

MISURE DI RESISTIVITÀ MEDIANTE OHMMAPPER FINALIZZATE ALLO STUDIO DEL SITO DI TORRACCIA DI CHIUSI

1. INTRODUZIONE

In questo contributo si intende esporre, attraverso modelli di resistività del sottosuolo, i risultati di una serie d'indagini geoelettriche compiute presso il sito archeologico di Torraccia di Chiusi (Comune di San Gimignano, Siena). È chiaro, tuttavia, che, per comprendere appieno strategie e scelte operative d'intervento, nonché per fornire al lettore qualche base storico-archeologica sul sito, sia necessario partire proprio da questo, dalla sua scoperta e dai dati acquisiti e già elaborati a riguardo.

L'interesse per il toponimo Torraccia di Chiusi risale alla metà degli anni Settanta del secolo scorso, quando, in occasione dell'allestimento della sezione archeologica del Museo Civico di San Gimignano, si provvide a recuperare e rendere fruibili i più rilevanti ritrovamenti antichi, etruschi e romani, entrati a far parte della Collezione Comunale a partire dalla fine dell'Ottocento fino agli anni Trenta del 1900.

In verità, il sito già allora era noto alla letteratura archeologica: infatti il giovane Ranuccio Bianchi Bandinelli, nel 1928, descriveva piuttosto diffusamente i reperti esposti nel locale Museo, ed in particolare si soffermava su un'urna marmorea di epoca romana (riutilizzata come acquasantiera in una chiesa della zona), decorata a festoni e teste d'Ammone e datata, dallo studioso stesso, ad epoca augustea (BIANCHI BANDINELLI 1928); a ciò si aggiunga che negli inventari comunali, redatti tra il 1928 e il 1932, tra le acquisizioni del Comune, si annoveravano due coppe in sigillata italica provenienti genericamente da Torraccia di Chiusi.

Successivamente, nel 1977, in un testo incentrato sulla topografia storica della Val d'Elsa in periodo etrusco (DE MARINIS 1977), si riportava come, in toponimo Castellaccio, si fosse rinvenuta una «tomba alla cappuccina o a tegoloni», del resto priva di corredo, e di un'«area di sporadici, probabilmente legata a strutture medievali e post-medievali, tra i quali si rinvergono materiali tardo-romani». Verosimilmente a seguito di questa pubblicazione, nel febbraio dello stesso anno, la Soprintendenza per i Beni Archeologici della Toscana metteva un vincolo nell'area individuata dal suddetto testo.

Ancora alla fine degli anni Settanta, il continuo emergere di importanti tracce archeologiche sul sito intensificò l'opera di sorveglianza e monitoraggio del campo, cui si associò da parte degli Uffici di tutela dello Stato un'opera di sensibilizzazione dei diversi proprietari succedutisi nel tempo relativamente all'importante presenza archeologica che giaceva ancora inesplorata

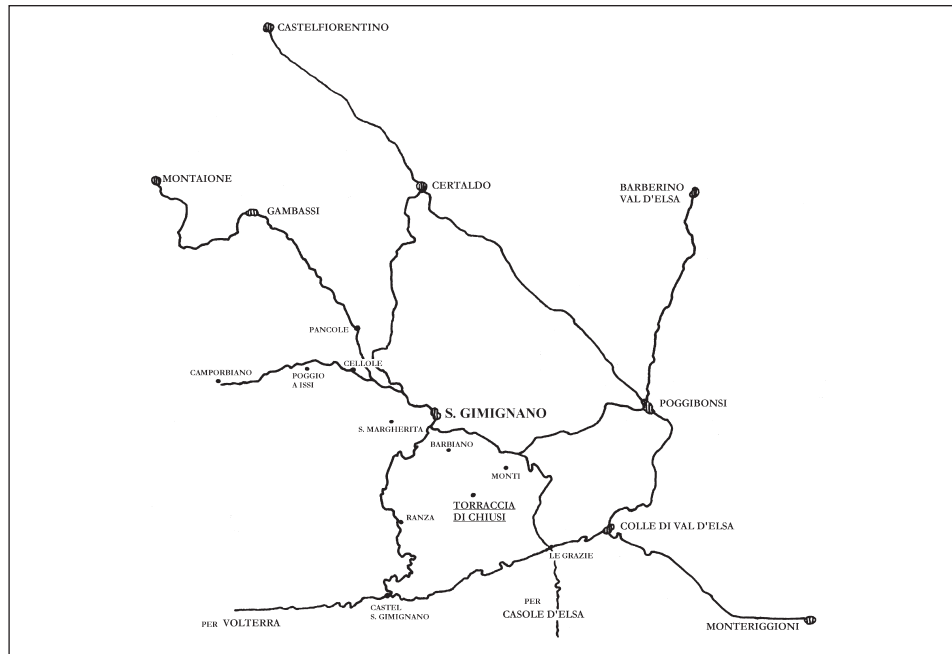


Fig. 1 – Comprensorio del Comune di San Gimignano: localizzazione del sito di Torraccia di Chiusi.

nei loro possedimenti. Proprio questa continua attenzione alle sorti del sito garantì non solo l'acquisizione di numerosi reperti recuperati nel corso degli anni, ma anche la formazione di un archivio fotografico riprodotto una più datata situazione di giacitura, riferibile a quando nel terreno risultavano ancor più evidenti le tracce delle strutture archeologiche.

Dunque, da subito si sviluppò un'attenzione particolare per la vicenda storica di Torraccia di Chiusi, interesse che non solo era legato alla curiosità per le vestigia ancora da dissotterrare, ma soprattutto alla speranza d'integrare, grazie allo studio di un'evidenza archeologica, una parte della storia del territorio di San Gimignano e dell'alta Val d'Elsa, più in generale, ancora poco conosciuta e documentata: il periodo della piena e tarda romanità (Fig. 1).

Restava, tuttavia, ancora il dubbio, tutt'altro che ingiustificato, della reale consistenza storica del sito. A conferma, infatti, dell'attribuzione delle strutture e della località alla fase medievale, c'era la notizia riportata da molti testi, anche assai recenti (PATTUCCI UGGERI 2005, 57-58), inerente al tracciato dell'antica via dei pellegrini, la ben nota via Francigena. In effetti, sullo scorcio del X secolo d.C., Sigeric, Arcivescovo di Canterbury di ritorno da Roma, nel tragitto fra Siena e l'Arno, sostiene d'aver incontrato sette *submansiones*,

una delle quali, la diciottesima del percorso, definita «Sce Martin in Fosse» (San Martino ai Foci) potrebbe ubicarsi, dalla ricostruzione del percorso, nei dintorni della zona in esame.

2. IL PROGETTO ARCHEOLOGICO DELL'UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN (BELGIO): OBIETTIVI E MODALITÀ

Tradizionalmente associata ai nomi di alcuni tra i più illustri archeologi belgi, quali Franz De Ruyt, Roger Lambrechts, Tony Hackens o ancora Joseph Mertens (l'illustre scavatore di siti quali *Alba Fucens* e *Ordonia-Herdonia*), l'Université catholique de Louvain (UCL), dopo anni d'assenza dalla scena dell'archeologia italiana, nel 2004 decise di sostenere una nuova missione di scavo nel nostro Paese, al fine di riprendere l'interrotta ricerca sul campo.

La scelta d'intraprendere uno studio sul sito di Torraccia di Chiusi, certo, fu dettata dall'interesse indotto dalle evidenze archeologiche rinvenute, ma altrettanto dalla necessità scientifica di riesaminare, possibilmente alla luce di nuovi dati, le numerose questioni, in parte ancora aperte, relative al popolamento, all'economia, al paesaggio rurale, etc. nell'ambito territoriale della Val d'Elsa durante quel lungo periodo storico, ancora poco conosciuto e documentato, che dalla fase di romanizzazione giunge all'alto medioevo. Si trattava, insomma, di studiare un comprensorio che, per la sua posizione nel cuore dell'antica *regio VII Etruria* (area di raccordo lungo la *via Clodia*, l'entroterra volterrano ed il mare: sul problema cfr. anche MOSCA 2002), risulta fondamentale alla comprensione dell'intera storia regionale. Tale fine, evidentemente, non sarebbe stato raggiungibile mediante un pur articolato scavo archeologico di un solo sito. Dunque, l'intento, fin dalla fase progettuale, fu di tessere una rete di collaborazione su più fronti con altri Atenei europei ed italiani, al fine di creare una sinergia di metodi, strategie ed intenti atta a donare un quadro il più completo possibile.

L'evidente necessità scientifica d'intraprendere ricerche mirate ed approfondite sulle numerose questioni relative alla trasformazione/continuità culturale, demografica, insediamentale, produttiva, etc. di questo territorio ha incontrato l'immediato interesse di diverse realtà scientifiche, tra cui, oltre all'UCL e alla Soprintendenza per i Beni Archeologici della Toscana, ricordiamo l'Institut für Altertumswissenschaften della Friedrich-Schiller-Universität di Jena (Germania), l'Università degli Studi di Firenze (Scuola di Specializzazione in Archeologia e Dipartimento di Restauro e Conservazione dei Beni Architettonici) e il Centro di GeoTecnologie dell'Università degli Studi di Siena (RICCIARDI 2005-2006).

In verità, non si è trattato di realizzare una missione archeologica secondo le formule usuali, ma di un progetto scientifico-culturale complesso che, in sinergia con diversi enti prevede campagne di scavo, studio, analisi e diffusione della conoscenza del patrimonio archeologico locale sia in Italia sia in Europa.

L'ottenimento di tale scopo è stato programmato mediante la realizzazione di una serie d'interventi mirati che, insieme all'uso dei sistemi tradizionali di scavo e studio, impieghino le più moderne tecnologie e metodologie applicate alla ricerca archeologica: dalle indagini geofisiche, alle analisi archeometriche ed archeometallurgiche sui materiali, alla creazione di un database di gestione ed integrazione dati, di *3D modelling*, di un GIS del paesaggio antico.

