

# INDICE

Introduzione	pag. 7
Gestione e rappresentazione dei dati	
Premessa	9
Le banche dati	14
I GIS	17
La rappresentazione dei dati	19
Condivisione dei dati	33
Realtà virtuale come strumento di conoscenza	
Premessa	45
La scoperta dell'anfiteatro	45
Lo scavo e la registrazione delle informazioni	49
Applicazione mobile per gestire dati	53
Considerazioni	58
La virtualizzazione delle informazioni di Sant'Orsola	
Premessa	61
La Chiesa di Sant'Orsola: storia e rilievo	62
Le problematiche da risolvere	66
L'ambiente di sviluppo scelto	66
Il funzionamento	67
Lo sviluppo	69
L'applicazione ArKeyLab	71
Realtà aumentata e archeologia	
Premessa	77
Lo scavo archeologico di Palazzo Baldini	79
Progetto e realizzazione app mobile	84
Risultati ottenuti	88
Realtà aumentata per la statua di Giuseppe Sirtori a Milano	
Premessa	91
La statua di Giuseppe Sirtori: rilievo e restituzione	93
Progettazione e creazione dell'applicazione mobile	95
Considerazioni	99

Realtà immersiva per la conoscenza dell'architettura	
Premessa	pag. 103
Realtà immersiva: definizione e applicazione	103
Cenni storici e rilievo della Sala Capitolare	106
Il progetto e la sua realizzazione	107
Risultati ottenuti	114
La realtà immersiva dell'Oratorio di Sant'Agostino	
Premessa	117
Rilievo tridimensionale dell'Oratorio	117
Realizzazione dell'applicazione immersiva	120
Bibliografia	125
Fonti delle illustrazioni	130

## INTRODUZIONE

Il continuo sviluppo della rappresentazione digitale tridimensionale offre oggi nuovi strumenti e tecniche per visualizzare e “raccontare” i beni culturali. Sistemi mobile e applicazioni interattive permettono, infatti, di interagire con i beni mostrando dettagli, difficilmente percepibili con una rappresentazione bidimensionale, nonché informazioni impossibili da ottenere nel campo del visibile. Si tratta di applicazioni che, con semplici tocchi su monitor touch screen, consentono di ruotare e analizzare modelli tridimensionali di un’architettura o di parte di essa. A tale tipologia di visualizzazione si aggiungono sistemi di realtà virtuale in grado di guidare il fruitore in “mondi” esplorabili attraverso percorsi predisposti per sollecitare i diversi interessi di un pubblico variegato.

L’intento di questa pubblicazione è quello di descrivere quali siano le differenti potenzialità dei sistemi appartenenti alla Mixed Reality, definizione proposta da Milgram<sup>1</sup> di un continuum che collega gli estremi di Virtual Reality e Mondo Reale. All’interno di questo spazio è possibile trovare la Realtà Aumentata che si trova più vicino al Real Environment e la Virtuality Augmented che presenta tratti più vicini al Virtual Environment.

In particolare il primo capitolo cerca di fornire una definizione storica e metodologica dei sistemi di rappresentazione della realtà virtuale, strumenti che hanno determinato la nascita di nuovi linguaggi e nuovi modi di raccontare le informazioni; allo stesso tempo, essendo necessariamente connessi ai sistemi per la visualizzazione e ai fondamentali concetti preliminari allo studio della materia, sono stati analizzati gli aspetti teorici che costituiscono la base della nascita delle banche dati e dei GIS, sistemi che sono fondamenta dei

<sup>1</sup> David Drascic, Paul Milgram. *Perceptual Issues in Augmented Reality*.

moderni database orientati alla ricerca ed alla gestione dei dati. Infine sono stati indagati esperienze e progetti esistenti o conclusi nel campo della standardizzazione e della interazione dei dati.

Nel secondo capitolo viene presa in esame la realtà virtuale tramite due esemplificazioni: la scoperta dell'Anfiteatro di Volterra ed il complesso di Sant'Orsola a Firenze. Due casi studio dove la complessità tridimensionale viene raccontata tramite le informazioni raccolte durante gli scavi archeologici.

Nel terzo capitolo il tema trattato è quello della realtà aumentata tramite lo studio dello scavo archeologico di Palazzo Baldini a Firenze e della statua di Giuseppe Sirtori a Milano.

Infine, il quarto capitolo indaga le potenzialità dell'impiego di sistemi immersivi per mostrare informazioni puntali degli affreschi della Sala Capitolare della Basilica di Santa Maria Novella a Firenze, oltre localizzare indagini specialistiche nel caso delle analisi eseguite nell'Oratorio di Sant'Agostino della Cella a Sampierdarena, Genova.

