

Raffaele Voccia^{*^}, Filippo Sala*, Gabriele Gattiglia*, Riccardo Belcari*,
Georgia Long*, Gianluca Miniaci*, Martina Naso*

* Università di Pisa.

[^] Corresponding author: raffaele.voccia@phd.unipi.it

APPLICAZIONI *MOBILE-BASED* PER IL RILIEVO 3D DI REPERTI ARCHEOLOGICI: UN'ANALISI COMPARATIVA TRA *REALITY COMPOSER* E *POLYCAM 3D SCANNER, LIDAR, 360*

DATASET: DOI 10.13131/UNIFI/JJTB-D584

Abstract: This study presents two digital methodologies employed for the creation of three-dimensional surveys of archaeological artefacts using the LiDAR sensor integrated into an iPhone 15 Pro. Artefacts from Late Antiquity, the Medieval period, and Ancient Egypt were analysed, acquired through two different applications, Polycam and Reality Composer, with the aim of assessing the potential, limitations,

and reliability of this technology in the digital documentation of archaeological objects. The study offers a critical comparison of the obtained results, highlighting the methodological and practical implications of using next-generation mobile devices for 3D surveys in archaeology.

Keywords: New technology; LiDAR; 3D surveys, Archaeology.

1. Introduzione e stato dell'arte

L'obiettivo del presente contributo è testare e valutare l'impiego del sensore LiDAR di iPhone 15 Pro per la realizzazione di rilievi 3D di manufatti archeologici di piccole dimensioni appartenenti a cronologie, caratteristiche morfologiche e materiali eterogenei. Il test è stato effettuato attraverso il confronto tra due applicazioni sviluppate per la scansione e la restituzione tridimensionale in tempo reale. Il focus del presente studio si è concentrato sull'efficacia e l'efficienza sia dei tempi di acquisizione sia della resa finale dei modelli. Le indagini hanno riguardato un set selezionato di reperti. Tuttavia, in uno dei due casi studio presentati, è stato possibile testare solamente il workflow di un'applicazione a causa dei vincoli di accesso ai manufatti archeologici.

Il lavoro, pertanto, si propone di indagare, da un lato, il grado di affidabilità metrica dei modelli prodotti valutando la corrispondenza tra le dimensioni virtuali e quelle reali degli oggetti; dall'altro, la qualità complessiva della restituzione tridimensionale in termini di completezza della copertura e di leggibilità delle caratteristiche morfologiche e delle texture. Inoltre, lo studio considera gli aspetti operativi del processo di acquisizione ed elaborazione, con particolare attenzione ai tempi richiesti, al workflow utilizzato, alla dimensione dei file generati, alla diversità dei formati di output e alla riproducibilità delle procedure.

Negli ultimi anni, il continuo progresso nella miniaturizzazione dei dispositivi digitali ha permesso di rendere disponibili sensori a basso costo migliorando il rapporto costi/benefici. Ciò ha spinto il mercato a proporre soluzioni economicamente sostenibili, in grado di soddisfare requisiti di affidabilità, precisione e velocità di processamento (Teppati Losè et al., 2022).

Nel settore della documentazione e del rilievo 3D, soluzioni commerciali *low-cost* sono attestate da qualche anno, come nel caso di *Project Tango* (Tomašík et al., 2017), iniziativa pensata per dotare i dispositivi mobili di capacità di percezione spaziale e realtà aumentata. L'evoluzione nello sviluppo della sensoristica e dei relativi algoritmi ha alimentato l'adozione di sistemi di realtà mista (*Microsoft HoloLens*) (Trotta et al., 2020; Microsoft, 2026) e, in parallelo, la diffusione di telecamere *time-of-flight* (ToF), capaci di generare nuvole di punti mediante sensori a bassa risoluzione, permettendo di ottenere elementi 3D da un singolo punto di vista senza scansione meccanica (Chiabrando et al., 2009; Lichti & Kim, 2011).

Questa tendenza all'adozione capillare di tecnologie 3D si inserisce anche nel quadro di iniziative europee come il progetto *Horizon REPLICATE* (2016-2021) (Nocerino et al., 2017), volto a dimostrare scalabilità e replicabilità di soluzioni per il monitoraggio, la gestione e la modellazione dello spazio urbano. Tra le linee trasversali più innovative figurava l'uso di sensori digitali e dispositivi mobili per la produzione di dati georiferiti. In questo solco, nel 2020 Apple ha introdotto su dispositivi *consumer* (iPad Pro e iPhone 12 Pro) sensori LiDAR basati su tecnologia *flash time-of-flight* (fToF) con illuminatore *vertical-cavity surface-emitting laser* (VCSEL), soluzione poi confermata sui modelli successivi fino ai più recenti (2025), promuovendo l'uso di acquisizioni *depth-based* in contesti applicativi eterogenei.

Con l'immissione sul mercato di questa nuova tecnologia, a livello internazionale, sono molti gli ambiti di studio e ricerca che hanno iniziato a testarne le potenzialità. Murtiyoso et al. (2021), ad esempio, hanno analizzato due applicazioni per l'acquisizione di nuvole di punti con iPad Pro in tre scenari: oggetti di piccole-medie dimensioni, facciate esterne e spazi indoor, confrontando i risultati con set di riferimento realizzati con *terrestrial laser scanner* (TLS) e fotogrammetria riscontrando un elevato rumore nella nuvola di punti prodotta dal dispositivo *mobile*. Luetzenburg et al. (2021) hanno valutato l'iPhone 12 Pro per il rilievo di rocce e falesie a fini geologici. Nell'ambito dei beni culturali, l'impiego di tali approcci digitali è attestato almeno a partire dal 2020. Paukkonen (2023), ad esempio, ha testato il sensore LiDAR di iPhone 12 Pro sul sito archeologico finlandese di Kerava Yli-Jaakkola sia per la scansione di strutture in elevato, sia per la possibile analisi volumetrica di singoli elementi litici. Un caso più recente è rappresentato dalla Shuangmei Mansion (Xiaolan Town,

Zhongshan City, Provincia del Guangdong) dove una scansione LiDAR con iPhone 15 Pro su spazi interni è stata integrata con una fotogrammetria della porzione esterna realizzata da drone (Zhang & Lan, 2024), configurando un approccio ibrido orientato alla completezza della copertura e al miglioramento della resa della texture.

In ambito italiano, sono presenti diverse sperimentazioni condotte con questi strumenti, prevalentemente orientate a verifiche applicative su casi eterogenei piuttosto che a protocolli comparativi standardizzati. A Cagliari, ad esempio, il potenziale del sensore LiDAR di iPad Pro (3a generazione) è stato esplorato in differenti contesti: la volta a crociera della chiesa di Santa Maria del Monte, con rilievo effettuato da una distanza di 5 metri, una colonna nel chiostro del Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi di Cagliari, una piccola fontana nel giardino botanico e un violino (Vacca, 2023, pp. 1479-1481). A Torino, nel Castello del Valentino, sono stati documentati una statua, una stanza decorata con stucchi e affreschi e una porzione della facciata esterna, verificando la tenuta del sensore di iPad Pro (4a generazione) e iPhone 12 Pro su geometrie e apparati decorativi complessi (Teppati Losè et al., 2022, p. 11).

