

Laboratory for Advanced Planning and Simulation Project

Sistemi Informatici Avanzati per l'analisi stratigrafica archeologica

Anna Luisa Sanna e Stefania Dore

Università degli Studi di Cagliari

**Gabriella Pusceddu, Gianstefano Monni, Gregorio Franzoni,
Fabrizio Murgia e Piero Pili**

Gems Area, EIP, CRS4

Sistemi Informatici Avanzati per l'analisi stratigrafica archeologica

Anna Luisa Sanna e Stefania Dore

*Università degli Studi di Cagliari*¹

Gabriella Pusceddu, Gianstefano Monni, Gregorio Franzoni, Fabrizio Murgia e Piero Pili

*GEMS Area EIP, CRS4*²

Giugno 2003

ABSTRACT

Questo documento descrive le potenzialità derivanti dall'applicazione di affermate tecniche e metodologie ICT all'ambito dell'indagine di siti archeologici. Queste metodologie vengono organizzate in un'architettura di sistema di sistema informativo adeguato a supportare l'attività dell'archeologo per la ricerca, la didattica e la fruizione.

L'architettura proposta cerca di estendere le potenzialità d'uso delle metodologie di analisi non distruttiva, delle tecniche di ricostruzione di geometrie da immagini e delle tecniche di prototipazione rapida per la manifattura di reperti, utilizzati principalmente nella diagnosi e restauro dei beni culturali, ad ambiti più estesi quale l'analisi stratigrafica archeologica.

L'architettura proposta integra le funzionalità tipiche di un sistema informativo geografico (es. inserimento, catalogazione e recupero dati di scavo) con una serie di moduli di calcolo innovativi (quali, per esempio, il calcolo automatico della posizione del reperto, l'acquisizione co-registrata delle immagini di scavo, la ricostruzione 3D della geometria dello scavo, prototipazione fisica dei reperti dello scavo, programmi per l'identificazione di reperti stratigrafici nelle immagini acquisite) in grado coadiuvare l'attività dell'archeologo sia durante la campagna di scavo che nelle fasi successive di analisi e elaborazione dati.

Nell'architettura proposta il dato tecnico è strettamente legato al dato visuale (immagine). Questa caratteristica permette al sistema di ottimizzare l'acquisizione di informazioni durante le fasi dello scavo. Per la catalogazione e la successiva analisi di questi dati, il sistema può utilizzare le potenzialità dei programmi di modellazione geometrica e grafica computerizzata per realizzare, con procedure completamente automatiche, l'elaborazione di grafici, prospetti e sezioni per l'analisi stratigrafica archeologica. Il sistema è così in grado di sfruttare appieno i dati multimediali (immagini, geometrie, dati di posizione, etc.) provenienti dai dispositivi elettronici di I/O di largo consumo quali: computer palmari, sistemi per la comunicazione dati senza fili, dispositivi di geo-referenziazione ad ultrasuoni e satellitari (GPS) e foto-camere digitali. L'architettura è innovativa e si basa sugli strumenti software ed ambienti di sviluppo Open Source legati al fenomeno Linux utilizzati nel Laboratorio Avanzato per la Progettazione e la Simulazione al Calcolatore (LAPS).

Il documento è organizzato in sezioni. La sezione 1 illustra l'impatto delle tecnologie ICT nel contesto applicativo scelto: l'analisi stratigrafica archeologica. La sezione 2 illustra le fasi, gli attori e le modalità inerenti l'analisi stratigrafica. La sezione 3 mostra un prototipo di architettura aperta ed Open Source realizzata con i programmi e gli ambienti di sviluppo installati nel Laboratorio. La sezione 4 sulla base delle analisi delle sezioni precedenti definisce l'architettura di sistema proposta.

¹ **Università degli Studi di Cagliari**

² **Geometric Modelling and Monte Carlo Simulations Area, Centro Ricerca e Sviluppo Studi Superiori in Sardegna**

Indice

1.	ARCHEOLOGIA E RIVOLUZIONE INFORMATICA	4
2.	ANALISI STRATIGRAFICA ARCHEOLOGICA.....	6
2.1	METODI DI DOCUMENTAZIONE E ACQUISIZIONE DATI.....	6
2.1.1	LO SCAVO ARCHEOLOGICO.....	7
2.1.2	<i>FASI PRELIMINARI ALLO SCAVO.....</i>	<i>7</i>
2.2.1	<i>FASE OPERATIVA DELLO SCAVO</i>	<i>9</i>
2.2.2	<i>STUDIO DEI REPERTI E LA FRUIZIONE DEI DATI.....</i>	<i>11</i>
2.3.1	<i>ARCHEOLOGIA DELLE STRUTTURE MURARIE.....</i>	<i>11</i>
3	UN PROTOTIPO DI SISTEMA GIS PER LA GESTIONE DEI DATI DI SCAVO.....	14
3.1	GIS ARCHEO.....	14
3.1.1	<i>MODELLO DEI DATI.....</i>	<i>14</i>
3.1.2	<i>RAPPRESENTAZIONE DEI DATI.....</i>	<i>14</i>
3.1.3	<i>COMPONENTI DI UN GIS.....</i>	<i>14</i>
3.2	DEFINIZIONE DI UN PROTOTIPO	15
3.2.1	<i>CARATTERISTICHE DI GRASS.....</i>	<i>15</i>
3.2.2	<i>CARATTERISTICHE DI MYSQL</i>	<i>15</i>
3.2.3	<i>CARATTERISTICHE DI PHPMYADMIN.....</i>	<i>16</i>
3.2.4	<i>INTEGRAZIONE DEI SISTEMI</i>	<i>16</i>
4	ARCHITETTURA SISTEMA AUSILIO INFORMATIVO PER L'ANALISI STRATIGRAFICA ARCHEOLOGICA	17
4.1	DEFINIZIONE DELLE SPECIFICHE.....	17
4.2	ARCHITETTURA DI SISTEMA	17
4.3	MODELLATORE GEOMETRICO ARCHEO.....	20
4.4	DATABASE ARCHEO.....	20
4.5	DATABASE-IMMAGINI ARCHEO	21
4.6	INTERFACCIA SISTEMA-DISPOSITIVI DI I/O	21
4.7	INTERFACCIA UTENTE-SISTEMA GRAFICA.....	21
4.8	VISUALIZZAZIONE 3D DEL SITO	21
4.9	ACQUISIZIONE 3D DEL SITO	22
4.10	COREGISTRAZIONE IMMAGINI-GEOMETRIE-DATI.....	24
4.11	SEGMENTAZIONE IMMAGINI ARCHEO.....	25
4.12	STAMPA 3D.....	27
5.	CONCLUSIONI SVILUPPI FUTURI.....	28
	BIBLIOGRAFIA	29

1. Archeologia e Rivoluzione Informatica

I costanti progressi nei campi dell'informatica e delle telecomunicazioni rendono oggi disponibili, a costi sempre più competitivi (500-1000 Euro) e su computer di fascia bassa (cioè Personal Computer *entry-level*), potenze di calcolo, elaborazione grafica, e spazio memoria accessibili solo qualche anno fa solo su workstation di fascia alta (es. Silicon Graphics™, Hewlett Packard™, IBM™) ad un costo dell'ordine delle decine e centinaia di migliaia di Euro. A questo sommiamo la parallela evoluzione del settore *elettronica multimediale* per il mercato di largo consumo che consente oggi di disporre, su larga scala, di computer palmari sempre più evoluti (Palm™, Compaq™, Nokia™, etc.) che integrano sempre maggiori funzionalità di calcolo, di elaborazione grafiche (schermi a colori) e di comunicazione senza fili (wireless). Le ultime versioni dei palmari (incluso in questi i cellulari di fascia alta iniziano ad offrire (ma siamo solo all'inizio del percorso evolutivo), in un unico dispositivo integrato del costo di 500-1000 Euro, schermo touch-screen a colori, diversi mega di RAM (64 FlashRAM), porte di comunicazione wireless per la connessione immediata ad altri dispositivi, comunicazione cellulare GSM, fotocamera digitale, rilevatore di posizione Global Positioning System (GPS). La comunicazione tra i vari sistemi risulta sempre più semplice grazie alla diffusione e all'accettazione, da parte dei vari *vendor*, di protocolli di comunicazione wireless aperti (es. Bluetooth). La possibilità di connettersi dal proprio palmare/cellulare ai server remoti in Internet e trasferire, in breve tempo, testo e singole immagini di adeguata risoluzione e a colori (fra qualche tempo anche le sequenze video di buona qualità saranno disponibili su larga scala) è già da oggi una realtà. Ciò grazie alla crescente disponibilità di banda di comunicazione (sia via cavo che via radio) offerta su tutto il territorio nazionale dai gestori di servizi di fonia sia cellulare (TIM, WIND, Vodafone) che via cavo (Telecom Italia, Wind, Tiscali, etc.).

La disponibilità di tecnologia elettronica a basso costo sta aprendo di fatto nuovi orizzonti applicativi in vari settori. Nel contesto dell'archeologia un utilizzo mirato delle nuove tecnologie legate all'evoluzione dei settori home-computer, multimedia e telecomunicazioni può portare a migliorare le procedure con cui si raccolgono, si catalogano e si analizzano dati raccolti durante le campagne di scavo.

Per sfruttare appieno le enormi potenzialità in un sistema informativo computerizzato occorre analizzare in dettaglio i principi e le modalità operative alla base dell'analisi stratigrafica archeologica.

Requisiti del sistema di ausilio all'indagine stratigrafica

L'architettura di sistema che andiamo a definire deve sia permettere una più agevole catalogazione delle informazioni prodotte nelle fasi di scavo di un sito, sia possedere funzionalità tipiche dei sistemi informativi automatizzati. Queste ultime funzionalità sono integrate con strumenti di calcolo avanzati di elaborazione di immagini e grafica computerizzata che si basano sulle potenzialità dell'associazione "informazione testo/immagine/geometria/topologia".

L'idea fondante dell'architettura qui proposta è che, sulla base dell'esperienza derivata dalle attuali e ben codificate procedure di scavo, sia possibile realizzare un sistema informativo in grado di supportare con strumenti automatizzati l'inserimento e la gestione delle informazioni da parte dell'archeologo e del team che lo supporta in tutte le fasi di scavo.