La complessità e l'ampiezza di tale progettualità hanno indotto a ritenere utile in futuro porre all'attenzione della Comunità Europea il progetto: VII REGIO. *Elsa Valley during Roman Age and Late-Antiquity* che sigla una collaborazione tra l'UCL e le Università di Firenze, Jena (a sua volta legata agli Atenei di Budapest e Cracovia) e Liegi offrendo alla ricerca un più ampio respiro sia sotto il profilo scientifico sia finanziario.

Come si può ben comprendere, infine, si tratta di un progetto ambizioso, che si fonda, al contempo, su uno spirito di cooperazione tra metodologie, approcci e tecnologie, così come sulla collaborazione tra diversi soggetti di ricerca, nazionali ed europei, al fine di comprendere maggiormente una problematica storico-archeologica, applicando e talora sperimentando nuove metodologie di studio del patrimonio archeologico, in profilo d'apertura alle nuove sfide ed esigenze di un'Europa allargata.

3. INQUADRAMENTO GEOLOGICO DEL SITO

Come lavoro preliminare necessario alla comprensione della situazione archeologica, ma anche dei parametri litologici su cui calibrare lo strumento a georesistività, è stato compiuto uno studio della geologia e della geomorfologia del sito, su base sia globale sia locale. Oltre alla conoscenza delle caratteristiche granulometriche, tessiturali e litologiche della piana alluvionale ove sono ubicate le evidenze archeologiche, questa analisi ha permesso di creare una base cartografica e geologica corretta, sulla quale posizionare lo scavo. La documentazione impiegata ha fatto riferimento alla Cartografia Tecnica Regionale (CTR 1:10.000), che è stata utilizzata anche per posizionare il cantiere archeologico mediante GPS.

Il sito di Torraccia di Chiusi è ubicato nella parte Sud-Est del bacino idrografico del torrente Foci (affluente del fiume Elsa): il luogo risulta facilmente raggiungibile sia da San Gimignano che da Poggibonsi, da cui dista solo pochi chilometri in direzione Est sulla SP 63. Il bacino idrografico del torrente, che ha una forma grossolanamente triangolare, nel tratto terminale dell'asta fluviale principale, coincidente con quello del sito archeologico, si caratterizza per un ampio fondovalle alluvionale pianeggiante, nel quale il torrente Foci incide le proprie alluvioni formando ampi meandri (Fig. 2).

L'area d'interesse, dunque, corrisponde ad una valle asimmetrica, colmata da depositi alluvionali pleistocenici, olocenici ed attuali; essa, inoltre, è delimi-

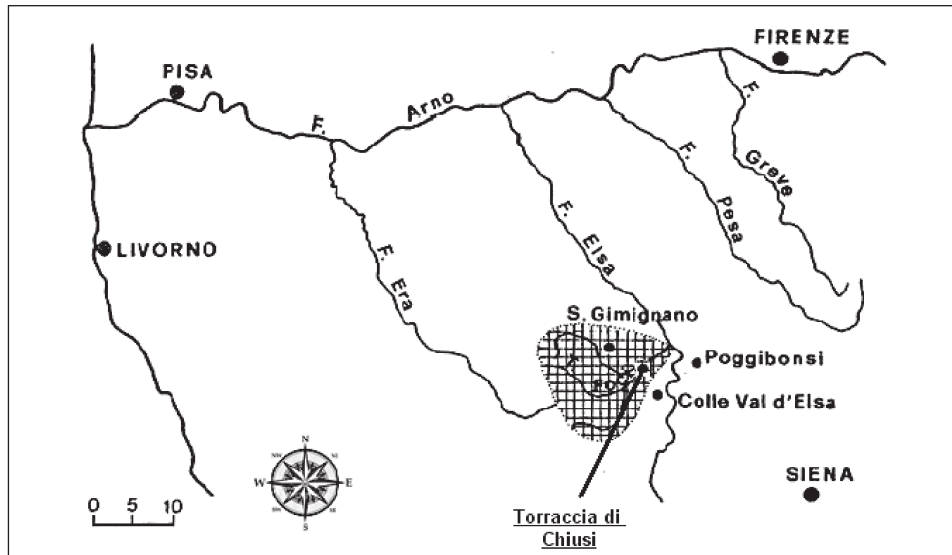


Fig. 2 – Ubicazione del bacino del torrente Foci e del sito di Torraccia di Chiusi in relazione ai maggiori corsi d'acqua del Toscana settentrionale.

tata ai margini da depositi marini pliocenici e travertini pleistocenici. Proprio su depositi pleistocenici e olocenici (costituiti da sabbie fini e medio-fini gialle, limi e limi-argillosi con frequenti frammenti di gasteropodi e lamellibranchi, talvolta integri) s'impongono le tracce archeologiche, chiaramente disposte su un terrazzo fluviale, costituito da litotipi poco coerenti e raccordato in dolce pendio al fondovalle.

4. LA RICERCA ARCHEOLOGICA

4.1 I dati di prospezione

Alcune ricognizioni di superficie, effettuate alla fine degli anni Novanta, permisero di raccogliere diversi materiali archeologici e documentare fotograficamente il sito in varie occasioni, aiutando così a definire nel suo insieme l'estensione dei rinvenimenti.

Nonostante l'estrema frammentarietà, l'analisi dei manufatti recuperati portò ad alcune considerazioni. Alcuni frammenti a vernice nera datavano la fase di frequentazione più antica: in particolare un frammento di *kantharos*, forma Montagna Pasquinucci 128 / Morel 3511c, poneva il *terminus* cronologico più alto alla fine del III secolo a.C.; la presenza costante di formelle marmoree (riferibili ad *opus sectile*) e tessere musive (lapidee e vitree), associate

ad alcuni micro-frammenti d'intonaco dipinto, indicava come l'edificio, qualunque fosse stata la sua natura, dovesse essere caratterizzato da un notevole apparato decorativo; tra i materiali recuperati dopo le arature, figuravano anche frammenti di vetro, riferibili a bicchieri prodotti nella tarda antichità, tra il V ed il VI secolo d.C., elemento che attestava una lunga frequentazione del luogo.

4.2 *Il primo saggio esplorativo: 2001*

Questo primo, limitato intervento (1,5 × 1,5 m) era teso a stabilire con maggiore precisione le possibili fasi di vita del sito e a verificare quanto la stratificazione originaria non fosse stata compromessa dalle arature e dagli interventi agricoli.

Il sondaggio fu aperto laddove l'esame autoptico pareva mostrare una più alta concentrazione di schegge e blocchi di travertino a varia pezzatura (verosimilmente riferibili a strutture murarie), oltre a numerosi laterizi da copertura e costruzione, frammenti ceramici e tessere musive.

L'incognita maggiore riguardava la profondità della stratificazione archeologica non intaccata dalle arature. Questa corrispose grosso modo a circa 70 cm d'arativo, i quali coprivano alcuni tratti murari in blocchi di travertino, visibilmente intaccati da evidenti tracce d'asportazioni antropiche, volontarie (spoliazioni) o involontarie (lavori agricoli).

Al di là dei dettagli stratigrafici dello scavo e dei materiali archeologici rinvenuti, quanto qui preme sottolineare è la natura geologica dei paramenti murari in travertino: tale dato risulta di particolare interesse se correlato alla presenza di affioramenti e cave, non più attive, della stessa roccia nella zona circostante, per l'esattezza, sulla sponda destra del torrente Foci. Tale scoperta, che aggiunge un elemento ulteriore alla comprensione dell'ubicazione del sito archeologico e della sua economia (da valutare in associazione al ritrovamento, successivamente, di modanature marmoree: fatto che implica una specializzazione edilizia e decorativa dei materiali litici), è stata funzionale, come si è accennato, anche alla taratura dell'OhmMapper, calibrata proprio sulla resistività di tale roccia.

4.3 *Le campagne di scavo: 2005 e 2006*

Contrariamente a quanto prospettato dal più variato quadro dei rinvenimenti in prospezione, i materiali ceramici rinvenuti nelle stratigrafie di Torraccia di Chiusi sono quasi esclusivamente, almeno per ora, pertinenti a produzioni relative alla tarda antichità o all'alto medioevo. Pur se in via preliminare, infatti, l'insieme delle classi presenti, i rapporti percentuali tra loro e le tipologie del vasellame portano a datare il corredo del sito ad un periodo compreso tra la seconda metà del VI e la prima metà del VII secolo d.C. (CAVALIERI, BALDINI 2005; CAVALIERI 2007).

Relativamente alla comprensione della natura ed articolazione spaziale del sito, si deve ammettere di essere ancora in una fase interlocutoria, ove, a fronte della notevole quantità di dati accumulati in due intense campagne di scavo, il quadro interpretativo risulta ancora non definito. A tal proposito, il primo, e forse, più grave problema, è una superficie di scavo (ca. 300 m²) che ancora risulta palesemente limitata rispetto all'estensione del sito, valutata, in base all'interpretazione della fotografia aerea, pari a circa 1 ettaro. Da questa prima considerazione discende chiaramente la difficoltà di comprendere i rapporti funzionali, architettonici e sintattici degli ambienti fin qui individuati, alcuni, inoltre, ancora solo parzialmente investigati.

Sintetizzando al massimo l'articolata problematica interpretativa, quanto certamente è emerso fino ad oggi è una serie di complesse situazioni stratigrafiche caratterizzanti un lungo processo di vita e sfruttamento del sito, ove le fasi di un riutilizzo in epoca tardo-antica ed alto-medievale della struttura sono assodate. Mancano, tuttavia, ancora indizi cronologici affidabili che permettano una definizione più precisa nell'ambito di tutti i macroperiodi di riferimento. Inoltre, non è ancora stata individuata con chiarezza la fase romano-imperiale, indiziata solo dalla monumentalità delle strutture, dai materiali lapidei, ceramici e metallici trovati nelle ricognizioni e durante le campagne di scavo.