Fiorini (2022; 2025) ha testato le potenzialità del sensore LiDAR in dotazione all'iPhone 13 Pro e dell'applicazione *Scaniverse* (Niantic Inc., 2024) su diversi reperti di piccole, medie e grandi dimensioni, mettendo in relazione le prestazioni con la scala dell'oggetto e con le modalità di acquisizione. I suoi studi hanno evidenziato sia le potenzialità sia i limiti di questa tecnologia, dimostratasi particolarmente utile per la documentazione di campioni di muratura ed elementi architettonici, dove la geometria e la scala risultano più compatibili con la risoluzione del sensore. Mentre su oggetti di piccole e medie dimensioni come un capitello (Fiorini, 2022, pp. 42-43), il sensore LiDAR si è rivelato poco efficiente durante la fase di acquisizione, mostrando un'eccessiva lacunosità della nuvola di punti dovuta al loro scarso numero e alla loro eccessiva distanza reciproca, con conseguente perdita di informazioni. Tali limiti non hanno permesso all'applicazione di cogliere dettagli specifici come, ad esempio, le tracce di lavorazione, creando discrepanze tra le misure reali e quelle digitali e riducendo la fruibilità del modello per analisi morfometriche o tecnologiche.

I casi studio citati attestano le potenzialità di questi strumenti sia in termini di qualità della resa sia del rapporto costi-benefici. Tuttavia, emergono criticità da tenere in considerazione quando tali sensori sono impiegati per la realizzazione di modelli tridimensionali destinati a usi analitici in archeologia. Densità della nuvola di punti prodotta, facilità del flusso di lavoro, flessibilità ed efficienza nell'elaborazione dei dati e nei modelli di output, qualità delle texture sono tutti elementi che dipendono tanto dal sensore LiDAR quanto dall'applicazione utilizzata per la gestione della scansione. Pertanto, a partire da queste evidenze, è utile considerare il panorama delle applicazioni disponibili negli *store online*. L'*App Store* di Apple mostra un'ampia gamma di strumenti che sfruttano il sensore LiDAR di iPhone e iPad per generare modelli tridimensionali in *real-time* di oggetti, strutture e ambienti, spesso integrando componenti algoritmiche basate su intelligenza artificiale a supporto delle fasi di filtraggio, *meshing* e *texturing*. Le applicazioni consigliate dallo store per la realizzazione di tali processi sono: *Polycam 3D Scanner, LiDAR, 360* (Polycam, 2022); *LiDAR Scanner 3D* (Simonik, 2022.); *3D Scanner App* (AI Photo Editor Lab SRL, 2024); *Scaniverse*

(Niantic Spatial Inc., 2026); *Reality Composer* (Apple Inc. 2025); *CamToPlan-3D Scanner & LiDAR* (Tasmanic Editions, 2021); *SiteScape: LiDAR Scanner & CAD* (FARO Technologies Inc., 2023); *3D Snap: Scanner e Planimetria* (BP Mobile LLC, n.d.). Questo scenario, se da un lato lascia intravedere la possibilità di utilizzare questi strumenti nel campo dei Beni Culturali, dall'altro richiede una verifica sistematica delle prestazioni delle diverse applicazioni in condizioni operative realistiche, fondata su criteri di valutazione misurabili e replicabili. Considerato ciò, il presente studio si propone di sperimentare, mediante l'utilizzo dell'iPhone 15 Pro, il confronto tra due applicazioni (*PolyCam* e *Reality Composer*) per la realizzazione di rilievi 3D di oggetti di piccole dimensioni, valutando (i) l'affidabilità metrica, (ii) la completezza e la fedeltà geometrica della ricostruzione, (iii) la qualità visiva e cromatica delle texture e (iv) l'efficienza operativa dei flussi di acquisizione ed esportazione. L'obiettivo è collocare criticamente i risultati ottenuti rispetto alle evidenze disponibili in letteratura relative a dispositivi e versioni precedenti, verificandone la compatibilità con i requisiti documentari e analitici dell'archeologia.

2. L'hardware utilizzato

Il dispositivo utilizzato è un iPhone 15 Pro (Apple Inc., 2023) con memoria SSD da 512 GB. Dispone di *display* Super Retina XDR OLED *all-screen* da 6,1" (2556x1179 pixel, 460 ppi), processore A17 Pro con CPU e GPU a 6 *core* e *Neural Engine* a 16 *core*. Il sistema fotografico include una fotocamera principale da 48 MP (24 mm, *f*/1.78), un ultra-grandangolo da 12 MP (13 mm, *f*/2.2), un teleobiettivo 2X da 12 MP (48 mm, *f*/1.78) e un teleobiettivo 3X da 12 MP (77 mm, *f*/2.8), con registrazione video fino a 4K a 24, 25, 30 o 60 fps. È presente anche un sensore LiDAR posteriore. La fotocamera frontale da 12 MP (*f*/1.9) consente video 4K a 24, 25, 30 e 60 fps (Apple Inc., 2023).

Il sistema di geolocalizzazione utilizza GPS a doppia frequenza (GPS, GLONASS, Galileo, QZSS, BeiDou, navIC) (Apple Inc., 2023). Poiché Apple non ha pubblicato le specifiche del modulo LiDAR, la descrizione si basa su modelli precedenti (iPhone 12 Pro): tecnologia *indirect/phase-shift time-of-flight* (iToF/fToF), che misura la distanza tramite lo sfasamento tra segnale emesso e riflesso. L'illuminatore VCSEL (940 nm, Classe 1 per sicurezza oculare) emette la radiazione modulata, rilevata da sensori di profondità ad alte prestazioni come, ad esempio, i *single-photon avalanche diode* (SPAD¹), generando mappe di profondità a bassa risoluzione ma alta frequenza. Tale configurazione è efficace in condizioni di illuminazione controllata e per rilievi ravvicinati, risultando adatta ad applicazioni di realtà aumentata e documentazione 3D di oggetti e ambienti (Luetzenburg et al., 2021).

¹ Si tratta di un fotodiodo operante in regime di valanga, in grado di rilevare anche singoli fotoni. Il regime di valanga (*avalanche breakdown*) è una modalità di funzionamento di un fotodiodo in cui il dispositivo è polarizzato con una tensione superiore alla soglia di *breakdown*, che consente di rilevare anche un singolo fotone.

