Archeologia e Calcolatori
37.1, 2026, 333-350
doi 10.19282/ac.37.1.2026.17

DOCUMENTARE PER VALORIZZARE: UN MODELLO DI FRUIZIONE DIGITALE PER LE MURA ROMANE DI FANO

1. Replica digitale e realtà estesa per il patrimonio archeologico

Nell'ultimo decennio, i processi di digitalizzazione si sono imposti come principale strumento di innovazione nel settore della conservazione e valorizzazione del patrimonio archeologico. L'utilizzo di repliche digitali in ambienti virtuali immersivi consente infatti di coniugare la rigorosità delle informazioni e l'accessibilità per pubblici e finalità diversificati (Brancato *et al.* 2023). La rappresentazione digitale costituisce dunque la fase fondante di ogni processo di valorizzazione scientifica e divulgativa del patrimonio archeologico, grazie a tecniche come il laser scanning e la fotogrammetria digitale che consentono di acquisire accurati dati metrici, restituendo geometrie fedeli, leggibili e interoperabili (Lo Pilato *et al.* 2023; Tapinaki *et al.* 2023). Tali repliche digitali non solo supportano l'analisi morfologica e strutturale dei manufatti, ma fungono da base operativa per riproduzioni fisiche, applicazioni interattive ed esperienze virtuali immersive (Liaskos *et al.* 2022). La digitalizzazione assume quindi una dimensione trasversale tra documentazione, ricostruzione e comunicazione, contribuendo alla generazione di un ecosistema integrato in cui ricerca, conservazione e fruizione convergono. In particolare, l'applicazione integrata di rilievo digitale, rappresentazione 3D, ambienti immersivi e interazione multisensoriale ha dato vita a un nuovo paradigma di valorizzazione, in cui la fruizione non è più passiva, ma esperienziale e personalizzata (Champion 2021; Innocente *et al.* 2023; Buragohain *et al.* 2024).

Per comprendere l'attuale scenario, è necessario richiamare l'evoluzione metodologica che ha trasformato il rapporto tra tecnologia e patrimonio. La progressiva diffusione delle tecnologie digitali ha rivoluzionato i processi produttivi e comunicativi, incidendo profondamente non solo sull'industria, ma anche sulle modalità di interazione sociale, culturale e scientifica (Zhang *et al.* 2024). L'archeologia non è rimasta immune a questo fenomeno, già a partire dagli anni '70 si sono verificate le prime sperimentazioni nella documentazione digitale e nella ricostruzione del passato. Tuttavia, è solo con l'introduzione del concetto di archeologia virtuale che si è delineato un nuovo paradigma metodologico (Reilly 1991). La disciplina si è aperta all'integrazione tra rilievo, modellazione tridimensionale, analisi spaziale e all'adozione di ambienti digitali come supporto alla conoscenza e alla divulgazione. Questo cambiamento ha dato avvio a un vivace dibattito scientifico, volto a

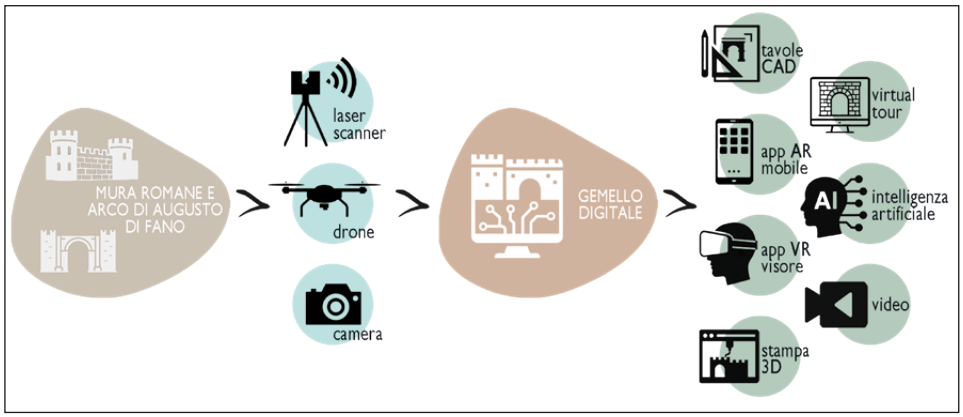

Fig. 1 – Workflow operativo per la realizzazione degli output di fruizione.

ridefinire l'archeologo sia come interprete del passato, sia come progettista di ambienti virtuali. Un punto di svolta lo rappresenta la redazione della Carta di Londra e dei suoi aggiornamenti, con la necessità di adottare linee guida condivise per l'utilizzo etico, scientifico e sostenibile delle ricostruzioni digitali (Brusaporci, Trizio 2013). In parallelo, studi recenti mostrano che le esperienze immersive in XR stanno evolvendo verso ambienti multisensoriali, partecipativi e inclusivi (Rodriguez-Garcia *et al.* 2024), offrendo modalità di fruizione in grado di superare barriere spaziali e temporali (Bosco *et al.* 2023; Tribhuvan, Binnaser 2024).

La Realtà Virtuale (Virtual Reality, VR), in particolare, si è rivelata uno strumento efficace per restituire ambienti scomparsi o difficilmente accessibili, permettendo all'utente di esplorare ricostruzioni in scala 1:1 accompagnate da contenuti audio-visivi sincronizzati (Clini *et al.* 2025a). L'impiego di game-engine come Unity o Unreal Engine facilita l'integrazione tra animazioni, interazione e narrazione, rendendo possibile la creazione di esperienze altamente personalizzabili. Il ricorso a interfacce naturali, come il riconoscimento dei gesti o il tracking oculare, contribuisce inoltre a rendere più fluido e intuitivo l'approccio ai contenuti, anche in assenza di mediazione umana (Buckingham 2021; Muñoz *et al.* 2025).

Un aspetto centrale delle esperienze XR è la loro accessibilità, che può essere potenziata attraverso design inclusivo, percorsi paralleli e modalità di interazione adattive. Alcuni progetti recenti hanno sperimentato l'uso di sistemi di guida vocale, avatar narranti e supporti tattili (Bucciero *et al.* 2025; Gatto 2025), dimostrando come la tecnologia possa diventare uno strumento di democratizzazione culturale (Koukopoulos *et al.* 2023). Parallelamente, la gamification applicata ai contesti archeologici si sta affermando come

strategia utile per l'apprendimento informale, in particolare presso i giovani. La trasformazione dei contenuti in sfide, obiettivi e percorsi esplorativi aumenta l'engagement e stimola una comprensione attiva del contesto. Il gioco diventa così un mezzo per veicolare contenuti scientifici in forma accessibile e dinamica (Cera 2017; Buscemi *et al.* 2020; Avella *et al.* 2024).