Per la produzione della documentazione tecnica relativamente allo scavo di un sito archeologico il settore ICT attuale e dell'elettronica di consumo mette a disposizione diverse tecnologie e dispositivi a basso costo. Tra queste possiamo evidenziare la disponibilità di:

- (a) sistemi operativi open quali Linux e ambienti di sviluppo avanzati ed open-source (ambienti sofisticati di modellazione geometrica 2D/3D, per la gestione di basi dati, per la progettazione di interfacce grafiche utente) per lo sviluppo di programmi specializzati per l'analisi stratigrafica archeologica;

- (b) programmi open sviluppati per il mondo open-source legati al settore Internet e Intranet (database SQL, ambienti per l'accesso al database SQL attraverso web, http-server, mail-server, etc.).
- (c) server di calcolo e stazioni lavoro da ufficio a basso costo ed alte prestazioni basati su piattaforma PC (Processori, Memoria RAM e disco, interfacce I/O, schede grafiche) per la gestione e l'elaborazione di grandi quantità di informazioni (testo, immagini) recuperate durante lo scavo;
- (d) camere digitali dell'elettronica di consumo ad alta risoluzione e basso costo per l'acquisizione di immagini digitali;
- (e) sistemi di posizionamento (tramite georeferenziazione GSM, georeferenziazione ad ultrasuoni e sistemi ottici) per l'identificazione precisa della localizzazione dei reperti nel contesto di scavo;
- (f) dispositivi per la ricostruzione 3D delle geometrie degli scavi e dei reperti (tramite dispositivi di visione);
- (g) sistemi di comunicazione economici wireless (radio, ottici) interfacciabili in modo semplice ai sistemi di controllo aperti di rete;
- (h) stazioni di lavoro portatili (computer portatili e palmari) con schermo a colori dotati di supporto wire-less con interfaccia di comunicazione aperta;

Queste tecnologie e dispositivi devono trovare la corretta collocazione nell'architettura di sistema. La sezione 2 del documento illustra il contesto applicativo per il quale il sistema viene progettato: l'analisi stratigrafica archeologica. La sezione 3 mostra un prototipo di architettura aperta ed open-source, non specializzata per l'analisi stratigrafica archeologica, che è servita a definire l'architettura di sistema proposta in sezione 4.

2. Analisi stratigrafica archeologica

L'archeologia dello scavo si fonda su principi peculiari e autonomi che solo mediatamente si ricollegano ad altri modi più tradizionali di intendere questa disciplina, come quelli storico antiquario e storico artistico. Non si può indagare il sottosuolo senza conoscere le regole della stratigrafia; l'indagine stratigrafica nasce da una tradizione di studi recenti sostanzialmente novecentesca.

Per potere estrarre, scavando, il massimo d'informazione e poter confrontare i risultati occorre un minimo comune denominatore nel metodo da usare. È stato pertanto necessario individuare regole di condotta da applicare nello scavo, in modo più sistematico o conciso a seconda delle circostanze, per individuare il maggior numero possibile di azioni naturali e umane, di accumulo o di sottrazione, intenzionali o casuali. Per fare ciò occorre smontare tali azioni nell'ordine inverso in cui si sono prodotte; lo scavo non implica soltanto lo smontare quanto anche il rimontare, e cioè la costruzione di una storia nelle tre dimensioni dello spazio, che non è mai un fatto esclusivamente strumentale o una questione di mera tecnica stratigrafica.

In passato realtà più tarde sono state sacrificate per raggiungere in fretta quelle sottostanti, testimonianze evidenti hanno fatto scartare quelle più riposte, e documenti ritenuti più importanti hanno portato alla distruzione di altri creduti trascurabili.

Nell'archeologia del territorio dovrebbe invece interessare qualsiasi cosa che si possa incontrare e solo un'oculata programmazione della ricerca può consentire di sveltire lo scavo in talune più ovvie circostanze per poter coglierne meglio altre più insolite, e arrivare così a conoscerne la stratificazione sino in fondo. Ogni scavo ha, infatti, limiti di tempo e di mezzi per cui deve restituire il massimo di informazione possibile; il momento della contestualizzazione di uno scavo nell'insieme delle conoscenze già acquisite, è essenziale ad una buona ricostruzione scientifica, esso è tanto più efficace quanto meno abbia interferito col momento della comprensione della stratigrafia.

Primo compito di chi scava è quello di stabilire la sequenza delle azioni e delle attività naturali e umane accumulate nella stratificazione entro un determinato spazio e tempo, prima singolarmente distinte e poi messe in relazione fra loro; tali relazioni sono rapporti di contiguità fra le unità che consentono di determinare la sequenza cronologica relativa. Saranno poi i reperti contenuti negli strati a permettere di passare dal tempo relativo a quello assoluto. Chiarita e periodizzata la sequenza stratigrafica (MATRIX) possono finalmente emergere gli avvenimenti. Nel suo aspetto più fisico lo scavo segue procedure valide per ogni tempo e luogo; le caratteristiche di una fossa, per cui il suo taglio negli strati precedenti è comunque precedente al suo riempimento, sono valide ovunque.

È importante per l'archeologo *individuare, descrivere e mettere in relazione gli interventi prima ancora di capirli.*

Lo scavo è una procedura lunga e faticosa, e solo la documentazione analitica delle unità stratigrafiche e la loro ricomposizione nella ricostruzione ideale possono riparare il danno della distruzione che esso inevitabilmente comporta. Sarebbe come bruciare le pagine di un libro in copia unica subito dopo la lettura.

2.1 Metodi di documentazione e acquisizione dati

La gestione della documentazione prodotta durante lo scavo sarà dunque alla base del sistema informativo, di conseguenza è fondamentale darne una classificazione accurata.

2.1.1 Lo scavo archeologico

Prima di illustrare l'architettura informatica del sistema di ausilio alla procedura di scavo è utile identificare le singole attività che vengono svolte preliminarmente e durante l'attività di scavo. Identifichiamo come *fasi preliminari* allo scavo le attività che vengono realizzate prima di iniziare le attività di scavo vero e proprio attività che chiameremo *fase operativa*. Per ciascuna delle fasi ai fini della definizione del sistema informativo viene presentata una breve descrizione dell'attività stessa, delle azioni che vengono svolte, e quale documentazione deve essere prodotta, la procedure con cui tale documentazione viene prodotta e le figura professionale coinvolte nelle (archeologo, tecnico di scavo).

2.1.2 Fasi preliminari allo scavo

Individuazione del sito

Essa consta di: ricerca bibliografica e d'archivio, ricerca topografica, ricognizione di superficie

La ricerca bibliografica

Essa consiste nel reperimento, in archivi, della bibliografia edita e/o dei documenti di epoca storica relativi al sito in questione. Per la gestione e la fruizione di dati scaturiti da tale ricerca è necessario creare un database che preveda l'archiviazione di un insieme di dati del tipo immagine e testo. La figure professionali in grado di definire le funzionalità di questo modulo sono: il Coordinatore archeologo e un tecnico informatico.

La ricognizione di superficie

Essa consiste nell'ispezione diretta nel territorio in oggetto allo scopo di accertare, tramite il riconoscimento di particolari emergenze o concentrazioni di reperti mobili, la presenza di un insediamento. . Acquisizione tramite camera digitale; Restituzione grafica (3D) Assegnazione ad ogni singolo reperto mobile di numero inventario, e conseguente registrazione tramite PC palmare. La figure professionali in grado di definire le funzionalità del modulo funzionale sono: il coordinatore archeologo e l'operatore di ripresa.

La ricerca topografica

Essa consiste nell'identificare il maggior numero possibile di insediamenti e percorsi (o unità topografiche) presenti nel territorio preso in esame e descriverli in modo adeguato, cercando di correlare tra loro le diverse unità topografiche al fine di ricostruire insiemi di siti e di percorsi per singoli periodi storici e presentando carte di paesaggi agrari o urbani ricostruiti per periodi e per territori. Necessita dell'acquisizione carte satellitari e aeree vettorializzate. La figure professionali necessarie a definire le funzionalità del modulo funzionale sono il coordinatore archeologo Tecnico informatico.

Delimitazione dell'area di scavo

I limiti presumibilmente definitivi dello scavo possono essere segnati per saggi e piccole aree da cordoni fissati a chiodi piantati nel terreno in modo da non coincidere con gli angoli dello scavo. Mano a mano che lo scavo procede occorre tagliare verticalmente le pareti di terra lungo i limiti dello scavo onde poterle rappresentare graficamente in sezione. Per questa attività si richiede una documentazione fotografica (macchina digitale, macchina Reflex) e l'inserimento (battuta) di quote del piano di campagna (stazione totale). La figura professionale coinvolta è l'archeologo.

Pulizia dell'area

Essa consta nell'asportazione dei cespugli rimozione di eventuali accumuli di materiale o di pietrame sciolto presente nell'area; asportazione dello strato humotico. Per questa attività si richiede una documentazione fotografica (macchina digitale, macchina Reflex) e registrazione (tramite PC portatile) delle informazioni derivate dalle azioni previste. La figura professionale coinvolta è l'archeologo.

Definizione unità di scavo.

Essa consta nella suddivisione in saggi. (funzionali a una migliore gestione delle attività di scavo e di documentazione. Per questa attività si richiede una documentazione fotografica (macchina digitale, macchina Reflex) e registrazione (tramite PC portatile) delle informazioni derivate dalle azioni previste. La figura professionale coinvolta è l'archeologo.

Creazione di un sistema di punti fissi

Creazione di un sistema di punti fissi utile alla realizzazione della documentazione grafica (quadrettatura etc.).serve per realizzare il sistema di riferimento per le misure orizzontali di uno scavo si deve creare una quadrettatura del sito. Si possono individuare in tal modo i punti da definire nello spazio mediante coordinate, ovvero creando un sistema di assi paralleli ai due assi principali definiti ad inizio scavo. In questo modo qualsiasi restituzione grafica risulta inserita all'interno di una maglia globale che comprende l'intera area. Si necessita del posizionamento picchetti georeferenziati (griglia punti fissi) e la restituzione grafica in scala 1: 50; Inserimento quote relative secondo procedura. La figura professionale coinvolta è l'archeologo.



Figura 1. Elaborazioni grafiche per la fase operativa dello scavo. Predisposizione della pianta generale dello scavo.

Scelta di un punto fisso fuori dell'area di scavo.

Questa attività serve per le misurazioni in verticale considerato come quota zero, in seguito si dovrà calcolare il rapporto di tale punto fisso con il livello del mare. Per misurare la quota di un punto sullo scavo basta un livello ottico in stazione e una stadia. La prima operazione consiste nel misurare l'altezza di stazione dello strumento rispetto al punto zero (si colloca il livello ottico dove meglio conviene per osservare contemporaneamente il punto di cui si deve calcolare la quota e il punto 0; successivamente si traguarda la stadia posta sul punto zero e si legge la misura corrispondente all'altezza strumentale. Si sposta quindi la stadia sul punto da quotare e si legge la nuova misura. Per stabilire il rapporto altimetrico tra i due punti si deve sottrarre dall'altezza strumentale la misura letta sul punto da quotare. Si ottengono in tal modo quote positive o negative a seconda che i punti siano collocati al di sopra o al di sotto del punto 0. Le misurazioni sono effettuate tramite l'utilizzo di una stazione totale o di un livello ottico e i dati andranno immessi mediante una macchina portatile del tipo palmare nell'apposito data base. La figura professionale coinvolta è l'archeologo.

Assegnazione di un numero di US.

Alle emergenze visibili prima dell'inizio delle operazioni di scavo (edifici, rocce affioranti, buche, cumuli di pietrame etc.) e ad ogni prodotto derivato da qualsiasi azione, sia essa naturale o artificiale, positiva o negativa, riconosciuto in fase di scavo, viene assegnato un numero arabo progressivo. Viene richiesta la: documentazione fotografica realizzata mediante macchina digitale e Reflex; l'assegnazione numeri di US e compilazione delle schede US a essi relative; elenco dei numeri di US assegnati; successiva immissione dei dati in oggetto in apposito data base mediante l'utilizzo di una macchina portatile di tipo palmare. La figura professionale coinvolta è l'archeologo.