3. Le applicazioni mobile selezionate per lo studio

Il progetto si è concentrato sull'utilizzo di due applicazioni testate su reperti archeologici di piccole dimensioni. Il primo software considerato è l'applicazione mobile, *Polycam 3D Scanner, LiDAR, 360* (Polycam, 2022), disponibile per sistemi iOS e Android². La versione base è gratuita ma limitata: comprende 10 catture in *object mode*, catture spaziali illimitate (Room/LiDAR), fino a 150 immagini per fotogrammetria, *export* in formato GLTF e condivisione via link. La versione pro³ consente acquisizioni illimitate in *object mode*, espande il limite di immagine per fotogrammetria a 2000, permette l'accesso a 12 nuovi formati di esportazione, include strumenti per *floor plans & misure* e integra la modalità *Gaussian Splat*. Infine, la versione business⁴ aggiunge *team library*, *billing* centralizzato, *upload* automatico, *floor plan/report* avanzati illimitati, strumenti di amministrazione e salvataggio delle misure. Nei casi studio proposti è stata impiegata la versione Pro di *Polycam*. L'applicazione combina fotogrammetria e scansione LiDAR in tempo reale, consentendo di gestire superfici traslucide (*Gaussian Splat*), la condivisione tramite *web/viewer* e la generazione di *Blueprint* e *Floorplan*⁵. La scansione LiDAR è disponibile solo sui modelli iPhone Pro/Pro Max e su iPad Pro; sugli altri dispositivi, è possibile utilizzare solamente la modalità fotogrammetrica. La fase di elaborazione dei dati derivati da scansione LiDAR avviene in locale, mentre l'elaborazione fotogrammetrica viene effettuata in *cloud*, con tempistiche più lunghe a causa dell'ingente mole di dati da processare. L'applicazione permette, inoltre, la geolocalizzazione dei modelli tramite il dispositivo GPS integrato nel dispositivo, sebbene tale funzionalità sia soggetta a un errore statistico dell'ordine di alcuni metri sulle coordinate assolute. In output, infine, *Polycam* permette di esportare mesh, nuvole di punti, immagini, video, *Blueprint* e *Floorplan*, in diversi formati di file⁶.

La seconda applicazione selezionata è *Reality Composer* (Apple Inc., 2025), sviluppata da Apple in collaborazione con Pixar e rilasciata su App Store per iOS il 19 settembre 2019 come parte delle nuove tecnologie di *augmented reality* (AR), insieme a *RealityKit* (Apple Inc., 2019). Inizialmente concepita per la creazione visuale di scene in realtà aumentata, mediante un'interfaccia guidata, è stata aggiornata il 10 ottobre 2023 alla versione 1.6, introducendo una funzione per generare modelli 3D metrico-coerenti di oggetti reali a partire da un'acquisizione fotografica e *sensor-based* eseguita direttamente su iPhone o iPad Pro dotati di sensore LiDAR. Il principio di funzionamento della *feature Object Capture* si basa sull'integrazione tra acquisizione fotografica e rilievo di

² Approdato su questo sistema nell'aprile del 2022, due anni dopo iOS.

³ (27\$/mese) <https://poly.cam/pricing>

⁴ (400\$/anno) <https://poly.cam/pricing>

⁵ In *Polycam*, il *Floorplan* rappresenta una pianta 2D di un ambiente, finalizzata principalmente alla restituzione rapida delle misure e del layout spaziale. La funzionalità *Blueprint* genera, invece, una versione grafica più strutturata e formalmente organizzata della pianta, orientata alla documentazione tecnica e alla condivisione in contesti professionali.

⁶ Mesh (OBJ, DAE, FBX, GLTF/GLB, STL, USDZ), nuvole di punti (DXF, LAS anche georiferito, PLY, PTS, XYZ, "Splat PLY"), immagini/video, *Blueprint* e *Floorplan* (PDF/PNG/DXF/SVG/CSV).

profondità. Durante la scansione, il dispositivo registra una sequenza di immagini ad alta risoluzione, provenienti dalla fotocamera principale, sincronizzandole con i dati spaziali forniti dal sensore LiDAR. Attraverso un processo automatico di *structure from motion* e *multi-view stereo*, il sistema ricostruisce una nuvola di punti densa e successivamente una mesh texturizzata. Tutta l'elaborazione avviene localmente sul dispositivo, grazie ai *framework RealityKit* e *Metal* (Apple Inc., s.d.-a), che gestiscono l'allineamento delle immagini e la generazione del modello tridimensionale in tempo reale. L'output finale è un file in formato USDZ⁷ (*Universal Scene Description*) (Apple Inc., s.d.-b), standard sviluppato da Apple e Pixar, contenente la geometria triangolare, le texture *physically based rendering* (PBR) e i metadati relativi alla scala e all'orientamento del modello (Apple, 2023b)

4. I casi studio archeologici

I reperti selezionati per lo studio appartengono a due contesti profondamente differenti. Il primo nucleo⁸ è rappresentato da una coppia di statuette in argilla provenienti dal Museo Egizio di Torino. Il reperto S 09455 (8.5×7.5×13.5 cm) è una figurina in argilla cotta, raffigurante un ippopotamo in piedi su una base rettangolare. L'animale è modellato a mano a tutto tondo e rappresentato in posizione eretta. Il corpo è decorato con punti e linee dipinti in bianco. I dettagli anatomici, come occhi, orecchie e narici, sono appena accennati tramite modellazione. Il manufatto proviene dagli scavi condotti da Schiapparelli nel 1908 nel complesso funerario di Min-Hotep, ad Assiut (Alto Egitto). Il secondo reperto S 11002 (14×10×11,5 cm) è anch'esso una figurina di ippopotamo in argilla cotta (o a bassa cottura), in posizione eretta su una base rettangolare. La testa e la coda sono spezzate; l'animale è modellato a mano a tutto tondo. Il corpo è decorato con piccoli punti bianchi dipinti e un motivo a croce. Provenienza dagli scavi condotti da Schiapparelli nel 1910 ad Assiut (Alto Egitto). Entrambe le figurine vengono datate a un periodo compreso tra 2050 e 1800 a.C.

Il secondo nucleo di reperti⁹ appartiene al periodo altomedievale ed è attualmente conservato presso il Museo Archeologico di Montelupo Fiorentino (FI). I manufatti, rinvenuti nel contesto della corte regia di S. Quirico, sono riconducibili a un arredo liturgico realizzato per la chiesa e successivamente riutilizzato nel corso del tempo. In occasione delle nuove campagne di indagine condotte nel sito tra il 2024 e il 2025,

⁷ Il formato USDZ è un archivio non compresso che può contenere geometrie tridimensionali (mesh, superfici, punti), materiali PBR, texture, luci, animazioni, camere e gerarchie di scena. È concepito per essere leggero e immediatamente visualizzabile: può essere aperto direttamente su dispositivi iPhone senza l'installazione di applicazioni aggiuntive. A partire dal 2020 Apple ha rilasciato un'applicazione dedicata, *Reality Converter* (disponibile esclusivamente per sistemi macOS/iOS), pensata per convertire formati 3D comuni (come OBJ o GLTF) in formato USDZ. L'applicazione consente anche l'operazione inversa, permettendo l'esportazione di file USDZ in formati interoperabili, quali OBJ e PLX, compatibili con software di modellazione tridimensionale come *MeshLab*, *CloudCompare* e *Metashape*.

⁸ Studiati da Georgia Long e Gianluca Miniaci.