Allo stato attuale, dunque, è possibile tentare una prima periodizzazione che preveda queste quattro macrofasi:

- Fase I: epoca tardo-imperiale. Impianto monumentale delle strutture cui, forse, possono essere riferiti i *sectilia* marmorei (la varietà dei “marmi” è notevolissima: dai bianchi e grigi più comuni di provenienza lunense, alle brecce d'estrazione senese, fino a frammenti in porfido egiziano e serpentino), i masselli e le tessere musive lapidee.
- Fase II: epoca tardo-antica/alto-medievale. Periodo d'occupazione parcellizzata del sito, che ha previsto, limitatamente all'area investigata, una defunzionalizzazione dei vani. È possibile, infatti, che questi ambienti, una volta persa la loro funzione originale, siano serviti come ricovero provvisorio per persone o animali (ne sono indizio i numerosi punti di fuoco sparsi caoticamente per gli ambienti) e/o come ambienti legati ad attività produttive metallurgiche.
- Fase III: epoca alto-medievale. Occupazione a scopo “abitativo” di alcuni ambienti. Sembra che, infatti, ad esempio il vano E (Fig. 3) sia stato ridotto di dimensioni mediante l'erezione di un muro divisorio (N-S): il nuovo ambiente così definito avrebbe svolto la funzione di piccolo portico coperto (evidente il crollo delle tegole del tetto) con ruolo di transito per accedere ad un ulteriore vano a Nord, apparentemente un lungo corridoio, posto ad una quota superiore; per entrare in tale ambiente, infatti, fu approntata all'uopo una serie di scalini (realizzati con materiale di reimpiego) tagliati nel muro preesistente (angolo N-E del vano). Il *terminus post quem* è dato dalle ceramiche contenute

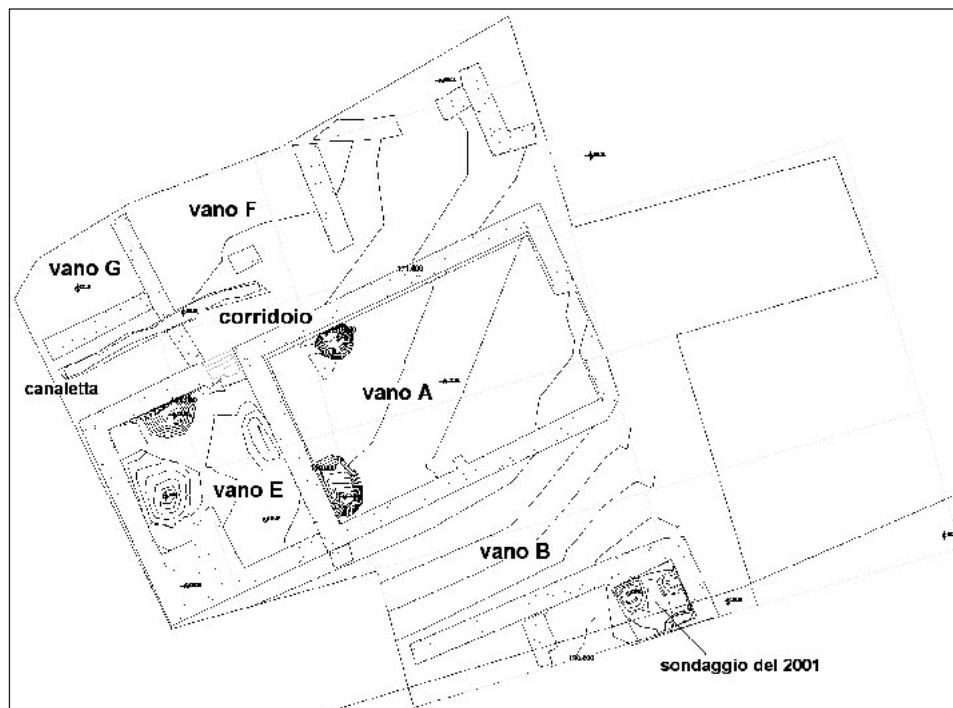


Fig. 3 – Pianta realizzata a CAD dello scavo di Torraccia di Chiusi (campagna 2006); il posizionamento del sito è stato georeferenziato mediante GPS con sistema di riferimento Gauss-Boaga.

in una fossa obliterata dal muro divisorio di cui sopra, databili nella prima metà del VII secolo d.C.

– Fase IV: epoca contemporanea. Le profonde lavorazioni hanno livellato il deposito archeologico, tagliando strati e rasando muri ad una profondità media di 70-75 cm dal piano di campagna.

5. L'OPZIONE PER L'INDAGINE GEOFISICA

L'applicazione delle tecniche d'indagine geofisica nel campo della ricerca archeologica si può far risalire agli anni Trenta e Quaranta in Gran Bretagna, periodo cui si datano le prime clamorose scoperte di nuovi e sconosciuti siti archeologici (BRUZZI 1990, 19-20).

Soprattutto in quest'ultimo decennio i notevoli progressi tecnologici che hanno interessato la microelettronica e l'informatica hanno avuto ricadute eccezionali anche sulla prospezione geofisica archeologica: solo per fare un esempio, si pensi alle ricerche inglesi a *Falerii Novi*, ove, grazie alla magne-

tometria, si è riusciti a riconoscere in pianta molte aree dell'antica colonia latina, *in primis* quella del foro (KEAY *et al.* 2000, 1-94). Oggi, quindi, sia come intervento propedeutico allo scavo stratigrafico, sia come vera e propria indagine conoscitiva, complementare all'intervento archeologico, lo studio geofisico risulta parte integrante, se non necessaria, alla comprensione del terreno e delle strutture in esso conservate.

Le tipologie metodologiche maggiormente impiegate possono essere ricondotte sostanzialmente alle seguenti: il rilevamento magnetico, il rilievo elettrico, quello elettromagnetico e più di recente, il rilievo radar. Va detto, tuttavia, che nel campo della ricerca archeologica non esiste, purtroppo, una tecnica "vincente", un'unica metodologia risolutiva in senso assoluto. Ogni situazione archeologica presenta caratteristiche peculiari circa la tipologia dell'insediamento, la geologia del sito, la natura delle strutture sepolte, etc. Numerosi, infatti, possono essere i fattori che condizionano il funzionamento della prospezione, determinando, di conseguenza, la scelta del tipo di metodologia da utilizzarsi. Per queste ragioni, la necessità operativa e strategica di conoscere sul sito, in modo ragionevolmente sicuro, la perimetrazione dell'area d'interesse archeologico, rende essenziale procedere a ricerche che applichino metodologie integrate tra loro.

Per tal motivo a Torraccia di Chiusi si è deciso di provvedere ad una serie di campagne diagnostiche non invasive i cui risultati, integrati tra loro, potessero dare la più alta garanzia d'affidabilità e, al contempo, il più ampio orizzonte di comprensione. Ad oggi sono state portate a termine unicamente le indagini a resistività elettrica e georadar; nell'estate 2007 è in progetto una campagna d'indagini geomagnetiche.

Più nello specifico, la scelta della sperimentazione del georesistivimetro OhmMapper rispondeva *in primis* a una serie di necessità pratiche: il sito di Torraccia di Chiusi, in base all'analisi delle foto aeree, sembra estendersi su una superficie di ca. 10.000 m², mentre lo scavo archeologico ricopre un'area di poco più di 300 m² (estate 2006), ove le strutture murarie rivenute si collocano ad una profondità compresa tra 0,7 m e 1,2 m dal piano di campagna odierno, interessando quasi tutta l'estensione dello scavo. Poiché appariva proibitivo, attraverso la sola ricerca stratigrafica, definire in tempi ragionevoli l'assetto planimetrico del sito, si è deciso di procedere con una serie d'indagini geoelettriche non invasive e speditive, i cui risultati avrebbero dovuto contribuire, tra l'altro, alla pianificazione delle future campagne di scavo.

6. POSIZIONAMENTO DEL SITO ARCHEOLOGICO

Qualsiasi tipo di indagine sul territorio necessita di un corretto posizionamento in carta che agevoli una visualizzazione semplice, efficace e veloce dei dati raccolti in campagna. Ciò permette di collocare con precisione le informazioni raccolte, di verificare la loro attendibilità e di confrontare le stesse

con altre tipologie di indagini passate o future. Nel caso del sito archeologico di Torraccia di Chiusi, contestualmente alla prima campagna di scavo, era già stato realizzato, tramite stazione totale, un sistema locale di riferimento. Questo si basa su una griglia quadrangolare di 4 m di lato, funzionale al corretto e reciproco posizionamento delle evidenze individuate.

È chiaro che l'inserimento di questo impianto locale in un sistema di riferimento geografico, su una cartografia territoriale regionale, è importante giacché, oltre a posizionare il sito in un contesto più ampio (tale, quindi, da poter compiere valutazioni di carattere geologico e topografico più precise) permette di valorizzarne i contenuti secondo uno standard riconosciuto dall'UNESCO (sistema di riferimento Gauss-Boaga).

Nonostante il sistema locale fosse già posizionato su base cartografica CTR 1:10.000, in fase preliminare alla campagna geoelettrica, si è voluto confermare l'esatta ubicazione del sito attraverso l'uso del GPS, raccogliendo, dunque, una serie di punti in modalità RTK. Tale operazione è stata suddivisa in due momenti con finalità diverse: sono state misurate le posizioni di 4 punti riconoscibili in carta al fine di valutare l'accuratezza delle loro misure ed evitare errori sistematici di posizionamento, e, successivamente, sono stati rilevati altri 8 punti della griglia del sistema locale per permettere un corretto posizionamento ed orientazione dello scavo sulla CTR.

In questa fase, infine, si è proceduto alla creazione di un progetto in ArcMap, chiamato aiano.mxd, in cui sono presenti i livelli informativi d'interesse, rispetto ad un unico sistema di riferimento geografico.

7. IL METODO GEOELETTRICO

Dopo il posizionamento geografico del sito, si è proceduto all'indagine geoelettrica tramite strumentazione OhmMapper. In due giornate di lavoro (12-13 novembre 2006) sono state effettuate 9 indagini geoelettriche disposte lungo il perimetro di scavo. Segue una breve introduzione alla teoria geoelettrica di base (LOKE 2004) e alla strumentazione utilizzata.