# **REALTÀ VIRTUALE COME STRUMENTO DI CONOSCENZA**

## **Premessa**

Il tema presentato in questo capitolo punta a descrivere una procedura sperimentale per la gestione dei dati raccolti durante una campagna di scavo archeologico. L'uso simultaneo di differenti tecniche di rilievo possono essere un forte contributo alla comprensione del bene indagato con dettagli a definizione variabile. I dati raccolti, dopo essere stati validati e comparati tra di loro, sono stati inseriti in un database per la loro gestione attraverso sistemi mobile. Lo studio propone, infatti, un prototipo di applicazione mobile, ancora in fase di studio ed implementazione, per la gestione delle informazioni tramite visualizzazioni virtuali. Tra le caratteristiche inserite nel progetto sono presenti: possibilità di inserire informazioni testuali; salvare appunti grafici; eseguire misurazioni lineari; scattare fotografie localizzate nello spazio tridimensionale virtuale.

## **La scoperta dell'anfiteatro**

La scoperta dell'Anfiteatro di Volterra è avvenuta l'8 luglio del 2015, quando è affiorata una grossa struttura di muratura curvilinea di circa 40 metri. Grazie ai fondi forniti dalla banca di Volterra è stato possibile far partire una prima campagna di scavi che permesso di confermare la presenza di una grossa struttura, a tre ordini, di periodo romano della quale si era perso la memoria. Scopo del primo saggio, durato 6 settimane, è stato quello di confermare la presenza della struttura e permettere la programmazione degli scavi successivi, impossibili da svolgere in quel momento dato l'incombere della stagione invernale. Per questo motivo sono



*Fig. 18. In alto: la scoperta del primo muro romano durante lo scavo. In basso: si inizia a vedere un muro curvilineo che suggerisce una struttura non comune.*

state asportate solo i primi strati che nel corso dei secoli si erano andati depositando, evidenziando le dimensioni reali dell'anfiteatro.

Il saggio eseguito ci ha fornito la certezza documentale di trovarci di fronte ad un anfiteatro composto da tre ordini, che dovevano ospitare a loro volta le gradinate, almeno in questo settore, scomparse. Quindi, la cavea è di notevole imponenza, composta da tre ordini sovrapposti, prima, secunda e summa cavea (o Maenianum primum, secundum e summum), separati dalle praecin-ctiones, che possiamo identificare con i potenti muri concentrici di sostegno.

L'arena si doveva trovare ad una quota che possiamo immaginare essere di circa due metri inferiore rispetto a quella raggiunta alla fine dello scavo, quindi



all'incirca a -6 metri dalla quota dell'attuale piano di campagna.

L'anfiteatro da un punto di vista architettonico potrebbe essere a struttura mista, ed avere quindi forti analogie

*Fig. 19. In alto: alla fine del primo giorno di scavo si delinea una struttura nascosta nel terreno. In basso: il risultato della prima campagna di scavo.*

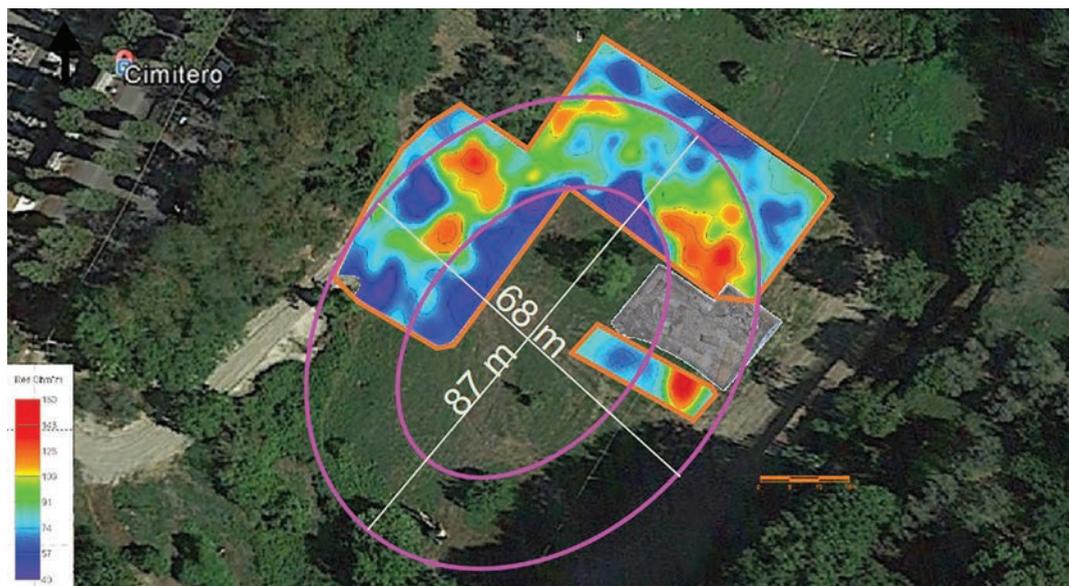


Fig. 20. Sovrapposizione dell'immagine aerea e la mappa di indagine geodiagnostica non invasiva realizzata dalla ditta SOING di Livorno.

con il teatro di Vallebuona, inserito cioè ove possibile nel pendio collinare con alcune parti costruite poi su sostruzioni, come la piccola indagine condotta all'interno di uno dei carceres parrebbe dimostrare.

Durante la prima campagna di scavi non è stato possibile indagare i crolli rinvenuti lasciando dubbi sul reale stato di conservazione della struttura. Durante i mesi invernali la ditta SOING di Livorno, partner della Soprintendenza nel progetto, ha eseguito alcune indagini geodiagnostiche non invasive che hanno mostrato come la struttura fosse molto più grande di quella immaginata.