⁹ Studiati da Riccardo Belcari.

ne è stato avviato lo studio sistematico¹⁰. In dettaglio, i materiali selezionati per le acquisizioni e le elaborazioni presentate in questo contributo sono: un frammento di archetto (12.6×35×4.8 cm) pertinente a una recinzione presbiteriale di tipo alto (*pergula*) decorata con motivi associati della treccia con nastro bisolcato e dei “cani ricorrenti” realizzato in turbidite arenacea (pietra serena) e la cui datazione è fissata entro l’VIII secolo d.C.; un capitello (8.4×11.6 cm) e un frammento di cornice (11.2×12.6×5 cm) da associare a un arredo liturgico, verosimilmente lo stesso del frammento di archetto, realizzato in materiali differenti oppure oggetto di sostituzioni non troppo distanti cronologicamente. La soluzione decorativa presenta un semplice nastro bisolcato, includente o meno un bottone convesso. Entrambi i manufatti, realizzati in arenaria, sono stati datati entro l’VIII secolo d.C. o al più tardi alla fine dell’VIII-primi del IX secolo d.C. Una colonnina in marmo con toro e plinto monolitico, frammentaria (h fusto 24.8/25.2 cm; diametro 16.40/15.76 cm; plinto h 6.7/7.8 cm×21.2×15.5 cm), forse da ricondursi a una struttura di tipo rustico e datata a un periodo antecedente l’edificio ecclesiastico. Infine, un bacile in lega metallica con effigie e iscrizione *Karolus Imperator* (diametro esterno 27.4 cm; bordo 0.6-0.8 cm; peso 389 g), noto in particolare per la presenza del ritratto di un imperatore di profilo, a figura intera e seduto sul trono, datato agli inizi del XII secolo d.C. da Otto von Hessen (1984) su base stilistica.

Tutte le misurazioni dei manufatti archeologici presi in esame dallo studio sono state effettuate mediante rilievo diretto, considerando l’ingombro massimo del reperto, in modo da garantire la comparabilità tra dimensioni reali e misure ottenute dai modelli digitali.

5. Preparazione dei reperti e ottimizzazione dell’ambiente di scansione

Nella fase preliminare di acquisizione è necessario garantire condizioni ottimali sia per la qualità del rilievo sia per l’affidabilità della successiva elaborazione digitale. I reperti devono essere preventivamente sottoposti a un’attenta pulitura superficiale, in modo da rimuovere polvere o residui che potrebbero interferire con la corretta acquisizione della geometria e delle texture. Gli oggetti vengono quindi collocati in un ambiente controllato, preferibilmente caratterizzato da uno sfondo neutro (verde, nero o blu), così da minimizzare le interferenze di fondo e agevolare la segmentazione automatica dell’oggetto durante la fase di scansione.

Particolare attenzione deve essere dedicata alle condizioni di illuminazione, che devono risultare omogenee e diffuse per evitare la formazione di ombre marcate o riflessi speculari. Tali fenomeni, infatti, possono compromettere la precisione della ricostruzione digitale, generando distorsioni nel modello poligonale (mesh) o nelle mappe di texture, con ripercussioni sulla leggibilità dei dettagli morfologici e decorativi.

¹⁰ Dir. Scientifica Federico Cantini, progetto PRIN 2022 *The Missing link. Early Medieval urban public courts as centres of resilience and reinterpretation of Antiquity*. Per i reperti lapidei si veda il contributo redatto da Riccardo Belcari e Federico Cantini nell’edizione delle campagne di scavo 1999-2001 e 2024-2025, a cura di F. Cantini, in corso di stampa.

Una volta selezionata l'applicazione, il dispositivo deve essere collocato a una distanza compresa tra 20 cm e 30 cm dal reperto, così da mantenere un equilibrio ottimale tra risoluzione spaziale e accuratezza della stima di profondità. Tale configurazione assicura un'acquisizione dei dati stabile e dettagliata, riducendo il rischio di perdita d'informazioni o errori di parallasse.

6. Workflow e risultati

6.1 I modelli tridimensionali realizzati con Reality Composer

L'applicazione *Reality Composer* è stata testata per la scansione di tutti i reperti presentati all'interno di questo studio, al fine di valutare in modo sistematico prestazioni, vincoli operativi e qualità degli output in relazione a morfologie e materiali differenti.

Una volta selezionato il manufatto da scansionare, viene collocato su un piano stabile, lasciato libero sul suo perimetro, in maniera tale da consentire all'operatore di muoversi agevolmente intorno all'oggetto, ottimizzando così la fase di acquisizione dei dati. Successivamente, all'interno dell'interfaccia dell'applicativo, viene selezionata la modalità *Object Capture*, che guida l'utente lungo il processo di acquisizione. Durante la prima fase, viene richiesto di inquadrare il reperto al fine di permettere al software di generare automaticamente una *bounding box* utile per delimitare l'oggetto ed escludere eventuali elementi esterni. È necessario, inoltre, verificare che la *box* creata corrisponda effettivamente al manufatto da rilevare; in caso contrario è possibile modificarne manualmente dimensioni, posizione e orientamento, in modo da circoscrivere con precisione l'oggetto della scansione.

In questa fase preliminare è emersa una delle principali criticità dell'applicazione, legata al riconoscimento di oggetti di piccole dimensioni. *Reality Composer* non è infatti in grado di rilevare reperti con dimensioni inferiori a 8 cm. Il problema è stato tuttavia risolto includendo temporaneamente nella *bounding box* anche il supporto su cui il reperto era posizionato, per poi correggere manualmente i limiti della *box* fino a racchiudere esclusivamente l'oggetto da scansionare, riducendo l'inclusione di elementi estranei nella generazione del modello.

Completata la fase di impostazione dell'ambiente di lavoro, è stata avviata la scansione. Al centro dello schermo compare un puntatore, il quale deve essere mantenuto sull'oggetto durante tutto il processo di acquisizione, mentre una circonferenza segmentata indica l'avanzamento del rilievo a 360°. Nella parte inferiore dello schermo è visibile, inoltre, una finestra che mostra in tempo reale l'aggiornamento della nuvola di punti. Durante la scansione, che prevede un movimento lento e costante intorno all'oggetto, il software assiste l'operatore suggerendo eventuali correzioni di traiettoria, indicando la distanza ottimale per la cattura dei dettagli e segnalando condizioni di illuminazione non adeguate, con l'obiettivo di ridurre errori di acquisizione dovuti a distanza, velocità di movimento e instabilità dell'inquadratura.

Al termine del primo segmento di rilievo, l'applicazione consente di integrare la scansione con ulteriori segmenti (fino a un massimo di tre), suggerendo di capovolgere il reperto per ottenere una copertura completa a 360°. Qualora non sia possibile

ruotare l'oggetto, come nel caso del frammento di archetto, fissato su supporto ligneo, il software propone di acquisire tre segmenti da punti di vista differenti (basso, medio e alto), così da migliorare la qualità e la completezza della ricostruzione.

Terminata la fase di acquisizione, il software procede automaticamente all'elaborazione del modello tridimensionale, interamente eseguita in locale senza necessità di connessione a Internet né di upload su server esterni. Il tempo di elaborazione varia in funzione del numero di immagini catturate, ma si mantiene generalmente entro un intervallo di 2-3 minuti. L'intero processo, inclusa la fase di rilievo, richiede in media tra 10 e 20 minuti complessivi.

Conclusa l'elaborazione, è possibile visualizzare il modello 3D e verificare la presenza di eventuali lacune o imperfezioni. *Reality Composer* non offre strumenti di editing direttamente sul dispositivo né consente interventi di correzione sull'output. Qualora il modello risulti incompleto o presenti errori significativi, è necessario ripetere l'intera scansione. Questo porta implicazioni sulla ripetibilità ed efficienza del workflow di lavoro sul campo.