L'emergere di queste tecnologie, se accompagnato da una progettazione scientificamente fondata e da una regia narrativa coerente, permette non solo di ampliare l'accesso al patrimonio, ma anche di ridefinirne le modalità di racconto, superando la distinzione tra reale e virtuale, presenza e memoria (Bekele *et al.* 2018; Clini *et al.* 2025b).

Il presente contributo si inserisce all'interno di questa linea di ricerca, proponendo un'esperienza immersiva in VR finalizzata a valorizzare il patrimonio archeologico delle mura romane di Fano. L'obiettivo principale è quello di rendere accessibile la complessità storica e architettonica del sito attraverso una narrazione visiva e interattiva, in grado di coinvolgere utenti di diversa formazione, anche non specialistica. L'esperienza è dunque concepita come strumento di mediazione culturale, capace di integrare rigore scientifico e coinvolgimento emotivo, favorendo l'esplorazione autonoma, la comprensione critica e la partecipazione attiva all'esperienza del patrimonio (Fig. 1).

2. La cinta muraria di *Fanum Fortunae*

La deduzione della *Colonia Iulia Fanestris* è in genere riferita agli anni tra il 31 e il 27 a.C., ma nell'area doveva già esistere un insediamento di una certa consistenza, sviluppatosi attorno al *fanum* della dea Fortuna, probabilmente almeno a partire dalla seconda metà del III secolo a.C., in concomitanza con l'inizio della romanizzazione, la promulgazione della *lex Flaminia* e l'apertura dell'omonima via consolare (Battistelli *et al.* 1983; Luni 2000; Mignani, Pozzi 2012; De Maria 2015; Clini, Mei 2017). Giulio Cesare ci informa che la città venne occupata da una sua coorte nel 49 a.C. (Caes., *Civ.*, I, 11, 4), insieme ad altri centri di interesse strategico della costa come *Pisaurum* e Ancona. La ristrutturazione urbanistica della città va comunque collocata nel periodo della deduzione coloniale, secondo un piano programmatico ben preciso, che comprendeva almeno l'erezione della Basilica di Vitruvio (Mei 2022) e la costruzione della cinta muraria, che dall'iscrizione posta sulla trabeazione della porta monumentale sappiamo conclusa nel 9-10 d.C. ed eretta per volontà dell'imperatore Augusto (Luni 1992a, 2000; Rosada 1992; De Sanctis 2012; Taus 2012). L'impianto urbanistico, ancora ben riconoscibile sia sulle piante storiche, sia nel centro storico attuale (Pandolfi Basso 1994, tavv. 1-3), era a maglia regolare, con vie parallele che si incrociavano ad angolo retto, pavimentate con grossi basoli di trachite dei Colli Euganei (Dolci 1992a). A maglia regolare e frutto dello stesso intervento edilizio di

età augustea è l'antico impianto fognario (Dolci 1992b), ancora in uso in gran parte, con collettori disposti in asse con le più importanti antiche vie.

Le mura romane di Fano costituiscono uno dei pochi esempi di cui si conosca l'esatta data della conclusione dei lavori, attestata dall'iscrizione monumentale esistente sulla trabeazione della porta principale della città (*CIL* XI, 6218; *EDR* 094015). La cinta ha una lunghezza complessiva di 1700 m e racchiude una superficie di circa 18 ettari. L'altezza massima conservata è di 9 m, a fronte di un'altezza totale pari a 48 piedi, cioè 14,15 m. Le torri dovevano essere in totale 24 o 28: si dibatte ancora infatti se la città avesse o no le mura nel versante verso il mare.

Le caratteristiche della cinta muraria di *Fanum Fortunae* rientrano perfettamente all'interno di schemi progettuali ormai acquisiti all'inizio dell'età imperiale, anche lontano da Roma. In questo periodo, dominato dall'instaurazione della *pax augusta*, si assiste paradossalmente ad una fervente attività costruttiva di nuove mura urbiche che non trova precedenti nemmeno nei tempi appena trascorsi delle guerre civili. Le cinte murarie e le porte monumentali, ormai prive di una concreta funzione difensiva, assumono *in toto* le motivazioni della nuova ideologia e spesso hanno come ruolo primario quello di evocare dall'esterno la *dignitas* della comunità cittadina.

La porta principale di ingresso alla *Colonia Iulia Fanestris* sorge nel punto in cui la consolare Flaminia diventa il decumano massimo della città romana e fa parte integrante della cortina muraria, alla quale è raccordata tramite due torrioni laterali con pianta a ferro di cavallo (De Maria 1988; Luni 1992b; Purcaro 1992, 2012). È caratterizzata da tre fornici e presentava una facciata quadrata monumentale di 17,58 m di lato (60 piedi), così suddivisi: 20 piedi (5,86 m) misura in larghezza il fornice centrale, 20 piedi ciascuno misurano le due porzioni di parete laterali e i fornici minori che racchiudono. Le diagonali del quadrato così ottenuto si incrociano al centro della chiave di volta del fornice centrale, che costituisce il centro del monumento, sottolineando la precisione dei rapporti proporzionali alla base della progettazione. La profondità del monumento è di 4,85 m, corrispondenti a 16,5 piedi, ma va tenuto in considerazione il fatto che secondo recenti ipotesi la porta fanestre possedeva un *cavaedium* retrostante e quindi doveva duplicare la facciata verso l'interno della città, come la Porta Pretoria di Aosta e la Porta Augustea di Nimes (Taus 2012).

Pur non essendo più conservato nella sua interezza, a causa dell'assedio di Fano attuato da Federico di Montefeltro nel 1463, durante il quale l'attico della porta venne abbattuto da colpi di cannone, conosciamo l'aspetto che doveva avere in origine il monumento grazie al rilievo realizzato nella facciata della adiacente Chiesa di San Michele, eretta tra 1494 e 1504 e costruita con materiale di reimpiego ricavato dalla porta stessa, come testimoniano anche i frammenti di iscrizione pertinenti ad essa ancora oggi presenti nella

