

SCANSIONI DINAMICHE CON IL LIDAR DI APPLE: ESPERIENZE DI RILIEVO ARCHEOLOGICO (2021-2023)

1. CARATTERISTICHE E PRIME ESPERIENZE DI UTILIZZO

Il LiDAR di Apple – posizionato sul retro dei dispositivi di fascia alta (Pro e Pro Max) – è un sensore di tipo attivo che funziona in due step: inizialmente, invia verso l’oggetto un fascio di luce non visibile; successivamente, rileva il riflesso di questo fascio. Questo metodo, simile al funzionamento di un radar, consente al sensore di determinare la distanza degli oggetti circostanti, sfruttando il tempo che trascorre tra l’emissione e la registrazione dell’impulso di ritorno. Grazie all’integrazione di sensori IMU (Inertial Measurement Unit) – tra cui un giroscopio – il dispositivo è in grado di calcolare valori angolari e combinare queste informazioni con le distanze misurate per ottenere la posizione tridimensionale di ogni punto nell’ambiente circostante. Da notare che la nuvola di punti generata dal sensore è colorata, il che significa che la fotocamera del dispositivo è coinvolta nel processo di rilevamento.

La fotocamera è coinvolta in tre operazioni principali: 1. *Supporto al tracciamento*. Il tracciamento è il processo mediante il quale il software determina, in ogni istante durante la scansione, la posizione e l’orientamento del dispositivo e, di conseguenza, dei punti rilevati dal sensore LiDAR. Sebbene il sensore, in combinazione con i sistemi IMU, possa effettuare il tracciamento senza l’aiuto della fotocamera¹, l’utilizzo di quest’ultima migliora ulteriormente la precisione del processo grazie ai dati visivi aggiuntivi che fornisce al software, come contorni, texture e punti di riferimento distintivi sull’oggetto; 2. *Infittimento della nuvola di punti*. Le immagini catturate dalla fotocamera vengono impiegate nel processo di fotogrammetria per densificare la nuvola di punti ottenuta dal sensore LiDAR. Nell’applicazione Scaniverse, questa modalità di trattamento dei dati è denominata “Detail Mode”. Grazie a questa funzionalità, il software identifica punti corrispondenti tra le immagini e genera ulteriori punti 3D, aumentando così la densità e il livello di dettaglio del modello; 3. *Texturizzazione della mesh*. Tramite la “Detail Mode”, oltre a densificare la nuvola di punti acquisita dal sensore, si ottiene la mesh texturizzata.

In genere, il LiDAR può operare efficacemente in ambienti con scarsa illuminazione o al buio, poiché utilizza il proprio laser per misurare le distanze

¹ In condizioni di buona luminosità, il sensore LiDAR può fornire una nuvola di punti – priva di colorazione – senza il contributo della fotocamera (per verificarlo, basta oscurare l’obiettivo mentre si esegue il rilievo con l’app Scaniverse). In questo caso, la densità dei punti sarà inferiore rispetto a quella ottenuta con il supporto della fotocamera, che consente l’infittimento della nuvola tramite il processo fotogrammetrico delle immagini.

indipendentemente dalla luce ambientale. Tuttavia, il sensore integrato nei dispositivi Apple non offre le stesse prestazioni dei sistemi professionali. In condizioni di scarsa illuminazione, il sistema che traccia continuamente la posizione e l'orientamento del dispositivo può risultare instabile o discontinuo². Di conseguenza, si genera una nuvola di punti lacunosa e disaggregata, ovvero una raccolta di punti scollegati tra loro e privi di una struttura coerente, rendendo i dati acquisiti inutilizzabili per la ricostruzione 3D. Questo problema si attenua con l'uso di app in grado di implementare il sistema di tracciamento, includendo anche i dati acquisiti dalla fotocamera durante la scansione (Scaniverse, ad esempio).

Un altro aspetto da considerare è la “portata” dello strumento, che si attesta intorno ai 5 m. Sebbene questa caratteristica possa rappresentare un limite per alcune applicazioni archeologiche, è importante sottolineare le ampie potenzialità di questa tecnologia (FIORINI 2022).

L'idea di mettere a confronto il LiDAR di Apple con alcuni strumenti di precisione nasce al termine di una primissima fase di sperimentazione, che permise di prendere familiarità con il suo funzionamento e intuirne le potenzialità in campo archeologico. Di seguito si fornisce un breve resoconto (inedito) di queste prime attività sperimentali, condotte con un iPhone 13 Pro Max: un dispositivo introdotto sul mercato nel settembre 2021³.

Uno dei primi test consistette nella scansione di un semplice foglio A4. Il modello ottenuto tramite l'app Scaniverse risultò 30×21 cm, evidenziando una differenza di pochi millimetri rispetto alle dimensioni standard del foglio (29,7×21 cm). Dopo questo rilievo elementare, la vera sfida si presentò quando il sensore LiDAR fu testato “sul campo” in situazioni complesse, come il rilevamento delle feritoie di una fortificazione medievale. Questi manufatti sono generalmente caratterizzati da vani stretti che rendono le operazioni di rilevamento particolarmente impegnative. La prima esperienza fu condotta presso le mura della rocca di Grottammare (Ascoli Piceno) dove è presente un'apertura con foro di entrata largo 44 cm e camera interna ampia circa 61 cm. Partendo dal rilievo degli esterni e successivamente inserendo il dispositivo nel manufatto, fu possibile “pennellare” tutte le sue pareti interne, rilevandole tridimensionalmente, comprese quelle non visibili dall'esterno. La tecnica di scansione utilizzata, detta dinamica, prevede che lo strumento venga

² Il multiecho, o multiritorno, è un'altra caratteristica distintiva dei LiDAR professionali che consente di registrare più impulsi di ritorno per distinguere oggetti a diverse distanze. Le specifiche tecniche fornite da Apple non menzionano questa funzionalità, suggerendo che il sensore LiDAR integrato nei loro dispositivi non sia progettato per applicazioni avanzate di mappatura territoriale.

³ Per un confronto con altre esperienze e test del LiDAR di Apple nel contesto del patrimonio culturale e architettonico, si rimanda ai seguenti articoli: SPREAFICO *et al.* 2021; TEPPATI LOSÈ *et al.* 2022; VACCA 2023; ABBAS, ABED 2024.

avvicinato all'oggetto da rilevare, muovendolo senza soluzione di continuità, anziché effettuare la misura da un punto fisso.

