



Università degli Studi di Ferrara

DOTTORATO DI RICERCA IN
"SCIENZE e TECNOLOGIE per l'ARCHEOLOGIA e i BENI CULTURALI"

CICLO XXII

COORDINATORE Prof. Carlo Peretto

Studio dell'efficacia dell'OhmMapper (Geometrics Inc.)
per indagini geoelettriche in contesti archeologici

Settore Scientifico Disciplinare GEO/05

Dottorando

Dott.ssa Bottacchi Marta Caterina

Tutore

Prof. Disperati Leonardo

Anni 2007/2009

Corso di Dottorato in convenzione con



UNIVERSITA'
DEGLI STUDI
DI
SIENA



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI MODENA E REGGIO EMILIA

*A nonno Pino,
con affetto.*

Riassunto

Il progetto di ricerca realizzato durante l'attività di dottorato si propone di studiare dell'efficacia del georesistivimetro ad accoppiamento capacitivo OhmMapper (Geometrics Inc.) in contesti archeologici.

Al fine di verificare l'efficacia dello strumento per individuare elementi di possibile natura archeologica, sono state realizzate delle indagini sistematiche nell'Area Test per la Geofisica di Bosco della Città, gestita dal Museo Civico di Rovereto (TN). In particolare sono stati confrontati i profili di resistenza e resistività realizzati con l'OhmMapper e con il georesistivimetro ad accoppiamento galvanico Terrameter SAS 1000 (ABEM) lungo la stessa linea di acquisizione su un target dalle caratteristiche compatibili con quelle di elementi di natura archeologica. Dal confronto è stato possibile constatare l'affidabilità dell'OhmMapper per l'individuazione di target con andamento verticale e con resistività maggiore rispetto al contesto.

Alla luce di questa analisi, sono state realizzate numerose campagne di indagine geoelettrica con l'OhmMapper in contesti archeologici. In particolare i survey realizzati in cinque siti archeologici campione, due in contesti urbani moderni (Area Sacra della città greca di Medma e acquedotto romano di Firenze) e tre in contesti extraurbani (villa tardo-antica presso Siena, Accademia di Villa Adriana e città romana di Sentinum), sono i più adeguati a dimostrare l'efficacia dello strumento, perché maggiormente completi e confrontabili con altri dati di natura archeologica e geofisica.

Abstract

The research project carried out during the PhD work aims to study the effectiveness of the OhmMapper (Geometrics Inc.) capacitive-coupled resistivity system in archaeological contexts.

In order to verify the effectiveness of this resistivity-meter to identify archaeological features, we realized a systematic surveys in the Geophysical Test Site of Rovereto (TN - Italy). In particular we compared both resistance and resistivity profiles realized by OhmMapper capacitively coupled resistivity-meter and by the Terrameter SAS 1000 (ABEM) galvanic resistivity meter. We realized these surveys walking along the same acquisition line to intercept a target compatible with an archaeological feature. The comparison between the profile realized by the two different instruments allowed us to establish the reliability of the OhmMapper to detect targets characterized by vertical pattern and resistivity values greater than the context.

After this analysis, we realized several resistivity surveys in archaeological sites using the OhmMapper. In particular the surveys carried out in five archaeological sites are the most appropriate to demonstrate the effectiveness of the instrument, because the resistivity results are comparable with other archaeological or geophysical data. Two of these sites are located in modern urban contexts (Sacred Area of Medma Greek colony and the roman Aqueduct of Florence); the other three sites are located in suburban areas (Late-ancient villa near Siena, Accademia of Villa Adriana and Sentinum roman town).

Dichiarazione di conformità

Io sottoscritta Dott.ssa

Bottacchi Marta Caterina

nata a

Genova

Provincia

GE

il giorno

9 Giugno 1980

Your E-Mail Address

bottacchi@unisi.it

avendo frequentato il corso di Dottorato di Ricerca in:

Scienze e Tecnologie per l'Archeologia e i Beni Culturali

Ciclo di Dottorato

XXII

Titolo della tesi in Italiano

Studio dell'efficacia dell'OhmMapper (Geometrics Inc.) per indagini geoelettriche in contesti archeologici

Titolo della tesi in Inglese

Study of the effectiveness of the OhmMapper (Geometrics Inc.) for geoelectrical surveys in archaeological contexts.

Titolo della tesi in altra Lingua Straniera

Tutore - Prof:

Disperati Leonardo

Settore Scientifico Disciplinare (SSD)

GEO/05

Parole chiave (max 10)

resistività, archeologia, sistema ad accoppiamento capacitivo, OhmMapper, resistivity, archaeology, capacitive-coupled system.