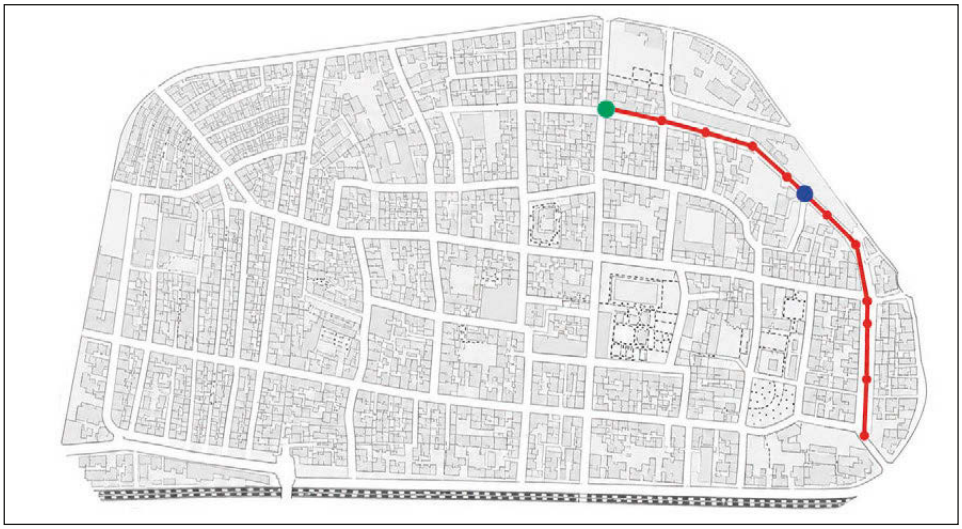

Fig. 2 – Pianta delle mura romane di Fano: in rosso i tratti murari presenti ad oggi; in verde l'Arco di Augusto; in blu la Porta della Mandria.

facciata della chiesa. Possiamo così notare come la porta fosse costituita da una parte basale alta 40 piedi (14,76 m) e da un loggiato superiore alto 20 piedi (5,86 m). La parte basale presenta il nucleo in conci di arenaria locale e il rivestimento esterno sempre in opera quadrata, ma formato da 16 filari di blocchi parallelepipedi di calcare bianco di ottima qualità e simile al marmo, proveniente dalle cave del Monte Nerone, distante circa 75 km da Fano, verso l'Appennino.

È stato osservato che con questa porta si è voluto determinare una "realizzazione di prestigio", riconducibile alla volontà di celebrare in modo adeguato l'opera di monumentalizzazione e di ristrutturazione urbanistica della città da parte di Augusto nel punto di arrivo della Flaminia alla costa. Questa volontà appare ancora più evidente se si osserva la Porta Minore, detta "della Mandria", conservata più a N. La struttura risulta con un unico fornice, realizzato in blocchi parallelepipedi di arenaria; è di modeste dimensioni, priva di elementi decorativi, funzionale al traffico della Flaminia verso N e rivolta verso *Pisaurum* (Fig. 2).

3. La documentazione digitale

La fase preliminare del lavoro ha riguardato l'attività di documentazione finalizzata alla successiva replica digitale delle mura romane di Fano, con l'obiettivo di produrre una base solida e scientificamente attendibile per

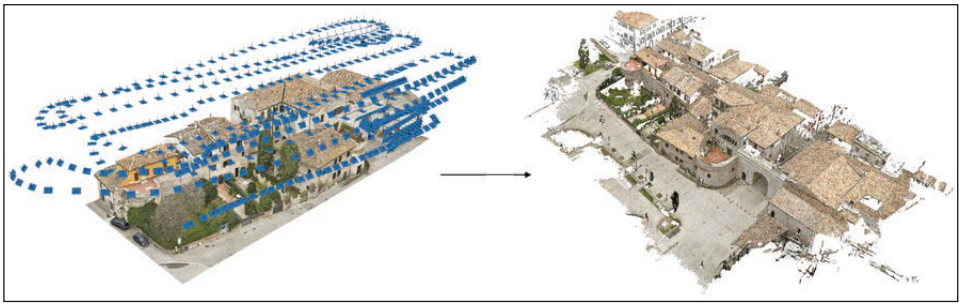

Fig. 3 – Rilievo fotogrammetrico da drone.

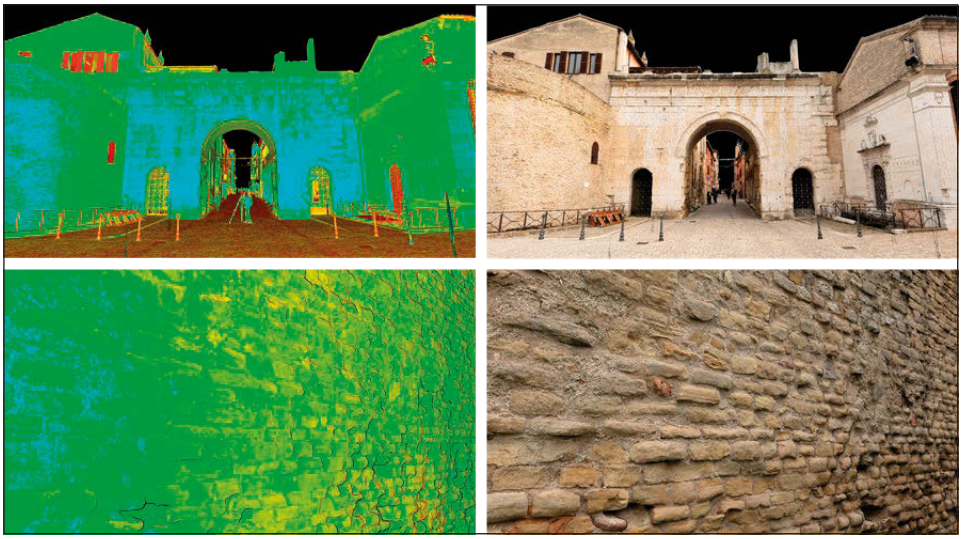

Fig. 4 – Campionamento ad alta densità ottenuto da laser scanner.

tutte le successive elaborazioni immersive, interattive e divulgative. In linea con i più recenti orientamenti della ricerca in digital heritage (Clini *et al.* 2024; Perna *et al.* 2025), si è adottata una strategia integrata, sfruttando tre diverse tecnologie: scansioni laser, rilievo fotogrammetrico, da drone e da terra, e rilievo di punti di controllo tramite sistema GNSS-RTK. Questo ha permesso di affrontare in modo differenziato e complementare le esigenze di precisione geometrica, accessibilità spaziale e resa materica, ottenendo un dataset completo, solido e accurato.