Nel mese di maggio del 2016 una breve campagna di scavo è stata finanziata dal Ministero per acquisire informazioni sulle reali dimensioni della struttura. La collaborazione con il Dipartimento DICCA di Genova ha reso possibile l'esecuzione dei rilievi digitali per lo studio dei saggi eseguiti. La ricostruzione del monumento ha mostrato come le dimensioni della struttura siano di 82 X 64 metri composto da tre ordini a gradinate in pietra, come risulta dall'ultimo saggio eseguito.



## Lo scavo e la registrazione delle informazioni

Le fasi di scavo sono state eseguite tramite l'impiego delle moderne tecniche di rilievo tridimensionale, capaci di acquisire tutti i dati necessari alla creazione di una banca dati ricca di informazioni per lo studio del bene indagato. Metodologie che, oggi, portano un forte contributo nelle fasi di interpretazione, conservazione ed archiviazione dei dati, oltre che nella valorizzazione del bene tramite sistemi interattivi di visualizzazione<sup>41</sup>. Come spesso accade, le tecniche di rilievo strumentale come scanner laser terrestre (TLS), topografia e strutture from motion (SfM)<sup>42</sup>, possono essere impiegate simultaneamente per acquisire il maggior numero di informazione a seconda delle peculiarità della metodologia impiegata. Tecniche di rilievo che presentano definizioni ed errori differenti, ma che possono essere confrontate ed implementate tra loro per arricchire la

*Fig. 21. Localizzazione degli scavi archeologici eseguiti. La dimensione totale dell'anfiteatro risulta di 82 m per 64 m.*

<sup>41</sup> Michele Russo, Fabio Remondino e Gabriele Guidi. *Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico.*

<sup>42</sup> Bertocci Stefano, *Un progetto per il rilievo digitale del sito archeologico di Masada, patrimonio UNESCO, in Israele.*

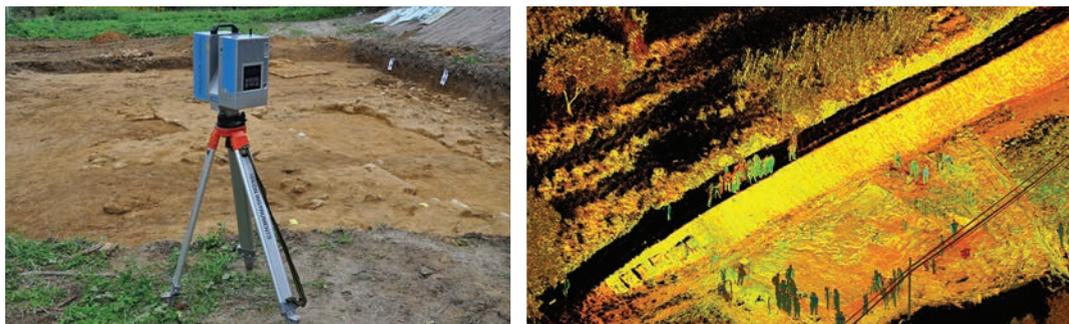


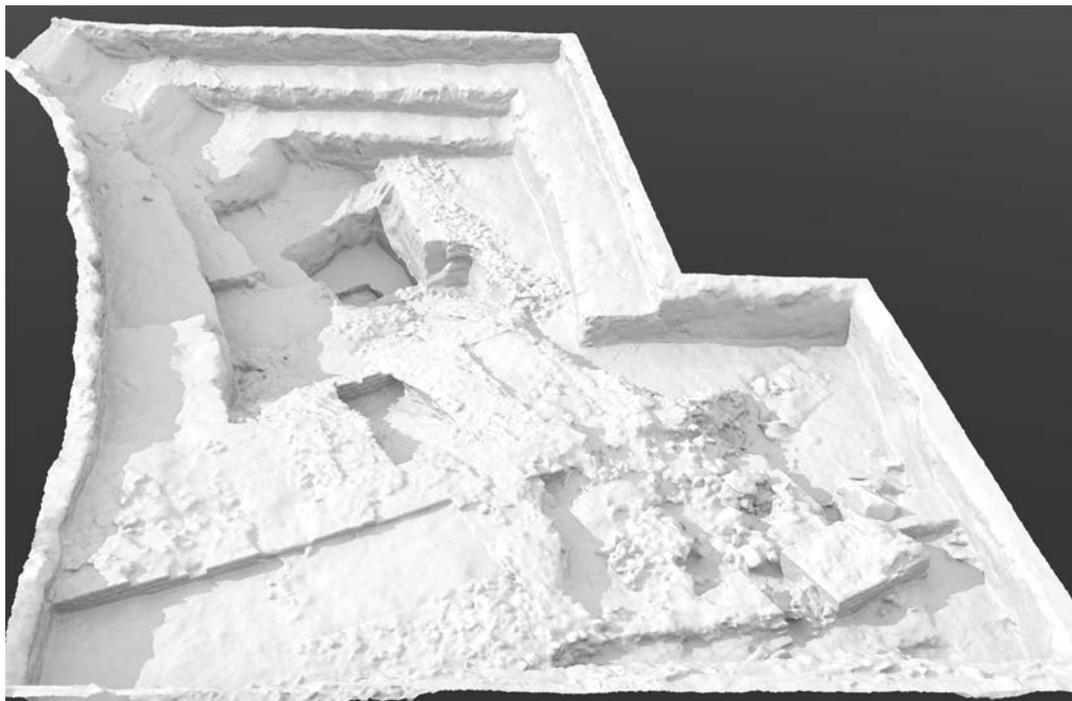
Fig. 22. La prima campagna di rilievo. A sinistra la strumentazione laser scanner impiegata Z+F Imager 5006h; a destra: visione della banca dati acquisita all'interno del software di gestione Leica Cyclone 9.1.