Infine, l'applicazione consente di esportare il modello elaborato direttamente nel *cloud*, esclusivamente nel formato USDZ. Questo limita l'interoperabilità con ambienti non iOS.

I modelli tridimensionali generati con *Reality Composer* sono stati successivamente importati all'interno di *Blender*¹¹ (Blender Foundation, n.d), software open source per la modellazione e il rendering 3D che, a partire dalla versione 4.0, supporta nativamente l'intera famiglia di formati USD*. Questa compatibilità consente non solo una visualizzazione immediata dei modelli esportati da dispositivi iOS, ma permette anche la possibilità di analizzarne la struttura interna. *Blender* rappresenta inoltre una piattaforma intermedia utile per la conversione permettendo così la successiva esportazione in formati interoperabili come OBJ, PLY e STL.

Questa fase di conversione e controllo ha consentito di integrare la verifica qualitativa dei modelli con un'analisi della nuvola di punti, della densità poligonale e della resa cromatica delle texture, garantendo una gestione coerente dei dati all'interno di differenti ambienti di modellazione e analisi.

L'analisi dei file PLY esportati ha evidenziato che *Reality Composer* genera modelli basati su nuvole di punti composte, nei casi analizzati, mediamente da circa 13.700 punti, con un picco massimo di 15.106 punti registrato per il modello del bacile metallico, da cui deriva un mesh a bassa densità poligonale. Tale semplificazione è funzionale alla leggerezza dell'output e alla sua immediata visualizzazione su dispositivi mobili, senza comprometterne la resa. La texture fotorealistica ad alta definizione, ottenuta sfruttando la risoluzione della fotocamera integrata negli iPhone di ultima generazione, compensa efficacemente la limitata complessità geometrica, restituendo modelli di elevata qualità visiva.

La verifica metrica, condotta confrontando le dimensioni reali dei reperti con quelle ottenute dai modelli tridimensionali, restituisce un errore sulle misure rilevata dagli operatori pari a 0.22 cm e un errore massimo di 0.4 cm (tab. 1).

¹¹ Per lo studio è stata impiegata la versione 4.5.4.

Nuvola di punti e misurazioni			
Reperti	Nuvola di Punti	Misure rilevate dagli operatori	Misure rilevate dall'applicazione
Frammento di archetto	13923 punti	35 cm×12.6 cm×4.8 cm	35.4 cm×12.5 cm×4.9 cm,
Frammento di cornice	13853 punti	11.2 cm×12.6 cm×5 cm	10.7 cm×12.2 cm×5.1 cm
Capitello	13385 punti	8.4 cm×11.6 cm	8.3 cm×11.7 cm
Colonnina	13497 punti	31.5 cm×21.2 cm	31.3 cm×20.8 cm
Bacile metallico	15106 punti	Diametro 27.4 cm	Diametro 27.6 cm
Figurina egizia n°09455	14365 punti	13.5 cm×8.5 cm×7.5 cm	13.25 cm×8.8 cm×7.3 cm
Figurina egizia n°11002	14204 punti	10.0 cm×14.0 cm×11.5 cm	10.03 cm×15.68 cm×11.1 cm
Valutazioni metrologiche			
Reperto	Errore medio relativo (cm)		
Frammento di archetto	0.20		
Frammento di cornice	0.33		
Capitello	0.10		
Colonnina	0.30		
Bacile metallico	0.20		
Figurina egizia n°09455	0.25		
Figurina egizia n°11002	0.70		

tab. 1. La tabella indica, per ciascun reperto, il numero di punti della nuvola, le misure rilevate dagli operatori, quelle rilevate dal dispositivo in fase di scansione con l'applicazione *Reality Composer* e l'errore medio relativo calcolato per ciascun manufatto.



fig. 1. I modelli 3D dei reperti altomedievali realizzati attraverso l'utilizzo di *Reality Composer*: il frammento di archetto (A), il bacile metallico (B), il capitello (C), il frammento di colonnina (D) e il frammento di cornice (E). Le elaborazioni qui mostrate non sono in scala.



fig. 2. I modelli 3D dei reperti egiziani realizzati con *Reality Composer*. A sinistra figurina S 11002, a destra figurina S 09455. Le elaborazioni qui mostrate non sono in scala.

Tali valori, calcolati come media tra i reperti e non pesati in funzione del numero di dimensioni misurate, confermano una buona affidabilità metrica dei modelli generati. Si è scelto di calcolare l'errore medio per reperto e non per singola dimensione, al fine di evitare una ponderazione eccessiva dei manufatti caratterizzati da un numero maggiore di misure disponibili. Questo approccio consente di mantenere una rappresentatività equilibrata dell'intero campione e di valutare la precisione dei modelli in funzione dell'unità analitica di riferimento, ovvero del singolo reperto, piuttosto che della numerosità delle misurazioni eseguite. È stato inoltre escluso dal calcolo il valore anomalo di 15.68 cm, relativo alla seconda dimensione della statuetta egizia S 11002, poiché attribuibile a un possibile errore di misurazione sul campo e non al processo di modellazione digitale. Nel complesso, i risultati evidenziano uno scostamento metrico medio inferiore a ± 0.3 cm.

Durante la fase di elaborazione, *Reality Composer* utilizza una *pipeline* ottimizzata che integra i dati provenienti dalla fotocamera con quelli generati dal sensore LiDAR. Quest'ultimo fornisce informazioni di profondità in tempo reale, migliorando la stima spaziale in corrispondenza di superfici riflettenti, scarsamente illuminate o di geometria complessa. Il contributo del LiDAR consente inoltre una definizione automatica più accurata della *bounding box* attorno all'oggetto, ottimizzando la segmentazione della scena e riducendo l'inclusione di elementi estranei. Il sensore agisce dunque come un sistema di calibrazione attiva, fornendo una prima stima della scala e della profondità che viene poi raffinata durante l'elaborazione fotogrammetrica.

Nelle seguenti immagini vengono visualizzati i modelli completi prodotti alla fine dell'esecuzione del processo di scansione (fig. 1; fig. 2).

6.2 I modelli 3D generati con Polycam 3D Scanner, LiDAR, 360

In questa sezione vengono descritti i passaggi seguiti per la realizzazione dei modelli 3D tramite *Polycam* e i relativi risultati metrici e qualitativi. Come già indicato¹², a causa dei vincoli di accesso ai manufatti di epoca egizia, non è stato possibile testare tale applicazione su questo nucleo. Di conseguenza, l'analisi con *Polycam* è stata condotta esclusivamente sul nucleo altomedievale, consentendo, in questo caso un confronto diretto con i risultati derivati da *Reality Composer*.

L'applicazione non dispone, di default, di una modalità specificamente dedicata al rilievo di oggetti, fatta eccezione per la modalità fotogrammetrica, che tuttavia esclude l'impiego del sensore LiDAR nel processo di acquisizione. Pertanto, la scansione è stata eseguita selezionando la modalità "Spazio", inquadrando l'oggetto da rilevare e attendendo la comparsa della griglia di acquisizione dei dati, che serve da riferimento visivo per la registrazione della scena.