2.2.1 Fase operativa dello scavo

Questa attività definisce la procedura per l'individuazione, definizione (con numeri), scavo delle singole porzioni di materiale coerente (muri) o incoerente (terra) che chiamiamo strati e documentazione dei tagli e delle asportazioni degli strati.

Lo scavo archeologico deve sempre procedere per strati e superfici reali e non per piano astratti e nell'ordine inverso a quello in cui si sono formati.

Le caratteristiche principali di un'unità stratigrafica sono le seguenti:

1. lo strato possiede una superficie che può essere orizzontale, inclinata o verticale;
2. la superficie di uno strato è delimitata da un contorno e possiede un rilievo che può essere rappresentato con curve di livello quotate;
3. dal rilievo della superficie di uno strato, combinato con quello degli strati sottostanti e a contatto, si ricava il suo volume;
4. ogni strato ha una sua posizione topografica entro le tre dimensioni spaziali;
5. ogni strato ha una sua posizione stratigrafica, cioè una sua posizione relativa nel tempo rispetto agli altri strati;
6. Ogni strato ha una sua cronologia assoluta, la quale viene stabilita grazie al reperto databile più tardo in esso contenuto e ad esso preferibilmente coevo;
7. Ogni reperto acquisito mediante l'asportazione dello strato diviene oggetto di un complesso e articolato procedimento (restauro e ricostruzione, lavaggio, catalogazione, inventario, disegno, ricerca bibliografica) finalizzato all'extrapolazione di una quantità di informazioni sullo strato stesso.

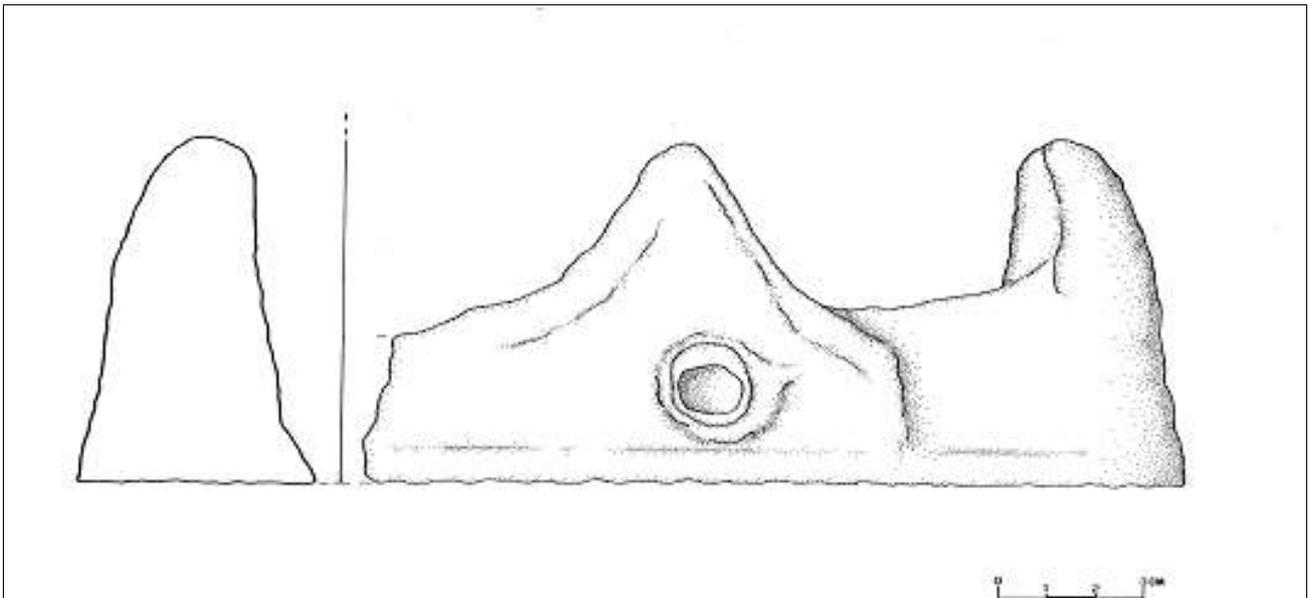


Figura 2. Esempio di documentazione grafica nell'analisi stratigrafia.

Lo svolgersi dell'attività di scavo deve essere costantemente monitorato mediante l'ausilio di una telecamera digitale che consenta di acquisire tutte le informazioni relative al contesto in oggetto. I dati andranno a confluire nel sistema informativo appositamente ideato per la gestione e la fruizione delle informazioni.

La documentazione richiesta è di tipo grafico, fotografico e cartaceo.

Documentazione Grafica.

Per effettuarla si possono usare sia la tecnica del rilievo indiretto, che si avvale di strumenti ottici, che quella del rilievo diretto, che si avvale di misurazioni con doppi decimetri e rotelle, applicando il sistema della trilaterazione. Tale sistema consiste nell'individuare la posizione di un punto nello spazio partendo dalla posizione di altri tre già individuati. Per realizzare facilmente il sistema di riferimento per le misurazioni orizzontali è indispensabile creare una quadrettatura del sito o una griglia di punti fissi, in modo tale che qualsiasi punto possa essere individuato nello spazio mediante coordinate. Tale documentazione è indispensabile sia per la conduzione e lo sviluppo dell'esplorazione, sia per documentarne i risultati. La documentazione grafica prodotta è formata da:

- **RILIEVI:** rappresentazione in pianta (piano orizzontale) secondo una scala predefinita (solitamente 1:50, 1:100 e 1:20, 1:10 per i rilievi in dettaglio);
- **PROSPETTI:** rappresentazione frontale (piano verticale) secondo una scala predefinita (solitamente 1:50, 1:100 e 1:20, 1:10 per i rilievi in dettaglio);
- **SEZIONI:** rappresentazione grafica di spaccato della stratificazione che consente di apprezzare la dimensione verticale dell'insediamento così come è venuto individuandosi mediante le operazioni di scavo.

Documentazione fotografica

Ogni US viene documentata mediante uno o più scatti, da effettuarsi possibilmente con due diverse macchine. È necessario che in ogni posa compaia una freccia indicante il nord, l'indicazione delle UUSS comprese nel campo visivo, una lavagnetta in cui siano facilmente leggibili luogo, settore e/o saggio, data, una palina metrica bicolore. Archiviazione elenchi fotografici mediante data base (PC palmare).

Documentazione cartacea

Per la registrazione delle informazioni riguardanti ogni singola unità stratigrafica (US), ci si avvale di un prestampato elaborato dal Ministero (Scheda US) che costituisce uno strumento atto a raccogliere sistematicamente i dati. È altresì necessario che giorno per giorno le attività di cantiere vengano registrate in modo sintetico, in maniera tale da fornire un resoconto del progredire del lavoro (diario di scavo). Archiviazione schede US, USM, USR, mediante utilizzo di un data base (PC portatile).

2.2.2 Studio dei reperti e la fruizione dei dati

Lo studio sistematico dei materiali mobili va sempre più diffondendosi, e con esso va affinandosi il metodo della classificazione tipologica necessario allo studio dei prodotti, specie di quelli in serie.

L'edizione dei reperti può costituire un importante momento nell'edizione di uno scavo, contribuendo essa alla storia della produzione artigianale e manifatturiera e della circolazione delle merci in un determinato luogo.

I reperti raccolti durante lo scavo vanno siglati direttamente o indirettamente sui loro contenitori, precisando lo scavo, l'anno, l'area, lo strato, in alcuni casi l'insieme e il sottoinsieme e in altri casi il numero di reperto particolare.

Il materiale deve poi essere diviso per classi, contato e registrato su schede preliminari, strato per strato, e raccolto in sacchetti contenuti a loro volta in cassette o scatoloni. In laboratorio si potrà procedere al restauro, alla classificazione finale per forme e tipi, alla quantificazione definitiva, utilizzando le tabelle dei materiali, le schede RA.

Esistono convenzioni per la documentazione grafica della ceramica e per la redazione di tabelle e istogrammi.

2.3.1 Archeologia delle strutture murarie

Al fine di descrivere il tipo di documentazione introduciamo un esempio concreto di produzione ed utilizzo di documentazione nell'archeologia delle strutture murarie.

L'analisi delle strutture murarie, altrimenti detta *lettura stratigrafica degli elevati o dell'edilizia*, nata alla fine degli anni Settanta in seguito alle osservazioni e ricognizioni sul campo dei ricercatori di diverse scuole, in particolar modo Roma, Genova, Siena, è giunta ad essere uno strumento indispensabile, indissolubilmente legato all'indagine archeologica.

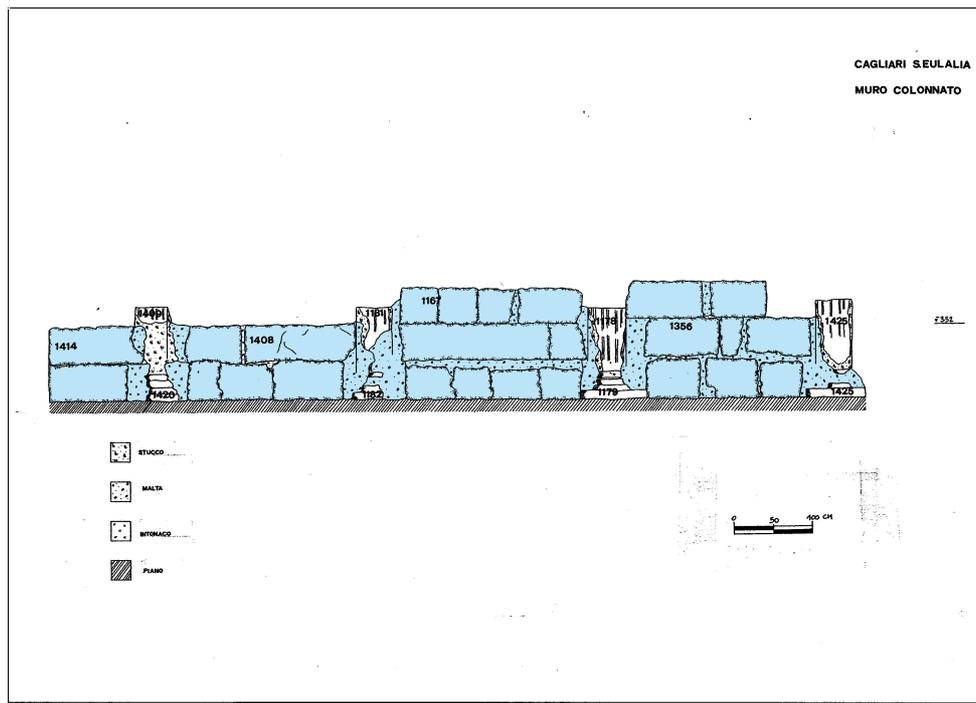


Figura 3. Unità stratigrafica muraria nell'archeologia delle strutture murarie: esempio di documentazione grafica di un prospetto murario.

