of 3-D scanning technology for the documentation and typology of lithic artifacts*, «Journal of Archaeological Science», 35, 12, 3101-3110 (<https://doi.org/10.1016/j.jas.2008.06.011>).
- HERZLINGER G., GOREN-INBAR N. 2020, *Beyond a Cutting Edge: A morpho-technological analysis of Acheulian handaxes and cleavers from Gesher Benot Ya'aqov, Israel*, «Journal of Paleolithic Archaeology», 3, 1, 33-58 (<https://doi.org/10.1007/s41982-019-00033-5>).
- HERZLINGER G., GOREN-INBAR N., GROSMAN L. 2017, *A new method for 3D geometric morphometric shape analysis: The case study of handaxe knapping skill*, «Journal of Archaeological Science: Reports», 14, 163-173 (<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.05.013>).
- HERZLINGER G., GROSMAN L. 2018, *AGMT3-D: A software for 3-D landmarks-based geometric morphometric shape analysis of archaeological artifacts*, «PLoS ONE», 13, 11, 1-17 (<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0207890>).
- LIN S.C.H., DOUGLASS M.J., HOLDAWAY S.J., FLOYD B. 2010, *The application of 3D laser scanning technology to the assessment of ordinal and mechanical cortex quantification in lithic analysis*, «Journal of Archaeological Science», 37, 4, 694-702 (<https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.10.030>).
- LORIOU B., FOUGEROLLE Y., SESTIER C., SEULIN R. 2007, *3D acquisition and modeling for flint artefacts analysis*, in C. FOTAKIS, L. PEZZATI, R. SALIMBENI, *O3A: Optics for Arts, Architecture, and Archaeology. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 6618 (<https://doi.org/10.1117/12.746775>).
- LYCETT S.J., VON CRAMON-TAUBADEL N., FOLEY R.A. 2006, *A crossbeam co-ordinate caliper for the morphometric analysis of lithic nuclei: A description, test and empirical examples of application*, «Journal of Archaeological Science», 33, 6, 847-861 (<https://doi.org/10.1016/j.jas.2005.10.014>).
- MAGNANI M., DOUGLASS M., PORTER S.T. 2016, *Closing the seams: Resolving frequently encountered issues in photogrammetric modelling*, «Antiquity», 90, 354, 1654-1669 (<https://doi.org/10.15184/aqy.2016.211>).
- MALONEY T.R. 2020, *Experimental and archaeological testing with 3D laser scanning reveals the limits of I/TMC as a reduction index for global scraper and point studies*, «Journal of Archaeological Science: Reports», 29, 102968 (<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2019.102068>).
- MORALES J.I., LORENZO C., VERGÈS J.M. 2015, *Measuring retouch intensity in lithic tools: A new proposal using 3D scan data*, «Journal of Archaeological Method and Theory», 22, 2, 543-558 (<https://doi.org/10.1007/s10816-013-9189-0>).
- OLSON B.R., GORDON J.M., RUNNELS C., CHOMYSZAK S. 2014, *Experimental three-dimensional printing of a Lower Palaeolithic handaxe: An assessment of the technology and analytical value*, «Lithic Technology», 39, 3, 162-172 (<https://doi.org/10.1179/2051618514Y.0000000004>).
- PASTOORS A., WENIGER G. 2011, *Graphical documentation of lithic artefacts: Traditional hand craft versus 3-D mechanical recording*, in R. MACCHIARELLI, G. WENIGER (eds.), *Pleistocene Databases: Acquisition, Storing, Sharing*, Mettmann, Wissenschaftliche Schriften des Neanderthal Museum, 9-17.
- POP C.M. 2019, *Lithics3D*, v0.4.2, A (<https://Github.Com/Cornelmpop/Lithics3D>).
- PORTER S.T., ROUSSEL M., SORESSI M. 2016, *A simple photogrammetry rig for the reliable creation of 3D artifact models in the field. Lithic examples from the Early Upper Paleolithic*, «Advances in Archaeological Practices», 4, 1, 71-86 (<https://doi.org/10.7183/2326-3768.4.1.71>).