A differenza di *Reality Composer*, *Polycam* non genera una *bounding box* per isolare l'oggetto dall'ambiente circostante; di conseguenza, durante il rilievo è necessario prestare particolare attenzione per evitare che elementi di disturbo vengano rilevati accidentalmente dal sensore LiDAR o dalla fotocamera dell'iPhone, compromettendo la qualità del modello finale, soprattutto nelle aree prossime all'oggetto come il piano d'appoggio e uno sfondo vicino. Una volta completata l'acquisizione, il modello deve essere elaborato selezionando la modalità "Oggetto", che consente di ottenere il massimo livello di dettaglio disponibile. In questa fase, *Polycam* offre la possibilità di intervenire manualmente sui parametri di elaborazione, modificando i valori personalizzati (*custom settings*) per ottimizzare la resa complessiva del modello tridimensionale, introducendo una variabile metodologica rilevante, poiché la qualità dell'output dipende anche dalle scelte di processing adottate dall'operatore.

L'intero processo di elaborazione, eseguito in locale senza necessità di connessione a Internet o upload su server esterni, presenta una durata variabile in funzione della quantità di dati acquisiti, generalmente compresa tra 1 e 4 minuti. È stato osservato che la velocità di elaborazione risulta influenzata dallo stato di carica della batteria dell'iPhone: a un livello di carica più elevato corrisponde una maggiore rapidità di calcolo. L'intero workflow di acquisizione ed elaborazione si completa mediamente in un intervallo di 15-20 minuti.

Una volta terminata l'elaborazione, il modello può essere analizzato direttamente in locale, non solo dal punto di vista grafico, ma anche metrico e geometrico. *Polycam* offre una serie di strumenti che consentono di effettuare misurazioni dirette sul modello 3D e, se necessario, di procedere a operazioni di ridimensionamento (*rescaling*) per correggere eventuali discrepanze geometriche, rendendo esplicite scelte correttive che possono migliorare la coerenza interna del modello, ma introducono trasformazioni *ex post* da documentare con cura.

Una delle maggiori criticità registrate durante l'impiego di *Polycam* è rappresentata dall'impossibilità di ottenere una scansione a 360° del singolo reperto, questo avviene

¹² Vedi par. 2.

Nuvola di punti e misurazioni			
Reperto	Nuvola di Punti	Misure rilevate dagli operatori	Misure rilevate dall'applicazione
Frammento di archetto	124680 punti	35 cm×12.6 cm×4.8 cm	36,1 cm×15.9 cm×4.9 cm,
Frammento di cornice	69040 punti	11.2 cm×12.6 cm×5 cm	10.3 cm×12.4 cm×4.9 cm
Capitello	131020 punti	8.4 cm×11.6 cm	8.1 cm×12.3 cm
Colonnina	158500 punti	31.5 cm×21.2 cm	32.3 cm×21.9 cm
Bacile metallico	142920 punti	Diametro 27.4 cm	Diametro 22.8 cm
Valutazioni metrologiche			
Reperto	Errore medio relativo (cm)		
Frammento di archetto	1.50		
Frammento di cornice	0.40		
Capitello	0.50		
Colonnina	0.75		
Bacile metallico	4.60		

tab. 2. La tabella indica, per ciascun reperto, il numero di punti della nuvola, le misure rilevate dagli operatori, le misure rilevate dal dispositivo in fase di scansione durante l'utilizzo dell'app *PolyCam* e l'errore medio relativo calcolato per ciascun manufatto.

perché l'applicazione non offre la possibilità di capovolgere l'oggetto, e pur permettendo una modalità *extend* per aggiungere parti a una stessa presa, non riconosce lo spostamento del singolo elemento, finendo per sovrapporre le parti in un unico modello, che può produrre effetti di duplicazione o incoerenza geometrica.

Infine, i modelli ottenuti sono stati esportati nei formati OBJ e PLY, al fine di consentirne la visualizzazione e la successiva analisi in software di modellazione e visualizzazione tridimensionale, così da verificarne l'accuratezza geometrica e la completezza della resa.

L'analisi dei PLY evidenzia come *Polycam* generi modelli a partire da nuvole di punti dense composte mediamente da 125.232 punti, con un picco massimo di 158.500 punti per la colonnina e un minimo di 69.040 punti per la cornice in arenaria. A una nuvola di punti sicuramente più densa rispetto a quella creata da *Reality Composer*; tuttavia, corrispondono una resa grafica e una qualità della texture decisamente inferiori, oltre all'impossibilità di generare un modello 3D completo a 360°. Infatti, i dettagli delle lavorazioni a rilievo delle cornici, i particolari della superficie metallica del bacile, appaiono poco definiti e dettagliati, non restituendo appieno lo spessore delle tracce di lavorazione e la qualità delle decorazioni, creando effetti di *blur* che alterano la percezione delle superfici, con ricadute sulla leggibilità del manufatto.

La verifica metrica, condotta confrontando le dimensioni reali dei reperti con quelle ottenute dai modelli tridimensionali, restituisce un errore medio sulle misure rilevate dagli operatori di 1.55 cm e un errore massimo di 4.6 cm (tab. 2).

Tali valori, calcolati come media tra i reperti e non pesati in base al numero di dimensioni misurate, riflettono l'eterogeneità dei manufatti analizzati e confermano una differenza significativa tra modelli caratterizzati da geometrie semplici e regolari, come il frammento di cornice e la colonnina, e quelli più complessi o riflettenti, come nel caso del bacile metallico. Si è scelto di calcolare l'errore medio per reperto e non



fig. 3. I modelli 3D dei reperti altomedievali realizzati attraverso l'applicazione Polycam: il frammento di archetto (A), il bacile metallico (B), il capitello (C), il frammento di colonnina (D) e il frammento di cornice (E). Le elaborazioni qui mostrate non sono in scala.

per singola dimensione, al fine di evitare una ponderazione eccessiva dei manufatti con un numero maggiore di misure disponibili e garantire una rappresentatività equilibrata dell'intero campione.

Nel complesso, i risultati indicano che la qualità metrica dei modelli ottenuti è generalmente affidabile, pur mostrando una maggiore variabilità nelle acquisizioni di oggetti complessi, sensibili a distorsioni ottiche e a errori legati alla riflettanza superficiale dei materiali, aspetto particolarmente rilevante in caso di superfici metalliche.

Nella seguente immagine vengono visualizzati i modelli completi prodotti alla fine dell'esecuzione del processo di scansione (fig. 3).