In totale, sono state effettuate 118 stazioni di presa con laser scanner, distribuite lungo l'intero perimetro delle mura e in corrispondenza delle

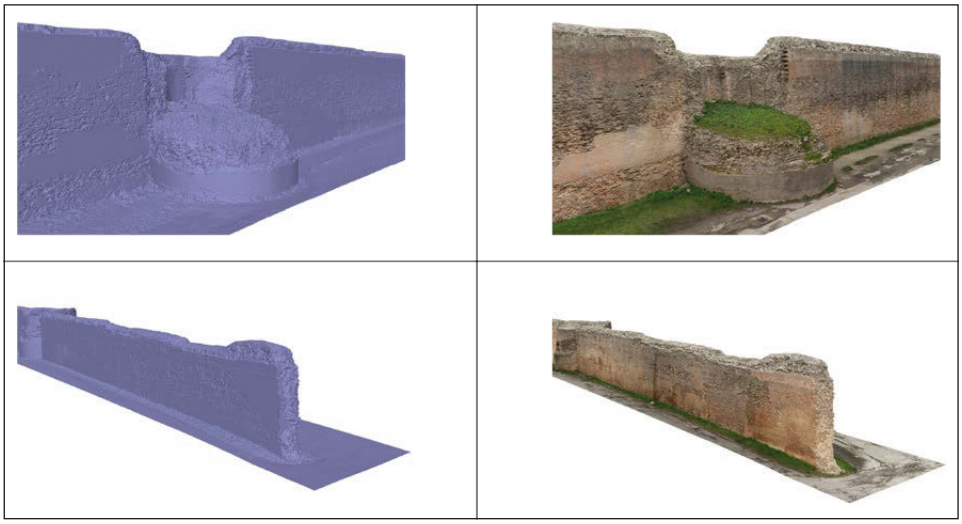

Fig. 5 – Modello 3D di un tratto delle mura.

strutture architettoniche di maggiore interesse, come la Porta d'Augusto e la Porta della Mandria (Fig. 3). La densità del campionamento ha garantito un livello di dettaglio millimetrico, utile sia per la restituzione grafica che per le analisi morfologiche (Fig. 4). Parallelamente, sono state acquisite 3250 immagini da drone MAVIC 3T, secondo un piano di volo programmato che ha assicurato copertura uniforme e sovrapposizione ottimale. Le 2196 immagini fotografiche acquisite da terra, mediante ottiche macro e tele, hanno consentito di documentare in modo analitico la superficie muraria dei giunti, stratigrafie murarie, tecniche costruttive e fenomeni di degrado.

Ogni tecnologia è stata utilizzata in funzione delle sue specifiche potenzialità: il laser scanner per l'accuratezza nella ricostruzione geometrica, la fotogrammetria aerea per l'acquisizione colorimetrica delle superfici e la conseguente elaborazione delle texture. Inoltre, le immagini da drone sono risultate essenziali per colmare i vuoti generati dai limiti di visibilità del rilievo terrestre, come già sperimentato in altri contesti archeologici. L'intero *corpus* di dati è stato poi processato, allineato e georeferenziato, ricorrendo a punti di controllo distribuiti lungo il tracciato murario. Questo ha consentito di elaborare un'unica nuvola di punti, integrando perfettamente i dati provenienti dalle scansioni laser e quelli derivati dalla fotogrammetria in un modello coerente, completo e ad alta risoluzione. L'accuratezza di tale rappresentazione ha permesso non solo di leggere e misurare ogni singola porzione del tracciato murario, ma anche di confrontare le geometrie rilevate con quelle documentate

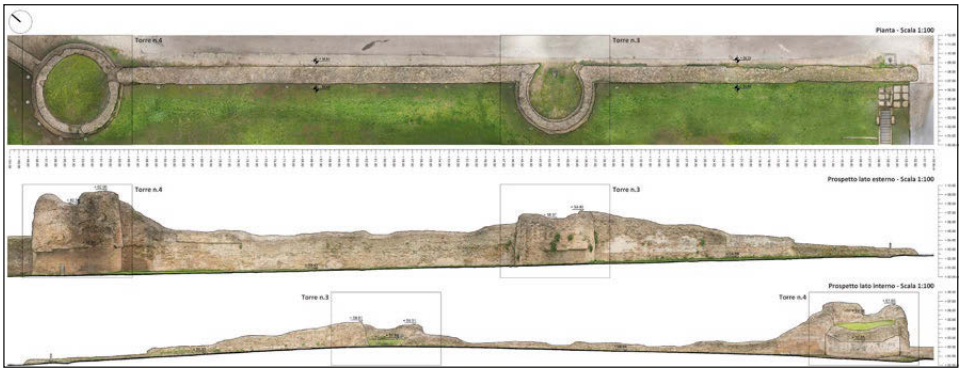

Fig. 6 – Tavole tecniche CAD.

Fig. 7 – Prototipo di stampa 3D utilizzato per l'applicazione AR.

in precedenti campagne di studio, contribuendo alla ricostruzione critica del processo costruttivo e delle trasformazioni subite nel tempo.

La nuvola delle mura è stata quindi editata rimuovendo elementi non di interesse e suddivisa in cinque sezioni per facilitare le fasi successive di modellazione ed editing. Dalle nuvole di punti si sono quindi generati modelli mesh ad alta risoluzione geometrica. Una volta importati i modelli in Metashape, mediante proiezione diretta delle immagini sulle superfici 3D, si sono ottenute texture ad alta definizione, garantendo una risoluzione pari a 0,3 mm/pixel (Fig. 5). La replica digitale così ottenuta ha costituito

Fig. 8 – Esperienza in AR con riconoscimento del monumento reale.

la base comune per tutti gli output successivi: adeguatamente semplificata e ottimizzata in ragione dell'utilizzo, ha consentito la produzione delle tavole tecniche tramite CAD utilizzate per la rappresentazione geometrica dei diversi tratti della cinta muraria (Fig. 6); ha permesso la costruzione di un virtual tour, supportato da audio narrativi e navigazione libera tra punti di osservazione a 360° a terra e aerei; e ha reso possibile la pubblicazione di modelli 3D su piattaforme online liberamente esplorabili e misurabili dall'utente.

Lo stesso modello ha supportato inoltre la realizzazione di esperienze in realtà aumentata, sia attraverso la sovrapposizione di contenuti digitali su modelli fisici stampati in 3D (Fig. 7), sia in sito, mediante il riconoscimento del monumento reale, con l'inserimento di elementi narrativi quali avatar interattivi e audio-guide geolocalizzate (Fig. 8).

4. Applicazione immersiva

Principale output di progetto è stata un'applicazione immersiva, dedicata alla narrazione e valorizzazione del patrimonio archeologico legato alle mura romane, alla Porta d'Augusto e alla Porta della Mandria. L'esperienza si inserisce all'interno delle attuali sperimentazioni nel campo della fruizione digitale, con l'obiettivo di proporre una narrazione visiva e interattiva capace di coinvolgere un pubblico non specialistico. Indossando il visore, l'utente entra in un ambiente tridimensionale che integra elementi reali e virtuali, offrendo una lettura immersiva del sistema murario attraverso un'interfaccia che include anche momenti di esplorazione libera e interazione diretta.