banca date delle informazioni. Nel caso specifico del rilievo dell'Anfiteatro di Volterra queste tre metodologie sono state implementate seguendo un ben preciso progetto di rilievo, indispensabile per analizzare la qualità dei dati raccolti e definire un protocollo operativo per la campagna di acquisizione dati. In primo luogo, una rete di appoggio topografico di inquadramento è stata costruita per poter registrare i dati provenienti dalle altre tecniche di rilievo: il TLS e la SfM. Queste due metodologie operative, oramai consolidate nel campo del rilievo, trovano ampia letteratura scientifica con l'obiettivo di determinare potenzialità e limiti nel loro uso simultaneo o alternativo<sup>43</sup>. L'uso di questi metodi nel campo dei Beni Culturali <sup>44 45</sup> mostrano come alcuni parametri siano fondamentali per la riuscita del rilievo. Dimensione, colorazione e complessità geometrica possono essere fattori determinanti nel momento dell'acquisizione tridimensionale aumentando o diminuendo l'errore di misura. Quindi, particolare attenzione è stata data alla definizione dell'errore massimo ammissibile. La presenza di terra sabbiosa e muratura a conci, unitamente alle dimensioni della struttura da rilevare, hanno determinato un errore ammissibile di circa 1,5 cm, valore massimo con il quale è possibile mantenere tutte le informazioni delle unità stratigrafiche rinvenute ed operare in modo speditivo nelle fasi di rilievo. Le operazioni che hanno portato alla valutazione di questo errore hanno visto la comparazione delle

<sup>43</sup> Beraldin, Jean Angelo. *Integration of Laser Scanning and Close-Range Photogrammetry - The Last Decade and Beyond*.

<sup>44</sup> Boehler, Wolfgang and Marbs, Andreas. *3D Scanning and photogrammetry for heritage recording: a comparison*.

<sup>45</sup> Grussenmeyer, Pierre, Landes, Tania, Voegtle, Thomas, and Ringle, Konrad. *Comparison methods of terrestrial laser scanning, photogrammetry and tacheometry data for recording of cultural heritage buildings*.



*Fig. 23. Modello tridimensionale della prima campagna di scavo composto da circa 6 milioni di poligoni.*

banche dati acquisite con le due differenti tecnologie di rilievo. Come test comparativo è stato scelto di prendere in esame il risultato della prima campagna di scavo, caratterizzata da una forte complessità geometrica e dalla presenza sia di zone con prevalenza di terreno, sia di strutture in muratura ben conservate.

Impiegando lo scanner a variazione di fase Z+F Imager 5006h, capace di acquisire punti fino a 79 metri con una precisione di circa 2 mm, è stato possibile registra-

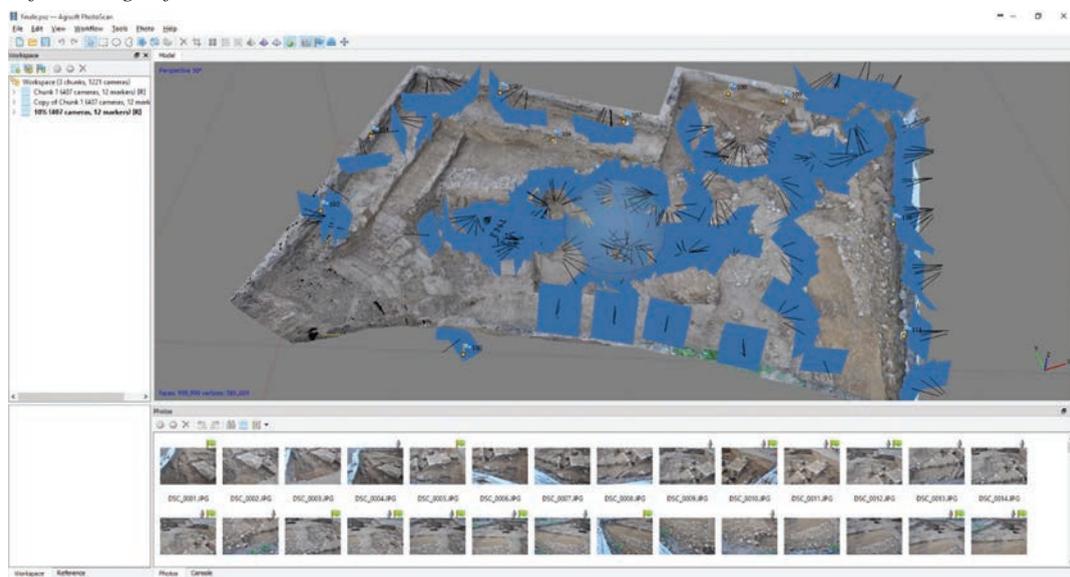
*Fig. 24. Applicazione della texture di colore generata tramite la tecnica di SfM.*