Nonostante la complessità del contesto, lo strumento produsse una replica digitale dell'apertura sufficientemente dettagliata da consentire la creazione di piante, sezioni e prospetti. Questa esperienza permise di evidenziare l'efficacia del metodo di rilevamento dinamico per la documentazione di ambienti di dimensioni ridotte, dove lo "spazio di manovra" è limitato e la visibilità delle superfici può essere parziale: in queste circostanze, la tecnica fotogrammetrica sarebbe difficilmente applicabile, soprattutto considerando la necessità di vedere le superfici per stabilire con precisione i punti di presa e ottenere così foto con adeguata sovrapposizione.

L'efficienza e la rapidità con cui fu possibile ottenere dati direttamente "sul campo", tramite gli strumenti dell'app Scaniverse, suscitavano notevole stupore ed entusiasmo. Allo stesso tempo, emersero alcune perplessità legate alla presenza di lacune nella mesh e artefatti nella texture, problemi principalmente attribuibili a una movimentazione non ottimale del dispositivo (solo più tardi si compresero i benefici – in termini di riduzione dell'errore – di una movimentazione lenta e fluida, evitando di passare più volte sulla stessa porzione dell'oggetto).

Successivamente, ci si chiese se il LiDAR potesse essere utilizzato per ottenere rapidamente rappresentazioni planimetriche di interi edifici. Le prime esperienze condotte a Roma confermarono questa possibilità, con la scansione dell'Arco di Druso e di un breve settore delle Mura Aureliane. In entrambi i siti, l'assenza di ostacoli permise di eseguire una sola scansione dinamica per documentare la loro pianta. Durante il percorso, il sensore fu tenuto a un'altezza di circa 1 m da terra ma senza prestare attenzione alla distanza dal paramento murario (solo più tardi si compresero i benefici in termini di riduzione dell'errore grazie a una distanza costante e inferiore a 1 m, cercando di orientare l'asse ottico in modo da formare sempre un angolo di 90° con la superficie architettonica). La mesh generata dall'app fu utilizzata per estrarre all'istante una pianta, ottenuta sezionando orizzontalmente il modello digitale, e per svolgere altre operazioni fondamentali come misurazioni e sezioni, ricavate mediante tagli verticali della mesh. Infine, tutti i modelli prodotti sul campo furono salvati su cloud (OneDrive, Sketchfab, etc.) in formato 3D (come OBJ e FBX) garantendo piena compatibilità con la maggior parte dei software di modellazione.

Ricapitolando, furono sufficienti pochi minuti per ottenere una rappresentazione planimetrica da utilizzare all'istante per studiare l'edificio. Questa possibilità richiamò alla mente un'esperienza personale di qualche anno fa: la schedatura condotta sui castelli della Romagna (FIORINI 2019). Considerando il gran numero di siti, il tempo limitato e l'obiettivo dell'indagine – ossia la redazione di un atlante crono-tipologico subregionale delle strutture murarie e degli elementi architettonici – si attuò una strategia di documentazione

speditiva. Questa comprendeva schizzi planimetrici eseguiti a mano su carta, integrati da rilievi fotogrammetrici delle superfici architettoniche più significative. La disponibilità di uno strumento portatile e performante come il LiDAR avrebbe assicurato una rappresentazione planimetrica molto più completa e aderente alla realtà in termini formali. Questa base grafica avrebbe garantito un supporto immediato (fattore non trascurabile quando i siti distano molti chilometri dalla propria sede abitativa/lavorativa) per il prosieguo e il completamento delle analisi, come ad esempio: 1) la mappatura delle unità di riferimento architettonico (CF, PG, PP, EA: BROGIOLO 1988, 15-20); 2) la mappatura dei nodi stratigrafici, vale a dire, i rapporti stratigrafici che intercorrono tra le principali fasi edilizie o tra i corpi di fabbrica (GELICHI 1997, 101); 3) l'annotazione di misure specifiche funzionali all'individuazione delle unità di misura antiche (FIORINI 2015); 4) l'annotazione della posizione dei campioni murari da rilevare per l'analisi delle tecniche costruttive. Basandosi su questa mole di dati, si sarebbero potuti selezionare con maggiore precisione i siti da sottoporre a indagini intensive (prospezioni geofisiche, rilievi architettonici di precisione tramite laser scanner, analisi stratigrafiche di tutti i prospetti, scavo archeologico, etc.), portando a un maggior beneficio in termini di conoscenza storica del fenomeno dell'incastellamento in Romagna.

A questo punto, ci si interrogò sulla possibilità di utilizzare il LiDAR non solo per ottenere le piante, ma anche per generare una vista ortografica delle pareti: un documento fondamentale per l'analisi delle tecniche e della stratificazione edilizia⁴.

I primi tentativi eseguiti, sempre a Roma, sulla porta di S. Sebastiano, furono estremamente incoraggianti. Un tratto della sua parete in conci venne scansionato "a mano libera", dall'alto verso il basso, mantenendo una distanza costante (poco meno di 1 m) e cercando di evitare il passaggio ripetuto sulla stessa porzione. L'immagine che si ottenne non presentava particolari problematiche ed era sufficientemente dettagliata per gli scopi prefissati. Inoltre, gli elementi sporgenti presenti nella muratura (tenoni) erano rappresentati senza errori grossolani, garantendo un risultato apparentemente corretto, dunque più che soddisfacente. Questi risultati portarono a riflettere sulle ricadute positive nell'organizzazione logistica delle operazioni di rilievo: era dunque possibile sostituire con un solo dispositivo (piccolo e facilmente trasportabile) gli strumenti di rilievo tradizionali che in genere si utilizzavano nelle nostre ricerche? In particolare: strumenti quali stazioni totali, fotocamere reflex, target di riferimento e righe metalliche che servono ad acquisire distanze

⁴ Gli strumenti e i metodi per il rilievo archeologico sono da sempre al centro dei nostri temi di ricerca, specialmente nell'ambito dello studio delle costruzioni storiche. Inoltre, chi scrive è responsabile scientifico del Laboratorio di Archeologia dell'Architettura ed è docente a contratto per l'insegnamento di Archeologia dell'Architettura presso la Scuola di Specializzazione in Beni Archeologici dell'Università di Bologna (FIORINI 2012).

note (fondamentali per la fotogrammetria). Visti i risultati estremamente positivi, si decise di approfondire alcuni aspetti tecnici: in primo luogo gli errori dimensionali e formali, quantificabili solo attraverso la comparazione di misure acquisite tramite strumenti professionali. La descrizione dettagliata di questa indagine comparativa fu pubblicata nel 2022 all'interno del numero 33.1 della rivista «Archeologia e Calcolatori» (FIORINI 2022). Per comodità del lettore si fornisce ora un breve riepilogo dei risultati di questa analisi.