Consapevole - Dichiaro

CONSAPEVOLE --- 1) del fatto che in caso di dichiarazioni mendaci, oltre alle sanzioni previste dal codice penale e dalle Leggi speciali per l'ipotesi di falsità in atti ed uso di atti falsi, decade fin dall'inizio e senza necessità di alcuna formalità dai benefici conseguenti al provvedimento emanato sulla base di tali dichiarazioni; -- 2) dell'obbligo per l'Università di provvedere al deposito di legge delle tesi di dottorato al fine di assicurarne la conservazione e la consultabilità da parte di terzi; -- 3) della procedura adottata dall'Università di Ferrara ove si richiede che la tesi sia consegnata dal dottorando in 4 copie di cui una in formato cartaceo e tre in formato .pdf, non modificabile su idonei supporti (CD-ROM, DVD) secondo le istruzioni pubblicate sul sito : <http://www.unife.it/dottorati/dottorati.htm> alla voce ESAME FINALE -- disposizioni e modulistica; -- 4) del fatto che l'Università sulla base dei dati forniti, archiverà e renderà consultabile in rete il testo completo della tesi di dottorato di cui alla presente dichiarazione attraverso l'Archivio istituzionale ad accesso aperto "EPRINTS.unife.it" oltre che attraverso i Cataloghi delle Biblioteche Nazionali Centrali di Roma e Firenze. --- DICHIARO SOTTO LA MIA RESPONSABILITA' --- 1) che la copia della tesi depositata presso l'Università di Ferrara in formato cartaceo, è del tutto identica a quelle presentate in formato elettronico (CD-ROM, DVD), a

quelle da inviare ai Commissari di esame finale e alla copia che produrrò in seduta d'esame finale. Di conseguenza va esclusa qualsiasi responsabilità dell'Ateneo stesso per quanto riguarda eventuali errori, imprecisioni o omissioni nei contenuti della tesi; -
- 2) di prendere atto che la tesi in formato cartaceo è l'unica alla quale farà riferimento l'Università per rilasciare, a mia richiesta, la dichiarazione di conformità di eventuali copie; -- 3) che il contenuto e l'organizzazione della tesi è opera originale da me realizzata e non compromette in alcun modo i diritti di terzi, ivi compresi quelli relativi alla sicurezza dei dati personali; che pertanto l'Università è in ogni caso esente da responsabilità di qualsivoglia natura civile, amministrativa o penale e sarà da me tenuta indenne da qualsiasi richiesta o rivendicazione da parte di terzi; -- 4) che la tesi di dottorato non è il risultato di attività rientranti nella normativa sulla proprietà industriale, non è stata prodotta nell'ambito di progetti finanziati da soggetti pubblici o privati con vincoli alla divulgazione dei risultati, non è oggetto di eventuali registrazioni di tipo brevettale o di tutela. ---

PER ACCETTAZIONE DI QUANTO SOPRA RIPORTATO

Firma Dottorando

Ferrara, li 24 febbraio 2010

Firma del Dottorando Marta Caterina Bottechi

Firma Tutore

Visto: Il Tutore
Si approva

Firma del Tutore

[Firma]