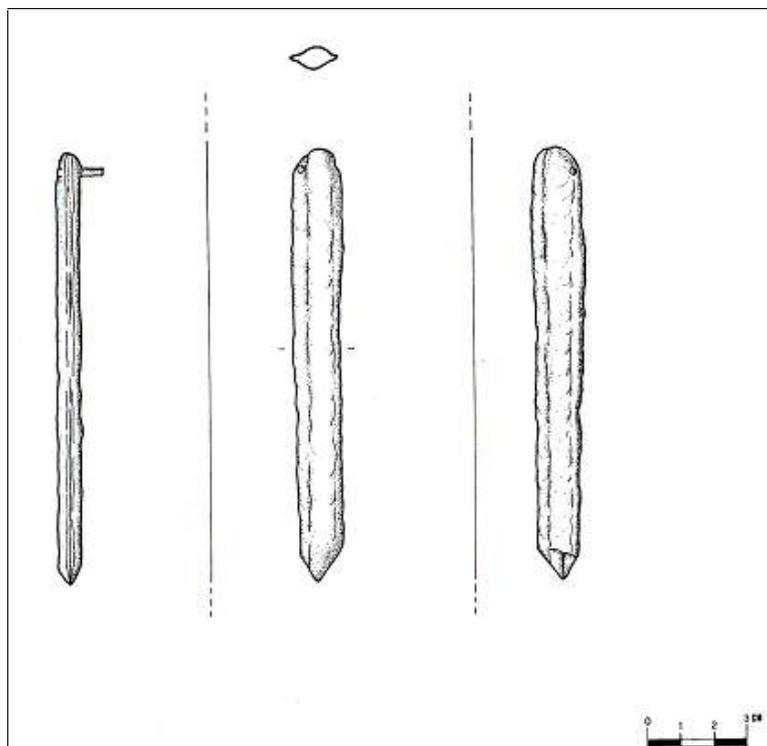


Figura 4. L'analisi stratigrafica archeologica: esempio di documentazione grafica relativa ad un reperto.

Sin dal principio le ricerche basate sull'osservazione diretta delle strutture e sulla registrazione oggettiva delle tecniche costruttive hanno avuto come scopo quello di desumere dal tipo di materiale impiegato, dalla modalità di posa in opera e dalla struttura risultante il maggior numero possibile di informazioni. Utilizzando per tale lettura strumenti tipici dell'indagine archeologica

quali l'analisi dei rapporti stratigrafici, lo studio delle tecniche costruttive, le analisi archeometriche, lo studio dei materiali, la dendrocronologia, si è riusciti a sopperire alla mancanza di fonti documentarie con la lettura "oggettiva" delle informazioni contenute nella muratura stessa.

Sulla struttura in elevato, considerata come un "deposito verticale", sono state applicate le stesse modalità di indagine proprie dello scavo quali la documentazione grafica (rilevi e prospetti particolareggiati e caratterizzati eseguiti a diretto contatto con le murature) e la registrazione delle caratteristiche oggettive tramite la compilazione di una Scheda di Unità Stratigrafica Muraria (USM), in cui sono confluiti i lemmi provenienti dalla scheda di registrazione delle Unità Stratigrafiche utilizzata nei cantieri di scavo.

Dai primi passi mossi nei cantieri, soprattutto quelli di archeologia post-classica, si è passati all'applicazione degli stessi strumenti di indagine anche sui grandi monumenti o in contesti molto estesi, applicazione che ha portato alla constatazione della perfetta applicabilità degli stessi strumenti d'analisi in manufatti edilizi e contesti totalmente diversi tra loro.

Punto di partenza imprescindibile è il riconoscimento, tramite analisi diretta, dei risultati delle varie fasi d'intervento ancora leggibili nel tessuto della muratura e il loro "isolamento", cui segue l'individuazione dei rapporti stratigrafici intercorrenti. In questo modo il manufatto viene scomposto, a seconda della scala d'intervento, in molte unità che confluiranno in un diagramma in cui siano resi graficamente i rapporti stratigrafici individuati.

Al risultato della cronologia relativa, se possibile, vengono integrati i dati desunti da altre fonti d'informazione (documenti d'archivio, epigrafi *in situ*, rapporto con gli strati orizzontali etc.), sino ad essere in grado di ricostruire la storia complessiva, sia della porzione di struttura indagata che del complesso edilizio.

La scheda di Unità Stratigrafica Muraria e la registrazione dei dati

Tale indagine, come detto, presuppone l'utilizzo di uno strumento strettamente tecnico quale è la scheda di Unità Stratigrafica Muraria, creata per accogliere la registrazione di tutti gli elementi propri della composizione tecnica della struttura muraria che distinguono i vari interventi costruttivi.

Negli ultimi decenni l'aumentare di questo tipo di analisi, conseguenza del fiorire delle indagini rivolte all'archeologia post classica, ha fatto sì che alcuni autori proponessero delle integrazioni da farsi ai lemmi delle schede, sottolineando l'importanza dei dati naturalistici oltre che tecnici.

Questo filone ha dato il via a studi inusuali ma estremamente significativi, nei quali l'accento viene posto su un'analisi maggiormente legata ai metodi e ai problemi della Storia della Cultura Materiale, quali, ad es., l'approccio all'interpretazione dei "segni" lasciati sulle pietre dagli strumenti utilizzati per la lavorazione, intesi non solo come tramite per la conoscenza degli strumenti stessi, ma anche come indici di conoscenza delle capacità tecniche acquisite, delle richieste della committenza, dalla presenza o meno delle maestranze itineranti.

3 Un prototipo di sistema GIS per la gestione dei dati di scavo

Sulla base dell'analisi illustrata nella sezione 2. è stata ipotizzata, sull'esempio di un'esperienza simile sviluppata all'Università del New Mexico [6], la possibilità di creare una piattaforma multimediale per coadiuvare l'archeologo nello scavo di siti storici e preistorici e nella conservazione dei reperti [7].

Questo strumento è una valida piattaforma su cui definire le esigenze degli utenti finali per identificare puntualmente informazioni e modalità con cui effettuare un'agevole catalogazione delle informazioni provenienti dallo scavo, aggiungendo alle peculiarità degli strumenti attualmente in uso la potenzialità dell'associazione dato immagine.

3.1 GIS Archeo

Il progetto è basato sull'uso di un GIS (Geographic Information System), cioè un ambiente per l'acquisizione, la conservazione, l'analisi e visualizzazione di dati associabili a superfici (ad esempio dati geografici o dati relativi a siti archeologici).

Caratteristica essenziale di un GIS è la capacità di gestire dati relativi ad elementi o ad oggetti di una superficie la cui posizione è definita da un insieme di coordinate.

3.1.1 Modello dei Dati

In un GIS tutti gli oggetti presenti sulla superficie considerata (per noi la stratigrafia di uno scavo archeologico) sono rappresentati mediante tre caratteristiche essenziali: la geometria, la topologia e gli attributi.

Dove gli attributi rappresentano i dati descrittivi dei singoli oggetti reali. Per esempio nel caso di un reperto archeologico come una moneta gli attributi possono ad esempio essere lo strato da cui proviene, il materiale di produzione, la datazione, l'anno di ritrovamento e il sito di ritrovamento.

3.1.2 Rappresentazione dei Dati

La rappresentazione vettoriale associa ad un punto una coppia di coordinate mentre ad una linea o un poligono le coordinate di un insieme di punti che quando connessi fra di loro con segmenti retti, formano la rappresentazione grafica dell'oggetto.

In un GIS le diverse categorie di oggetti presenti sulla superficie considerata sono distinti in diverse mappe, ogni mappa contiene quindi una diversa caratteristica (ad es. la disposizione delle monete, quella dei reperti ceramici, quella dei reperti ossei, ecc.).

3.1.3 Componenti di un GIS

Per quanto all'utente un GIS possa apparire come un unico programma di calcolo, in realtà esso è tipicamente suddiviso in un certo numero di componenti, o elementi, con funzioni diverse. Nella maggior parte dei GIS si possono comunemente individuare le seguenti componenti essenziali:

- 1) Un database spaziale e degli attributi. È costituito da un'insieme di mappe e di informazioni associate, in forma digitale. Dal momento che nel database sono contenuti oggetti, o elementi, della superficie considerata, è possibile distinguere un database spaziale che descrive la geografia (forma e posizione) degli oggetti, ed un database degli attributi,

che descrive le caratteristiche, o qualità, degli stessi oggetti. Così, ad esempio, è possibile avere il perimetro del sito definito nel database spaziale mediante le coordinate dei vertici, mentre le sue caratteristiche nel database degli attributi.

2) Un sistema di visualizzazione. Contiene le funzioni che permettono la visualizzazione di elementi del database per produrre mappe sullo schermo.

3) Un sistema di digitalizzazione. È costituito da un programma per convertire fotografie digitali in dati GIS.

4) Un sistema di analisi. Un GIS è in grado di confrontare differenti entità in base alla loro topologia. Si immagini ad esempio che di un determinato territorio siano disponibili due mappe, rappresentanti il primo la distribuzione dei reperti del III secolo a. C., il secondo la distribuzione dei reperti del I secolo a. C. Le due mappe non presentano ovviamente la stessa topologia; con un GIS è possibile individuare quelle aree in cui vi sono sovrapposizioni storiche. Questo tipo di operazione, molto usato nei GIS, è definito sovrapposizione (overlay), in quanto equivale all'operazione manuale di sovrapposizione di carte trasparenti contenenti tematismi diversi.

3.2 Definizione di un prototipo

L'analisi preliminare del progetto ha richiesto la installazione e lo studio delle funzionalità di alcuni software utili per la costruzione della piattaforma: il software GIS Grass [8], il database (MySQL [9]) che sta alla base di Grass e il software PhpMyAdmin [10] per introdurre l'ulteriore potenzialità della gestione web al database.

3.2.1 Caratteristiche di GRASS

GRASS (Geographic Resources Analysis Support System) è un sistema geografico informativo (GIS) usato per data management, image processing, produzione di grafici, modellazione spaziale e visualizzazione. È un software libero open-source rilasciato sotto licenza GNU. Originariamente creato a scopi militari (U.S. Army e ora sviluppato da un gruppo dell'Università di Waco). È uno strumento potente in un ampio range di applicazioni sia accademiche che commerciali.

GRASS è acquisibile ed utilizzabile gratuitamente ed è costituito da circa 350 moduli diversi.

GRASS funziona sotto sistema operativo Unix (o similari), sia su workstation che su personal computer ed utilizza l'interfaccia grafica X-windows.

Alla base di questo sistema sta il database MySQL.

3.2.2 Caratteristiche di MySQL

MySQL, è il più popolare SQL (Structured Query Language) database open-source. È sviluppato e distribuito da MySQLAB. MySQL è un sistema di gestione di database. Infatti, poiché un database è un insieme ordinato di dati, per aggiungere, accedere, e processare dati contenuti in esso è necessario un sistema per maneggiare le informazioni come MySQLServer.

MySQL è un sistema di management per database relazionale, cioè conserva dati in tabelle separate piuttosto che inserirli in un singola tabella.

SQL è il linguaggio più comune , esso è inoltre il linguaggio standard per l'accesso ai databases, esso è definito nello Standard ANSI/ISO. Il Database MySQL è un sistema client/server che consiste di un server multi-thread che supporta differenti richieste, differenti clients e librerie e differenti strumenti di amministrazione oltre che un'ampia gamma di API.