Quando la superficie è planare, come un paramento murario, e viene scansionata a poco meno di 1 m, gli errori sono praticamente trascurabili. Le misure ricavate dal modello 3D si discostano da quelle acquisite direttamente sul paramento (usando una riga metallica) di soli 0,2 cm (errore medio) e 0,6 cm (errore massimo). Tuttavia, questi valori aumentano se lo strumento viene posizionato a una distanza maggiore: a 2,5 m, l'errore medio sale a 0,9 cm e l'errore massimo a 1,5 cm.

Quando la superficie del manufatto non è planare o pseudo-planare ma è formalmente complessa e caratterizzata da sporgenze molto pronunciate, la qualità della scansione può essere veramente scarsa (anche se si pone lo strumento a distanza ravvicinata). Lo rivela un test, su un capitello riccamente decorato, che ha messo a confronto il LiDAR con uno scanner manuale ad alta precisione⁵. Rispetto ai dati acquisiti con questo scanner, il modello LiDAR (acquisito a 0,4 m di distanza) presenta semplificazioni evidenti e perdita diffusa dei decori superficiali. Ciò significa che la distanza tra i punti della nuvola è troppo ampia per riuscire a catturare i dettagli più minuti⁶. Oltre a ciò, sono evidenti numerose deformazioni: l'errore medio calcolato su tutti i punti della mesh è di 0,16 cm, ma in alcuni punti della superficie sale fino a 1,3 cm. Un errore di tale entità è inaccettabile per oggetti di piccole dimensioni, mentre può essere tollerabile nel rilievo planimetrico di un grande edificio⁷.

Rilevando gli interni affrescati di una piccola chiesa (Oratorio del Carmine, Urbana), si è potuto stabilire che le deformazioni della mesh aumentano con l'incremento della distanza di acquisizione. A causa delle dimensioni del manufatto, sono state eseguite più scansioni, ciascuna con una buona area di sovrapposizione. Le deformazioni geometriche presenti in ogni scansione hanno causato, nelle zone di sovrapposizione, errori di allineamento fino

⁵ Si tratta di uno Spider a luce strutturata, prodotto da Artec 3D. La lunghezza più piccola che lo scanner può apprezzare è 0,1 mm (risoluzione), mentre la differenza tra il valore della lunghezza misurata dallo strumento e quello della lunghezza reale può essere veramente minima: fino a 0,05 mm (precisione).

⁶ Test di misurazione condotti a 1 m dall'oggetto rivelano che la distanza tra punti adiacenti della nuvola è di circa 1 cm (SPREAFICO *et al.* 2021, 65).

⁷ Sono 8 le osservazioni che rientrano nella classe di valore 0,012-0,013 m, mentre la classe più popolata (122 osservazioni) comprende errori più contenuti, intorno ai 2 mm (da 0,0015 a 0,0021 m).



Fig. 1 – Attrezzatura per scansioni dinamiche: smartphone con sensore LiDAR (iPhone 13 Pro Max), struttura metallica con manopole in gomma (Neewer Rig Video) e lampada LED. Questo setup consente il rilevamento in ambienti dove lo spazio operativo è limitato. A sinistra: foto delle operazioni di rilievo presso l'abbazia di San Giovanni Battista (Casola Valsenio, RA).

a 5-10 cm⁸. Di conseguenza, in questi casi, la qualità dell'informazione metrica potrebbe non essere sufficiente per gli scopi del ricercatore. D'altra parte, usare la fotogrammetria per rilevare ambienti di questo tipo sarebbe stato più complicato, richiedendo un operatore esperto e diversi strumenti: 1) una fotocamera reflex; 2) alcune lampade LED a batteria; 3) un treppiede (non potendo scattare "a mano libera" a causa della scarsa illuminazione); 4) uno strumento di misura per raccogliere distanze utili alla messa in scala del modello; 5) un numero elevato di foto (viste le dimensioni dell'ambiente non sarebbe stato possibile allontanarsi dalle pareti per aumentare il campo di ripresa); 6) un computer in grado di processare il set (corposo) di dati.

Infine, esistono altre due criticità nell'impiego del LiDAR di Apple in contesti archeologici: 1) la potenziale difficoltà nel rilevare le superfici in ombra o di colore molto scuro, che causa lacune nella nuvola di punti, come osservato su un paramento in laterizi di colorazione omogenea e scura (Munsell 2.5Y 4/1 dark gray)⁹; 2) il disallineamento millimetrico di alcuni bordi dei

⁸ La superficie del modello non è continua, ma è il risultato di numerose mesh giustapposte tramite punti comuni, all'interno del software CloudCompare.

⁹ Quando si utilizza l'applicazione Scaniverse, la fotocamera può fornire al software i dettagli visivi utili per il calcolo del tracciamento, come contorni, texture e punti di riferimento distintivi sull'oggetto. Ovviamente, nei casi più critici come questo, dove la superficie è scura, povera di dettagli e scarsamente illuminata, la fotocamera non riesce a catturare queste informazioni visive, compromettendo la capacità del sistema di determinare correttamente la posizione e il movimento del dispositivo. Di conseguenza, la nuvola di punti può presentare problematiche significative, tra cui lacune e disaggregazioni.

mattoni, sebbene raro. Il primo problema può essere risolto o attenuato con un'adeguata illuminazione della superficie, mentre per il secondo, gli ingegneri informatici stanno lavorando a una soluzione. Secondo Keith Ito (sviluppatrice dell'app Scaniverse), i segmenti di texture provenienti da due viste diverse si uniscono in modo scorretto (disallineamento) quando si verificano errori di tracciamento, ovvero una valutazione imprecisa dell'orientamento spaziale del sensore. Per ridurre questo problema (e quindi la presenza di questi artefatti nella texture) consiglia l'impiego di un *ring* o un *gimbal*, strumenti che permettono un movimento più fluido della fotocamera.

2. RILIEVI (2022-2023): ANALISI DELLE PROBLEMATICHE E RISULTATI

Le esperienze di rilevamento più recenti sono caratterizzate dall'utilizzo di uno strumento ausiliario per una movimentazione più precisa del sensore: il Neewer Rig Video, una staffa di metallo dotata di comode impugnature e fori per l'installazione di una piccola lampada led (Fig. 1). La movimentazione accurata del sensore è cruciale per ottenere una corretta rappresentazione tridimensionale degli ambienti: un movimento fluido può ridurre al minimo la formazione di artefatti nella texture. Inoltre, il migliore controllo dello strumento consente di rispettare un'altra regola: non passare più volte sulla stessa area dell'oggetto, prevenendo così duplicazioni nella nuvola di punti (FIORINI 2022, 45, 51).