Indice generale

RIASSUNTO	5
ABSTRACT	6
DICHIARAZIONE DI CONFORMITÀ	7
INDICE GENERALE	9
INDICE DELLE FIGURE	11
INDICE DELLE TABELLE	16
INTRODUZIONE	17
1 IL METODO DELLA RESISTIVITÀ E SUE APPLICAZIONI IN CAMPO ARCHEOLOGICO	21
1.1 TEORIA ALLA BASE DEL METODO GEOELETTICO	21
1.2 DESCRIZIONE DEL METODO DELLA RESISTIVITÀ	23
1.3 DISPOSIZIONI ELETTRODICHE	26
1.4 DAL MODELLO DI RESISTIVITÀ ALL'INTERPRETAZIONE	33
1.5 L'IMPIEGO DELLE INDAGINI GEOELETTICHE IN CONTESTI ARCHEOLOGICI	34
2 IL GEORESISTIVIMETRO AD ACCOPPIAMENTO CAPACITIVO OHMMAPPER	38
2.1 IL SISTEMA AD ACCOPPIAMENTO CAPACITIVO	38
2.2 DESCRIZIONE DEL SISTEMA	41
2.3 OHMMAPPER: COMPONENTI, ASSEMBLAGGIO E ATTIVAZIONE	44
2.4 PROFONDITÀ DI INDAGINE	48
2.5 MODALITÀ DI ACQUISIZIONE	51
2.6 TIPOLOGIE DI SONDAGGI ELETTRICI REALIZZABILI CON L'OHMMAPPER	53
2.7 PROCEDURE DI CAMPAGNA CON L'OHMMAPPER	56
3 STUDIO SISTEMATICO DELL'OHMMAPPER IN SITUAZIONI CONTROLLATE	59
3.1 L'AREA TEST PER LA GEOFISICA "BOSCO DELLA CITTÀ"	59
3.2 MISURE DI RESISTENZA E RESISTIVITÀ CON OHMMAPPER E GEORESISTIVIMETRO AD ELETTRODI: CONFRONTO IN SITUAZIONE CONTROLLATA	62
4 UTILIZZO DELL'OHMMAPPER PER INDAGINI DI RESISTIVITÀ IN SITI ARCHEOLOGICI IN CONTESTI URBANI MODERNI	74
4.1 SANTUARIO DELLA COLONIA GRECA DI MEDMA (ROSARNO – RC)	75
4.1.1 <i>Caratteristiche del sito e pianificazione del survey a Rosarno</i>	75
4.1.2 <i>Rilievo 1</i>	78
4.2 ACQUEDOTTO ROMANO DI FIRENZE	90
4.2.1 <i>Caratteristiche del sito e pianificazione del survey a Sesto Fiorentino</i>	90
4.2.2 <i>Rilievi realizzati a Sesto Fiorentino</i>	93
4.3 CONSIDERAZIONI GENERALI SULL'USO DELL'OHMMAPPER PER INDAGINI ARCHEOLOGICHE IN CONTESTI URBANI	99
5 UTILIZZO DELL'OHMMAPPER PER INDAGINI DI RESISTIVITÀ IN SITI ARCHEOLOGICI IN CONTESTI EXTRAURBANI	101
5.1 VILLA DI ETÀ TARDO-ANTICA PRESSO SIENA	102
5.1.1 <i>Caratteristiche del sito e pianificazione del survey in prossimità della villa tardo-antica</i>	102
5.1.2 <i>Rilievi realizzati nel sito della villa tardo-antica presso Siena</i>	105
5.2 ACCADEMIA DI VILLA ADRIANA (TIVOLI – ROMA)	116
5.2.1 <i>Caratteristiche del sito e pianificazione del survey nell'Accademia di Villa Adriana</i>	116
5.2.2 <i>Rilievo realizzato con l'OhmMapper nell'Accademia di Villa Adriana</i>	119
5.3 TEATRO ROMANO DI SENTINUM (SASSOFERRATO – AN)	123
5.3.1 <i>Caratteristiche del sito e pianificazione del survey per l'individuazione del Teatro Romano di Sentinum</i>	123

5.3.2	<i>Rilievo realizzato con l'OhmMapper nel sito della città romana di Sentinum.....</i>	<i>126</i>
5.4	CONSIDERAZIONI GENERALI SULL'USO DELL'OHMMAPPER PER INDAGINI ARCHEOLOGICHE IN CONTESTI EXTRAURBANI.....	135
6	CONCLUSIONI E PROSPETTIVE.....	136
	RICONOSCIMENTI.....	143
	BIBLIOGRAFIA.....	144
	CARTOGRAFIA GEOLOGICA CONSULTATA.....	147
	RIFERIMENTI LEGISLATIVI.....	147