7.1 Teoria e metodi di acquisizione

Il metodo geoelettrico si basa sulla misura della differenza di potenziale in alcune zone del terreno, con l'obiettivo di ricostruire modelli di resistività attraverso un processo d'inversione.

La corrente elettrica (I), misurata in Ampère, è così definita:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = I$$

dove con ΔQ si indica il numero di cariche che passano in un conduttore e con Δt il tempo (Fig. 4).

In presenza di un conduttore ohmico la corrente elettrica subisce una resistenza (R) che dipende dalla differenza di potenziale (ΔV) applicata ai capi del circuito e dalla corrente (I) secondo la relazione:

$$R = \frac{\Delta V}{I}$$

In generale la resistenza che incontrano le cariche nel passaggio lungo un conduttore dipende dalle caratteristiche geometriche del materiale e dalle proprietà fisiche del materiale stesso. Per un conduttore omogeneo, isotropo e cilindrico vale la seguente relazione:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (0.1)$$

dove con (l) si indica la lunghezza del cilindro, con (S) la sezione del cilindro e con (ρ) la resistività tipica del materiale.

Il metodo geoelettrico prevede l'energizzazione del terreno con una corrente I ed una misura diretta della differenza di potenziale (ΔV), da cui si ricava la resistività apparente ρ_a , la quale è influenzata dalla somma delle diverse resistività di tutti gli elementi presenti nel sottosuolo e che può essere dedotta dalla relazione (0.1):

$$g \frac{\Delta V}{I} = \rho_a \quad (0.2)$$

dove con g si indica un fattore geometrico. Conoscendo l'intensità di corrente (I) che viene immessa nel terreno e la differenza di potenziale (ΔV) che è misurata, è necessario ipotizzare una "geometria" del terreno per poi ricavare la resistività (ρ).

Per realizzare questo tipo di misure è necessario utilizzare uno strumento in grado di immettere corrente nel terreno attraverso elettrodi (chiamati convenzionalmente A e B) e misurarne la differenza di potenziale (ΔV) in altri due punti (M e N, chiamati elettrodi di potenziale).

Le cariche scorrono da un elettrodo di corrente all'altro percorrendo "linee di corrente" a profondità diverse: maggiore è la separazione tra A e B, maggiore sarà la diffusione della corrente nel terreno (e di conseguenza la profondità raggiunta), ma minore sarà la differenza di potenziale registrata in superficie. La disposizione geometrica dei quattro elettrodi sul terreno può essere la più varia, anche se normalmente si considerano tre diverse disposizioni: Wenner, Schlumberger e dipolo-dipolo (Fig. 5).

Nel quadripolo detto di Wenner i picchetti sono sistemati in linea in modo da essere equidistanti tra loro secondo lo schema A M N B. Con questa disposizione degli elettrodi le misure di resistività apparente possono essere effettuate a profondità diverse, allargando ad ogni misura tutti e quattro gli elettrodi della stessa distanza, mantenendo invariato il centro del dispositivo e ottenendo, così, un sondaggio elettrico verticale (SEV); oppure si possono

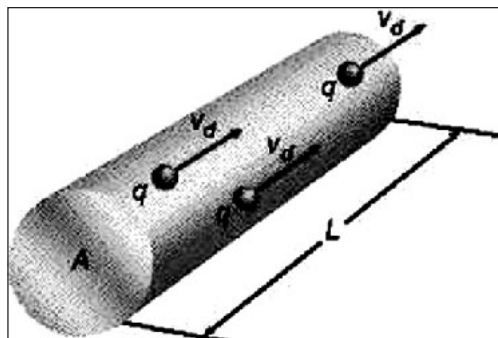


Fig. 4 – La resistenza di un filo dipende dal materiale da cui è costituito e dalle sue dimensioni.

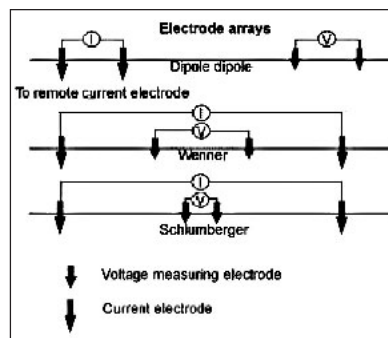


Fig. 5 – Schema riassuntivo degli schieramenti di resistività tipo Wenner, Schlumberger e dipolo-dipolo.

ottenere dei profili di resistività a profondità costante spostando ad ogni misura contemporaneamente tutti e quattro gli elettrodi lungo un allineamento, mantenendo invariata l'interdistanza tra i picchetti.

Nel quadripolo di Schlumberger la distanza tra gli elettrodi di corrente è compresa tra 4 e 40 volte la distanza tra gli elettrodi di potenziale che si trovano al centro della disposizione. Per ottenere un SEV si mantiene fissa la distanza intercatodica tra M e N e si allargano gli elettrodi A e B; per ottenere un profilo di resistività solo gli elettrodi di potenziale sono traslati tra gli elettrodi di corrente, mantenendo fissa la distanza reciproca. Questa procedura è particolarmente sensibile alle variazioni orizzontali di resistività rispetto al dispositivo di Wenner.

Nella disposizione dipolo-dipolo il potenziale elettrico, diversamente dagli altri sistemi, è misurato al di fuori della linea ideale che congiunge gli elettrodi di corrente. Questo assetto è molto sensibile ai cambiamenti di resistività orizzontali (rappresentati da strutture verticali, dicchi o cavità), ma poco sensibile nella mappatura di cambiamenti di resistività verticali: per questa ragione può bene adattarsi ad applicazioni archeologiche, allorquando queste tendano ad evidenziare strutture antropiche come muri o tombe.

Il quadripolo dipolo-dipolo mantiene una buona risoluzione di dettaglio anche in profondità, in quanto è possibile misurare la variazione di potenziale elettrico sull'asse delle z senza dover allargare gli elettrodi di corrente: infatti per ottenere un SEV basta allontanare gli elettrodi di potenziale dall'altra coppia di picchetti, anche senza mantenere allineati i quattro catodi. Per ottenere un profilo di resistività è necessario spostare entrambe le coppie lungo una direzione, sempre senza che occorra mantenere allineati A e B con M e N.

In effetti, lo strumento utilizzato per le indagini geoelettriche nel sito archeologico di Torraccia di Chiusi, pur non utilizzando elettrodi di contatto, può essere assimilato ad un dipolo-dipolo.



Fig. 6 – Lo strumento OhmMapper.

8. LO STRUMENTO OHMMAPPER

Il contesto geomorfologico (una piana alluvionale) e la tipologia di target (una serie di strutture murarie in blocchi di travertino) da individuare a Torraccia di Chiusi sono ideali per l'utilizzo dell'OhmMapper (Fig. 6), un georesistivimetro ad accoppiamento capacitivo che permette di misurare in modo speditivo la resistività apparente del sottosuolo fino ad una profondità di 25 m. In verità, com'è noto, la maggior difficoltà pratica incontrata nell'attuare misure di resistività consiste nel piazzare gli elettrodi nel terreno, operazione che richiede molto tempo e che non facilita la rapida realizzazione di più profili di resistività nell'area da indagare. Questo ostacolo può essere facilmente superato con l'impiego dell'OhmMapper, strumento della statunitense Geometrics che, a differenza di altri georesistivimetri ad accoppiamento galvanico, non prevede l'impiego di elettrodi: l'energizzazione del terreno, infatti, avviene attraverso un sistema di antenne (un trasmettitore e un ricevitore) che operano con una frequenza di 16,5 kHz. Tali antenne, dunque, trascinate sul terreno, consentono l'acquisizione dei dati in continuo fino ad un massimo di una lettura al secondo. Non utilizzando elettrodi, quindi, non solo si aumenta la velocità di acquisizione, ma si eliminano tutti i disturbi

generati dalle resistenze di contatto terreno-picchetto. Ne consegue che tale strumento si rivela adatto ad operare anche su terreni ad alta resistività o dove sarebbe preferibile, se non sconsigliabile, piantare elettrodi, come su pavimentazioni storiche.

La configurazione utilizzata dallo strumento è assimilabile ad un dipolo-dipolo, che, unita all'alta densità di dati acquisiti, permette di ottenere profili di resistività ad alta risoluzione anche in situazioni complesse del sottosuolo. Utilizzando l'OhmMapper, quindi, è possibile realizzare ricostruzioni tridimensionali del sottosuolo e mappe di resistività a profondità diverse.

Per ottenere profili a profondità differenti è variata la lunghezza del ricevitore e del trasmettitore, nonché la loro distanza reciproca. Una volta deciso quali antenne utilizzare la loro interdistanza viene via via aumentata con l'obiettivo di raggiungere profondità sempre maggiori.

La limitazione più rilevante dello strumento è la profondità massima raggiungibile durante l'indagine: anche se essa dipende dalla resistività media del terreno, difficilmente con una coppia di antenne si riescono a superare i 25 m. Tale assetto dello strumento fa sì che esso sia molto sensibile ai cambiamenti orizzontali nella resistività, risultando particolarmente adatto all'individuazione di strutture verticali come dicchi, cavità, strutture antropiche murarie e meno efficace nello studio di strutture orizzontali.

Per queste caratteristiche, l'OhmMapper ottiene performance migliori laddove le strutture antropiche (muri, tombe, fondazioni, strade) si dispongano prevalentemente in verticale e si trovino a basse profondità.

9. MISURE DI CAMPAGNA

La configurazione dell'OhmMapper prevede il posizionamento del trasmettitore in coda allo stendimento, separato dal ricevitore tramite una corda non conduttiva di misura proporzionale alla lunghezza delle antenne (Fig. 7). Questo sistema è collegato ad una console vincolata all'utente attraverso un'imbracatura, così da poter permettere un movimento lento e regolare.