2.1 Sese Grande (Isola di Pantelleria, TP)

Il Sese Grande è il monumento funerario più ampio all'interno di una vasta area di necropoli connessa al vicino abitato di Mursia: un villaggio protostorico abitato tra la metà del XVIII e la metà del XV sec. a.C. (CATTANI, DEBANDI 2020, 273). Le attività di rilievo e analisi delle strutture sono state svolte nel mese di marzo del 2022 nell'ambito di un progetto di studio sul popolamento dell'isola in età del Bronzo. Tale progetto prevede il censimento di tutti i tumuli in pietre a secco, localmente noti come "Sesi". Questa attività è diretta dal prof. Maurizio Cattani (Dipartimento di Storia Culture Civiltà, Università di Bologna).

La letteratura sul Sese Grande è carente di studi specifici e di indagini archeologiche approfondite. Inoltre, i rilievi architettonici esistenti sono parziali o eccessivamente schematizzati, il che limita la comprensione e l'analisi del monumento. Per ovviare a queste lacune, si è deciso di realizzare un modello tridimensionale da cui trarre nuove visualizzazioni del monumento, piante, sezioni e prospetti: una documentazione fondamentale per comprendere la sua "storia costruttiva".

Il Sese Grande è un complesso architettonico formato da un corpo principale e due appendici strutturali (Fig. 2). Il corpo principale è una struttura



Fig. 2 – Il Sese Grande (Pantelleria, TP). In alto: vista da N (foto di Lorenzo Bonazzi). In basso a sinistra: corridoio e cella funeraria n. 12 del monumento. In basso a destra: planimetria del monumento con individuazione degli ambienti interni.

di dimensioni notevoli (lunghezza 21,8 m, larghezza 19,5 m, altezza 7 m, ingombro 306 m²), al cui interno si trovano 12 celle funerarie, raggiungibili da altrettanti corridoi. Esternamente, la struttura presenta una serie di livelli o “gradoni”, che culminano in una superficie a calotta. La pianta (a livello del primo gradone) ha una forma che richiama un’ellisse cuspidale, simile a

una mandorla. La sommità del monumento ha invece una forma irregolare, non riconducibile a categorie geometriche standard.

Lo studio del monumento si è focalizzato su una serie di obiettivi primari: 1) creare una pianta dettagliata, per descrivere la disposizione e le dimensioni dei corridoi e delle celle all'interno della struttura; 2) acquisire ortofoto dei prospetti, per disegnare la forma degli elementi costruttivi e delle unità stratigrafiche; 3) condurre un'analisi stratigrafica degli elevati, per determinare la sequenza delle fasi edilizie; 4) generare un modello tridimensionale del monumento, per produrre una replica fisica in scala ridotta (stampa 3D).

Questi obiettivi hanno orientato la scelta degli strumenti di rilievo, suggerendo l'impiego congiunto di due tecniche: la fotogrammetria da drone per il rilievo delle superfici esterne e la scansione dinamica terrestre per il rilievo degli ambienti interni¹⁰.

Per eseguire la scansione dei corridoi e delle camere funerarie, è stato utilizzato uno smartphone iPhone 13 Pro Max, fissato a una struttura metallica dotata di maniglie in gomma per agevolare il trasporto e garantire un movimento fluido e preciso. Inoltre, per illuminare la superficie da scansionare, è stata installata una lampada a led sulla struttura.

Prima di ogni rilievo, l'operatore ha posizionato una seconda lampada, alimentata da un generatore di corrente a benzina, all'interno della camera per garantire una migliore illuminazione e fornire un elemento di riferimento per orientarsi durante gli spostamenti. Questa soluzione si è rivelata particolarmente utile nei cunicoli più stretti e lunghi, che in alcuni casi raggiungevano anche i 7,9 m. Il rilevamento è stato eseguito mantenendo una distanza massima di 1 m dalle superfici, ottenendo così mesh con un errore inferiore al centimetro¹¹.

Durante la fase iniziale, si sono inquadrati gli elementi litici dell'ingresso, dove precedentemente erano stati collocati 3 target ad alta visibilità: dischi in plastilina fosforescente con al centro una piccola sfera nera (perline decorative per tessuti). Ciò ha permesso di determinare una serie di punti omologhi tra i modelli individuali dei corridoi e il modello generale, elaborato tramite fotogrammetria aerea (drone), fondamentali per allineare i rilievi. Una volta superato l'ingresso, le superfici murarie sono state scansionate procedendo "a gattoni" e muovendo lentamente il dispositivo. Ogni sessione di lavoro non ha superato

¹⁰ Chi scrive ha condotto i rilievi con il LiDAR di Apple e si è occupato del trattamento informatico di tutti i dati acquisiti sul campo, mentre l'acquisizione fotogrammetrica da drone è stata realizzata da Lorenzo Bonazzi (Dipartimento di Storia Culture Civiltà, Università di Bologna).

¹¹ Per il rilievo LiDAR del Sese Grande non sono state effettuate misure di controllo sul campo. Era stata predisposta una poligonale chiusa per il controllo, ma la verifica non è stata ancora eseguita. In assenza di tali misure, si è fatto riferimento ai test precedenti condotti con lo stesso sistema e in condizioni analoghe (FIORINI 2022), che hanno quantificato un errore atteso giudicato accettabile rispetto ai prodotti finali previsti (planimetria e modello in scala per stampa 3D). In sintesi, l'errore noto dai test è stato ritenuto compatibile con gli obiettivi; è comunque prevista una verifica in campo per consolidare i risultati.

i 3 minuti di tempo, pertanto si sono evitati arresti improvvisi della scansione causati dal surriscaldamento del sensore. La fresca temperatura esterna durante il rilievo (eseguito nel mese di marzo) ha ulteriormente agevolato le operazioni.

Dopo ciascuna scansione, è stato generato un modello geometrico a triangoli con resa fotografica delle superfici. Questo ha consentito di condurre un'analisi istantanea dei risultati e, se necessario, di ripetere la sessione. I dati acquisiti sul campo sono stati salvati in OneDrive (il noto servizio di cloud storage offerto da Microsoft), garantendo un'archiviazione tempestiva del lavoro svolto. Per l'elaborazione e la visualizzazione grafica, sono stati impiegati i software CloudCompare e AutoCAD.

In conclusione, la scansione dinamica si è dimostrata una tecnica di immediata applicabilità (ben più complesso è il settaggio di una fotocamera digitale o uno scanner 3D), in grado di operare efficacemente in condizioni operative complesse, come ambienti angusti (ipogei, corridoi, etc.). Il rilievo, eseguito a poco meno di 1 m dalla superficie, ha prodotto un modello texturizzato compatibile con il livello di qualità richiesto per le attività di studio programmate. Nello specifico, il “gemello digitale” del monumento presenta una mesh con errori centimetrici (superficie esterna) e sub-centimetrici (superfici interne)¹². Le viste ortografiche sono nitide e metricamente idonee a una analisi delle evidenze stratigrafiche e degli elementi costruttivi (osservazione, schedatura e disegno al CAD).