Indice delle figure

Fig. 1.1 - La resistenza di un filo dipende dal materiale con cui è fatto e dalle sue dimensioni.	22
Fig. 1.2 - Esempificazione schematica delle diverse resistività del terreno (a sinistra) e della resistività apparente misurata dallo strumento (a destra).....	23
Fig. 1.3 - Disposizione quadripolare. C_1 e C_2 elettrodi di corrente, P_1 e P_2 elettrodi di potenziale.....	24
Fig. 1.4 - Rappresentazione delle linee di equipotenziale e dei filetti di corrente in pianta ed in sezione.	25
Fig. 1.5 - Un tipico array con 4 elettrodi per misure di resistività del sottosuolo dal piano di campagna (P.d.c.).	26
Fig. 1.6 - Configurazione elettrodica Wenner.	26
Fig. 1.7 - Configurazione elettrodica Schlumberger.	27
Fig. 1.8 - Configurazione elettrodica dipolo-dipolo con gli elettrodi di potenziale in asse con quelli di corrente (A), oppure fuori asse (B).	28
Fig. 1.9 - Esempificazione schematica di un SEV realizzato con il metodo Schlumberger e relativo modello di resistività 1D.	30
Fig. 1.10 - Rappresentazione schematica della realizzazione di un'acquisizione 2D con un georesistivometro ad accoppiamento galvanico.	31
Fig. 1.11 - Schema semplificato di un georesistivometro: cavo multielettrodico (64 elettrodi) collegato agli elettrodi (rappresentati dalle frecce nere) e alla centralina di alimentazione e gestione del sistema.	32
Fig. 1.12 - Rappresentazione schematica della realizzazione di un'acquisizione 3D con un georesistivometro ad accoppiamento galvanico.	32
Fig. 1.13 - Rappresentazione schematica del Megger Earth Tester utilizzato da Atkinson e la mappa delle aree di iso-resistività del sito presso Dorchester. I valori di resistività sono espressi in Ohm*Piedi. In puntinato sono riportati i risultati dello scavo archeologico condotto nel 1963 (da Clark 1996).	35
Fig. 1.14 - Resistance Meter RM4 (dal sito web Geoscan Research).	36
Fig. 1.15 - Il sistema di acquisizione ARP [®]	37
Fig. 2.1 - Schematizzazione dell'accoppiamento cavo-terreno assimilabile a quello delle piastre di un condensatore.	39
Fig. 2.2 - Confronto schematico tra la disposizione geometrica delle antenne dell'OhmMapper e l'array dipolo-dipolo di un quadripolo elettrico.	41
Fig. 2.3 - Operatore che trascina l'OhmMapper durante l'acquisizione.....	42
Fig. 2.4 - La console G-858 dell'OhmMapper.	43
Fig. 2.5 - I componenti principali dell'OhmMapper. I numeri riportati in figura si riferiscono a Tab. 2.1.	44
Fig. 2.6 - Assemblaggio dei componenti principali del georesistivometro OhmMapper (da OhmMapper Operation Manual, 2001).	46
Fig. 2.7 - Schermata del menu OhmMapper Geometry (da OhmMapper Operation Manual, 2001).	47
Fig. 2.8 - Esempificazione schematica dell'aumentare della profondità di indagine dell'OhmMapper in rapporto all'aumento della distanza tra il ricevitore e il trasmettitore.	49
Fig. 2.9 - Caratteristiche geometriche dell'OhmMapper per la realizzazione di un profilo di resistività e corrispondente modello di resistività 1D.	53
Fig. 2.10 - Caratteristiche geometriche dell'OhmMapper per la realizzazione di una pseudosezione di resistività e corrispondente modello di resistività 2D.	54
Fig. 2.11 - Caratteristiche geometriche dell'OhmMapper per la realizzazione di una mappa di resistività e corrispondente modello di resistività 2D.	55
Fig. 2.12 - Esempio di modello di resistività tridimensionale realizzato attraverso l'elaborazione di dati acquisiti con l'OhmMapper.	56
Fig. 2.13 - Realizzazione di un'indagine di resistività con l'OhmMapper.....	57