Lo strumento è trascinato dall'operatore lungo una linea descritta da traguardi fissi (*marks*) posizionati a distanza regolare. L'OhmMapper acquisisce memorizzando le misure in funzione del tempo ed il raggiungimento di ogni traguardo è segnalato con un comando alla console stessa. Ipotizzando che la velocità dell'utente durante l'intervallo tra due marker sia costante, è possibile assegnare una posizione alla misura lungo la linea percorsa dallo strumento. Sul sito di Torraccia di Chiusi la spaziatura scelta per i marker durante l'acquisizione è stata di 5 m.

Lo stesso percorso viene effettuato più volte adottando configurazioni di corda e antenne diverse; così da ottenere diversi profili a profondità crescente.

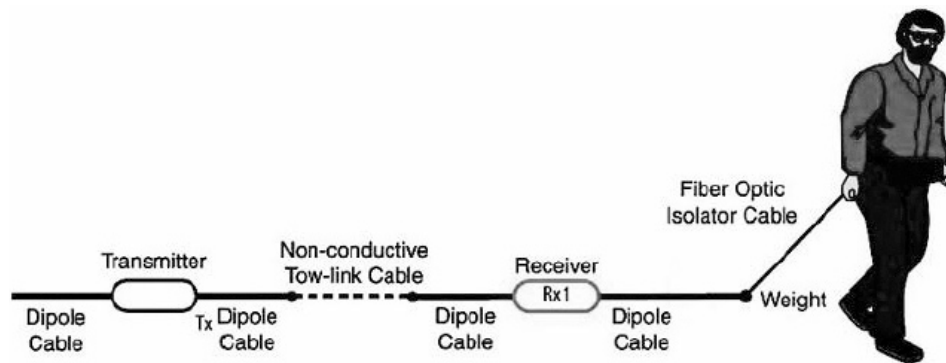


Fig. 7 – Modello di configurazione dell'OhmMapper.

I dati raccolti sono stati scaricati dalla console dell'OhmMapper attraverso il programma MagMap2000 Geometrics (fornito in dotazione con lo strumento) ed elaborati con il software Res2Dinv, un programma di inversione di dati geoelettrici. Il risultato finale per ciascun rilievo è sintetizzato da una tomografia geoelettrica, che rappresenta un modello 2D della resistività del sottosuolo.

Le indagini di resistività si sono svolte realizzando nove “strisciate” che hanno permesso la ricostruzione di altrettante pseudosezioni. Tutti i rilievi sono disposti intorno al perimetro dello scavo, a diverse distanze e con un'orientazione tale da poter intercettare perpendicolarmente le presunte strutture sepolte.

La pianificazione e la scelta dei punti in cui effettuare le tomografie sono basate sull'analisi dei dati di scavo e su osservazioni della morfologia della piana alluvionale del sito. La leggera inclinazione verso Nord di quest'ultima e le arature perpetrate fino assai di recente facevano supporre che le strutture antropiche meglio conservate si trovassero sul margine settentrionale dello scavo. Per tal motivo, si è deciso di indagare più a fondo quel settore, realizzando all'uopo ben quattro pseudosezioni. Tre strisciate, invece, sono state effettuate sul lato Est, mentre solo una rispettivamente sui margini Ovest e Sud, lungo i quali le aspettative di intercettazione di strutture antropiche erano minori (Fig. 8).

La tomografia 1, in particolare, è stata posizionata a pochi centimetri dal margine Nord dello scavo, dove risulta evidente la prosecuzione di strutture murarie sotto il piano di campagna (Fig. 9). Partendo dall'evidenza archeologica di muri ad andamento N-S posizionati lungo la sezione Nord dello scavo, tale operazione è stata finalizzata per tarare la misura dello strumento: il valore assoluto dei segnali e la forma dei modelli emersi in questa tomografia sono

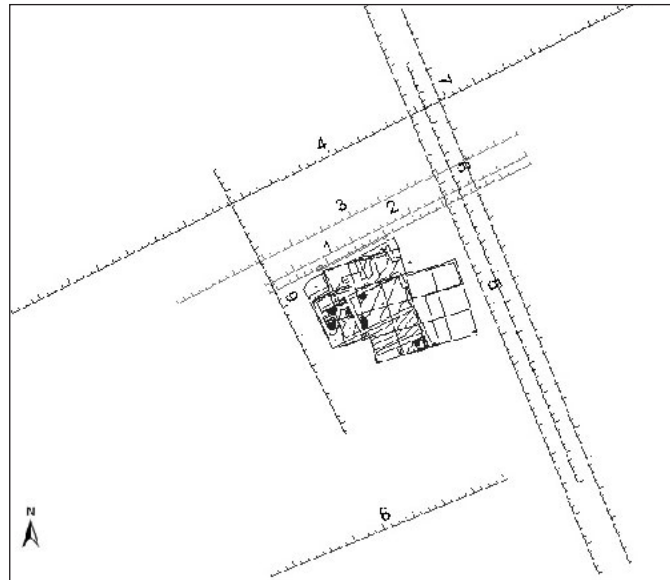


Fig. 8 – Disposizione delle tomografie intorno all'area di scavo.

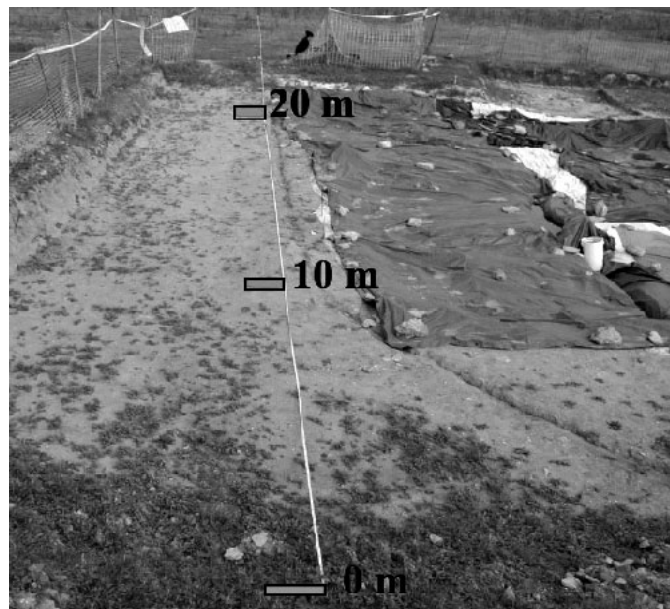


Fig. 9 – Posizionamento della tomografia elettrica n. 1 rispetto al lato Nord dello scavo archeologico.

Profilo	Lunghezza del profilo [m]	Profondità indagate [m]	Numero di misure compiute	Intervallo spaziale medio di acquisizione [cm]	Tempo impiegato per il rilievo [minuti]
1	35	0.5; 0.68; 0.87; 1.04; 1.22; 1.39; 1.74; 2.07	3198	9	56
2	35	0.5; 0.68; 0.87; 1.04; 1.22; 1.39; 1.74; 2.07	2918	10	45
3	45	0.68 ; 1.04; 1.39; 1.74; 2.07; 2.40; 2.73	3473	9	48
4	65	1.01; 1.37; 1.73; 2.09; 2.44; 2.79; 3.13; 3.47	3554	15	43
5	60	0.68; 1.04; 1.39; 1.74; 2.07; 2.40; 2.73	5101	8	60
6	45	0.68; 1.04; 1.39; 1.74; 2.07; 2.40	2676	20	69
7	60	0.68; 1.04; 1.39; 1.74; 2.07; 2.40	3902	9	52
8	30	0.5; 1.04; 1.39; 1.74	1581	7.5	23
9	35	0.5; 0.68; 1.04; 1.32; 1.74; 2.07	2187	10,5	24

Tab. 1 – Riassunto delle caratteristiche dei vari rilievi.

stati utilizzati come tracce interpretative delle misure di resistività acquisite a maggiori distanze dall'area di scavo archeologico.

Prefissandosi l'obiettivo di non voler indagare profondità maggiori di 2,5 m, si è scelto di configurare lo strumento con antenne da 2,5 m; solo per il rilievo 4 si sono adottate antenne da 5 m, con lo scopo di scendere più in profondità in corrispondenza dell'alto morfologico a Nord del cantiere di scavo. Nella Tab. 1 sono state raccolte tutte le informazioni utili per capire la qualità e le caratteristiche di ciascun rilievo geoelettrico. Si può notare che l'intervallo spaziale medio (ovvero la distanza media tra due misure successive) è molto basso (dell'ordine di 10 cm); questo significa poter disporre, in fase di elaborazione dei dati, di un alto numero di misure e, quindi, di una risoluzione dei dettagli piuttosto alta.

10. ELABORAZIONE DELLE MISURE GEOELETTRICHE

I dati raccolti sono stati così scaricati dalla console dell'OhmMapper utilizzando il programma MagMap2000 (Geometrics), in dotazione allo strumento. In questo processo è possibile trasformare i file binari in formato ASCII (estensione .stn).

Il software permette di elaborare i dati mediante l'inserimento delle informazioni geometriche dei differenti percorsi, la correzione dei versi di percorrenza e della posizione dei marker ed il filtraggio dei dati con operazioni di *despike* e *smoothing*. Oltre alla visualizzazione classica con la quale

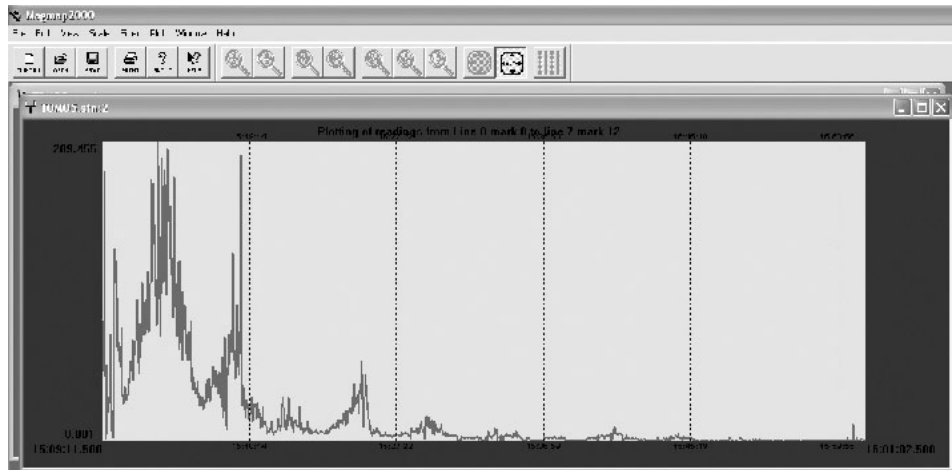


Fig. 10 – Schermata di MagMap ottenuta selezionando il comando *Plot OhmMapper reading*.