Fig. 9 – Applicazione VR, interazioni con il tavolo virtuale e vista immersiva dalla mongolfiera.

L'intero processo creativo è stato articolato secondo le tre fasi canoniche della produzione cinematografica: pre-produzione, produzione e post-produzione (Buccheri 2003), permettendo una gestione strutturata del lavoro, dalla definizione del concept narrativo alla costruzione dell'ambiente digitale.

4.1 *Pre-produzione*

Nella fase di pre-produzione si è lavorato all'identificazione dei contenuti chiave e alla strutturazione del racconto, con l'obiettivo di costruire un'esperienza capace di coinvolgere l'utente sia dal punto di vista cognitivo che emozionale. A partire dalla selezione dei contenuti da veicolare, è stato redatto lo storytelling, che ha guidato l'intera costruzione narrativa dell'applicazione. I temi principali individuati per la costruzione del racconto sono stati la storia urbanistica della colonia romana, l'architettura, il significato simbolico delle mura e delle porte monumentali, le tecniche costruttive adottate in età augustea e la relazione della città con il tracciato della via Flaminia. I testi sono stati concepiti per accompagnare il visitatore in un percorso di esplorazione storica, offrendo una narrazione accessibile e scientificamente fondata.

Lo sviluppo dello storyboard ha poi reso possibile definire in modo coerente la sequenza effettiva dei contenuti, conferendone anche una dimensione visiva: l'esperienza si apre con un ambiente in realtà mista (Mixed Reality, MR) dove l'utente può interfacciarsi con un tavolo interattivo.

Grazie a quest'ultimo è possibile osservare un plastico in scala ridotta delle mura romane, e una ricostruzione in scala 1:1 di un tratto murario. Nella seconda parte dell'esperienza l'utente si ritrova immerso in una scena VR, sospeso su una mongolfiera virtuale, dalla quale può osservare dall'alto l'intero circuito murario e le due porte principali. Infine, viene simulato il volo sopra la città di Fano, accompagnato da una narrazione audio pensata come voce di Vitruvio. La definizione dei contenuti sonori è stata parte integrante della pre-produzione: sono stati ideati i testi destinati alla narrazione audio, pensati per accompagnare l'utente in chiave emozionale e immersiva, fornendo al contempo informazioni coerenti con l'impianto tematico individuato. Sono stati inoltre stabiliti il tono, il ritmo narrativo e i momenti di attivazione dei contenuti vocali, da realizzare e sincronizzare nelle fasi successive (Fig. 9).

4.2 *Produzione*

La fase di produzione ha comportato la realizzazione concreta dei contenuti progettati in precedenza, articolandosi in tre principali ambiti operativi: modellazione tridimensionale, texturizzazione e animazione interattiva, che hanno dato forma all'esperienza immersiva. Per la modellazione 3D è stato utilizzato il software Blender, impiegato sia per l'ottimizzazione dei modelli derivati da rilievo sia per la modellazione *ex-novo* degli elementi necessari alle interazioni come il tavolo e la mongolfiera. Particolare attenzione è stata dunque dedicata alla rappresentazione delle mura romane; la geometria derivante dalla precedente fase di documentazione, attraverso un processo di retopology, è stata ottimizzata per la visualizzazione tramite visore Meta Quest 3 (Gonizzi *et al.* 2022). Il risultato, semplificato ma coerente con il dato originale, è stato adattato in due versioni: una in scala ridotta, a più basso livello di dettaglio e destinata alla visualizzazione sul tavolo, e una in scala reale, maggiormente dettagliata e collocata all'interno dello spazio immersivo per essere esplorata come il circuito murario reale.

Il processo di texturizzazione dei modelli 3D è stato realizzato mediante Adobe Substance 3D Painter per quanto riguardante il tavolo interattivo e gli altri oggetti virtuali, mentre per quanto riguardante le mura, partendo da quelle realizzate per la replica digitale, come descritto nel precedente paragrafo, si sono ottenute quelle dei modelli semplificati tramite processo di baking realizzato all'interno del software Blender. Oltre alle texture per riprodurre il colore delle superfici, tramite il medesimo processo si sono realizzate mappe delle normali e dell'ambient occlusion in grado di simulare il dettaglio geometrico del modello master su quelli derivati, garantendo il recupero delle informazioni visive perse in fase di ottimizzazione della replica digitale e rispettando in pieno i requisiti tecnici del visore Meta Quest 3. Per il modello a scala ridotta, è stato inoltre progettato un doppio livello di resa:

una prima visualizzazione monocromatica, attivata all'avvio dell'esperienza, e una successiva applicazione delle texture fotografica tramite il secondo pulsante, che simula l'effetto di una ricostruzione progressiva.

Infine, sono stati realizzati tutti i file audio necessari all'impianto narrativo. Nello specifico è stata utilizzata la piattaforma di sintesi vocale (text-to-speech) basata sull'IA ElevenLabs. Tale strumento è stato fondamentale per convertire il testo in tracce audio caratterizzate da voce naturale, ritmo modulato, emozione, tono e interpretazione del contenuto.

4.3 *Post-produzione*

La fase di post-produzione ha riguardato l'assemblaggio dei contenuti modellati e animati in Unity, l'ottimizzazione finale dell'esperienza per visore Meta Quest 3 e l'implementazione del sistema di interazione e navigazione. Particolare attenzione è stata riservata alla strutturazione del funzionamento logico dell'esperienza e alla sincronizzazione dei contenuti visivi, animati e sonori.

Le diverse azioni attivabili tramite i quattro pulsanti presenti sul tavolo interattivo sono state gestite tramite un sistema a eventi, programmato in C#, che regola la comparsa dei modelli, l'attivazione delle texture, le animazioni e le transizioni tra le scene. Il comportamento della scena è stato modellato secondo una logica evento-risposta, in cui ciascun pulsante agisce da trigger per l'attivazione di un modulo narrativo successivo. Tale sistema ha permesso di realizzare un'esperienza a blocchi progressivi, in cui l'utente è guidato lungo un percorso esplorativo coerente ma interattivo.

Le interazioni sono state progettate in modo da risultare immediate e intuitive, sfruttando il sistema di hand tracking nativo del visore, evitando l'uso di controller fisici. In particolare, l'azione di afferrare la piccola mongolfiera e posizionarla nel punto corretto per attivare la fase del volo, è stata sviluppata come un gesto simbolico di transizione narrativa. Le interazioni sono state limitate ma significative, con l'obiettivo di massimizzare l'engagement mantenendo l'usabilità alta anche per utenti non esperti. Per garantire fluidità tra le fasi, è stato programmato un sistema di fade-in/fade-out tra le scene e momenti di transizione visiva e sonora coordinati con i movimenti del punto di vista. La fase finale dell'esperienza prevede la riproduzione di un video panoramico aereo, con la simulazione del volo su Fano con una narrazione in sottofondo, realizzata per completare l'esperienza in modo coinvolgente e contemplativo.