Fig. 3.1 – L'area Test di Rovereto vista da Nord-Ovest.....	59
Fig. 3.2 – Sezione schematica dell'Area Test di Rovereto.....	60
Fig. 3.3 – Distribuzione dei bersagli nell'Area Test di Rovereto (da Finotti 2003). I numeri si riferiscono alla tabella 3.1.....	61
Fig. 3.4 – Muro a secco (n° 1 in Tab. 3.1) durante la realizzazione dell'Area Test di Rovereto (da Finotti 2003).	63
Fig. 3.5 – Confronto tra i profili di resistività realizzati in presenza di un target con andamento verticale di resistività maggiore rispetto al contesto ($\rho_2 > \rho_1$) utilizzando gli array Wenner e dipolo-dipolo (da Musset 2003).	64
Fig. 3.6 – Acquisizione dei profili con l'OhmMapper nell'Area Test del Museo Civico di Rovereto. A sinistra dell'operatore è possibile notare l'attrezzatura utilizzata per realizzare i profili con il georesistivimetro ad accoppiamento galvanico Terrameter SAS1000.....	65
Fig. 3.7 – Grafico di confronto tra i profili di Resistenza realizzati con l'OhmMapper a due velocità (Ohm V1 e Ohm V2) e con il Terrameter SAS 1000 (ABEM), utilizzando una distanza tra i dipoli di 0,625 m e indagando una profondità di 0,5 m circa.....	66
Fig. 3.8 – Grafico di confronto tra i profili di Resistenza realizzati con l'OhmMapper a due velocità (Ohm V1 e Ohm V2) e con il Terrameter SAS 1000 (ABEM), utilizzando una distanza tra i dipoli di 1, 25 m e indagando una profondità di 0,7 m circa.....	66
Fig. 3.9 – Grafico di confronto tra i profili di Resistenza realizzati con l'OhmMapper a due velocità (Ohm V1 e Ohm V2) e con il Terrameter SAS 1000 (ABEM), utilizzando una distanza tra i dipoli di 1, 875 m e indagando una profondità di 0,9 m circa.....	67
Fig. 3.10 – Grafico di confronto tra i profili di Resistenza realizzati con l'OhmMapper a due velocità (Ohm V1 e Ohm V2) e con il Terrameter SAS 1000 (ABEM), utilizzando una distanza tra i dipoli di 5 m e indagando una profondità di 1,7 m circa.....	67
Fig. 3.11 – Grafico di confronto tra i profili di Resistività apparente realizzati con l'OhmMapper a due velocità (Ohm V1 e Ohm V2) e con il Terrameter SAS 1000 (ABEM), utilizzando una distanza tra i dipoli di 0,625 m e indagando una profondità di 0,5 m circa.....	69
Fig. 3.12 – Grafico di confronto tra i profili di Resistività apparente realizzati con l'OhmMapper a due velocità (Ohm V1 e Ohm V2) e con il Terrameter SAS 1000 (ABEM), utilizzando una distanza tra i dipoli di 1, 25 m e indagando una profondità di 0,7 m circa.....	69
Fig. 3.13 – Grafico di confronto tra i profili di Resistività apparente realizzati con l'OhmMapper a due velocità (Ohm V1 e Ohm V2) e con il Terrameter SAS 1000 (ABEM), utilizzando una distanza tra i dipoli di 1, 875 m e indagando una profondità di 0,9 m circa.....	70
Fig. 3.14 – Grafico di confronto tra i profili di Resistività apparente realizzati con l'OhmMapper a due velocità (Ohm V1 e Ohm V2) e con il Terrameter SAS 1000 (ABEM), utilizzando una distanza tra i dipoli di 5 m e indagando una profondità di 1,7 m circa.....	70
Fig. 3.15 – Dall'alto verso il basso, modello di resistività realizzato con il georesistivimetro ad accoppiamento galvanico ABEM Terrameter SAS1000 e sezione di resistività corrispondente al Rilievo 1 realizzato con l'OhmMapper nel sito della città romana di Sentinum. Nonostante la scala di valori utilizzata per i due modelli di resistività sia la medesima, è possibile apprezzare come i segnali ad alta resistività visibili sulla tomografia elettrica realizzata con il Terrameter abbiano valori più elevati rispetto ai corrispondenti sulla sezione di resistività ottenuta con l'OhmMapper.....	71
Fig. 3.16 – Profili di Resistività apparente realizzati con l'OhmMapper a due velocità (Ohm V1 e Ohm V2) utilizzando una distanza tra i dipoli di 1, 875 m e indagando una profondità di 0,9 m circa. Per quanto il profilo Ohm V1 (in rosso) sia molto frastagliato, perché caratterizzato da numerose acquisizioni, è possibile riconoscere il tipico andamento a M caratteristico degli array con il dipolo di potenziale esterno rispetto al dipolo di corrente.....	72
Fig. 4.1 – Posizionamento dei rilievi nell'area dell'ex mattatoio comunale di Rosarno su uno stralcio della Carta Topografica in scala 1:2000 fornita dall'Ufficio Tecnico del Comune di Rosarno.....	76
Fig. 4.2 – Scala di valori e colori utilizzata per l'interpretazione dei modelli di resistività di Rosarno.....	77
Fig. 4.3 – Posizionamento del Rilievo 1 realizzato all'interno dell'ex mattatoio di Rosarno.....	78
Fig. 4.4 – Rilievo 1 Rosarno – Sezioni di resistività 0-4.....	79