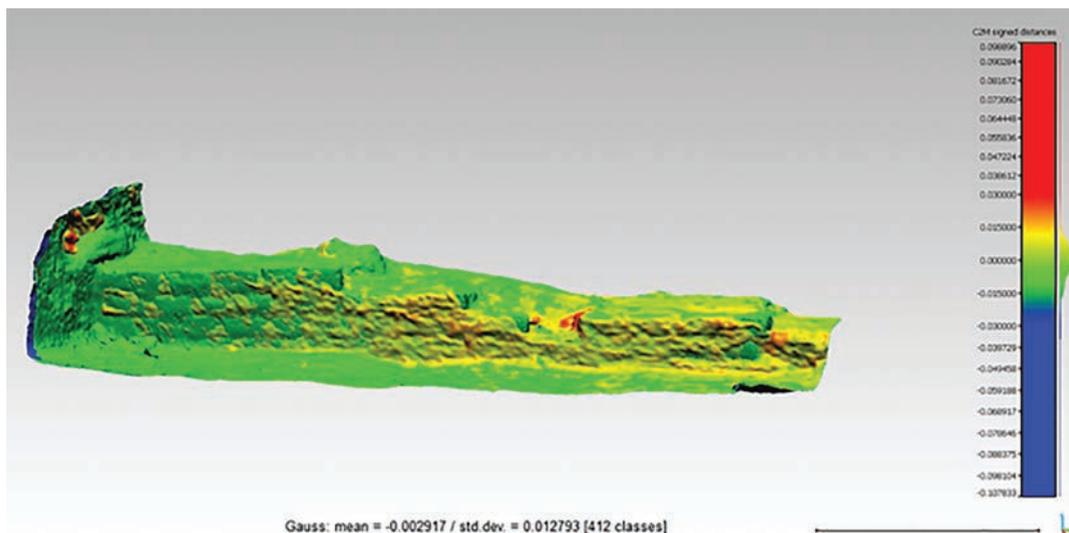


re le geometrie dello scavo archeologico con il valore di riflettanza del materiale. Tramite 14 postazioni laser sono state acquisite le nuvole di punti necessarie alla creazione del modello tridimensionale del saggio. Tale processo ha quindi visto la conversione delle point cloud in mesh tridimensionale operando una semplificazione dei dati con una distanza tra i punti di 1 cm, valore al di sotto dell'errore ammissibile definito in fase iniziale. Il modello 3d così ricostruito è stato successivamente sottoposto a fasi di ripulitura ed eliminazione di imperfezioni producendo un modello finale di 12'058'625 triangoli.

Contemporaneamente, la stessa area di scavo è stata analizzata impiegando la tecnica della SfM. Le operazioni di rilievo sono state eseguite impiegando una fotocamera reflex Nikon D5000 con obiettivo 18-105 mm. Mantenendo la stessa apertura focale, è stato possibile acquisire numerose immagini fotografiche che, successivamente, sono state elaborate all'interno del software Photoscan 1.2.2. Tramite le fasi di allineamento, costruzione della nuvola sparsa, nuvola densa, modello 3d e texture è stato possibile costruire un modello tridimensionale con lo stesso orientamento e

Fig. 25. Esecuzione della procedura di SfM all'interno del software Agisoft Photoscan.





*Fig. 26. Comparazione delle geometrie acquisite tramite scansione 3D e SfM eseguita all'interno del software open source CloudCompare 2.6.2.*

dimensionamento del risultato eseguito tramite tecnica TLS. I due modelli creati sono stati comparati all'interno del software CloudCompare 2.6.2 per valutare le divergenze tra le due tecniche di rilievo impiegate. I valori ottenuti sono stati di mean distance di 0.002917 m e di standard deviation di 0.012793 m, valori al di sotto del limite prefissato in partenza.

Alla luce di questa comparazione, il gruppo di ricerca ha deciso di eseguire i successivi rilievi tridimensionali utilizzando la tecnica SfM, con appoggio topografico, come principale risorsa per acquisire le informazioni metriche. Tecnica che, oltre a essere meno dispendiosa di risorse nelle fasi di elaborazione dati, poteva essere facilmente impiegabile anche da parte di personale non esperto evitando di dover interrompere per lungo tempo le fasi di scavo.

### **Applicazione mobile per gestire i dati**

La raccolta delle informazioni è solo il primo passo per la comprensione di un manufatto archeologico. Dati che devono essere catalogati e resi disponibili a più settori disciplinari per interpretare l'evoluzione storica



Server MySQL



App Mobile

Fig. 27. I dati non vengono memorizzati localmente ma, tramite appositi script di connessione, vengono salvati all'interno di un database remoto.