Infine, è stato implementato un sistema di reset automatico dell'applicazione al cambio di utente, basato sul sensore di prossimità integrato nel visore. Questo ha reso l'esperienza particolarmente adatta all'ambito espositivo, garantendo accessibilità, continuità e riduzione del carico operativo per gli operatori museali.

5. User evaluation

Per verificare l'efficacia comunicativa e immersiva dell'esperienza VR dedicata alle mura romane di Fano, è stata condotta una user evaluation su un campione di 25 utenti di età compresa tra i 20 e i 25 anni. La scelta di questo gruppo è motivata dall'interesse a indagare l'impatto di strumenti immersivi sulle nuove generazioni, considerate un target privilegiato per strategie di valorizzazione volte ad avvicinare un pubblico giovane al patrimonio archeologico. Il campione ha incluso sia utenti con esperienza pregressa in ambienti VR sia utenti alla prima esperienza, così da considerare diversi livelli di familiarità con la tecnologia. Il questionario, somministrato al termine dell'esperienza, è stato strutturato mediante scala Likert a 5 punti, con valori compresi tra 1 (fortemente in disaccordo) e 5 (fortemente d'accordo), consentendo una lettura quantitativa delle percezioni espresse dai partecipanti. Le 18 affermazioni che costituiscono il questionario hanno indagato diverse dimensioni: Autenticità, Interazione, Navigazione, Apprendimento e Ampliamento del pubblico.

I risultati ottenuti evidenziano una valutazione complessivamente molto positiva dell'esperienza in tutte le dimensioni considerate. In particolare, la dimensione dell'Apprendimento registra il punteggio medio più elevato (M = 4.79; DS = 0.39), indicando che l'ambiente virtuale è percepito come estremamente efficace nella trasmissione dei contenuti e nel supporto all'acquisizione di conoscenze. Anche l'Interazione (M = 4.71; DS = 0.43) e la Navigazione (M = 4.67; DS = 0.50) mostrano valori medi elevati, suggerendo un'esperienza fluida, intuitiva e coinvolgente dal punto di vista dell'usabilità. La dimensione dell'Autenticità presenta un punteggio medio pari a 4.31 (DS = 0.63), confermando una percezione generalmente positiva del realismo dell'ambiente virtuale. Infine, l'Ampliamento del pubblico (M = 4.53; DS = 0.49) evidenzia come gli utenti riconoscano il potenziale dell'applicazione nel rendere il patrimonio accessibile a una platea più ampia. Nel complesso, dunque, i risultati sottolineano come l'esperienza sia stata percepita come efficace, coinvolgente e ricca di informazioni, mettendo in evidenza soprattutto la sua capacità di supportare l'apprendimento e favorire nuove forme di accesso e fruizione del patrimonio.

Tuttavia, è emersa una criticità legata all'accessibilità dell'esperienza: una parte significativa degli utenti ha segnalato forme di disagio fisico, in particolare vertigini e sensazioni di instabilità, riconducibili al fenomeno del 'VR motion sickness' (Chang *et al.* 2023). Tali effetti sembrano essere stati accentuati dall'impiego di panoramiche aeree, che collocano l'utente in un punto di osservazione sospeso, simulando una mongolfiera virtuale. Questa modalità di fruizione, sebbene altamente suggestiva, ha in alcuni casi determinato una perdita dei riferimenti spaziali e un aumento dell'instabilità percettiva, condizioni note in letteratura per ambienti immersivi. Il limite

riscontrato evidenzia pertanto la necessità di intervenire su specifici aspetti tecnici dell'esperienza, quali la gestione della telecamera, la velocità e la fluidità delle transizioni, nonché l'introduzione di riferimenti visivi stabili. Tali accorgimenti risultano fondamentali per migliorare il comfort dell'utente e garantire una fruizione più inclusiva, in particolare per soggetti maggiormente sensibili a questo tipo di disturbi.

6. Conclusioni e sviluppi futuri

Il presente contributo ha dimostrato come l'integrazione tra rilievo digitale, modellazione 3D e ambienti immersivi possa generare nuovi strumenti di conoscenza e valorizzazione del patrimonio archeologico. La creazione di una replica digitale delle mura romane di Fano ha fornito una base solida e flessibile per molteplici applicazioni, dalla documentazione tecnica alla fruizione narrativa in VR. In questo contesto, il modello digitale non rappresenta esclusivamente una restituzione geometrica del manufatto rilevato, ma si configura come uno strumento attraverso cui organizzare e comunicare le conoscenze su di esso. La replica digitale delle mura romane di Fano ha consentito di integrare dati metrici, informazioni costruttive e contenuti descrittivi all'interno di un unico ambiente digitale. La comunicazione del patrimonio archeologico mediante tecnologie immersive non si limita infatti alla visualizzazione del modello, ma implica una strutturazione dei contenuti e delle modalità di interazione che guidano l'utente nella lettura del manufatto. In questo senso, l'esperienza VR sviluppata rappresenta uno strumento di mediazione, in cui la replica digitale viene utilizzata per rendere accessibili e comprensibili informazioni complesse, mantenendo un equilibrio tra rigore scientifico e chiarezza comunicativa.

Tra gli sviluppi futuri si prevede l'estensione del rilievo e della modellazione alle porzioni di cinta muraria non ancora digitalizzate, al fine di completare l'intero circuito difensivo romano della città. Parallelamente, si lavorerà alla ricostruzione virtuale delle mura sulla base dello studio delle fonti storiche, con l'obiettivo di proporre ipotesi di restituzione stratificata e scientificamente fondata. Un ulteriore obiettivo è rappresentato dall'integrazione del gemello digitale nel GIS della Carta Archeologica della città di Fano, in modo da collocare i dati 3D all'interno di un sistema informativo georeferenziato e aggiornabile dell'intera città, utile sia per la ricerca sia per la pianificazione urbana.

Dal punto di vista della fruizione, saranno progettate nuove esperienze rivolte a target diversificati, cittadini, turisti, studenti, attraverso soluzioni XR adattabili a diversi contesti espositivi e dispositivi. In questo senso, si intende sperimentare la strutturazione di un museo diffuso basato su contenuti interattivi e su percorsi esperienziali attivabili sia *in loco* che da remoto. Alla luce dei risultati emersi dai test di valutazione, si prevede l'introduzione di

strumenti compensativi per ridurre i disagi legati alle vertigini, come modalità alternative di locomozione, opzioni di personalizzazione della velocità e tutorial introduttivi. Questi accorgimenti potranno contribuire a migliorare l'inclusività e la sostenibilità dell'esperienza immersiva. I dati raccolti saranno inoltre impiegati per avviare una valutazione comparativa su altri profili di utenti, secondo un approccio di sviluppo iterativo e partecipato.