Fig. 4.5 - Rilievo 1 Rosarno – Sezioni di resistività 5-9.....	80
Fig. 4.6 - Rilievo 1 Rosarno – Mappe di resistività.....	81
Fig. 4.7 – Particolare del Rilievo 1 limitatamente al settore che insiste sull'area dei SAS2 1994/1995 (in grigio – da Iannelli 2005). Con le lettere A, F e G sono indicati i segnali di resistività individuati nelle sezioni e corrispondenti alle Unità Stratigrafiche Murarie (USM) riportati nella pianta di scavo.....	82
Fig. 4.8 – Posizionamento dei segnali di possibile natura archeologica superficiali (magenta) e profondi (verde) e delle aree meno perturbate da interventi antropici interpretabili come aree di rispetto attigue al santuario greco.....	87
Fig. 4.9 – Corrispondenza tra le USM rilevate durante il saggio SAS2 1994/1995 (da Iannelli 2005) e i segnali di resistività individuati.....	88
Fig. 4.10 – Analisi dell'andamento del profilo di resistività apparente acquisito con l'OhmMapper a Rosarno ad una profondità di circa 0,9 m in corrispondenza del target A ₈ interpretato come fondazione di natura archeologica.....	89
Fig. 4.11 – Speco e struttura dell'acquedotto romano di Firenze (in basso a destra nell'immagine) intercettato nel cantiere dell'alta velocità Firenze-Bologna.....	91
Fig. 4.12 – Posizionamento dei Rilievi sull'immagine da satellite orto rettificata (volo AIMA 2004) e sulla CTR della Regione Toscana in scala 1:10 000 (sezioni 263110 e 263150). Le tacche sulle linee indicano intervalli spaziali di 10 m per i Rilievi 2, 3, 4 e 5 e di 5 m per il Rilievo 1, corrispondenti alla spaziatura dei marks scelta durante l'acquisizione. Con il triangolo è indicata la posizione dell'acquedotto rinvenuto durante i lavori del cantiere.....	91
Fig. 4.13 – Scala di valori e colori utilizzata per l'interpretazione dei modelli di resistività di Sesto Fiorentino.....	93
Fig. 4.14 – Sezioni di resistività del sito di Sesto Fiorentino.....	94
Fig. 4.15 – Varie fasi operative adottate dai Romani per la costruzione degli acquedotti interrati; A= preparazione dello scavo, B= getto del fondo e delle fiancate in calcestruzzo e pietra, C= sistemazione e posa in opera della copertura, D= strato protettivo inferiore e copertura di terreno superiore. (da Adam 1988).....	95
Fig. 4.16 – Cantiere della galleria dell'alta velocità Firenze-Bologna nel 2006 responsabile del segnale C nel Rilievo 1.....	96
Fig. 4.17 – In rosso ricostruzione del percorso del tratto dell'acquedotto romano sull'immagine da satellite (volo AIMA 2004) e sulla CTR della Regione Toscana in scala 1:10 000 (sezioni 263110 e 263150). In blu è riportato il percorso ipotizzato da studi archeologici precedenti (Chiostrì 2002).....	97
Fig. 4.18 – Analisi dell'andamento del profilo di resistività apparente acquisito con l'OhmMapper a Sesto Fiorentino ad una profondità di circa 6 m in corrispondenza del target A ₄ (Rilievo 4) interpretato come speco dell'acquedotto romano.....	99
Fig. 4.19 – Ricostruzione schematica di un'indagine realizzata con l'OhmMapper in prossimità di un muro. Con la linea rossa è indicato il percorso effettuato dall'operatore. In una situazione come quella schematizzata non è possibile indagare le aree del sottosuolo in prossimità del muro.....	100
Fig. 5.1 – Posizionamento dei rilievi per l'indagine della villa tardo-antica presso Siena sulla CTR della Regione Toscana in scala 1:10 000 (sezione 286130).....	103
Fig. 5.2 – Scala di valori e colori utilizzata per l'interpretazione dei modelli di resistività nel sito della villa tardo-antica presso Siena.....	104
Fig. 5.3 – Schema illustrativo delle caratteristiche del sito. È possibile distinguere lo strato di arativo, lo strato antropizzato caratterizzato principalmente da crolli e dalla presenza delle strutture archeologiche, che in alcuni casi tagliano il substrato vergine di sabbie parzialmente sature.....	112
Fig. 5.4 – Distribuzione in pianta dei segnali di resistività interpretabili come elementi di natura archeologica attorno all'area di scavo della villa tardo-antica.....	113
Fig. 5.5 – Corrispondenza tra le USM rilevate durante il saggio di scavo successivo alla campagna di indagini geoelettriche e i segnali di resistività individuati.....	114
Fig. 5.6 – Analisi dell'andamento del profilo di resistività apparente acquisito con l'OhmMapper nei dintorni di Siena ad una profondità di circa 1 m in corrispondenza del target C (Rilievo 8), interpretato come fondazione di natura archeologica.....	115