<sup>46</sup> Grabner, Markus, Wozelka, Ralph, Mirchandani, Manish, and Schindler, Konrad. *Web-based visualization of virtual archaeological sites*.

<sup>47</sup> Vlahakis, Vassilios, Ioannidis, Nikolaos, Karigiannis, John et al. *Archeoguide: An augmented reality guide for archaeologist sites*.

<sup>48</sup> Pescarin, Sofia, Palombini, Augusto, Calori, Luigi, and Negri, Andrea. *Ambienti collaborativi 3D. Il caso di Virtual Rome*.

<sup>49</sup> Potenziani, Marco, Callieri, Marco, Dellepiane, Matteo, Corsini, Massimiliano, Ponchio, Federico, and Scopigno, Roberto. *3DHOP: 3D Heritage Online Presenter*.

del bene indagato. Lo scavo archeologico è il momento in cui tutte le informazioni non raccolte e catalogate andranno perse definitivamente, interrompendo il processo di comprensione del manufatto indagato. Raccogliere e registrare le informazioni ad intervalli regolari è quindi il primo passo per validare scientificamente le informazioni raccolte<sup>46</sup>.

Nuovi progetti di ricerca vedono oggi l'uso di piattaforme commerciali e strumenti open source per gestire e visualizzare modelli tridimensionali, immagini, testi e suoni. Studi come Archeoguide<sup>47</sup> consentono di creare visite guidate in realtà aumentata tramite HMD. Altri progetti, come Virtual Rome, sovrappongono il paesaggio della Roma moderna a quello di Roma nel secondo secolo A. C. all'interno di browser web comuni, attraverso una riproduzione online tridimensionale<sup>48</sup>.

Ad oggi, la piattaforma 3D Heritage Online Presenter (3DHOP), sviluppata dal Laboratorio Visual Computing del Dipartimento Isti-CNR di Pisa, si dimostra un progetto promettente per la visualizzazione di risorse multimediali digitali sul web<sup>49</sup>. L'uso della codifica multi risoluzione risulta essere un ottimo strumento gestire modelli 3D ad alta risoluzione, come i modelli campionati utilizzati di solito nelle applicazioni CH. Inoltre, fornisce una serie di modelli pronti per l'uso ed

esempi pratici per la presentazione degli artefatti CH, capaci di interconnettere la visualizzazione 3D con il resto del sito web DOM, consentendo di creare schemi di presentazione integrata (3D e multimedia).

La ricerca presentata in questo contributo vuole essere una sperimentazione di come la realizzazione di una applicazione mobile possa contribuire alla comprensione e lo studio di un bene archeologico. In particolare, l'uso della realtà virtuale può essere uno strumento indispensabile per comprendere la morfologia spaziale del manufatto indagato, permettendo l'interazione da parte dell'utente e l'inserimento di informazioni puntuali indispensabili alla comprensione della sua evoluzione. L'obiettivo è quindi quello di creare una applicazione capace di:

- navigare tridimensionalmente all'interno dei modelli 3d dei saggi rilevati;
- compiere misurazioni da punto a punto;
- memorizzare appunti testuali e grafici, localizzati nella tridimensionalità, per favorire lo studio del manufatto;
- scattare immagini fotografiche utilizzando la camera del sistema mobile e collocare queste immagini in punti precisi del modello tridimensionale.

Il progetto presentato è stato realizzato tramite l'impiego della piattaforma Unity 3D, software di programmazione utilizzato principalmente per lo sviluppo di videogames e capace di fornire tutte le utility necessarie alla creazione di ambientazioni virtuali. Lo sviluppo dell'applicazione proposta ha quindi avuto inizio definendo le caratteristiche indispensabili all'interazione da parte dell'utente. L'applicazione doveva infatti essere in grado di visualizzare modelli tridimensionali e consentire la navigazione virtuale, oltre a gestire testi ed immagini. Dati che potevano essere già presenti e visualizzati all'interno dell'appli-