Il database mysql può essere amministrato e utilizzato via web con il tool PhpMyadmin

3.2.3 Caratteristiche di phpMyAdmin

Con phpMyAdmin si può controllare completamente un server MySQL così come un database singolo. Si può:

- creare e distruggere un database,
- creare, copiare, distruggere, rinominare e modificare le tabelle,
- cancellare, editare e aggiungere campi nelle singole tabelle,
- eseguire comandi SQL
- maneggiare le chiavi all'interno dei campi
- creare tabelle leggendo file esterni
- esportare dati nei formati CSV, XML e Latex
- amministrare più di un server
- utilizzare utenti e privilegi di MySQL
- usare queries complesse
- fare una ricerca globale nel database oppure in una sua parte

3.2.4. Integrazione dei sistemi

I tre software di cui abbiamo discusso le caratteristiche nelle sezioni precedenti (Grass, MySQL e phpMyAdmin) presentano buone potenzialità per la realizzazione della piattaforma di nostro interesse, essi inoltre hanno in comune una caratteristica importante, che è alla base della filosofia scelta nel progetto LAPS, di essere free-licence e Open Source.

I tre software (ed il software apache, necessario per le applicazioni Web) sono stati installati nei computer del Laboratorio LAPS sotto Linux-Slackware. È stata verificata la reciproca compatibilità tra i tre software. Sono state analizzate le caratteristiche base di ciascun sistema in una applicazione vicina a quella in esame.

4 Architettura sistema ausilio informativo per l'analisi stratigrafica archeologica

Nella sezione 2 abbiamo analizzato le fasi in cui avviene la produzione di documentazione in uno scavo archeologico mentre nella 3 abbiamo mostrato un esempio concreto su come sia possibile utilizzando pacchetti applicativi open-source disponibili in rete creare un prototipo di sistema per la gestione di dati di interesse archeologico. Sulla base di questi risultati e sulla base dell'analisi effettuata in [7], questa sezione presenta le specifiche di un'architettura di sistema atto a ottimizzare le fasi dell'analisi stratigrafica archeologica.

È fondamentale che l'archeologo partecipi alla fase di definizione dell'architettura di sistema insieme al team di informatici, che l'archeologo di disegni scenari che permettano di valutare a priori in che modo e con quale resa il sistema informatico possa riuscire a coadiuvare effettivamente l'esperto nello scavo di un sito. In questo contesto occorre valutare anche se, e in che misura, l'ambiente informatico favorisce un migliore approccio per l'archeologo alla fase di sintesi e studio delle informazioni ricavate dal sito stesso. Ovviamente la risposta finale a queste domande sarà possibile quando i singoli moduli, definiti organicamente nell'architettura qui proposta, saranno sviluppati e validati. Sarà quindi l'utente finale, cioè l'archeologo ed il fruitore, a verificare le potenzialità di utilizzo del sistema sul campo e nei contesti quali la didattica e la fruizione di dati di carattere archeologico.

4.1 Definizione delle specifiche

L'architettura viene costruita attorno alle specifiche definite dall'utente. Questa attività consta dapprima nell'individuazione dei requisiti da parte dagli utenti "naturali" del sistema, ovvero gli archeologi, e successivamente nell'affinamento delle specifiche prendendo in considerazione le aspettative di utenti che fruiranno del software. Gli utenti a cui il sistema si rivolge possono essere così classificati:

- archeologi esperti e gestori di scavi;
- specializzandi in archeologia;
- studente di archeologia;
- utenti fruitori di contenuti archeologici.

Le precedenti figure di utenza individuano due tipi di requisiti tecnici nella definizione dell'architettura:

1. *requisiti dell'utente-tecnico*: sono quelli che il sistema deve soddisfare perché siano applicabili con profitto in ambito della ricerca e didattica dell'archeologia. In questa fase vengono analizzati i requisiti del sistema di acquisizione e del software di interazione, e ne vengono definite le specifiche funzionali e tecniche.
2. *requisiti dell'utente fruitore*: sono quelli (in termini di funzionalità e di implementazione) che il software di interazione deve soddisfare perché sia funzionale per un utente fruitore.

Sulla base di questo tipo di specifiche tecniche si può disegnare un'architettura di sistema che sarà discussa nella prossima sezione.

4.2 Architettura di sistema

La Figura 5 illustra un possibile scenario dello scavo. È possibile costruire il sistema attorno ad un computer centrale identificato con **E** nella Figura 5 (chiamato di seguito Server e costituito da un

PC da scrivania con prestazioni adeguate se il sito è fornito di linea elettrica o di generatore di elettricità portatile o di un portatile dell'ultima generazione dotato, eventualmente, di batteria supplementare per aumentarne il tempo di utilizzo in caso contrario) locato nel sito di scavo. Su questo server è installato il programma di ausilio per l'indagine stratigrafica qui proposto. Questo computer svolge la funzione del server intranet dello scavo e deve avere caratteristiche tali da rispettare le sollecitazioni d'uso in ambiente polveroso ed umido. È da privilegiare quindi la scelta di un PC (desktop o portatile) di tipo industriale. Il server offre una serie di servizi (di carattere archeologico specificati nel seguito) ad un certo numero di computer clienti (chiamati di seguito client) costituiti da computer portatili (o computer palmari) assegnati allo staff di scavo (indicati con **D** in Figura 5). I client sono connessi al server centrale attraverso una rete locale LAN (Local Area Network) o via cavo che senza cavo (wireless) indicati con i sistemi (**A**, **B** e **C** in Figura 5). I client palmari sono adatti ad essere usati nelle fasi preliminari (vedi sezione 2.2.1) e esecutive (vedi sezione 2.2.2) sul sito di scavo (sicuramente sono meno fragili dei PC portatili). I client saranno dotati di camere-digitali e di sistemi di misurazione automatica della posizione ottica o ultrasuoni come illustrato in Figura 5 (i sistemi A, B e C). L'attrezzatura completa componente il sistema (il server, i client, i sistemi di trasmissione) saranno trasportabili e dotati di opportune custodie. Tutta l'attrezzatura dovrà essere realizzata in modo tale da poter essere montata e smontata in modo veloce (secondo procedure di coregistrazione sui punti di riferimento interno o esterni allo scavo) all'inizio e fine della giornata di lavoro presso il sito di scavo e trasportabile con macchine utilitarie (es. Panda 4x4). Per quanto attiene il dispositivo di acquisizione delle geometrie del sito, la procedura di montaggio dipende dalle caratteristiche morfologiche dell'area di scavo e vengono definite nella fase preliminare dello scavo con il supporto di un programma di taratura del dispositivo (fonti laser a bassa intensità e camera digitale per puntare punti fissi dentro e fuori l'area di scavo).

Come abbiamo visto in sezione 2.2.2, l'indagine archeologica richiede tipicamente una documentazione formata da tre componenti base: a) una sezione grafica (rilievi, prospetti, sezioni), b) una sezione fotografica (fotografie), c) una sezione cartacea (schede cartacee della stratigrafia, delle murature, a cui sono allegate altre schede dei singoli oggetti ritrovati) oltre che un diario giornaliero dello scavo.

Per supportare questo tipo di informazioni attraverso una gestione informatizzata dell'indagine archeologica, il sistema deve supportare le seguenti entità:

1. un gestore di entità geometriche 2D/3D (modellatore geometrico);
2. un gestore di dati ipertestuali (gestore base dati archeologia);
3. un gestore di immagini digitali (sistema di archiviazione e comunicazione di immagini);
4. un modulo per la generazione formato di stampa per la replica fisica dei modelli 3D;
5. un modulo di interfaccia software con dispositivo di ricostruzione geometrie;
6. un modulo interfaccia grafica utente ipertestuale 2D;
7. un modulo visualizzazione geometrie 3D utilizzabile dai client con maggiore potenza di calcolo (portatile, PC);

Il modulo descritto al punto 6 ed il modulo descritto al punto 7 sono disponibili nei computer client.

L'architettura del sistema qui proposto si organizza attorno ai seguenti tre librerie software:

1. *un modellatore geometrico;*
2. *un gestore della base dati;*
3. *un gestore di immagini.*

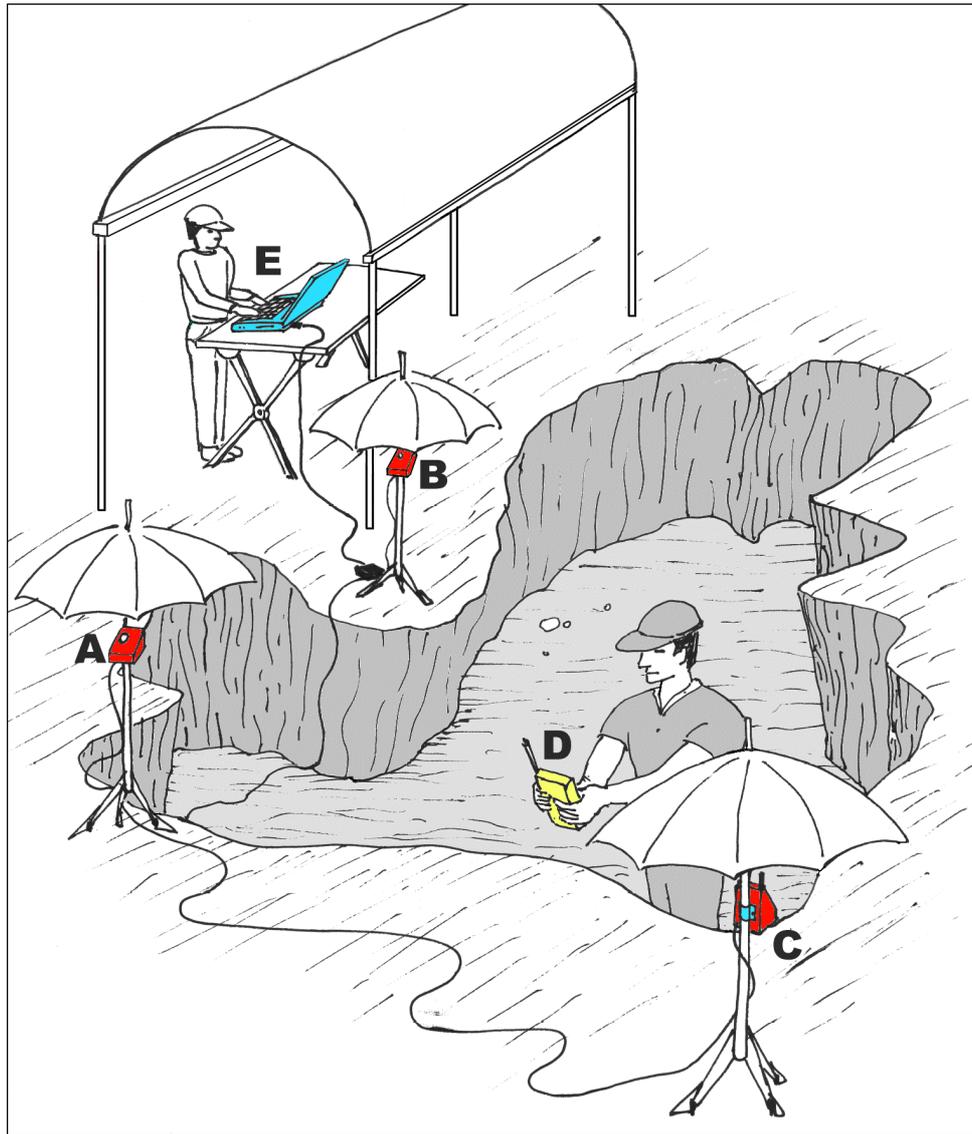


Figura 5. Scenario dello scavo. La rete di comunicazione è installata secondo i punti di riferimento georeferenziati come definito nei documenti fase preliminare e fase esecutiva dello scavo). Lo staff di scavo può interagire in maniera efficace e sicura (dal punto di vista dei rischi di incidente) con il sistema che sfrutta in maniera importante i vantaggi della comunicazione digitale (immagini, dati geo-referenziati, etc) della rete wireless .