2.2 Rocca di Cervia Vecchia (Cervia, RA)

Il progetto “Archeologia a Cervia”, avviato dalla cattedra di Archeologia medievale dell'Università di Bologna (prof. Andrea Augenti), si propone di indagare il territorio del comune di Cervia nel suo complesso attraverso diversi approcci archeologici. Coordinato da Mila Bondi e Marco Cavalazzi, il progetto comprende scavi, indagini geofisiche, ricerche paleoecologiche e archeologia dell'architettura (AUGENTI, BONDI, CAVALAZZI 2024; BONDI, CAVALAZZI, FERRARI 2024; FIORINI 2024). L'attenzione si concentra principalmente su Cervia Vecchia (il sito della città medievale di Cervia, abbandonato nel corso del XVII-XVIII secolo a favore dell'insediamento attuale) e su Prato della Rosa (una delle località tradizionalmente associate a Ficocle, antica città e sede vescovile attestata dalla tarda Antichità).

Durante la terza e la quarta campagna di indagini (2021-2022), a Cervia Vecchia sono stati aperti diversi sondaggi stratigrafici che hanno permesso di documentare un'ampia varietà di tipologie murarie. Nel sondaggio 13, sono

¹² In genere, il disegno planimetrico (ricavato da una mesh con errori di quell'ordine) è sufficientemente preciso per la maggior parte delle applicazioni in campo archeologico: lo studio tipologico-formale dell'impianto, la restituzione grafica dei perimetri di USM, la mappatura delle tecniche costruttive e delle fasi edilizie.

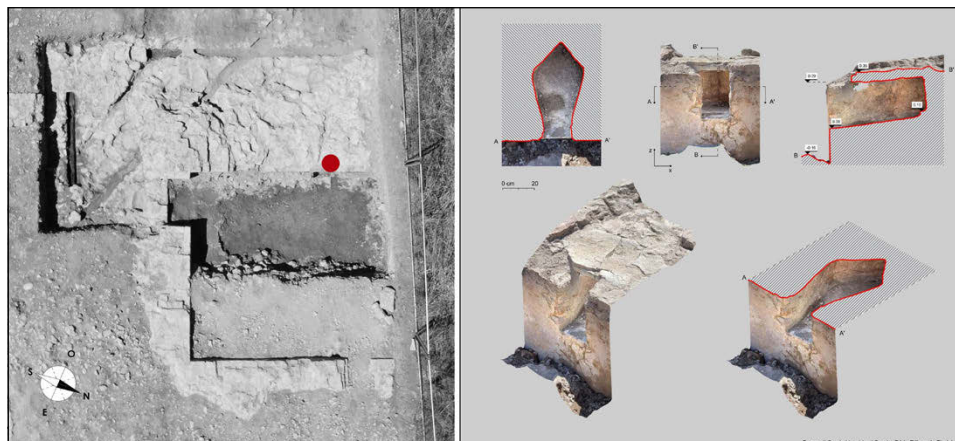


Fig. 3 – Mastio della rocca di Cervia Vecchia (Cervia, RA). A sinistra: foto da drone della struttura al termine della quarta campagna di indagini archeologiche (2022), con indicazione del luogo di rinvenimento del vano. A destra: restituzioni grafiche del rilievo tridimensionale eseguito con il sensore LiDAR di Apple.

state individuate alcune strutture attribuibili al settore militare della città, ovvero la “Rocha vecchia di Ciervia”: un complesso architettonico formato da numerosi corpi di fabbrica che, nel XVI secolo, erano ancora visibili seppur in precarie condizioni strutturali. Questa situazione è documentata da una relazione – corredata di piante e sezioni – attribuita all’architetto Antonio da Sangallo il Giovane e realizzata in seguito a un sopralluogo avvenuto presumibilmente nel 1526.

Sebbene sia stato portato alla luce solo in parte, il mastio della rocca risulta essere l’edificio più interessante. La struttura ha pianta quadrangolare, con ambiente interno largo 3,7 m e lungo circa 6 m. Dalla documentazione cinquecentesca si apprende che i muri perimetrali avevano uno spessore notevole (1,7 m circa) e una intercapedine, riempita di terra, che separava il fusto dalla sua scarpa. La presenza di mattoni di modulo medievale (prevalentemente integri) e di una scarpa basamentale suggerirono inizialmente una datazione non antecedente il XIII secolo. Oggi, invece, siamo in grado di confermare questa ipotesi – precisandola ulteriormente (fine XIII-inizio XIV secolo) – in base alle analisi C14 effettuate su alcune travi individuate nel nucleo della muratura (probabili “radiciamenti”, ovvero elementi lignei atti a contrastare la tendenza al ribaltamento delle strutture murarie in presenza di sollecitazioni orizzontali dovute ad esempio a un sisma).

Ma non è tutto. Un’altra caratteristica interessante della fabbrica si trova al suo interno, nella parete che guarda a E. Qui è presente un vano realizzato contestualmente alla costruzione del paramento (Fig. 3). La sua posizione,

rispetto alla parete, non è al momento precisabile (vista la parzialità dello scavo), tuttavia sovrapponendo il rilievo dell'architetto Antonio da Sangallo il Giovane si desume un dato interessante: il vano è stato realizzato esattamente a metà della lunghezza della parete. Colpisce subito la forma della sua pianta poligonale: un pentagono irregolare, allungato e profondo circa 60 cm, idealmente scomponibile in un trapezio isoscele affiancato a un triangolo isoscele. Il foro di entrata del vano, situato a un'altezza di circa 30 cm dalla superficie di scavo, ha una forma rettangolare di circa 17×29 cm. Degna di nota è anche la leggera inclinazione del piano inferiore interno. Al momento, non sono disponibili altri elementi per interpretarne la funzione. Ad esempio, non è chiaro se nella parete interna rivolta a O esista una struttura analoga, che potrebbe suggerire alloggiamenti per travi destinate al supporto di solai o pavimenti. Inoltre, rimane incerta la sua relazione con il piano pavimentale dell'ambiente, che sarà indagato durante le prossime campagne di scavi.

Le peculiarità strutturali del vano hanno reso indispensabile la realizzazione di un modello tridimensionale per comprenderne pienamente la conformazione. La metodologia di rilevamento doveva garantire l'acquisizione accurata dei dati morfologici delle pareti interne, nonostante gli spazi estremamente angusti. Con appena 17 cm di distanza tra le pareti verticali del foro d'accesso, l'impiego della fotogrammetria risultava problematico, richiedendo numerosi scatti con adeguata sovrapposizione (prerequisito essenziale per elaborare una restituzione tridimensionale affidabile delle superfici). Di conseguenza, la modalità "continua" di rilevamento (scansione dinamica) mediante un dispositivo compatto, facilmente inseribile nel vano, è stata identificata fin da subito come la soluzione ottimale¹³.