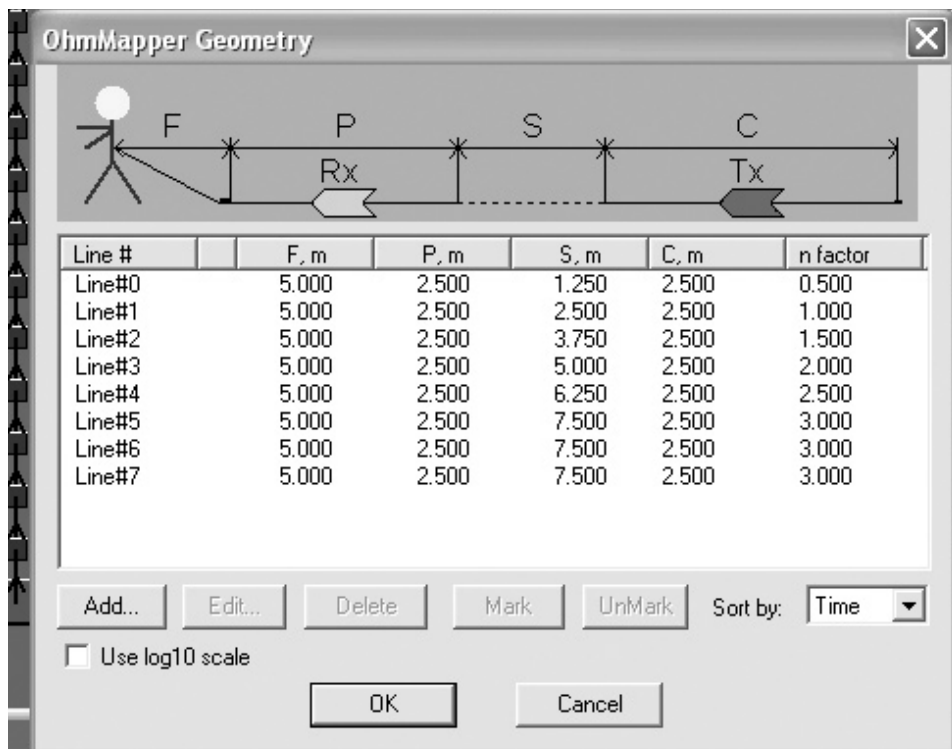


Fig. 11 – Schermata di MagMap ottenuta selezionando il comando *Plot resistività map*.

vengono rappresentati la disposizione dei marker e la lunghezza dei profili, il programma consente di visualizzare (funzione *Plot OhmMapper reading*) le misure di resistenza elettrica [$\mu\text{V}/\text{mA}$] in funzione dell'istante di acquisizione (Fig. 10). Lo studio di questo grafico è importante per individuare eventuali segnali spuri o assenze di segnale che in fase di inversione introdurrebbero degli errori nella formazione dei modelli di resistività.

La selezione del comando *Plot resistività map* permette, inoltre, la visualizzazione e la modifica della configurazione dell'OhmMapper utilizzata durante ogni rilievo (lunghezza delle corde, tipo di antenne, etc.) (Fig. 11).

Le misure geoelettriche collazionate a Torraccia di Chiusi sono state processate con il MagMap 2000 per correggere la posizione di alcuni marker. Gli output ottenuti (file con estensione .dat) sono stati importati ed elaborati dal software Res2Dinv, che rappresenta uno dei programmi di inversione di dati geoelettrici tra i più diffusi. Il risultato finale, per ciascun rilievo, è sintetizzato da una tomografia geoelettrica, che rappresenta un modello 2D della resistività del sottosuolo.

La differenza di potenziale misurata dal ricevitore dipende non solo dalla resistività dei materiali presenti nel sottosuolo, ma anche dalla loro disposizione spaziale: è necessaria pertanto una serie di elaborazioni matematiche che permetta di creare modelli di resistività ipotizzando determinate geometrie nel sottosuolo. Questo processo, che prende il nome di inversione, normalmente viene eseguito dopo aver acquisito i dati in campagna e costituisce la principale attività di elaborazione in laboratorio. Nel nostro caso il software Res2Dinv utilizza un algoritmo di inversione basato sui minimi quadrati che permette di determinare un modello bidimensionale di resistività del sottosuolo.

Il punto di partenza per il processo di inversione è il file .dat, output del MagMap 2000; l'utente può successivamente sfruttare le potenzialità del Res2Dinv configurando vari parametri per calibrare meglio il modello teorico in relazione alle condizioni ambientali in cui si sono svolte le misure. Il Res2Dinv, dopo aver compiuto un numero di iterazioni successive che possono essere stabilite dall'utente, visualizza una tomografia elettrica che rappresenta il miglior compromesso tra le misure fatte e il modello calcolato: l'accordo (o il disaccordo) tra essi è sintetizzato dal parametro RMS (*Root Means Square error*) espresso in percentuale.

Anche se un valore elevato di RMS può essere letto come un'incapacità del programma ad invertire i dati (e quindi creare un buon modello di resistività), non bisogna dimenticare che gli algoritmi utilizzati dal Res2Dinv si basano su ipotesi di carattere geologico. Tali algoritmi, pertanto, tendono a creare una modellazione geologicamente coerente del sottosuolo e non tengono conto dell'eventuale presenza di strutture antropiche che introducono variazioni artificiali al naturale andamento della resistività del terreno: per questo motivo, in presenza di un sottosuolo fortemente antropizzato, si

hanno spesso valori di RMS molto elevati. In tali casi, l'utente consapevole può utilizzare il metodo di inversione *robust* per "segnalare" al software la presenza di forti variazioni di resistività in spazi ridotti (caso tipico delle indagini archeologiche); questo metodo di inversione (detto anche "a blocchi") permette di accentuare le variazioni orizzontali enfatizzando i contorni netti e gli spigoli vivi delle zone con forti variazioni di resistività.

Un altro dei parametri modificabili per la creazione di un buon modello teorico è la larghezza delle celle con cui si rappresenta il sottosuolo, la quale normalmente è pari alla minima spaziatura tra le antenne; dimezzare questo parametro (funzione *use model refinement*) significa ottenere un modello più dettagliato e raffinato. Considerata l'attendibilità delle misure compiute *in situ* e l'alto numero di dati rilevati, nel caso di Torraccia di Chiusi si è fatto uso di questa opzione nell'elaborare alcune tomografie.

Il software Res2Dinv offre, infine, una serie di opzioni per una miglior visualizzazione del modello finale di resistività: è possibile per esempio cambiare la scala di colori, utilizzare scale di colori lineari o logaritmiche, inserire informazioni topografiche, variare le diverse visualizzazioni, etc. In particolare l'inserimento della topografia permette di rappresentare la pseudosezione di resistività secondo l'andamento della morfologia dell'area indagata.

Di seguito si riportano alcuni modelli di resistività del sottosuolo con le relative interpretazioni: nelle immagini, con le lettere maiuscole si indicano le principali strutture verticali, con le lettere minuscole le evidenze orizzontali. Per ciascuna tomografia analizzata, è unita la rappresentazione in pianta sulla quale sono segnalate le principali strutture (mediante indicatori rossi). Le scale metriche delle tomografie coincidono con quelle in pianta; nel progetto GIS aiano.mxd, tutti i dati sono riportati in scala.

11. L'ANALISI DELLE TOMOGRAFIE

Sarebbe troppo lungo e, ai fini di questo contributo, inutile analizzare ogni singola pseudosezione delle 9 eseguite: per tal motivo, preferiamo commentare solo quelle tomografie che maggiormente hanno contribuito, per chiarezza ed evidenza dei dati, alla creazione del modello interpretativo finale relativo al sottosuolo circostante l'area di scavo.

Come già accennato, la tomografia 1 è particolarmente importante perché eseguita come rilievo funzionale alla calibrazione dello strumento: come si nota nella Fig. 9 la linea percorsa si trova mediamente ad una distanza di ca. 0,8 m dallo scavo.

Questa grande vicinanza permette di riconoscere i segnali dati dalla presenza di strutture individuate in scavo e che quasi certamente proseguono il loro andamento rettilineo sotto l'attuale piano di calpestio. Sapendo che i muri immediatamente adiacenti al rilievo geoelettrico sono composti da

blocchi di travertino (roccia sedimentaria calcarea) la cui resistività è < 1000 ohm m (NORINELLI 1996; SHERIFF 2002; MILSOM 2003; MUSSETT, KHAN 2003), “immersi” in un contesto di limo sabbioso, la cui resistività varia, a seconda della percentuale di acqua presente, da 50 a 1000 ohm m, possiamo riconoscere in questa tomografia l’andamento certo di 2 strutture murarie (Tav. IVa, a) evidenziate dalle lettere A e C. Il segnale che le rappresenta è evidente e ben delimitato rispetto all’area adiacente con resistività inferiore. Con le lettere b e d sono indicate due strutture ad alta resistività (> 1000 ohm m) la cui forma rende difficile l’interpretazione, nonostante il valore del segnale indichi la presenza di travertino. La lettera t mostra una fascia longitudinale ad alta resistività presente per tutta la tomografia, fino ad una profondità di 40 cm; l’evidenza è interpretata come strato superficiale di arativo ed è riconoscibile in tutte le pseudosezioni. La lettera s, infine, delimita una fascia longitudinale a bassa resistività (< 5 ohm m) che si ritrova per quasi tutta la lunghezza della tomografia, intervallata soltanto dalle fondazioni delle evidenze antropiche; considerando la geometria della struttura ed il contesto geologico, l’evidenza è interpretata come deposito alluvionale “vergine”.