Paolo Clini, Renato Angeloni, Mirco D'Alessio, Irene Galli
Università Politecnica delle Marche
p.clini@staff.univpm.it, r.angeloni@staff.univpm.it, m.dalessio@staff.univpm.it
i.galli@pm.univpm.it

Oscar Mei
Università degli Studi di Urbino
oscar.mei@uniurb.it

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano il Centro Studi Vitruviani (Fano, Italia) per aver promosso e sostenuto le attività di ricerca legate al progetto "Murum Dedit - Mura Digitali". Un ringraziamento è rivolto anche a tutte le istituzioni e i privati cittadini che hanno supportato l'iniziativa. Gli autori desiderano inoltre ringraziare tutte le persone che hanno partecipato al test d'uso dell'esperienza immersiva, contribuendo, con il loro coinvolgimento ed i loro feedback, alla valutazione del sistema.

BIBLIOGRAFIA

Avella F., Cellura G., Valpreda F. 2024, *Un serious game per la ricostruzione del Tempio G di Selinunte*, in F. Bergamo, A. Calandriello, M. Ciammaichella, I. Friso, F. Gay, G. Liva, C. Monteleone (eds.), *Misura/Dismisura: ideare conoscere narrare. Measure/Out of Measure: Devising Knowing Narrating*, Milano, Franco Angeli, 791-814.

Battistelli F., Deli A., Prete S. 1983, *Immagine di Fano romana*, Fano, Cassa di Risparmio di Fano.

Bekele M.K., Pierdicca R., Frontoni E., Malinverni E.S., Gain J. 2018, *A survey of augmented, virtual, and mixed reality for cultural heritage*, «Journal on Computing and Cultural Heritage», 11, 1-36 (https://doi.org/10.1145/3145534).

Bosco G., Farella M., Di Piazza G. 2023, *Immersive virtual reality for cultural heritage exploration*, «Memorie della Società Astronomica Italiana», 94, 1, 51-54.

Brancato R., Lamanna C., Mirto V., Magnanelli L. 2023, *Digital technologies and the archaeological topography of Castellito*, «Archeologia e Calcolatori», 34.2, 185-206 (https://doi.org/10.19282/ac.34.2.2023.10).

Brusaporci S., Trizio I. 2013, *La Carta di Londra e il patrimonio architettonico: riflessioni circa una possibile implementazione*, «SCIRES-IT - SCIentific RESearch and Information Technology», 3, 2, 55-68 (https://doi.org/10.2423/i22394303v3n2p55).

Buccheri V. 2003, *Il film. Dalla sceneggiatura alla distribuzione*, Roma, Carocci Editore.

Bucciero A., Chirivì A., Ferrari I., Giuri F., Greco M., Pandurino A., Pescarin S., Scardozzi G., Taurino F.V., Zecca D. 2025, *Il Museo Archeologico di Ugento fra valorizzazione e fruizione*, «Archeologia e Calcolatori», 36.1 (https://doi.org/10.19282/ac.36.1.2025.19).

Buckingham G. 2021, *Hand tracking for immersive virtual reality: Opportunities and challenges*, «Frontiers in Virtual Reality», 2 (https://doi.org/10.3389/frvir.2021.728461).

Buragohain D., Meng Y., Deng C., Li Q., Chaudhary S. 2024, *Digitalizing cultural heritage through metaverse applications: Challenges, opportunities, and strategies*, «Heritage Science», 12, 1, 295 (https://doi.org/10.1186/s40494-024-01403-1).

Buscemi F., Militello P., Figuera M., Aiello D.A.A., D'Agostino G., Santagati C. 2020, *Use and reuse of spatial and quantitative data in archaeology: From 3D survey to serious game at Phaistos (Crete)*, «Archeologia e Calcolatori», 31.1, 221-243 (https://doi.org/10.19282/ac.31.1.2020.09).

Cera V. 2017, *Knowledge and valorization of historical sites through low-cost, gaming sensors and H-BIM models. The case study of Liternum*, in S. Garagnani, A. Gaucci (eds.), *Knowledge, Analysis and Innovative Methods for the Study and the Dissemination of Ancient Urban Areas, Proceedings of the Kainua 2017 International Conference in honour of Professor Giuseppe Sassatelli's 70th birthday (Bologna 2017)*, «Archeologia e Calcolatori», 28.2, 497-506 (https://doi.org/10.19282/AC.28.2.2017.40).

Champion E.M. 2021, *Rethinking Virtual Places*, Bloomington, Indiana University Press (https://doi.org/10.2307/j.ctv21r3q81).

Chang E., Billinghurst M., Yoo B. 2023, *Brain activity during cybersickness: A scoping review*, «Virtual Reality», 27, 3, 2073-2097 (https://doi.org/10.1007/s10055-023-00795-y).

Clini P., Angeloni R., D'Alessio M., Bardelli G., Finocchi S. 2024, *Un Virtual Immersive Movie per la fruizione del patrimonio archeologico: il viaggio nella "Tomba Della Regina" di Sirolo-Numana*, «Archeologia e Calcolatori», 35.1, 473-490 (https://doi.org/10.19282/ac.35.1.2024.28).

Clini P., Angeloni R., D'Alessio M., Coppetta L., Galli I. 2025a, *Digital representation and AI-driven virtual experience for historic houses. The case study of Borgo storico Seghetti Panichi*, in *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Copernicus GmbH, 337-344 (https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlviii-m-9-2025-337-2025).

Clini P., Mei O. 2017, *Fanum Fortunae e il culto della dea Fortuna*, Venezia, Marsilio Editori.

Clini P., Nespeca R., Angeloni R., Mei O., Ferretti U. 2025b, *Dalla vetrina al territorio: repliche digitali per la realtà mista nel parco archeologico di Forum Sempronii*, «Archeologia e Calcolatori», 36.1, 341-356 (https://doi.org/10.19282/ac.36.1.2025.17).

De Maria S. 1988, *Gli archi onorari di Roma e dell'Italia romana*, Roma, L'Erma di Bretschneider.

De Maria S. 2015, *L'Augusteum di Fanum Fortunae. Un edificio del culto imperiale nella Fano d'età romana*, Milano, Silvana Editoriale.

De Sanctis L. 2012, *Rilettura, su dati oggettivi, della forma di Fano romana*, in Mignani, Pozzi 2012, 10-74.