2.3 Casa Traversari (Ravenna)

Da qualche tempo, Casa Traversari è oggetto di complessi lavori di restauro e adeguamento funzionale¹⁴. L'edificio, sede dell'Unità Organizzativa di Sede (UOS) del Dipartimento di Storia Culture Civiltà (DiSCi), è un complesso architettonico pluristratificato, formato da più corpi di fabbrica disposti attorno a un cortile.

La storia delle sue trasformazioni architettoniche rimane ancora da delineare attraverso un approfondito studio archeologico. Di conseguenza, le datazioni proposte per le sue componenti stratigrafiche devono essere considerate come ipotesi di lavoro.

¹³ L'accuratezza del rilievo LiDAR è stata valutata confrontando i dati dimensionali ricavati dal modello 3D con alcune misure ottenute tramite una riga metallica. Gli scostamenti sono risultati simili a quelli verificati nei test precedentemente descritti (FIORINI 2022), confermando la validità del metodo utilizzato.

¹⁴ Il progetto è promosso da Alma Mater Studiorum – Università di Bologna – Area Edilizia e Sostenibilità – RUP: Arch. Monica Pagnetti.

Gli studi editi convergono sul XIII secolo come possibile periodo di fondazione dell'abitazione (RICCI 1921, 9; NOVARA 1990, 676-677; 2008, 33-34; CIRELLI 2008, 251-252, scheda n. 259). Al momento, a questo periodo o, con maggior cautela, al secolo successivo, si può far risalire una sola porzione muraria, individuata nell'aula magna del complesso (l'Aula Bovini). A interventi più recenti sembra invece riferibile un piccolo edificio, situato sul lato orientale del complesso, che ospita il Centro di Ricerche di Bioarcheologia ArcheoLaBio.

Qui, durante i lavori, si sono portate in luce alcune strutture di interesse storico-archeologico. Tra queste, la più interessante, individuata dopo la rimozione della pavimentazione, è senza dubbio un piccolo ambiente (1,9×1,3 m ca.), sormontato da una volta a sesto ribassato in laterizi, il cui pavimento non è osservabile per la presenza di terra e frammenti di materiali costruttivi. L'aspetto di questa struttura interrata fa pensare a una ghiacciaia o neviera (ATERINI 2007), oppure a un ambiente utilizzato per lo stoccaggio e la conservazione di prodotti alimentari (silo).

Al momento non è possibile determinare con precisione la sua cronologia, poiché mancano dati di scavo (l'intervento non è stato eseguito per la mancanza dei requisiti di sicurezza). Inoltre, non sono state rilevate caratteristiche costruttive che possano essere attribuite con certezza a un periodo storico specifico. Tuttavia, le dimensioni dei laterizi (circa 30×14×6 cm), simili a quelle riscontrate in alcuni edifici medievali della città di Ravenna, permettono di ipotizzare una possibile datazione medievale, da verificare attraverso future indagini.

Nel vasto panorama dei cantieri edilizi, si presentano spesso situazioni in cui gli scavi (funzionali al restauro e adeguamento funzionale) conducono alla scoperta di contesti archeologici che, al termine delle operazioni, non potranno essere lasciati a vista (come nel caso specifico della ghiacciaia di Casa Traversari, destinata a essere coperta da una nuova pavimentazione). In queste circostanze, la documentazione accurata di tali contesti diventa fondamentale, essendo l'unica testimonianza di ciò che non potrà più essere osservato. Si rendono pertanto indispensabili strumenti capaci di operare con efficacia anche in contesti complessi, caratterizzati da spazi ristretti e geometrie irregolari, quali grotte, cunicoli sotterranei o altri ambienti di difficile percorribilità.

Il 4 agosto 2023, si sono eseguiti i rilievi e le indagini archeologiche delle strutture emerse negli spazi del Centro di Ricerche di Bioarcheologia ArcheoLaBio, al fine di comprenderne la sequenza delle trasformazioni edilizie e di formulare ipotesi riguardo alla loro cronologia. Il modello 3D è stato generato in breve tempo dal sensore LiDAR di uno smartphone iPhone 13 Pro Max. Da questo modello si sono estratte le viste ortografiche, sopra le quali è stata prodotta una mappatura delle evidenze stratigrafiche (Fig. 4).