Fig. 5.7 – Schematizzazione della parte percorribile del cunicolo oggetto di indagine e immagini dell'ingresso (A) e dei tratti interessati dalla presenza di detriti (D ed E).....	117
Fig. 5.8 – Posizionamento sulla pianta storica dell'Accademia di Villa Adriana redatta da Piranesi nel 1781 della linea di acquisizione di 32 m (in rosso) percorsa dall'operatore con l'OhmMapper. In giallo è possibile distinguere i percorsi dei cunicoli sotterranei riportati da Piranesi; cerchiato in azzurro l'ambiente da cui è possibile accedere al cunicolo oggetto di studio.....	117
Fig. 5.9 – Scala di valori e colori utilizzata per l'interpretazione dei modelli di resistività dell'Accademia di Villa Adriana.....	118
Fig. 5.10 – Posizionamento della linea di indagine e dei segnali A e B nell'area dell'Accademia di Villa Adriana. Veduta da Ovest.....	120
Fig. 5.11 – Confronto tra i modelli di resistività ottenuti con un georesistivimetro ad accoppiamento galvanico (array Schlumberger - 1) e l'OhmMapper (2) lungo la stessa linea di indagine nel sito dell'Accademia di Villa Adriana.....	121
Fig. 5.12 – Analisi dell'andamento del profilo di resistività apparente acquisito con l'OhmMapper nell'Accademia di Villa Adriana ad una profondità di circa 2,50 m in corrispondenza del target A interpretato come cunicolo cavo di passaggio tra gli ambienti della Villa.....	122
Fig. 5.13 – Posizionamento (dettaglio in D) dei Rilievi realizzati con l'OhmMapper (in arancione) e con il Terrameter SAS 1000 (in verde) sulla CTR in scala 1:10000 della Regione Marche (2001). Con A sono indicati i risultati poco chiari delle indagini magnetometriche (Bottacchi 2008), con B le fondazioni monumentali scoperte nel 1890 durante gli scavi della tratta ferroviaria Fabriano-Urbino (Mengarelli 1892) e con C le strutture archeologiche visibili in sezione sulle scarpate ai lati della ferrovia (Medri 2008).....	124
Fig. 5.14 – Scala di valori e colori utilizzata per l'interpretazione dei modelli di resistività di Sentinum.....	125
Fig. 5.15 – Visione da nord dell'area indagata con l'OhmMapper nel sito della città romana di Sentinum. Al centro dell'immagine è possibile vedere il gradino morfologico dovuto alla terra di risulta degli scavi archeologici.....	126
Fig. 5.16 - Rilievo nel sito della città romana di Sentinum – Sezioni di resistività.....	127
Fig. 5.17 – Rilievo nel sito della città romana di Sentinum – Mappe di resistività.....	128
Fig. 5.18 – Rilievo archeologico delle strutture US301 e US176 individuate sulla parete della sezione ovest della tratta ferroviaria Fabriano-Urbino.....	130
Fig. 5.19 – Rilievo nel sito della città romana di Sentinum – Modelli 3D di resistività.....	131
Fig. 5.20 – Risultati dell'interpretazione archeologica dei segnali di resistività individuati durante il survey nella città romana di Sentinum.....	132
Fig. 5.21 – Dall'alto verso il basso, sezione archeologica della scarpata ovest della ferrovia, modello di resistività realizzato con il georesistivimetro ad accoppiamento galvanico ABEM Terrameter SAS1000 e sezione di resistività corrispondente al Rilievo 1 realizzato con l'OhmMapper. In evidenza le corrispondenze tra le strutture presenti nel sottosuolo.....	133
Fig. 5.22 – Analisi dell'andamento del profilo di resistività apparente acquisito con l'OhmMapper a Sentinum lungo la linea 2, ad una profondità di circa 2,5 m, in corrispondenza del target C ₁ interpretato come fondazione di natura archeologica.....	134
Fig. 6.1 – Area Test per la geofisica: grafico di confronto tra i profili di Resistenza realizzati con l'OhmMapper a due velocità (Ohm V1 e Ohm V2) e con il Terrameter SAS 1000 (ABEM), utilizzando una distanza tra i dipoli di 1, 875 m e indagando una profondità di 0,9 m circa.....	137
Fig. 6.2 – Immagine esemplificativa della differenza di valori di resistività (apparente in A e reale in B) nei modelli realizzati nell'Area Test di Rovereto (A) e nel sito della città romana di Sentinum (B), ottenuti attraverso l'acquisizione con l'OhmMapper e con il georesistivimetro Terrameter SAS 1000.....	138
Fig. 6.3 – Sito dell'Accademia di Villa Adriana: confronto tra i modelli di resistività ottenuti con un georesistivimetro ad accoppiamento galvanico (array Schlumberger - 1) e l'OhmMapper (2) lungo la stessa linea di indagine. È possibile notare la corrispondenza tra i segnali interpretati come elementi di natura archeologica in entrambi i modelli.....	139
Fig. 6.4 – Sito della città romana di Sentinum: confronto tra i modelli di resistività ottenuti con un georesistivimetro ad accoppiamento galvanico (array dipolo-dipolo - 1) e l'OhmMapper (2) grossomodo lungo la stessa linea di indagine. È possibile notare la corrispondenza tra i segnali interpretati come elementi di natura archeologica in entrambi i modelli.....	139

<i>Fig. 6.5 – Villa Tardo-Antica presso Siena: corrispondenza tra le USM rilevate durante il saggio di scavo successivo alla campagna di indagini geoelettriche e i segnali di resistività (in rosso) interpretati come fondazioni di probabile natura archeologica.....</i>	<i>140</i>
<i>Fig. 6.6 – Confronto tra un profilo di resistività tipico acquisito in corrispondenza di un target verticale con resistività maggiore del contesto (1) e l'andamento dei profili di resistività acquisiti su target interpretati come elementi di natura archeologica nei siti di Rosarno (2), Sesto Fiorentino (3), campagna presso Siena (4), Villa Adriana (5) e Sentinum (6).....</i>	<i>141</i>