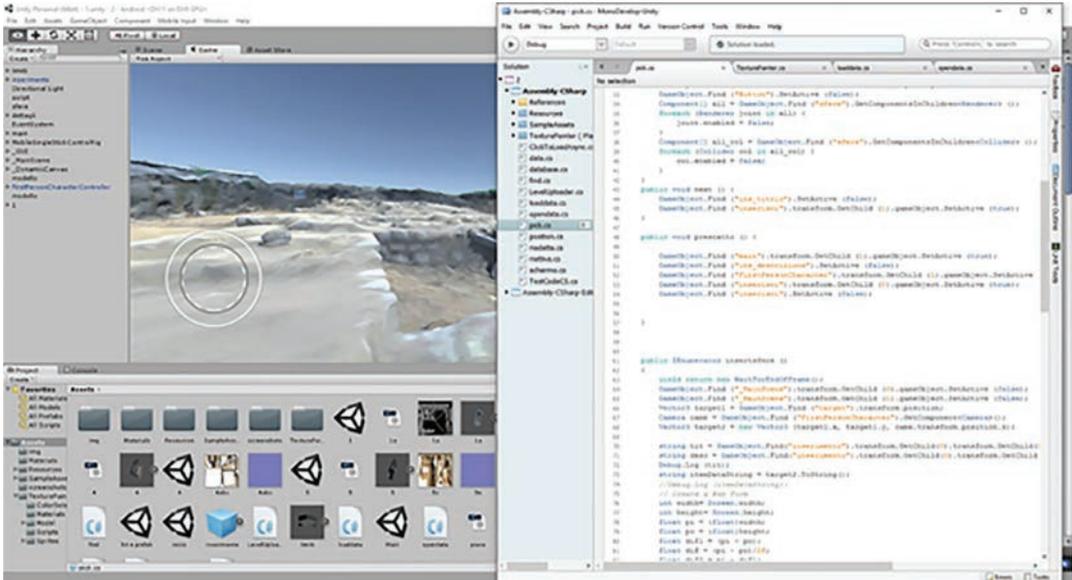


Fig. 28. Schermata di utilizzo della piattaforma Unity 3D per la gestione dei modelli tridimensionali e la creazione degli script C# per le azioni.

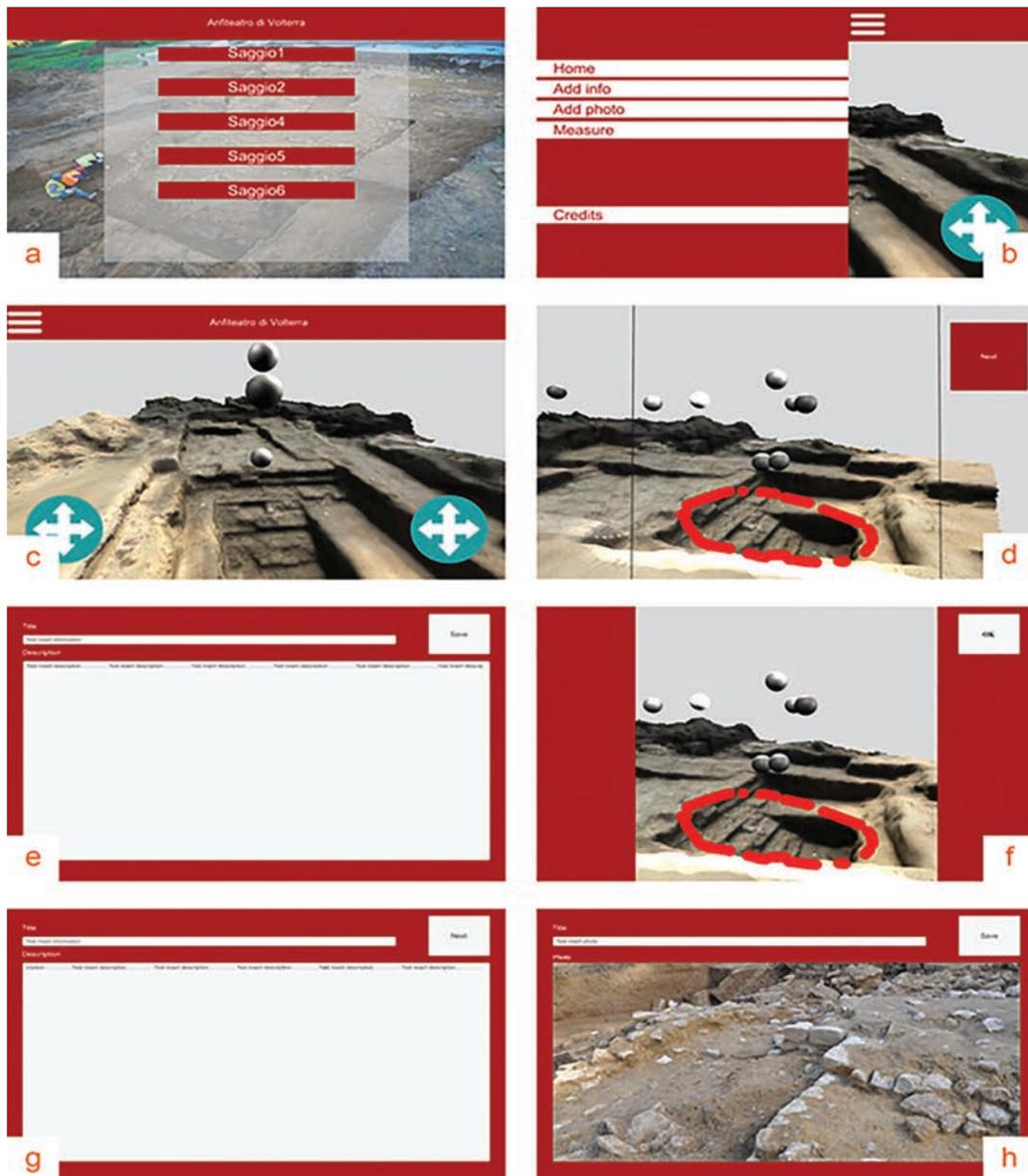
cazione, oppure inseriti runtime dall'utente durante la navigazione virtuale. Per favorire possibili sviluppi e consentire una maggiore versatilità dell'applicazione proposta, è stato deciso di creare un database aggiornabile SQL all'interno di un server per scambiare e salvare le informazioni raccolte.