La tomografia 7 (Tav. IVa, b) è la più orientale di una serie di tre strisciate condotte parallelamente tra loro. L’interpretazione dei dati geoelettrici mostra un susseguirsi d’evidenze localizzate su un asse NW-SE la cui resistività generalmente è $\approx / < 1000$ ohm m: si tratta dei punti A-O che si caratterizzano per strutture con larghezza superiore al metro ed interpretabili quali presenze antropiche. In particolare i punti M, N e O, per la geometria delle strutture e per una loro profondità comparabile, sembrano costituire una compagine muraria compatta e di considerevole impatto volumetrico. La fascia longitudinale s, a bassa resistività (< 10 ohm m), ad andamento irregolare e presente soprattutto tra i 45 e 70 m, risulta intervallata dalle presunte strutture antropiche: l’interpretazione è che si tratti del substrato geologico. Infine, la fascia longitudinale ad alta resistività t, evidente per tutta la lunghezza della tomografia, fino ad una profondità di 70 cm, è interpretata come lo strato superficiale dell’arativo.

La tomografia 8 (Tav. IVa, c) è localizzata a circa 30 m a Sud dell’area di cantiere. Essa è caratterizzata dall’individuazione di cinque evidenze, i punti da A-E, di cui tre, C-E, particolarmente forti ed ampie. Infatti, se per i punti A e B la resistività si pone a livelli rispettivamente medio-bassi e bassi (≈ 500 ohm m e ≈ 200 ohm m), tale da non poter essere messa immediatamente in relazione a strutture antropiche (pur se la modifica del substrato in corrispondenza di A è estremamente netta!), le evidenze C-E (strutture ad alta resistività $\approx / > 1000$ ohm m) verosimilmente devono essere ricondotte a presenze antropiche. A ciò si aggiunga, inoltre, la considerazione relativa alla regolarità dell’intervallo spaziale che divide le cinque evidenze. Ancora una volta, la fascia ad alta resistività t, presente per tutta la lunghezza della tomo-

grafia fino ad una profondità di 60 cm, è interpretata come arativo; mentre s, fascia a bassa resistività ad andamento irregolare (posizionata soprattutto a sinistra della tomografia), si presenta intervallata dalle probabili strutture antropiche, qualificandosi come substrato geologico.

La tomografia 9 (Tav. IVa, d) è localizzata a circa 4 m ad Ovest dell'area di scavo. I punti A-I si qualificano generalmente (escludendo C) per l'alta resistività che li caratterizza ($\approx / < 1000$ ohm m, salvo picchi pari a ≈ 2000 ohm m in D). Tali evidenze, dunque, possono essere interpretate come strutture antropiche che, per altro, causano nel substrato (zone verdi-blu della tomografia) profonde deformazioni (in particolare A-E). Quanto alle fasce t e s, si rimanda alle considerazioni su esposte.

12. COMMENTO AI RILIEVI GEOELETTICI

L'elaborazione e l'interpretazione delle nove sezioni di resistività hanno evidenziato un elevato numero di potenziali presenze antropiche di complessa lettura e difficile comprensione (Fig. 12); per questo motivo si è deciso di proseguire lo studio utilizzando un criterio di sintesi – basato su considerazioni di natura fisica, geologica, geometrica ed archeologica – che ha permesso di eliminare i segnali incerti e selezionare le evidenze più probabili.

Il principale risultato emerso dall'analisi geoelettrica si fonda sul riconoscimento in tutti i modelli di resistività di quattro layer (“zone”) distinti e ricorrenti (Fig. 13 e Tab. 2): l'arativo, la fascia antropizzata, il substrato e le strutture antropiche; tale sintesi consente la ricostruzione schematica della situazione geopedologica in cui è inserito il sito archeologico.

Il primo strato, caratterizzato da un'elevata resistività, raggiunge sistematicamente la profondità di 70 cm ed è chiaramente interpretabile come arativo. Il secondo layer, caratterizzato da resistività medio-alte (300-600 ohm m), si colloca a profondità comprese tra 0,7 e 3,4 m (pur essendo ben riconoscibile, il suo spessore varia a seconda della zona indagata) e può essere definito come “strato antropizzato”, in cui sono “immerse” le strutture costruite. La morfologia del territorio e le tomografie eseguite sembrerebbero caratterizzare tale layer come uno strato di “riporto” al cui interno si trovano crolli, strutture e tutte le altre evidenze di carattere archeologico. Al di sotto di esso è chiaramente visibile un livello a bassa resistività (1-10 ohm m, di colore blu), ove spesso affondano le strutture soprastanti e che valutazioni geologiche e geomorfologiche inducono ad interpretare come deposito alluvionale “vergine”.

Infine, la quarta zona, ovvero le strutture antropiche, si caratterizzano nei modelli di resistività per la loro forma geometrica (spesso particolarmente regolare) e per l'alta resistività (> 1000 ohm m), che riesce ad emergere nonostante si venga a trovare in un contesto certamente a non bassa resistività, all'interno della fascia antropizzata.

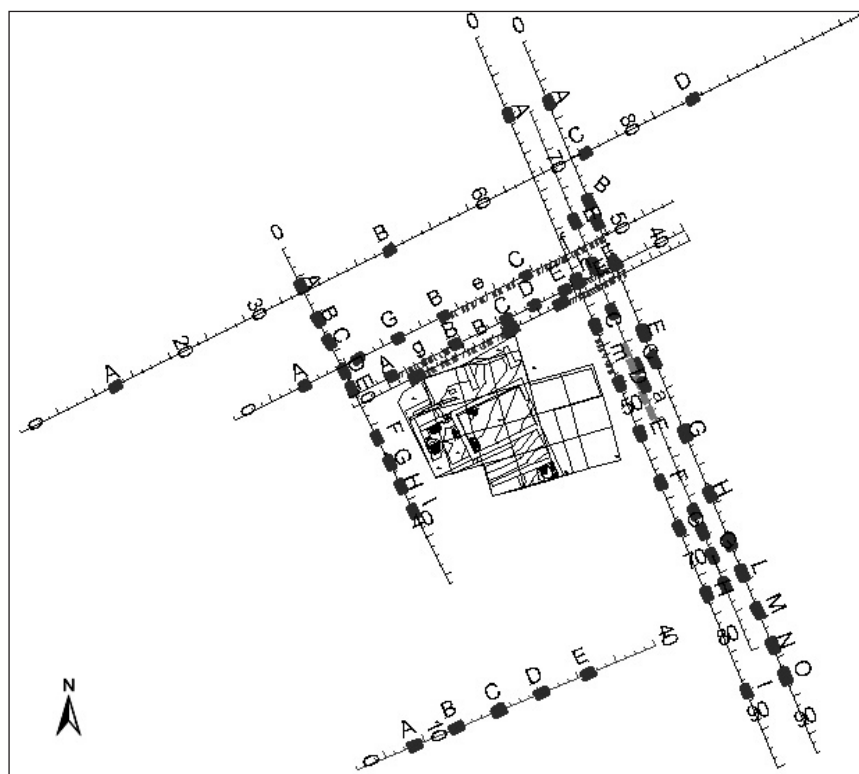


Fig. 12 – Visualizzazione dello scavo e delle nove tomografie con le relative evidenze.

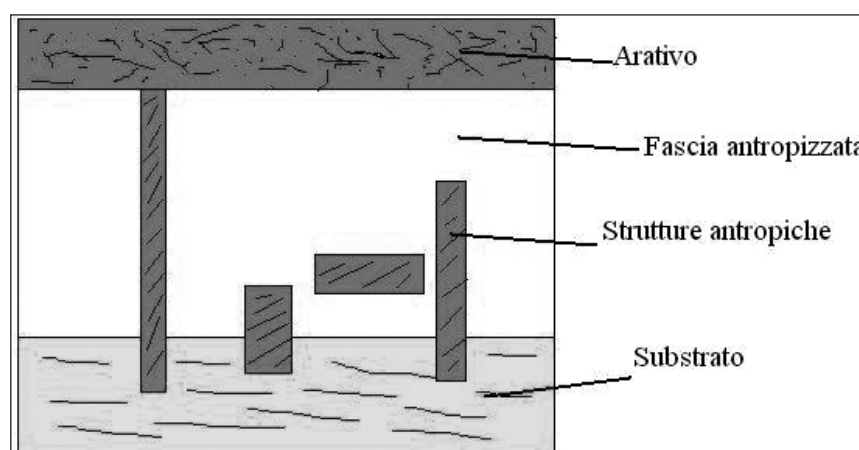


Fig. 13 – Schema illustrativo delle caratteristiche del sito.

Layers	Resistività misurata [Ω m]	Resistività da bibliografia [Ω m]
Arativo	> 1500	-
Fascia antropizzata	\approx 300	-
Substrato	1-10	500-5000 sabbia 1-100 argilla
Strutture antropiche (travertino)	\approx 1000	\approx 1000

Tab. 2 – Le “zone” presenti sul sito di Torraccia di Chiusi con le relative misure di resistività.

Tali osservazioni hanno permesso la ricostruzione geometrica della struttura del sottosuolo e hanno fornito importanti informazioni sia di natura geologica che archeologica. Il contatto con il substrato, come vedremo, risulta particolarmente significativo poiché parrebbe indicare il limite della zona antropizzata rispetto al “vergine” geologico.

Infine, per correttezza, è necessario valutare anche la risoluzione spaziale con cui sono stati acquisiti i dati in campagna. Come indicato nella Tab. 1, le misure sono state rilevate circa ogni 10 cm: in tal modo si è ottenuto un *rate* d’acquisizione finalizzato all’individuazione di spessori di 50 cm in quantità tale da poter indicare un attendibile campione statistico. A tal proposito, però, va segnalato che il metodo di acquisizione ed il software d’inversione tendono a produrre modelli in cui le strutture verticali subiscono un “allargamento”: se, ad esempio, un’evidenza appare nel modello dell’ordine di un metro, è verosimile che ci si trovi di fronte ad una struttura che ha dimensioni minori (non superiori a 70 cm).

13. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

La realizzazione di un’indagine geofisica speditiva e non invasiva che, attraverso la realizzazione di prospezioni geoelettriche, potesse dare indicazioni circa la presenza, la profondità e le dimensioni di eventuali strutture antropiche interrato, nonché dell’assetto geomorfologico del sottosuolo sul sito di Torraccia di Chiusi, ha raggiunto il suo obiettivo.

Nove sono le tomografie effettuate ai margini dello scavo archeologico: quattro parallele al lato Nord, tre sul lato Est, una ad Ovest e, infine, ancora una lungo il lato Sud.

Dopo l’elaborazione dei dati raccolti e la successiva inversione, sono stati ottenuti nove modelli di resistività delle sezioni indagate: per ciascuno di essi sono state messe in evidenza le maggiori anomalie, le quali, successivamente, sono state posizionate in pianta in ambiente GIS. Al termine di questa operazione il quadro emerso presentava un elevato numero d’evidenze di notevole complessità ed articolazione. Nella fase di sintesi interpretativa, pertanto, si è proceduto alla rielaborazione dei dati sulla base di considerazioni di diver-

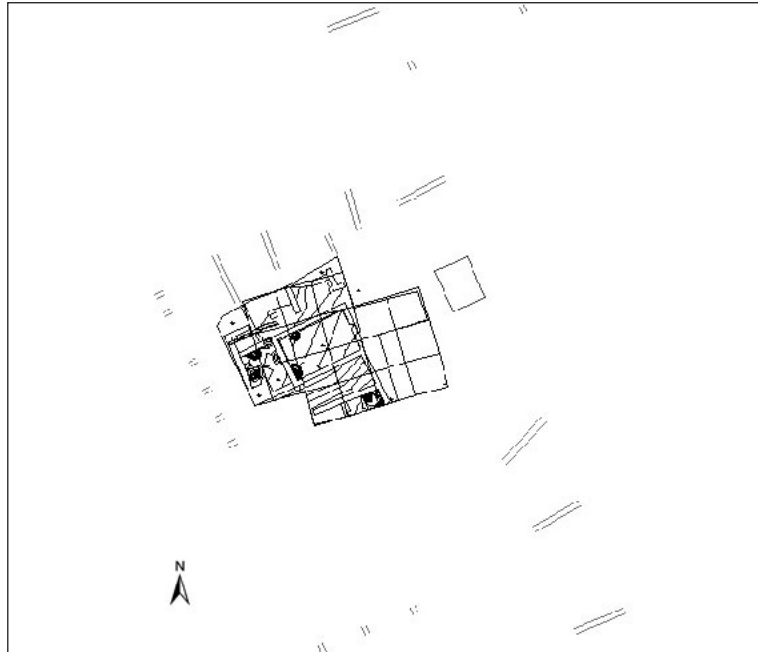


Fig. 14 – Localizzazione delle evidenze.

sa natura, nella consapevolezza che una misura sperimentale può divenire un'indicazione archeologica solo se è inserita in un contesto più globale che ne supporta l'esistenza.

Il risultato di questo processo è sintetizzato in Fig. 14, dove sono state raccolte le principali evidenze antropiche e geologiche: quanto emerge è una nuova mappa del sito archeologico in cui paiono evidenziarsi strutture antropiche (probabilmente fondazioni) anche a distanza elevata dall'attuale area di scavo. Durante la scelta del posizionamento delle indagini elettriche, infatti, aspettative di ritrovamento di strutture antropiche erano ipotizzabili nella zona a Nord dello scavo, dove un lieve dosso poneva il dubbio di celare strutture murarie interrato e ben conservate; le tomografie confermano tali aspettative, in quanto probabili strutture antropiche, dislocate ad una considerevole profondità, sono state individuate ad una distanza di 16 m dallo scavo (tomografia 4).

Altro dato interessante arriva dall'area a Sud del cantiere archeologico, dove la sezione di resistività, effettuata a quasi 25 m dal confine della griglia di scavo, rivela la presenza di almeno tre importanti evidenze puntuali a profondità ridotta: la loro forma particolarmente regolare fa pensare a complessi apparentemente ben conservati, anche se dubbia rimane l'entità della rasatura causata dai lavori agricoli.

L'analisi dei dati, in particolare, ha evidenziato come il layer a bassa resistività sia molto marcato e più superficiale nella zona ad Ovest dello scavo: tale anomalia è stata ricondotta all'esistenza in antico di una "zona umida" (canale?) a forma di cono con vertice a Nord e andamento N-S, presente fin dalla costruzione del complesso: tale ipotesi potrebbe spiegare la presenza di una canaletta di scolo rinvenuta nella parte N-O dello scavo archeologico con scorrimento apparentemente verso Ovest (Tav. IVb).

Come già enunciato, la discrezione di quattro layer distinti e ricorrenti in tutti i modelli di resistività consente una ricostruzione schematica della situazione geopedologica in cui è inserito il sito archeologico. A tal riguardo, risultato non secondario sotto il profilo archeologico, è il possibile riconoscimento nella terza zona (il substrato) della superficie di contatto con il livello antropizzato. Ne consegue che sarebbe ragionevole ipotizzare che il terzo layer possa corrispondere alla superficie morfologica presente al momento della costruzione delle strutture murarie, fatto che, mediante la modellazione di un DEM (*Digital Elevation Model*) del piano di campagna e una rappresentazione tridimensionale del substrato del deposito alluvionale "vergine", consentirebbe, almeno in linea teorica, la ricostruzione geomorfologica dell'intera area al momento della costruzione delle antiche strutture.

MARCO CAVALIERI

Département d'Archéologie et Histoire de l'art
Université catholique de Louvain

in collaborazione con

MARTA BOTTACCHI, FABIO MANTOVANI, GIULIA RICCIARDI
Centro di GeoTecnologie
Università degli Studi di Siena

BIBLIOGRAFIA

- BIANCHI BANDINELLI R. 1928, *Materiali archeologici della Val d'Elsa e dei dintorni di Siena*, 2, Siena, La Balzana.
- BRUZZI G. 1990, *Le prospezioni geofisiche applicate all'archeologia*, in M. MARINI CALVANI (ed.), *Tutela archeologica e pianificazione*, Parma, 19-20.
- CAVALIERI M., BALDINI G. 2005, *La "villa romana" di Torraccia di Chiusi, Comune di San Gimignano (SI)*, «Notiziario della Soprintendenza ai Beni Archeologici della Toscana», 1, 401-409.
- CAVALIERI M. 2007, *Un progetto di studio per Torraccia di Chiusi, loc. Aiano, San Gimignano (SI). I nuovi dati parziali della II campagna di scavo, 2006*, «Notiziario della Soprintendenza ai Beni Archeologici della Toscana», 2, in corso di stampa.
- DE MARINIS G. 1977, *Topografia storica della Valdelsa in periodo etrusco*, Castelfiorentino, Società Storica della Valdelsa Editrice.
- KEAY S., MILLETT M., POPPY S., ROBINSON J., TAYLOR J., TERRENATO N. 2000, *Falerii Novi: A new survey of the walled area*, «Papers of the British School at Rome», 68, 1-94.
- LOKE M.H. 2004, *Electrical Imaging Surveys for Hydrogeological, Environmental and Engineering Studies*, Piacenza, Geofluid.

- MILSOM J. 2003, *Field Geophysics*, The Geological Field Guide Series, Chichester, J. Wiley & Sons.
- MOSCA A. 2002, *Via Cassia. Un sistema stradale romano tra Roma e Firenze*, Firenze, Leo S. Olschki Editore.
- MUSSETT A.E., KHAN M.A. 2003, *Esplorazione del sottosuolo, un'introduzione alla geofisica applicata*, Milano, Zanichelli.
- NORINELLI A. 1996, *Elementi di geofisica applicata*, Bologna, Patron Editore.
- PATTUCCI UGGERI S. (ed.) 2005, *La via Francigena e altre strade della Toscana medievale*, Firenze, All'Insegna del Giglio.
- RICCIARDI G. 2005-2006, *Misure di resistività finalizzate allo studio ed alla modellazione della "villa romana" rinvenuta in località Torraccia di Chiusi (Comune di San Gimignano)*, Tesi di laurea in GeoTecnologie, Università degli Studi di Siena.
- SHERIFF R.E. 2002, *Encyclopaedic Dictionary of Applied Geophysics*, Tulsa, Society of Exploration Geophysicists.

ABSTRACT

The paper describes the findings of a geo-electric study conducted at the archaeological site of Torraccia di Chiusi (Siena Province) with the use of soil resistivity modelling. In collaboration with the Département d'Archéologie et Histoire de l'Art (Université catholique de Louvain, Belgium) and the Centro di GeoTecnologie (Università degli Studi di Siena), a new, non-invasive instrument, named the OhmMapper, was used for the first time in an archaeological context to provide geophysical sections of the terrain.

The aim of the study was to evaluate the nature and distribution of the buried anthropogenic structures and to properly locate them on the map without the necessity of excavating. The site, located in the valley of the Foci river, has been described as a long lasting settlement (III to VII centuries A.D., although ceramics dating to the II century B.C. have been uncovered). Belgian and Italian archaeologists, who have been digging at the site for the last two years, have also discovered that it had undergone multiple additions and modifications throughout the years (initially a villa, and later perhaps a *mansio*).

The OhmMapper is a capacitively coupled resistivity meter that measures the electrical properties of rocks and soil without ground stakes used in traditional resistivity surveys. A simple coaxial-cable array with transmitter and receiver sections is pulled along the ground either by a single person or attached to an all-terrain vehicle. The dipole-dipole configuration enables the instrument to immediately pick up the horizontal variations in resistivity, thereby enabling the user to identify structures such as walls or cavities. With the OhmMapper, nine sections were made around the perimeter of the area already excavated to collect data on the presence, depth, and dimensions of anthropogenic structures. The results from the sections were refined and placed on a map using an ArcGIS platform. The interpretation of the nine sections resulted in a new hypothesis on the buried anthropogenic structures and a new model of the natural landscape that existed at the site prior to its construction.