Queste tre componenti, che costituiscono il cuore del sistema, sono strettamente connesse. Esse devono essere progettate per supportare le varie fasi che si susseguono durante l'indagine archeologica viste in sezione 2. I tre moduli devono immagazzinare e gestire tutte le entità rilevanti dal punto di vista archeologico immesse nel sistema. Tali entità costituiscono i mattoni su cui tutto il sistema informativo è costruito. A tali entità sono infatti associate tutte le informazioni che l'operatore introduce nella base di dati.

In particolare devono essere messe in relazione tra loro:

- (a) le geometrie tridimensionali fornite dal software di ricostruzione di immagini sviluppato;
- (b) le informazioni che permettano di effettuare la coregistrazione delle immagini (o porzioni di immagini ottenute dalla segmentazione) acquisite da fotocamera digitale;
- (c) dati testo che descrivono le entità nel contesto archeologico scelto, etc.

Come abbiamo visto nella sezione 3 nella creazione di un prototipo per l'ausilio ai dati archeologici creati con Grass [8], mysql [9] e phpmyadmin [10] questi tre moduli software devono essere progettati in maniera da creare relazioni tra le diverse tabelle delle rispettive basi di dati (testuali, immagini, geometrie) per incrociare i dati provenienti da contesti diversi .

Il modellatore geometrico è interfacciato direttamente con il sistema di acquisizione 3D (come evidenziato nella ricostruzione virtuale dei reperti attraverso la scansione della loro superficie dettagliata in [7]) attraverso il modulo *gestore di immagini*: le immagini acquisite dalla telecamera e rielaborate con il software di visualizzazione saranno opportunamente collocate nel modulo di modellazione geometrica. Un ulteriore interfaccia software deve essere creata per il modulo di segmentazione immagini e di stampa 3D con la tecnologia di prototipazione rapida.

Infine deve essere supportata un'interfaccia grafica utente che permette di usare facilmente le funzionalità del sistema. Deve essere analizzato e sviluppato un sistema di visualizzazione che permette di sfruttare le potenzialità delle mappe tridimensionali (vedere sezione 2.1) e l'integrazione degli oggetti segmentati (vedere sezione 3.9). Il software di interazione (descritto in sezione 4.5) prevede l'utilizzo di un modulo di manipolazione degli oggetti tridimensionali. Il visualizzatore (sezione 4.6), che è una parte rilevante dell'interfaccia grafica applicativa, permetterà all'utente di navigare nello spazio virtuale 3D che rappresenta il saggio di scavo, applicargli piani di sezione, visualizzare i reperti all'interno dello spazio virtuale e selezionarli.

Il modulo che verrà sviluppato all'interno del progetto dovrà soddisfare le specifiche definite nella sezione 4.1.

4.3 Modellatore Geometrico Archeo

Il sottosistema di modellazione geometrica, è costruito utilizzando la libreria OpenCascade [12] (installato tra le librerie Open Source disponibili sui computer del Laboratorio LAPS) della Matra DataVision, il quale può rispondere a tutte le richieste di carattere geometrico e topologico necessarie al sistema ed ha le basi per risolvere i problemi complessi di carattere geometrico/topologico tra le entità presenti nella base dati. La tipologia delle richieste che possono essere richieste a questo sottosistema è descritta dal seguente problema: identificare nella base dati tutti i reperti **R_x** che distano meno di un metro da un punto cartesiano dato (x, y, z) dato. Questo sottosistema deve:

1. l'identificazione ed implementazione dello schema di rappresentazione geometrico (strutture dati ed algoritmi) adeguato a rispondere alle esigenze definite sopra;
2. l'individuazione delle relazioni fra entità geometriche, entità immagini e entità alfanumeriche presenti nel sistema base dati;

4.4 Database Archeo

Il sottosistema gestore della base dati è costruito utilizzando i software MySQL [9] e PHPMYADMIN [10] installati nel Laboratorio LAPS (vedi sezione 3.1) e gestisce l'inserimento, la ricerca e la modifica dell'insieme delle informazioni alfanumeriche (esempio descrizioni relative a unità stratigrafiche) e le immagini digitali e le relazioni tra le varie entità presenti nella base dati. Esso sarà in grado di rispondere a domande del seguente tipo: identificare tutti i reperti di metallo trovati nelle unità stratigrafiche US2 e US5.

Scopo di questo obiettivo realizzativo sarà:

1. l'individuazione delle tabelle formanti il database secondo le specifiche fornite;
2. l'individuazione delle relazioni fra le tabelle;
3. la realizzazione del database.

4.5 Database-Immagine Archeo

Il sottosistema gestore della immagine sarà basato sulla libreria PGN [14] con un'architettura simile a quella utilizzata dal server di immagini mediche DICOM3 [13] secondo le modalità di interazione immagine raster utilizzate da GRASS [8]. Esso gestirà l'inserimento, la ricerca e la modifica dell'insieme delle immagini e dei risultati ottenuti dalle procedure di segmentazione guidate dall'utente. Un possibile utilizzo è, per esempio, l'identificazione e l'estrazione di dati numerici quali lunghezze e aree relative a regioni di colore diverso nell'immagine appartenenti all'unità stratigrafica, la loro identificazione come chiave di ricerca della US, la coreferenziazione nel sottosistema base dati di tipo testuali (sezione 4.4). Il gestore delle immagini è indipendente dal sottosistema che gestisce il data base testo per motivi di efficienza nella memorizzazione e nella velocità degli algoritmi di ricerca. Il sottosistema immagine renderà disponibili servizi per rispondere a domande del tipo: identificare tutti le immagini che contengono reperti di metallo trovati nelle unità stratigrafiche US2 e US5.

In questa sottosistema devono essere analizzati:

1. la definizione del formato di memorizzazione delle immagini (tra quelli offerti da PGN);
2. la definizione dei formati di scambio di immagini (proposti tra i convertitori PGN);

4.6 Interfaccia sistema-dispositivi di I/O

Nell'architettura generale del sistema è previsto un insieme di moduli software costituiti da una serie di librerie che si occupano di interfacciare i sottosistemi base tra loro (modellatore geometrico descritto nella sezione 4.3, gestore di base dati descritto nella sezione 4.4, e sistema archiviazione immagine descritto nella sezione 4.5) e con gli altri moduli funzionali del sistema (interfaccia grafica utente descritto nella sezione 4.7, modulo di navigazione dati archeo descritto in sezione 4.8) e con i dispositivi di input/output. I dispositivi di I/O che verranno supportati dal sistema sono sia quelli supportati nativamente dal sistema operativo Linux (stampanti, modem, mouse, tastiera, audio) sia sistemi specialistici quali dispositivi di acquisizione immagine e video (macchine fotografiche digitali), sia sistemi per la rilevazione della posizione (sensore GPS, sensori di posizionamento ad ultrasuoni), sia sistemi di ricostruzione di geometrie da immagine (dispositivo AILUN [11]), sia dispositivi di stampa per modelli 3D tramite tecnica di prototipazione rapida.

4.7 Interfaccia utente-sistema grafica

Il modulo di interfaccia grafica utente traduce i comandi dell'utente, identificati con mouse e tastiera nel caso di un utente del sistema (archeologo esperto e fruitore), in istruzioni adatte ad essere eseguite dalle componenti centrali del sistema, dal gestore della base dati, dal modellatore geometrico, dal sistema di archiviazione immagine per poi presentarli nel formato grafico più opportuno (testuali, grafico). Il sistema si presenta verso l'utente con le tipiche modalità di interazione di un sistema geografico informativo (attraverso mappe visuali georeferenziate) viste nella sezione 3.1. Esso sarà implementato utilizzando la libreria Qt [15] e la libreria grafica OpenGL [16] installate tra i tool del Laboratorio LAPS.

4.8 Visualizzazione 3D del sito

Scopo di questo modulo è la creazione di un visualizzatore grafico interattivo 3D per la navigazione all'interno del sito archeologico. Esso sarà basato sull'uso della libreria grafica Open Source OpenGL [16] installata tra i software del Laboratorio. Il sistema di navigazione è integrato al database di immagine descritto in sezione 4.5 al modellatore geometrico illustrato in sezione 4.3 e al

database Archeo descritto in sezione 4.4. Le funzionalità principali previste in questo modulo sono le seguenti:

1. la progettazione della navigazione 3D secondo le specifiche identificate nella sezione 1.1 per gli utenti finali;
2. la definizione delle relazioni con il database Archeo, con il sottosistema Immagini e con il sottosistema modellazione;
3. l'implementazione di funzionalità quali creazioni di sezioni e di prospetti.

4.9 Acquisizione 3D del sito

Lo scopo di questo modulo è fornire la ricostruzione 3D del saggio di interesse. Il dispositivo di acquisizione deve essere integrato alle altre componenti del sistema descritte nelle sezioni precedenti. Il modulo di ricostruzione deve essere in grado di acquisire le necessarie informazioni sulla struttura tridimensionale del sito di interesse dalle immagini 2D. Queste informazioni, sia 2D che 3D, saranno poi inserite nel modellatore geometrico (sezione 4.3), e nel server di immagini descritta in sezione 4.5.

Tra i dispositivi in grado di risolvere questo problema il Laboratorio LAPS ha testato il sistema dell'AILUN [11]. Questo sistema di acquisizione 3D si basa sul principio della ricostruzione della forma tridimensionale dell'oggetto mediante la proiezione di un sistema di frange

Per l'applicazione in esame è necessario aggiornare tale dispositivo per adattarlo alla ricostruzione della forma di una regione di terreno quale quella di un saggio in uno scavo archeologico della dimensione di qualche metro quadrato (1.5m x 2.5m). Fra gli adattamenti principali richiesti per l'applicazione in esame citiamo:

1. la variazione della distanza di ripresa in funzione del nuovo contesto applicativo;
2. la gestione di più acquisizioni tridimensionali;
3. il sistema di trasporto e collocazione del dispositivo per riprendere il sito nelle sue varie parti.