7. Discussione

Nel confronto condotto, *Reality Composer* risulta complessivamente lo strumento più idoneo alla documentazione standardizzata di reperti di piccole/medie dimensioni, perché unisce una procedura di acquisizione guidata (puntatore, avanzamento a 360°, messaggi su distanza/illuminazione) a una segmentazione assistita da *bounding box* che riduce l'inclusione di elementi estranei. L'integrazione nativa tra fotocamera e LiDAR migliora la stima di profondità e la separazione oggetto/sfondo, producendo modelli leggeri (≈ 13.700 punti medi, picco 15.106) ma metricamente coerenti. L'errore medio relativo è pari a 0.22 cm, con un massimo di 0.4 cm (fig. 4). La minore complessità geometrica è compensata da texture fotorealistiche di alta qualità, che preservano la leggibilità dei dettagli decorativi anche su materiali difficili. Restano

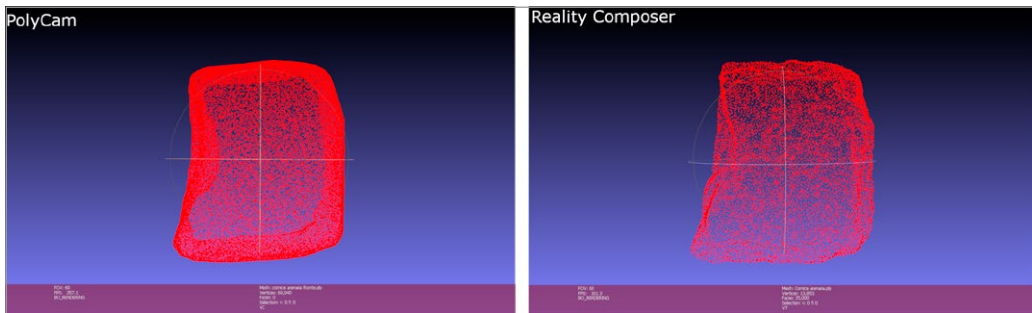


fig. 4. Confronto tra nuvole di punti del frammento di cornice: a sinistra quella elaborata da *PolyCam* (69040 punti), a destra quella elaborata da *Reality Composer* (13853 punti).

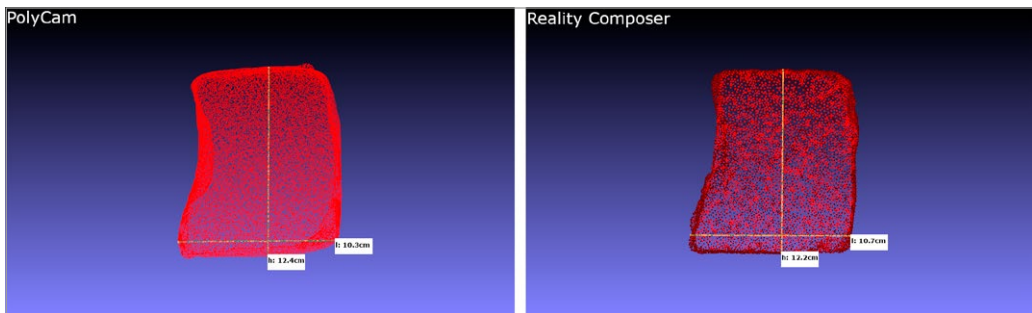


fig. 5. Confronto tra nuvole di punti e misure rilevate per il frammento di cornice: a sinistra è possibile osservare le misure rilevate da *PolyCam* (h: 12.4cm×l: 10,3 cm), a destra quelle rilevate da *Reality Composer* (h: 12.2 cm×l:10.7 cm).

due limiti strutturali: l'impossibilità di intervenire in editing correttivo *on device* (in caso di errori è necessario ripetere la presa) e la soglia di riconoscimento degli oggetti inferiore a 8 cm, risolvibile includendo temporaneamente il supporto nella *bounding box* e rifinando a mano i limiti prima della scansione. L'esportazione nativa in USDZ, pur pienamente interoperabile tramite *Blender*, non consente l'accesso alle immagini sorgenti per eventuali verifiche.

Polycam, per contro, privilegia densità e controllabilità del *processing*: le nuvole di punti risultano significativamente più fitte (media di 125.232 punti; range 69.040-158.500 punti), e l'utente può regolare parametri, misurare e applicare *rescaling* direttamente sul dispositivo, con esportazioni immediate in OBJ/PLY/STL. Tuttavia, la maggiore densità e controllabilità procedurale non si traducono in maggiore accuratezza: la verifica metrica evidenzia un errore medio relativo di 1.55 cm, con massimo di 4.6 cm, valori che mostrano una sensibilità marcata a morfologie complesse e superfici riflettenti (fig. 5). Inoltre, l'impossibilità di completare la copertura a 360° del singolo reperto (l'*extend* non gestisce il capovolgimento) e una resa a livello di texture meno definita, con fenomeni di *blur* e perdita di dettaglio, limitano l'idoneità dei risultati per contesti in cui la leggibilità dei tratti di lavorazione è fondamentale.

Entrambe le applicazioni presentano infine un limite comune, ossia l'impossibilità di accedere o scaricare le immagini impiegate per la generazione dei modelli,



fig. 6. Confronto tra i risultati ottenuti: a sinistra i modelli realizzati con *Polycam* (il modello relativo alla cornice in basso a sinistra è orientato per favorire una migliore visualizzazione della texture), a destra quelli realizzati con *Reality Composer*. Le elaborazioni qui mostrate non sono in scala.

condizione che riduce la trasparenza del processo di ricostruzione e limita la possibilità di svolgere verifiche fotogrammetriche indipendenti, con implicazioni sulla replicabilità del workflow.

8. Conclusioni

Dai risultati emersi dall'analisi dei manufatti esaminati, dalle elaborazioni effettuate e dal confronto tra i due applicativi, emerge che per oggetti di piccole dimensioni l'applicazione *Reality Composer* produce un output qualitativamente migliore sia in

termini di resa grafica (texture e leggibilità dei dettagli) sia sotto il profilo dell'affidabilità metrica (fig. 6). In particolare, la maggiore coerenza metrica ottenuta risulta più compatibile con esigenze di documentazione standardizzata in ambito archeologico.

Dall'esperienza emersa da questo contributo, si può, quindi, raccomandare *Reality Composer* per scenari in cui sia richiesto un workflow rapido, intuitivo e gratuito per la realizzazione di modelli 3D da LiDAR, accettando tuttavia una minore densità della nuvola di punti e una limitata possibilità di intervento correttivo sull'output. *Polycam* risulta più indicato per workflow che privilegiano una maggiore densità del dato e strumenti operativi di intervento (misure, *rescaling*, esportazioni in formati interoperabili), utili per elaborazioni successive e procedure di *post-processing* più complesse, pur con una maggiore variabilità nella qualità metrica e nella completezza della costruzione del modello.

La scelta dello strumento più idoneo dipende quindi non solo dalla densità della nuvola di punti, ma anche dal bilanciamento tra accuratezza metrica, qualità visiva e grado di controllo richiesto nel processo di elaborazione, da valutare attraverso protocolli di acquisizione e verifica replicabili (controllo delle condizioni di scansione, verifiche metriche e criteri qualitativi espliciti) e in funzione dell'obiettivo analitico: documentazione standardizzata, analisi morfometrica o *post-processing* avanzato.

Attività autoriale

Ideazione e metodologia: Raffaele Voccia, Filippo Sala, Gabriele Gattiglia; Raccolta e gestione dati: Raffaele Voccia, Filippo Sala, Riccardo Belcari, Gianluca Miniaci, Georgia Long, Martina Naso; Analisi dei dati: Raffaele Voccia, Filippo Sala; Scrittura e revisione della bozza originale: Raffaele Voccia, Filippo Sala, Gabriele Gattiglia, Riccardo Belcari, Georgia Long; Figure: Raffaele Voccia, Filippo Sala; Supervisione: Raffaele Voccia, Filippo Sala, Gabriele Gattiglia.