- PORTER S.T., ROUSSEL M., SORESSI M. 2019, *A comparison of Châtelperronian and Protoaurignacian core technology using data derived from 3D models*, «Journal of Computer Applications in Archaeology», 2, 1, 41-55 (<https://doi.org/10.5334/jcaa.17>).
- RANHORN K.L., BRAUN D.R., BIERMANN GÜRBÜZ R.E., GREINER E., WAWRZYŃIAK D., BROOKS A.S. 2019, *Evaluating prepared core assemblages with three-dimensional methods: A case study from the Middle Paleolithic at Skhül (Israel)*, «Archaeological and Anthropological Sciences», 11, 7, 3225-3238 (<https://doi.org/10.1007/s12520-018-0746-z>).
- RICHARDSON E., GROSMAN L., SMILANSKY U., WERMAN M. 2014, *Extracting scar and ridge features from 3D-scanned lithic artifacts*, in *Archaeology in the Digital Era. Papers from the 40th Annual Conference of Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, Amsterdam, Amsterdam University Press, 83-92.
- RIEL-SALVATORE J., BAE M., MCCARTNEY P., RAZDAN A. 2002, *Palaeolithic archaeology and 3D visualization technology: Recent developments*, «Antiquity», 79, 294, 929-930 (<https://doi.org/10.1017/s0003598x00091614>).
- SCHURMANS U., RAZDAN A., SIMON A., MCCARTNEY P., MARZKE M., VAN ALFEN D., JONES G., ROWE J., FARIN G., COLLINS D., ZHU M., LIU D., BAE M. 2002, *Advances in geometric modeling and feature extraction on pots, rocks and bones for representation and query via the Internet*, in *Archaeological Informatics - Pushing the Envelope CAA 2001, Proceedings of the 29th Conference of Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, BAR Int. Series 1016, Oxford, Archaeopress, 191-204.
- SHOLTS S.B., STANFORD D.J., FLORES L.M., WÄRMLÄNDER S.K.T.S. 2012, *Flake scar patterns of Clovis points analyzed with a new digital morphometrics approach: Evidence for direct transmission of technological knowledge across early North America*, «Journal of Archaeological Science», 39, 9, 3018-3026 (<https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.04.049>).
- SHOTT M. 2014, *Digitizing archaeology: A subtle revolution in analysis*, «World Archaeology», 46, 1, 1-9 (<https://doi.org/10.1080/00438243.2013.879046>).
- SHOTT M.J., TRAIL B.W. 2010, *Exploring new approaches to lithic analysis: Laser scanning and geometric morphometrics*, «Lithic Technology», 35, 2, 195-220 (<https://doi.org/10.1080/01977261.2010.11721090>).
- SLIZEWSKI A., SEMAL P. 2009, *Experiences with low and high cost 3D surface scanner*, «Quartär», 56, 131-138.
- SUMNER T., RIDDLE A. 2008, *Virtual Paleolithic: Assays in photogrammetric three-dimensional artifact modelling*, «PaleoAnthropology», 158-169.
- THULMAN D.K. 2012, *Discriminating Paleoindian point types from Florida using landmark geometric morphometrics*, «Journal of Archaeological Science», 39, 5, 1599-1607 (<https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.01.004>).
- VALLETTA F., SMILANSKY U., GORING-MORRIS A.N., GROSMAN L. 2020, *On measuring the mean edge angle of lithic tools based on 3-D models. A case study from the southern Levantine Epipalaeolithic*, «Archaeological and Anthropological Sciences», 12, 2 (<https://doi.org/10.1007/s12520-019-00954-w>).
- WARD I., SALVEMINI F., VETH P. 2016, *3D visualisation and dating of an embedded chert artefact from Barrow Island*, «Journal of Archaeological Science: Reports», 7, 432-436 (<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.05.023>).
- WEISS M., LAUER T., WIMMER R., POP C.M. 2018, *The variability of the Keilmesser-Concept: A case study from Central Germany*, «Journal of Paleolithic Archaeology», 1, 3, 202-246 (<https://doi.org/10.1007/s41982-018-0013-y>).
- YANG X., MATSUYAMA K., KONNO K. 2016, *A new method of refitting mixture lithic materials by geometric matching of flake surfaces. 1 Introduction*, «The Journal of the Society for Art and Science», 15, 4, 167-176.
- YEZZI-WOODLEY K., CALDER J., OLVER P.J., CODY P., HUFFSTUTLER T., TERWILLIGER A., MELTON A., TAPPEN M., COIL R., TOSTEVIN G. 2020, *The virtual goniometer: A new method for measuring angles on 3D models of fragmentary bone and lithics*, arXiv:2011.04898.

ZANGROSSI F., DELPIANO D., COCILOVA A., FERRARI F., BALZANI M., PERESANI M. 2019, *3D visual technology applied for the reconstruction of a Paleolithic workshop*, «Journal of Archaeological Science Reports», 28, 102045 (<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2019.102045>).

ABSTRACT

In the past few years, the application of digital techniques to archaeology has strongly increased, including 3D recording of lithic artefacts for purposes of documentation and analysis. In this paper, the main acquisition techniques are reviewed focusing on their application to lithics, and on the cost-benefit analysis which largely depends on the research objectives. The introduction of the main functions of the virtual approaches to lithics comes from the new possibilities offered in the area of graphic documentation. In fact, 3D models could gradually replace the archaeological drawing thanks to the data objectivity and to the ability to undergo remote analysis. Indeed, in virtual models complex metric data and technological information are easily recorded. Furthermore, 3D models allow the application of quantitative and statistical analysis for different aims, such as reduction intensity estimation and geometric morphometrics, especially thanks to the landmark-based approach. All these potentials have been already explored in recent years, some of them have produced a considerable number of publications. However, this diversification needs the sharing of Open Data protocols in order to evaluate the methods, as well as the application of integrated approaches. Some examples of integration between traditional and 3D analyses derive from traceology and refitting studies, where the virtual tool is not considered as replacing but complementary. Finally, the options in the fields of data storage and cataloguing have been addressed, besides the free circulation of 3D models for academic and museological purposes, including 3D printing.