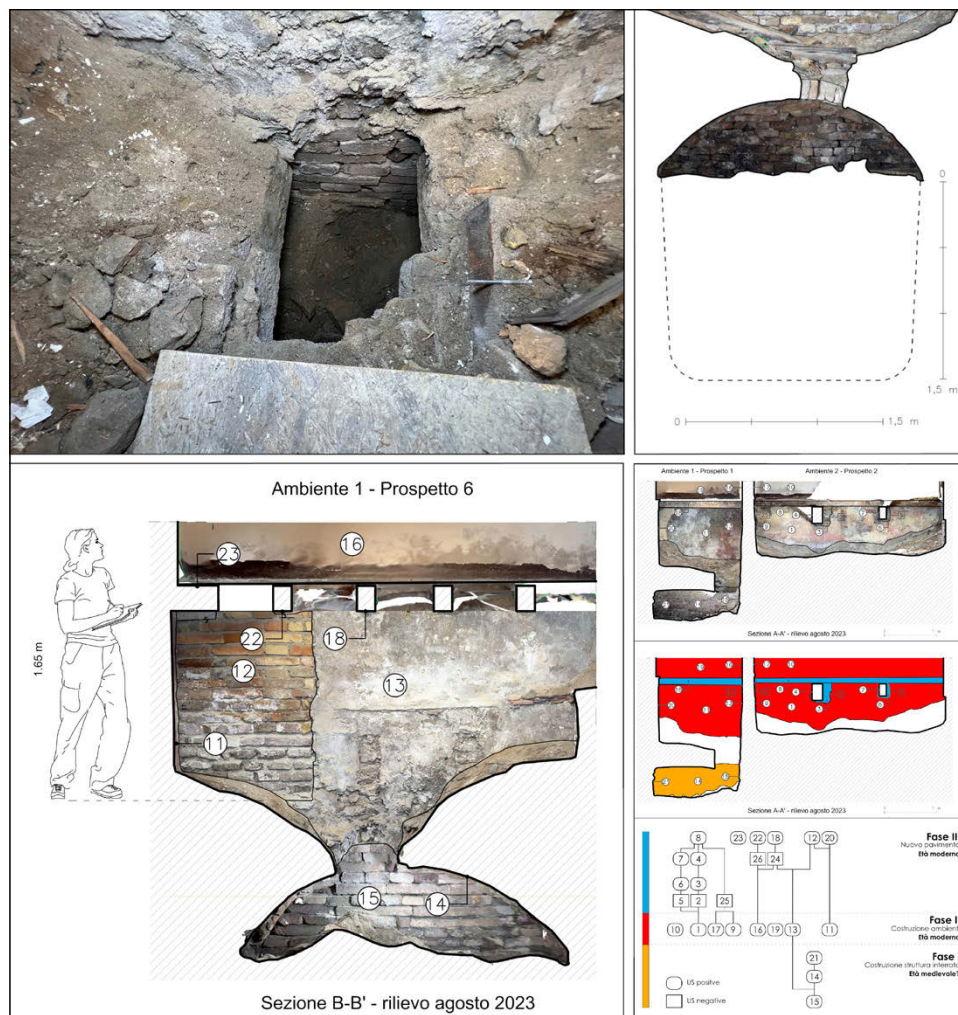


Fig. 4 – Casa Traversari (RA). Ghiacciaia scoperta dopo la demolizione del pavimento del Centro di Ricerche di Bioarcheologia ArcheoLaBio. Riquadro in alto a sinistra: dettaglio del foro d'ingresso. In alto a destra: sezione della struttura estratta dal modello LiDAR. In basso a sinistra: eidotipo stratigrafico di un paramento murario. In basso a destra: eidotipo stratigrafico di un paramento murario con individuazione delle diverse fasi edilizie.

Anche in questo caso, la scelta dello strumento è stata dettata dalle particolari condizioni ambientali: le ridotte dimensioni dello spazio da rilevare e la necessità di eseguire un rilievo “alla cieca”, vista l'impossibilità di vedere dall'esterno tutte le superfici interne della ghiacciaia (in particolar modo la

superficie intradossale della volta). La tecnica fotogrammetrica, al contrario, avrebbe richiesto una visione diretta delle superfici per stabilire la distanza di presa e lo spostamento laterale (così da ottenere immagini concatenate ad elevata sovrapposizione).

Nel foro d'ingresso della ghiacciaia, che misura appena 40 cm, è stato inserito il dispositivo, connesso alla luce ausiliaria, e grazie alla modalità “continua” di rilevamento è stato possibile documentare tutte le superfici. La movimentazione manuale dello strumento ha permesso anche di rilevare la superficie intradossale della volta (nonostante il suo punto più elevato fosse a soli 60 cm di distanza dal fondo). Sebbene il rilievo “alla cieca” non abbia rispettato una delle regole di utilizzo più importanti (evitare di passare più volte sulla stessa porzione), le deformazioni localizzate e gli artefatti della texture non hanno compromesso la qualità della documentazione e delle interpretazioni.

Dal modello 3D di questo ambiente si sono ricavati i dati dimensionali e gli elaborati grafici (piante, sezioni e prospetti), che hanno permesso di avviare la fase successiva dell'indagine: la ricerca di manufatti simili. Gli studi pubblicati hanno permesso di formulare ipotesi sulla funzione dell'ambiente (ghiacciaia o silo) e sulla posizione del fondo, che verosimilmente potrebbe trovarsi ad almeno 1,5 m di profondità rispetto al piano attuale¹⁵.

3. CONCLUSIONI E SUGGERIMENTI

Dopo un periodo di intenso utilizzo del LiDAR di Apple, è giunto il momento di fare un bilancio e condividere alcune considerazioni finali. Tra i suoi pregi, il sensore offre una precisione adeguata per numerose applicazioni archeologiche, con errori nell'ordine dei centimetri o addirittura sub-centimetrici, rendendolo una scelta economica rispetto agli scanner professionali. Inoltre, il dispositivo si dimostra efficace anche in condizioni operative estreme, come spazi angusti o aree non visibili direttamente, dove è indispensabile eseguire un “rilievo alla cieca”. Questo tipo di rilievo consente di acquisire dati senza la necessità per l'operatore di avere una visuale diretta su tutte le superfici da documentare, come dimostrato nei casi di un'apertura per armi da fuoco e di una ghiacciaia. È particolarmente utile per la documentazione di campioni di muratura ed elementi architettonici (ma non è adatto per un'indagine mensiocronologica dei laterizi, in quanto gli artefatti presenti qua e là nell'immagine non consentono di identificare con sufficiente precisione l'inizio e la fine del fianco o della testa di un mattone e pertanto non

¹⁵ L'accuratezza dei rilievi LiDAR di Casa Traversari non è stata verificata attraverso misure di controllo specifiche. Tuttavia, i test precedentemente descritti (FIORINI 2022) hanno permesso di determinare l'errore atteso, che è stato giudicato accettabile rispetto agli obiettivi del rilievo.

permettono la misura al millimetro delle sue dimensioni). Infine, offre viste ortografiche sufficientemente dettagliate, che permettono il riconoscimento e il disegno vettoriale dei contorni delle Unità Stratigrafiche Murarie (USM).

Passando ai difetti, va notato che il LiDAR potrebbe non essere adatto per la modellazione di piccoli oggetti, considerate le deformazioni (che in alcuni punti si discostano di oltre 1 cm) e la scarsa risoluzione del sensore (non sufficiente alla restituzione dei dettagli formali più minuti di una superficie). Questi problemi diventano più evidenti all'aumentare della distanza di presa, come ad esempio nel rilevamento architettonico. Il rilievo di un ambiente complesso, compreso il suo soffitto, richiederà necessariamente una serie di scansioni concatenate, eseguite a distanza variabile (almeno 1-3 m) e prossima al limite di portata dello strumento (4,9 m). In questi casi, le deformazioni presenti nelle mesh potrebbe determinare errori di allineamento significativi (fino a 5-10 cm), pertanto la qualità dell'informazione metrica potrebbe non essere sufficiente agli scopi del ricercatore. Inoltre, la limitata portata del sensore potrebbero rappresentare una significativa restrizione per lo studio dell'edilizia storica. Infine, il sensore LiDAR, in combinazione con la fotocamera, funziona in modo ottimale solo su superfici ben illuminate, chiare e ricche di dettagli contrastanti. In assenza di una o più di queste condizioni, si osserva un peggioramento dei dati, sia in termini di densità che di precisione nella posizione dei punti.