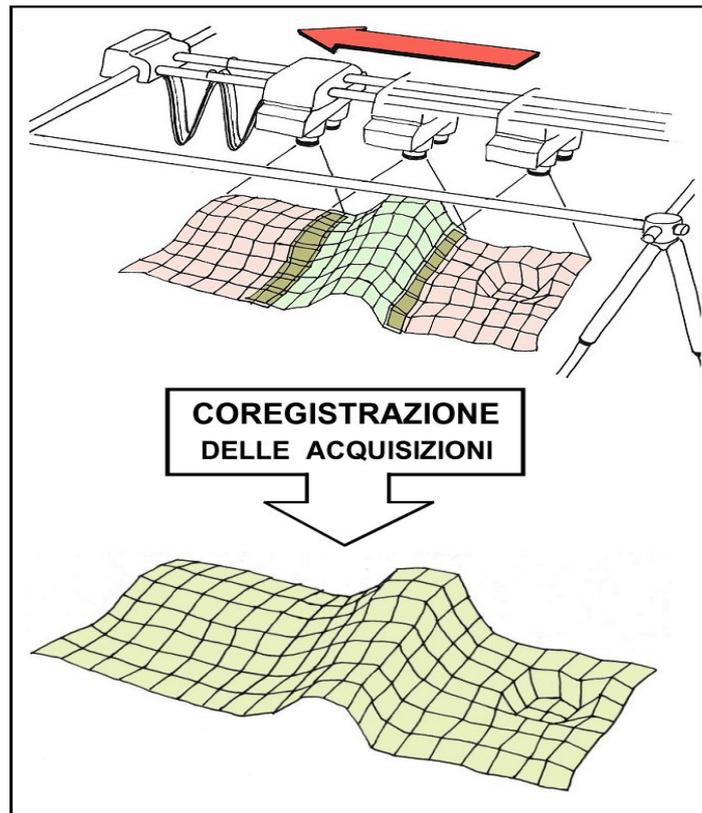


Figura 6. Apparato di visione per ricostruzione geometrie dei saggi. L'apparato di acquisizione AILUN, viene supportato da una meccanica che ne consente una maggiore flessibilità d'uso permettendo l'acquisizione della sequenza di acquisizioni del sito

Il risultato di questa attività è un sistema hardware/software ed una serie di rapporti tecnici sull'utilizzo dello strumento di acquisizione e sulle fasi di scavo di saggi.

Relativamente alle specifiche di utilizzo da parte dello staff di scavo occorrerà adeguare :

1. la costruzione/reingegnerizzazione dello strumento dedicato;
2. la calibratura dello strumento su struttura di supporto;

Dal punto di vista dell'inserimento del dispositivo con gli altri moduli dell'architettura proposta occorre :

1. convertire il formato di memorizzazione e scambio delle acquisizioni con quelle offerte dal server immagini (vedi sezione 4.5);
2. realizzare il modulo per l'integrazione delle diverse acquisizioni;
3. realizzare il modulo per la visualizzazione delle diverse acquisizioni.

Il dispositivo di acquisizione deve poter essere agevolmente trasportato ed assemblato per essere utilizzato in situ per la ripresa delle fasi di scavo.

A questo fine deve essere progettata e realizzata una struttura di supporto del dispositivo di ricostruzione che permetta di muovere il dispositivo stesso in senso orizzontale su due assi, su un rettangolo di lavoro di dimensioni indicative di 1.5 x 2.5 metri quadrati, con direzione di ripresa verticale. La struttura sarà costituita da tubi metallici e sarà sostenuta da cavalletti di altezza variabile in modo da poter essere collocata in posizione perfettamente orizzontale anche su siti dalla morfologia particolarmente irregolare. Il sistema di acquisizione, che avrà l'obiettivo puntato nella direzione verticale, potrà scorrere lungo delle guide parallele a due lati del rettangolo di lavoro, le

quali potranno a loro volta scorrere utilizzando come guide gli altri due lati (Figura 6). In una prima versione della struttura, che servirà a testare la qualità delle acquisizioni ottenute e le dimensioni del rettangolo di lavoro, il dispositivo potrà essere spostato manualmente e le guide saranno graduate in modo che per ogni acquisizione si conosca la posizione relativa dell'asse di ripresa rispetto ad un'origine fissata su uno dei quattro vertici del rettangolo di lavoro, da qui in poi chiamato *dominio*. In versioni successive si può pensare ad un sistema di controllo della posizione dello strumento tramite motore passo-passo controllato dal software di sistema. La tecnica con cui si acquisiranno le geometrie 3D è la seguente: lo strumento

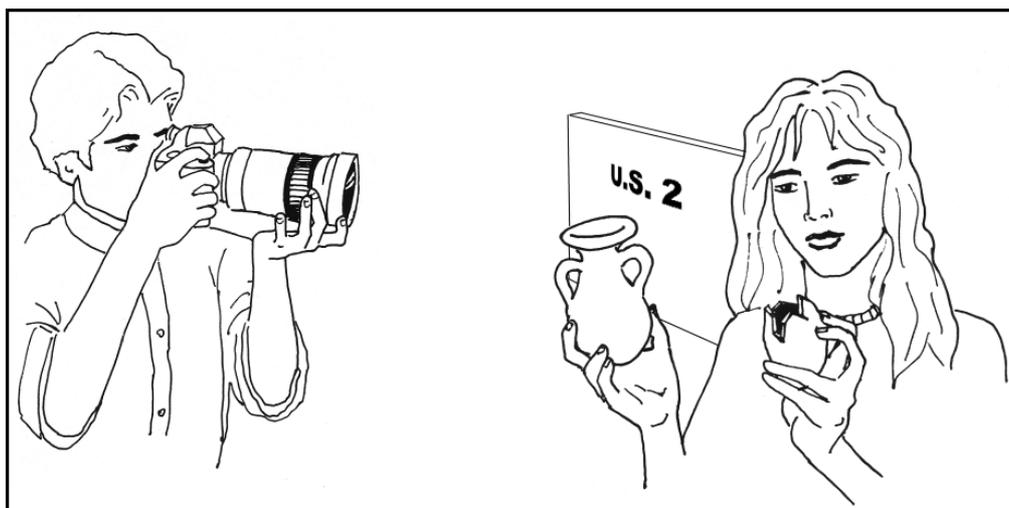


Figura 7 . Acquisizioni con apparecchi digitali e tradizionali di reperti e porzioni del saggio.

di acquisizione (da qui in avanti chiamato *strumento*) si trova inizialmente posizionato su uno dei quattro vertici del dominio, che è l'origine di un sistema di riferimento cartesiano xy . Da tale posizione esso effettua l'acquisizione 3D dell'area del saggio sottostante, quindi viene spostato lungo un asse, diciamo l'asse y di una distanza d_1 fissata, ed effettua una seconda acquisizione con una *parziale sovrapposizione alla prima*. In tal modo le acquisizioni proseguono, ciascuna parzialmente sovrapposta alla precedente, fino a quando l'intera lunghezza disponibile dell'asse viene percorsa. A quel punto si è acquisita una *riga* di fotogrammi tridimensionali. Lo strumento si sposta allora di una distanza d_2 nella direzione dell'asse y ed acquisisce una seconda riga di fotogrammi, affiancata alla precedente e parzialmente sovrapposta ad essa. Il processo va avanti fino a quando l'intero dominio viene percorso ed acquisito, come schematizzato nella Figura 6. La matrice di fotogrammi viene quindi trattata con il software di coregistrazione (vedasi sezione 3.3).

4.10 Coregistrazione immagini-geometrie-dati

La possibilità di correlare delle fotografie digitali (immagini bidimensionali) significative alla mappa tridimensionale è usata in diverse applicazioni della medicina (radio-terapia) nella terapia guidata dalle immagini. Essa risolve il problema di lavorare con due rappresentazioni grafiche differenti (le immagini e le geometrie) che devono essere sovrapposte in maniera coerente per poter mettere in evidenza, e quindi misurare con strumenti automatici (es. moduli di segmentazione di immagini descritti in sezione 4.11) particolari zone dello scavo o punti di ritrovamento di reperti.

Questo modulo mette a disposizione le tecniche che permettono di costruire la mappa geometrica tridimensionale complessiva correlando tra loro i dati delle acquisizioni 2D (fotografie digitali, vedi Figura 7) dai vari punti di ripresa e la geometrie 3D (acquisite dal sistema di ricostruzione).

L'obiettivo finale del modulo di corregistrazione è ottenere una unica rappresentazione vettoriale, costituita da immagini 2D e da modelli geometrici 3D, con cui è possibile identificare, anche in tempi differenti, tramite ad esempio variazioni di colori nelle foto i reperti per poterli poi catalogare (con l'opportuna sigla) nel database georeferenziato (vedi sezioni 4.2, 4.3 e 4.4).

Il primo problema è ricostruire la matrice di fotogrammi ripresa dal sistema di acquisizione che deve essere unificata in un singolo fotogramma delle dimensioni del rettangolo di lavoro. A questo fine, si deve procedere alla scrittura di un algoritmo che "cuca" le zone sovrapposte riconoscendo le parti delle nuvole di punti sufficientemente combacianti (vedi Figura 6).

La correlazione tra immagini riprese da camere digitali da posizione internamente allo scavo e la geometria del sito ricostruito dal dispositivo di acquisizione è di natura differente. I dati da correlare sono infatti di tipo diverso (prima erano entrambi immagini 2D), in quanto si tratta di inserire le coordinate di punti notevoli del saggio, determinati dall'archeologo e riconoscibili automaticamente, nella mappa tridimensionale descritta in precedenza (vedi sezione 2.2 sulle Fasi dello scavo). È necessario quindi che ci sia una corrispondenza precisa tra il riferimento utilizzato dall'archeologo nell'indagine del saggio (e ripreso da una macchina fotografica digitale) e il riferimento del sistema di acquisizione. Il lavoro da svolgere in questa attività riguarda la messa a punto di un algoritmo che metta in relazione i due sistemi di riferimento. L'implementazione di tale algoritmo potrà essere effettuata solo dopo lo studio dettagliato della procedura con cui l'archeologo tipicamente crea e usa i propri sistemi di riferimento definiti secondo protocolli ben stabiliti e di uso generale. I moduli software prodotti in questa fase serviranno a correlare in maniera automatica i due sistemi di riferimento: quello utilizzato dagli archeologi durante lo scavo e quello georeferenziato del sistema. Ovvero il sistema dovrà permettere all'archeologo di immettere le coordinate del reperto (o relative a qualsiasi altro tipo di informazione georeferenziabile) nel proprio sistema di riferimento (quello in cui l'archeologo è abituato a lavorare) e il software collocherà tali punti notevoli nella mappa 3D georeferenziata. Si può anche ipotizzare una differenziazione di punti notevoli secondo tipologie determinate da esigenze di carattere prettamente legato alla disciplina specifica (archeologia).

4.11 Segmentazione immagini Archeo

Il modulo di segmentazione di immagini è un importante strumento di analisi per le indagini stratigrafiche sia durante la fase esecutiva (sezione 2.2) dello scavo che a posteriori. Nel nostra architettura di sistema, insieme ai moduli messi a disposizione da GRASS [8], questo modulo è basato sul software PV, sviluppato originariamente dai Laboratori HP, che nel progetto LAPS è stato adattato per applicazioni bio-medicali [19].



Figura 8. Sito di Sant'Eulalia. L'immagine del sito, acquisita con una macchina digitale, mostra una struttura metallica che il software di segmentazione deve eliminare.

Questo strumento è utilissimo anche nel contesto dei beni culturali. Per le potenzialità di PV nell'ambito dell'analisi stratigrafica archeologica, la Figura 9 mostra un'immagine fotografica del sito di Sant'Eulalia a fine scavo. Supponendo che essa faccia parte del nostro archivio georeferenziato di immagini e che quindi tutti i protocolli di acquisizione dati descritte nelle sezioni precedenti (sezioni 4.9 e 4.10) siano state correttamente effettuate. Supponiamo inoltre che l'Unità Stratigrafica di nostro interesse sia costituita dalla muratura (a sinistra nella foto). Supponiamo infine che per i nostri studi ci interessi associare informazioni aggiuntive sulla US quale colore, posizione relativa nello scavo, etc. Un primo problema è come eliminare le parti dell'immagine che non appartengono alla US, come, ad esempio, la struttura metallica (in verde) necessaria per la fruizione al pubblico dello scavo.