Bibliografia

- Chiabrando, F., Chiabrando, R., Piatti, D., & Rinaudo, F. (2009). Sensors for 3D Imaging: Metric Evaluation and Calibration of a CCD/CMOS Time-of-Flight Camera. *Sensors*, 9(12), 10080-10096. <https://doi.org/10.3390/s91210080>
- Fiorini, A. (2022). Scansioni dinamiche in archeologia dell'architettura: Test e valutazioni metriche del sensore LiDAR di Apple. *Archeologia e Calcolatori*, 33(1), 35-54. <https://doi.org/10.19282/ac.33.1.2022.03>
- Fiorini, A. (2025). Scansioni dinamiche con il LiDAR di Apple: Esperienze di rilievo archeologico (2021-2023). *Archeologia e Calcolatori, Supplemento*, 13, 249-266. <https://doi.org/10.19282/acs.13.2025.18>
- Lichti, D. D., & Kim, C. (2011). A Comparison of Three Geometric Self-Calibration Methods for Range Cameras. *Remote Sensing*, 3(5), 1014-1028. <https://doi.org/10.3390/rs3051014>
- Luetzenburg, G., Kroon, A., & Bjørk, A. A. (2021). Evaluation of the Apple iPhone 12 Pro LiDAR for an Application in Geosciences. *Scientific Reports*, 11(1), 22221. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01763-9>
- Murtiyoso, A., Grussenmeyer, P., Landes, T., & Macher, H. (2021). First assessments into the use of commercial-grade solid state LiDAR for low cost heritage documentation. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B2-2021, 599-604. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2021-599-2021>

- Nocerino, E., Lago, F., Morabito, D., Remondino, F., Porzi, L., Poiesi, F., Rota Bulò, S., Chippendale, P., Locher, A., Havlena, M., Van Gool, L., Eder, M., Fötschl, A., Hilsmann, A., Kausch, L., & Eisert, P. (2017). A smartphone-based 3D pipeline for the creative industry – the Replicate EU project. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W3, 535-541. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-535-2017>
- Paukkonen, N. (2023). Towards a Mobile 3D Documentation Solution. Video-Based Photogrammetry and iPhone 12 Pro as Fieldwork Documentation Tools. *Journal of Computer Applications in Archaeology*, 6(1), 143-154. <https://doi.org/10.5334/jcaa.135>
- 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(17), 4157. <https://doi.org/10.3390/rs14174157>
- Tomašík, J., Saloň, Š., Tunák, D., Chudý, F., & Kardoš, M. (2017). Tango in forests – An initial experience of the use of the new Google technology in connection with forest inventory tasks. *Computers and Electronics in Agriculture*, 141, 109-117. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.07.015>
- Trotta, G. F., Mazzola, S., Gelardi, G., Brunetti, A., Marino, N., & Bevilacqua, V. (2020). Reconstruction, Optimization and Quality Check of Microsoft HoloLens-Acquired 3D Point Clouds. In A. Esposito, M. Faundez-Zanuy, F. C. Morabito, & E. Pasero (Eds.), *Neural Approaches to Dynamics of Signal Exchanges* (Vol. 151, pp. 83-93). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8950-4_9
- Vacca, G. (2023). 3D Survey with Apple LiDAR Sensor – Test and Assessment for Architectural and Cultural Heritage. *Heritage*, 6(2), 1476-1501. <https://doi.org/10.3390/heritage6020080>
- Von Hessen, O. (1984). *Il bacile bronzeo romanico da Empoli*. All'Insegna del Giglio.
- Zhang, N., & Lan, X. (2024). Everyday-Carry Equipment Mapping: A Portable and Low-Cost Method for 3D Digital Documentation of Architectural Heritage by Integrated iPhone and Microdrone. *Buildings*, 15(1), 89. <https://doi.org/10.3390/buildings15010089>

Sitografia

- AI Photo Editor Lab SRL. (2024). *3D Scanner App*™ [Mobile app for iOS]. Apple App Store. Retrieved March 3, 2026, from <https://apps.apple.com/us/app/3d-scanner-app/id1419913995>
- Apple Inc. (s.d.-a). *Metal*. Apple Developer Documentation. Retrieved April 21, 2026, from <https://developer.apple.com/documentation/Metal>
- Apple Inc. (s.d.-b). *USD*. Apple Developer Documentation. Retrieved April 21, 2026, from <https://developer.apple.com/documentation/USD>
- Apple Inc. (2019). *RealityKit*. Apple Developer Documentation. Retrieved April 21, 2026, from <https://developer.apple.com/documentation/realitykit>
- Apple Inc. (2023). *iPhone 15 Pro-Specifiche tecniche*. Apple. Retrieved March 3, 2026, from <https://support.apple.com/it-it/111829>
- Apple Inc. (2025). *Reality Composer* [Mobile app for iOS]. Apple App Store. Retrieved March 3, 2026, from <https://apps.apple.com/us/app/reality-composer/id1462358802>
- Blender foundation. (n.d). Retrieved March 3, 2026, from <https://www.blender.org/>
- BP Mobile LLC. (n.d.). *3D Snap: Scanner e Planimetria* [Mobile app for iOS]. Apple App Store. Retrieved March 3, 2026, from <https://apps.apple.com/it/app/3d-snap-scanner-e-planimetria/id6477467417>
- FARO Technologies Inc. (2023). *SiteScape: LiDAR Scanner & CAD* [Mobile app for iOS]. Apple App Store. Retrieved March 3, 2026, from <https://apps.apple.com/us/app/sitescape-lidar-scanner-cad/id1524700432>

- Microsoft. (2026). *Microsoft HoloLens*. Microsoft Learn. Retrieved April 21, 2026, from <https://learn.microsoft.com/it-it/hololens/>
- Niantic Inc. (2024). *Scaniverse* [Mobile app]. Apple App Store. <https://scaniverse.com>
- Niantic Spatial, Inc. (2026). *Scaniverse – 3D Scanner* [Mobile app for iOS]. Apple App Store. Retrieved March 3, 2026, from <https://apps.apple.com/it/app/scaniverse-3d-scanner/id1541433223>
- Polycam. (2022). *Polycam 3D Scanner, LiDAR, 360* [Mobile app for iOS]. Apple App Store. Retrieved March 3, 2026, from <https://apps.apple.com/it/app/polycam-3d-scanner-lidar-360/id1532482376>
- Simonik, M. (2022). *LiDAR Scanner 3D* (versione 1.3.1) [Mobile app for iOS]. Apple App Store. Retrieved April 21, 2026, from <https://apps.apple.com/it/app/lidar-scanner-3d/id1504307090>
- Tasmanic Editions. (2021). *CamToPlan – 3D Scanner & LiDAR* [Mobile app for iOS]. Apple App Store. Retrieved March 3, 2026, from <https://apps.apple.com/it/app/camtoplan-3d-scanner-lidar/id1547594886>