Le funzioni per l'interazione con l'applicazione progettata, come ad esempio la navigazione virtuale, l'inserimento dei dati e la connessione con il database, sono state realizzate tramite appositi script, in linguaggio di programmazione C#, capaci di gestire le variabili necessarie allo svolgimento di ogni azione. Ad esempio, lo script dedicato alla creazione di appunti grafici è stato realizzato impiegando una sequenza di particolari azioni:

- acquisizione dello screenshot del punto di vista dell'utente;
- creazione di piano perpendicolare all'asse visivo di dimensione uguale allo schermo del supporto mobile;
- applicazione dello screenshot come texture del piano;

- creazione dell'appunto grafico definito dall'utente tramite il touch screen del supporto mobile utilizzando la funzione raycast. In particolare questa funzione permette di inviare raggi invisibili paralleli all'asse visivo in corrispondenza del punto toccato dall'utente sul monitor touch. L'intersezione di questi raggi con il piano precedentemente creato individua punti spaziali ai quali viene associato un cerchio con campitura rossa. La vicinanza di questi cerchi rispetto alla loro dimensione consente di simulare una linea continua e quindi di creare un appunto grafico;
- acquisizione dello screenshot del supporto mobile e suo salvataggio nel database SQL.

Altri script usano invece la funzione di raycast per individuare le coordinate spaziali di punti (indispensabili per associare nello spazio virtuale le informazioni o calcolare distanze) oppure il nome di un gameobject (GameObjects are the fundamental objects in Unity that represent characters, props and scenery) utile per richiamare una particolare informazione dal database. La navigazione tridimensionale avviene tramite l'uso di due cursori posizionati agli angoli dello schermo che permettono sia il movimento (sticker sinistro), sia la rotazione del punto di vista dell'utente (sticker destro). Infine, i modelli tridimensionali impiegati sono quelli derivanti dalle procedure di rilievo tridimensionale precedentemente descritte opportunamente semplificate tramite le tecniche di retopology e texturing avanzato. Per non aggravare la dimensione pacchetto di installazione, i modelli tridimensionali vengono scaricati nel momento in cui viene scelto il saggio che dovrà essere visualizzato, salvandolo in apposita cartella del supporto mobile e rendendolo già presente per le successive visualizzazioni.



## Considerazioni

Fig. 29. Alcune schermate dell'applicazione sviluppate:  
 A) elenco degli scavi lato server;  
 B) menu popup con funzioni programmate;

Le tecnologie di rappresentazione sono oggi in continuo sviluppo e consentono una sempre maggiore interattività da parte dell'utente finale. Tecniche di virtual reality sempre più raffinate e strumenti tecnologici sempre

più potenti sono gli ingredienti fondamentali per realizzare applicazioni utili nel campo dei beni culturali. La possibilità di impiegare questi strumenti all'avanguardia può essere di grande interesse per aiutare i ricercatori a condividere le informazioni e per favorire la divulgazione delle informazioni raccolte. Questi strumenti ed applicazioni tecnologiche non devono essere viste come oggetti lontani dal mondo dei beni culturali, ma devono invece essere viste come strumento per facilitare le operazioni di ricerca e condivisione, molto più efficaci di quanto possano essere i mezzi tradizionali. Le tecnologie per la rappresentazione sono oggi in continua evoluzione e consentono una sempre maggiore interattività da parte dell'utente finale. Tecniche di realtà virtuale sempre più raffinate e strumenti tecnologici sempre più potenti sono gli ingredienti essenziali per realizzare applicazioni utili nel campo del patrimonio culturale. La possibilità di utilizzare questi strumenti all'avanguardia può essere di grande interesse per aiutare i ricercatori a condividere informazioni e facilitare la diffusione delle informazioni raccolte. Questi strumenti e le applicazioni tecnologiche non devono essere considerate come oggetti lontani dal mondo dei beni culturali. Dovrebbe invece essere visto come uno strumento per facilitare le operazioni di ricerca e condivisione, molto più efficaci di quanto possa essere il mezzo tradizionale.

- C) vista VR dello scavo;*
- D) Possibilità di disegnare sull'istantanea;*
- E) finestra per immettere titolo e descrizione;*
- F) istantanea memorizzata lato server;*
- G) visualizzazione delle informazioni inserite;*
- H) finestra con foto e titolo memorizzati.*

Si ringrazia: Dottoressa Elena Sorge, Dottoressa Valeria d'Aquino, Dottor Giacomo Baldini, GIANO snc, SO.IN.G. Strutture e Ambiente srl, Dottor Paolo Nannini, Dottor Giovanni Roncaglia, Dottor Stefano Sarrì, Dottor Pasquino Pallecchi, Dottor Domenico Zaccaria, il Comune Volterra, Stockholm University, Cassa di Risparmio di Volterra, Fondazione Cassa di Risparmio di Volterra e Signora Franca Taddei.