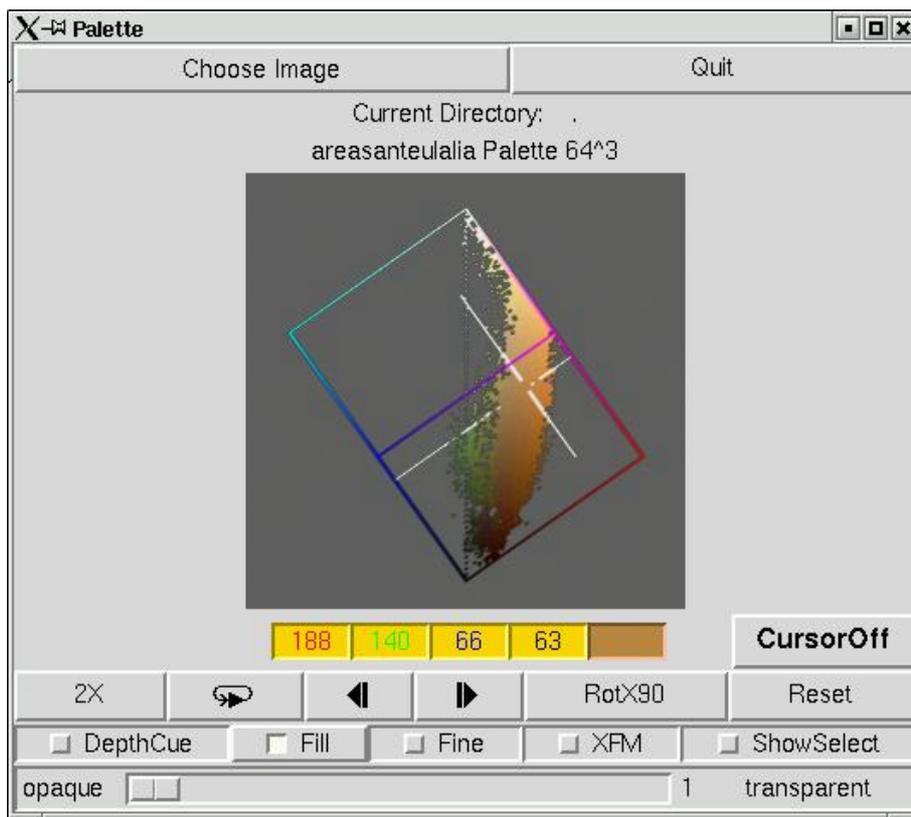


Figura 9. Istogramma dell'immagine sito Sant'Eulalia con il software PV.

Sulla base dell'immagine originale e dell'istogramma a colori (Figura 9), mediante semplici interazioni con il mouse sull'interfaccia grafica utente del programma PV, l'utente archeologo è in grado di identificare tutti i pixel (segmentare l'immagine) della struttura muraria originale. In Figura 10 tutti gli elementi appartenenti alla struttura originale sono stati identificati e presentati in tonalità blu. Questo risultato può essere già archiviato nella base di dati come ulteriore elemento di informazioni associato alla US (questa operazione è consentita solo all'archeologo capo). Questa immagine, come avviene in un buon strumento GIS (vedi sezione 3), può quindi essere recuperata dal database per essere ulteriormente elaborata, per esempio, per calcolare l'area di particolari pietre (ad esempio, le pietre della seconda fila a partire dall'angolo in alto a sinistra). Questa operazione può essere eseguita estraendo dall'immagine la regione di interesse (Figura 11A) e applicando una nuova procedura di segmentazione con PV. Il risultato è mostrato in Figura 11B, in cui i pixel che appartengono alle pietre di interesse sono stati identificate. Poiché ad ogni pixel corrisponde una dimensione fisica nello spazio (ricordiamo che ciascuna immagine contiene i punti di riferimento che ci consentono di ricavare i parametri di proiezione definiti in sezione 4.10) per fare il calcolo dell'area delle pietre occorre semplicemente contare al computer i pixel evidenziati.



Figura 10. Le strutture originali sono state segmentate. Su queste strutture si possono ora eseguire delle indagini di carattere quantitativo (esempio calcolo dell'area).

4.12 Stampa 3D

Questo modulo si occupa dell'estrazione delle informazioni geometriche dal database (sezione 4.3) e della produzione fisica mediante tecnica Prototipazione Rapida (PR) [19] e [20]. In [7] abbiamo illustrato alcuni utilizzi delle tecniche di PR nel settore dei beni culturali inerenti la possibilità di realizzare repliche di manufatti di interesse culturale. Nell'ambito dell'analisi stratigrafica archeologica una grande opportunità è offerta dalla stampa delle acquisizioni dei saggi ottenute con i dispositivi di visione descritti in sezione 4.9. Le modalità con cui è possibile realizzare la stampa di queste geometrie sono descritte in [21] e [22]. Le geometrie memorizzate nel sottosistema di modellazione geometrica (superfici) possono essere convertite in entità stampabili con il dispositivo di prototipazione secondo le modalità descritte in [22].



Figura 11A



Figura 11B

Dettaglio della parete. Considerando la muratura come unità stratigrafica da studiare, segmentando ulteriormente con PV è possibile ottenere informazioni quantitative relative all'unità stratigrafica muraria in oggetto.

5. Conclusioni Sviluppi Futuri

L'architettura proposta è una soluzione per la realizzazione di un sistema informativo avanzato per l'analisi stratigrafica archeologica. Essa sfrutta le tecnologie della telematica a basso costo del mercato consumer, assieme con gli strumenti open-source, messi a disposizione dalla rivoluzione legata al fenomeno Linux.

Questa architettura, definita in stretta collaborazione tra gli archeologi ed i ricercatori del CRS4, prende in considerazione le varie fasi che determinano la definizione di una base dati georeferenziata per il trattamento di dati relativi all'analisi stratigrafica archeologica. La definizione del protocollo automatizzato con cui le informazioni vengono prodotte dagli operatori coinvolti in tutte le fasi di scavo è un primo risultato della ricerca qui presentata.

I diversi moduli di software open-source per la modellazione geometrica e la prototipazione fisica (OpenCascade), le librerie per la gestione basi dati (MYSQL, PHPMYADMIN), le librerie di gestione immagini digitali (PGN), i tool di sviluppo per l'interazione grafica con l'utente (QT), gli strumenti di visualizzazione grafica 2D/3D (OpenGL) e gli strumenti per la segmentazione immagini a colori (PV), che costituiscono l'infrastruttura del Progetto Laboratorio Avanzato per la Progettazione e la Simulazione al Calcolatore, sono organizzati in una architettura a basso costo, in grado di gestire tutte le fasi relative all'analisi stratigrafica archeologica.

L'implementazione di questa architettura non è compatibile con le risorse messe a disposizione dal progetto ed è lasciata come attività futura.

BIBLIOGRAFIA

- [1-A] Carandini, Settefinestre. *“Una villa schiavistica nell’Etruria romana”*, Modena 1981
- [1-B] A. Carandini, *“Storie dalla terra. Manuale di scavo archeologico”*, Roma 1991
- [1-C] J. Backer, *“Tecniche di scavo archeologico”*, 1977
- [2] G.P. Crogiolo, S. Gelichi, *“La città nell’alto medioevo italiano”*, Roma Bari 1998.
- [3] R. Martorelli D. Mureddu, *“Le radici di Marina. Dallo scavo archeologico di S. Eulalia un progetto di ricerca, formazione e valorizzazione”*. Atti del seminario (Cagliari, teatro di S. Eulalia 27 marzo 2000), Cagliari 2002.
- [4] D. Mureddu, R. Martorelli, F. Carrada, S. Sangiorgi, F. Pinna, S. Scattu, A.L. Sanna, M.G. Arru, C. Cossu, *“Scavi sotto la chiesa di S. Eulalia a Cagliari”*. Notizie preliminari, Amed 2003, XXIX, pp. 285-342.
- [5] D. Mureddu, R. Martorelli, F. Pinna, A.L. Sanna, *“Nuovi dati sulla topografia di Cagliari in epoca tardoantica ed alto medioevale dagli scavi nelle chiese di S. Eulalia e del S. Sepolcro”*, in Rivista di Archeologia Cristiana 2003
- [6] R. J. Brandon, T. Kludt and M. Neteleter “Archeology and GIS” Linux Journal Issue 63 2002
- [7] G. Pusceddu and P. Pili. *“Metodologie di analisi non distruttiva applicate ai beni culturali”*. Technical Report 02/36. CRS4, Center for Advanced Studies, Research and Development in Sardinia. Cagliari, Italy, 2002.
- [8] GRASS Geographical Information System: Ufficial web site: www.baylor.edu/~grass/
- [9] MYSQL Software Library, Ufficial web site: www.mysql.com
- [10] PHPMYADMIN Software Tool, Ufficial web site: www.phpmyadmin.net/
- [11] G. Monni, P. Pili e J. Kozlowski *“Sviluppo sistema per la prototipazione rapida di modelli acquisiti da telecamera digitale: Linee guida per il porting su architettura Linux del sistema di acquisizione tridimensionale sviluppato presso l’AILUN e suo inserimento all’interno della pipeline di prototipazione LAPS”*. CRS4 Internal Report. 2003.
- [12] F. Murgia, G. Pusceddu G. Franzoni, *“Open Cascade and Rapid Prototyping in Human Carotid Lumen Reconstruction”*, Atti Eurographics, Italian Chapter 2002
- [13] DICOM Mallinckrodt CTN toolkit, <http://www.dclunie.com/medical-image-faq/html/part8.html>
- [14] PNG: Portable Network Graphics Library: Ufficial web site: <http://www.libpng.org/pub/png/>
- [15] QT Library development Library: Ufficial web site: <http://www.trolltech.com/>
- [16] OPENGL library. Ufficial web site: <http://www.opengl.org/>
- [17] OPENCASCADE Software library. Ufficial web site: www.opencascade.org..
- [18] I. Sobel “Software PV”. Comunicazioni private con l’autore.
- [19] A. Gatto and L. Iuliano, *“Prototipazione rapida, la tecnologia per la competizione globale”*, Tecniche Nuove, 1998;
- [20] T. Wohlers, *“Wohlers Report 2002”*, Rapid Prototyping & Tooling State of the Industry Annual Worldwide Progress Report 2002;
- [21] G. Franzoni, D. Lecca, R. Mitescu, S. Montaldo, F. Murgia, P. Pili e A. Turcu, *“Realizzazione fisica di Superfici non Orientabili Mediante Prototipazione Rapida”*, CRS4 Internal Report. Giugno 2003.
- [22] G. Franzoni e P. Pili, *“Rapid Prototyping from Fast Conctless 3D Reconstruction”*, CRS4 Internal Report Giugno 2003.

- [23] D. Lecca, G. Franzoni e P. Pili, “Algoritmi di conversione RayRep-Csg e CSG-RayRep”, CRS4 Internal Report Giugno 2003.