Dolci N. 1992a, *Il basolato romano*, in Milesi 1992, 87-88.

Dolci N. 1992b, *Le fogne romane di Fano*, in Milesi 1992, 329-342.

Gatto C. 2025, *Museums and new challenges: From digital curation to well-being enhancement. The case study of the archaeological collection of the Sigismondo Castromediano Museum*, «Archeologia e Calcolatori», 36.1, 393-410 (https://doi.org/10.19282/ac.36.1.2025.20).

Gonizzi Barsanti S., Guagliano M., Rossi A. 2022, *3D reality-based survey and retopology for structural analysis of cultural heritage*, «Sensors», 22, 24, 9593 (https://doi.org/10.3390/s22249593).

Innocente C., Ulrich L., Moos S., Vezzetti E. 2023, *A framework study on the use of immersive XR technologies in the cultural heritage domain*, «Journal of Cultural Heritage», 62, 268-283 (https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.06.001).

Koukopoulos D., Koukoulis K., Sylaiou S., Fidas C. 2023, *XR technologies fostering museum visits for people with impairments*, in C. Fidas, S. Sylaiou, T. Kuflik, F. Liarokapis, P. Koutsabasis, M. Wallace, D. Koukopoulos, A. Antoniou, K.

Mania, I. Lykourentzou (eds.), *Proceedings of the First International Workshop on Accessibility and Multimodal Interaction Design Approaches in Museums for People with Impairments (AMID) co-located with MobileHCI 2023*, Aachen, CEUR Workshop Proceedings, 17-25 (https://ceur-ws.org/Vol-3622/).

Liaskos O., Mitsigkola S., Arapakopoulos A., Papatzanakis G., Ginnis A., Papadopoulos C., Peppa S., Remoundos G. 2022, *Development of the virtual reality application: The Ships of Navarino*, «Applied Sciences», 12, 7, 3541 (https://doi.org/10.3390/app12073541).

Lo Pilato A., Scandurra S., Palomba D., Di Luggo A. 2023, *Valorizing cultural heritage by employing digital technologies for survey and communication: The church of San Vincenzo Ferreri*, in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, Florence, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 969-975 (https://doi.org/10.5194/isprs-Archives-XLVIII-M-2-2023-969-2023).

Luni M. 1992a, *La cinta muraria di Fanum Fortunae*, in Milesi 1992, 89-152.

Luni M. 1992b, *La Porta d'Augusto a Fano dalla riscoperta al Novecento*, in Milesi 1992, 153-182.

Luni M. 2000, *Studi su Fanum Fortunae*, Urbino, Quattroventi.

Mei O. 2022, *La basilica vitruviana della Colonia Iulia Fanestris e la realtà archeologica di Fano*, «Vitruvius: Rivista del Centro Studi Vitruviani», 1, 143-174.

Mignani C., Pozzi R. (eds.) 2012, *Murum dedit. Bimillenario delle mura augustee di Fano. Atti del Convegno (Fano 2009)*, Fano, Comune di Fano-Assessorato alla Cultura-Museo Civico.

Milesi F. (ed.) 1992, *Fano romana*, Fano, Editrice Fortuna.

Muñoz A., Climent-Ferrer J.J., Martí-Testón A., Solanes J.E., Gracia L. 2025, *Enhancing cultural heritage engagement with novel interactive extended-reality multisensory system*, «Electronics», 14, 10, 2039 (https://doi.org/10.3390/electronics14102039).

Pandolfi Basso A. 1994, *Le mura romane di Fano*, «Nuovi Studi Fanesi», 9, 11-62.

Perna R., de Silva L.X., Clini P., D'Alessio M., Capodaglio E. 2025, *Le fornaci romane di Pollentia-Urbs Salvia (Urbisaglia-MC): un modello di fruizione immersiva per il patrimonio archeologico*, «Archeologia e Calcolatori», 36.1, 321-340 (https://doi.org/10.19282/ac.36.1.2025.16).

Purcaro V. 1992, *Osservazioni sulla "Porta Augustea" di Fano*, in Milesi 1992, 197-208.

Purcaro V. 2012, *L'"Arco" di Augusto a Fano*, in Mignani, Pozzi 2012, 82-91.

Reilly P. 1991, *Towards a virtual archaeology*, in S. Rahtz, K. Lockyear (eds.), *CAA90. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology 1990*, Oxford, Archaeopress, 132-139.

Rodriguez-Garcia B., Guillen-Sanz H., Checa D., Bustillo A. 2024, *A systematic review of virtual 3D reconstructions of Cultural Heritage in immersive Virtual Reality*, «Multimedia Tools and Applications», 83, 42, 89743-89793 (https://doi.org/10.1007/s11042-024-18700-3).

Rosada G. 1992, *Mura e porte: tra architettura funzionale e simbolo*, in S. Settis (ed.), *Civiltà dei Romani. III. Il rito e la vita privata*, Milano, Electa, 124-139.

Tapinaki S., Pateraki M., Skamantzari M., Georgopoulos A. 2023, *Conventional or automated photogrammetry for cultural heritage documentation?*, in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, Florence, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1535-1542 (https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-1535-2023).

Taus P. 2012, *La cinta augustea di Fano: forma e funzionalità militare*, in Mignani, Pozzi 2012, 108-129.

Tribhuvan A.P., Binnaser A.A. 2024, *Exploring the digital heritage of Ajanta caves through VR technology*, «Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage», 35 (https://doi.org/10.1016/j.daach.2024.e00381).

Zhang J., Wan Yahaya W.A.J., Sanmugam M. 2024, *The impact of immersive technologies on cultural heritage: A bibliometric study of VR, AR, and MR applications*, «Sustainability», 16, 15, 6446 (https://doi.org/10.3390/su16156446).

ABSTRACT

This contribution presents a virtual reality application developed for the enhancement of the Roman Walls of Fano, combining digital surveying, 3D modeling, and immersive storytelling. The project involved the integration of data acquired through laser scanning, aerial photogrammetry, and high-resolution photography to generate a high-density digital twin, used as the foundation for interactive experiences. The VR application, designed for standalone devices, guides the user through a structured narrative composed of activatable sequences, featuring synchronized audiovisual content, symbolic interactions, and explorable 1:1 scale environments. The user evaluation, conducted on a sample of university students, revealed a high level of satisfaction in terms of immersion and interactivity, while also highlighting the need to improve accessibility due to episodes of cybersickness. Future developments include the extension of the survey to the entire circuit of the Roman walls, historically grounded virtual reconstructions, integration of the model into GIS systems, and the creation of a distributed museum based on digital content adaptable to different audiences. The proposed experience represents an example of a scientifically grounded application of immersive technologies to the dissemination of archaeological heritage.