Per concludere, alcuni suggerimenti per il corretto impiego del sensore. È fondamentale pianificare attentamente il percorso di scansione, verificando che sia privo di ostacoli. Per ottenere immagini nitide destinate al disegno di campioni murari, è consigliabile mantenere una distanza di scansione non superiore a 1 m. Per la documentazione delle evidenze stratigrafiche, invece, la distanza di scansione non dovrebbe superare i 4 m. Nella movimentazione del sensore, è importante evitare di passare più volte sulla stessa porzione dell'oggetto per prevenire "sdoppiamenti" nella nuvola. L'utilizzo di un *ring* o un *gimbal* può migliorare la fluidità e la precisione del movimento, minimizzando così la formazione di artefatti nella texture. Se l'illuminazione naturale non è adeguata, è fortemente consigliato utilizzare lampade ausiliarie per evidenziare i dettagli visivi necessari al sistema di tracciamento continuo della posizione e dell'orientamento del dispositivo, come contorni, texture e punti di riferimento distintivi sull'oggetto.

In sintesi, il LiDAR di Apple può essere uno strumento utile per molte applicazioni archeologiche, ma è importante considerare attentamente i suoi limiti e le migliori pratiche per ottenerne il massimo beneficio.

ANDREA FIORINI

Dipartimento di Storia Culture Civiltà (DiSCi) - Sezione di Archeologia
Alma Mater Studiorum - Università di Bologna
andrea.fiorini6@unibo.it

BIBLIOGRAFIA

- ABBAS S., ABED F. 2024, *Revolutionizing depth sensing: A review study of Apple LiDAR sensor for as-built scanning applications*, «Journal of Engineering», 30, 04, 175-199 (<https://doi.org/10.31026/j.eng.2024.04.11>).
- ATERINI B. 2007, *Le Ghiacciaie. Architetture dimenticate*, Firenze, Alinea.
- AUGENTI A., BONDI M., CAVALAZZI M. 2024, *Cervia Vecchia: gli scavi 2020-2022. Strategia e primi risultati*, in MORIGI 2024, 25-40.
- BONDI M., CAVALAZZI M., FERRARI A. 2024, *Le ricognizioni archeologiche dell'Università di Bologna a Cervia Vecchia e nel territorio cervese (2019-2021)*, in MORIGI 2024, 47-59.
- BROGIOLO G.P. 1988, *Archeologia dell'edilizia storica*, Como, New Press.
- CATTANI M., DEBANDI F. 2020, *Strutture abitative e unità sociali: il caso studio dell'abitato dell'età del bronzo di Mursia (Pantelleria, TP)*, in N. NEGRONI CATACCHIO (ed.), *Archeologia dell'abitare. Insediamenti e organizzazione sociale prima della città. Dai monumenti ai comportamenti. Ricerche e scavi. Preistoria e protostoria in Etruria. Atti del quattordicesimo incontro di studi (Valentano-Pitigliano-Manciano 2018)*, vol. I, Milano, Centro Studi di Preistoria e Archeologia, 273-287.
- CIRELLI E. 2008, *Ravenna: archeologia di una città*, Firenze, All'Insegna del Giglio.
- FIORINI A. 2012, *Le attività di ricerca del Laboratorio di Archeologia dell'Architettura. Strumenti e metodi*, «Archeomatica», 3, 2, 38-42.
- FIORINI A. 2015, *Modani e campioni mensori: verso un censimento dell'Italia centro-settentrionale (secoli XIII-XVIII)*, «Debates de Arqueología Medieval», 5, 69-90.
- FIORINI A. 2019, *I castelli della Romagna. Indagini di Archeologia dell'architettura*, Firenze, All'Insegna del Giglio.
- FIORINI A. 2022, *Scansioni dinamiche in archeologia dell'architettura: test e valutazioni metriche del sensore LiDAR di Apple*, in A. ARRIGHETTI, R. PANSINI (eds.), *Sistemi e tecniche di documentazione, gestione e valorizzazione dell'architettura storica. Alcune recenti esperienze*, «Archeologia e Calcolatori», 33.1, 35-54 (<https://doi.org/10.19282/ac.33.1.2022.03>).
- FIORINI A. 2024, *Archeologia dell'architettura a Cervia Vecchia*, in MORIGI 2024, 63-75.
- GELICHI S. 1997, *Introduzione all'archeologia medievale. Storia e ricerca in Italia*, Roma, La Nuova Italia scientifica.
- MORIGI A. (ed.) 2024, *Cervia. Archeologie e storie di terre e di acque*, Cesena, Società di Studi Romagnoli.
- NOVARA P. 1990, *Rileggere un restauro. Nuove indagini sul paramento del cosiddetto muro di Drogdone in Ravenna*, «Archeologia Medievale», 17, 661-687.
- NOVARA P. 2008, *Edilizia abitativa nel medioevo ravennate. Un'indagine attraverso le fonti scritte e il riscontro del dato archeologico*, Ravenna, Fernandel.
- RICCI C. 1921, *Monumenti degli Anastagi e dei Traversari*, in CASSA DI RISPARMIO DI RAVENNA (ed.), *Ricordi di Ravenna medioevale nel VI centenario della morte di Dante*, Ravenna, S.T.E.R., 1-14.
- SPREAFICO A., CHIABRANDO F., GIULIO TONOLO F., TEPPATI LOSÈ L. 2021, *The iPad Pro built-in LiDAR sensor: 3D rapid mapping tests and quality assessment*, in N. PAPARODITIS et al. (eds.), *The International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLIII-B1-2021, 63-69 (<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2021-63-2021>).
- TEPPATI LOSÈ L., SPREAFICO A., CHIABRANDO F., GIULIO TONOLO F. 2022, *Apple LiDAR sensor for 3D surveying: Tests and results in the Cultural Heritage domain*, «Remote Sensing», 14, 4157 (<https://doi.org/10.3390/rs14174157>).
- VACCA G. 2023, *3D Survey with Apple LiDAR sensor-Test and assessment for architectural and Cultural Heritage*, «Heritage», 6, 1476-1501 (<https://doi.org/10.3390/heritage6020080>).

ABSTRACT

In recent years, Apple's mobile phones and tablets have been equipped with a LiDAR sensor capable of measuring the three-dimensional position of objects and reconstructing their surfaces. Experiments with this sensor began in 2021 and the results were published in the 2022 issue (33.1) of «Archeologia e Calcolatori» (FIORINI 2022). This paper describes the functionality and limitations of the sensor and its use in archaeology, in particular for the documentation of standing structures. This article provides a detailed account of recent activities (2022-2023), preceded by a brief overview of the characteristics of the instrument and its first use in 2021. Tests have shown that the LiDAR sensor is indeed valuable for archaeological work, given its relatively low cost, ease of use and rapid data acquisition compared to other scanning systems. It has proved effective for documenting walls, architectural elements and surfaces, and for quickly creating floor plans and 3D models of small spaces (with a maximum range of about 5 metres). In addition, the LiDAR sensor was effective in complex operating conditions, such as underground environments or corridors with limited manoeuvring space and poor lighting. Further surveys conducted after the initial study confirm the effectiveness of the LiDAR sensor, particularly in these challenging scenarios.