Indice delle tabelle

<i>Tab. 1.1 - Intervalli di resistività per alcune tipologie di rocce e terreni incontrati comunemente durante indagini geoelettriche in siti archeologici, secondo diversi autori.</i>	34
<i>Tab. 2.1 – Descrizione sintetica dei principali componenti dell’OhmMapper TRI.</i>	45
<i>Tab. 2.2 – Configurazione geometrica dell’OhmMapper con antenne da 2,5 m e 5 m.</i>	48
<i>Tab. 2.3 – Configurazione geometrica dell’OhmMapper con antenne da 7,5 m e 10 m.</i>	49
<i>Tab. 3.1 – Tipologia, materiali e dimensioni dei bersagli dell’Area Test di Rovereto.</i>	61
<i>Tab. 3.2 – Tabella riassuntiva delle caratteristiche geometriche e profondità di indagine dei profili realizzati nell’Area Test di Rovereto con l’OhmMapper e con il Terrameter SAS 1000.</i>	64
<i>Tab. 3.3 – Confronto tra il numero di misure e i tempi di acquisizione dei profili di lunghezza 10 m realizzati con l’OhmMapper a velocità V1 e V2 e con il Terrameter SAS 1000.</i>	73
<i>Tab. 4.1 – Configurazione dell’OhmMapper utilizzata durante il survey a Rosarno e relativa lunghezza dello strumento.</i>	76
<i>Tab. 4.2 – Configurazione dell’OhmMapper utilizzata durante il survey a Sesto Fiorentino per il Rilievo 1 e relativa lunghezza dello strumento.</i>	92
<i>Tab. 4.3 – Configurazione dell’OhmMapper utilizzata durante il survey a Sesto Fiorentino per il Rilievo 4 e relativa lunghezza dello strumento.</i>	92
<i>Tab. 4.4 – Configurazione dell’OhmMapper utilizzata durante il survey a Sesto Fiorentino per i Rilievi 2, 3 e 5 e relativa lunghezza dello strumento.</i>	92
<i>Tab. 5.1 – Configurazione dell’OhmMapper utilizzata durante i Rilievi 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8 e 9 nella villa tardo-antica presso Siena e relativa lunghezza dello strumento. Per i Rilievi 1, 2 e 9 la profondità massima indagata è stata di circa 2 m; per i Rilievi 3 e 5 la profondità massima indagata è stata di circa 2,7 m; per i Rilievi 6 e 7 la profondità massima indagata è stata di circa 2,4 m; per il Rilievo 8 la profondità massima indagata è stata di circa 1,7 m.</i>	103
<i>Tab. 5.2 – Configurazione dell’OhmMapper utilizzata per realizzare il Rilievo 4 nella villa tardo-antica presso Siena e relativa lunghezza dello strumento.</i>	104
<i>Tab. 5.3 – Configurazione dell’OhmMapper utilizzata durante il survey nell’Accademia di Villa Adriana e relativa lunghezza dello strumento.</i>	118
<i>Tab. 5.4 – Configurazione dell’OhmMapper utilizzata durante il survey a Sentinum e relativa lunghezza dello strumento.</i>	123

Introduzione

Il progetto di ricerca realizzato durante l'attività di dottorato si colloca nell'ambito dell'applicazione geofisica in campo archeologico e consiste nello studio delle potenzialità del georesistivimetro OhmMapper (Geometrics Inc.) ad accoppiamento capacitivo impiegato per indagini geoelettriche di dettaglio in contesti archeologici estesi.

Il contributo che le geotecnologie possono apportare all'indagine degli strati più superficiali del terreno, interessati dalla presenza di manufatti o più generalmente da presistenze di natura antropica, è ormai noto da tempo a livello internazionale: in particolare i metodi geofisici sono impiegati sempre più frequentemente in contesti archeologici, con lo scopo di individuare la presenza di elementi antropici sepolti, determinare l'ampiezza dell'area di interesse ed indirizzare le indagini future. Le prospezioni geofisiche, in quanto metodologie non invasive, hanno acquisito ancora maggiore importanza in ambito nazionale con l'introduzione di una serie di decreti legge¹, che prevedono l'utilizzo di "indagini archeologiche e geologiche preliminari" all'intervento di scavo per la realizzazione di opere pubbliche o di grandi infrastrutture, con il fine di verificare la possibile presenza di evidenze di interesse archeologico.

Le diverse metodologie di prospezione geofisica consentono di acquisire ed interpretare alcune proprietà costitutive del terreno e degli elementi antropici in esso contenuti in tempi brevi e con costi ridotti rispetto ad un'indagine di tipo stratigrafico. In particolare, attraverso misure di resistività è possibile individuare con buona precisione la geometria e la profondità a cui sono sepolti gli elementi contenuti nel sottosuolo, proprio sfruttando il contrasto, in termini di resistività elettrica, tra gli elementi antropici ed i corpi stratigrafici ospitanti.

Lo studio viene affrontato inizialmente fornendo le conoscenze indispensabili per comprendere il metodo della resistività (**Capitolo 1**): verranno innanzitutto chiariti i riferimenti teorici di fisica alla base di una misura di resistività, per poi definire le disposizioni elettrodiche tipiche di un georesistivimetro ad accoppiamento galvanico di uso tradizionale; saranno poi trattati i diversi modelli di resistività e l'approccio interpretativo tipico del contesto archeologico.

¹ Decreto legge 63/2005; Decreto legislativo 163/2006.

Questa fase di impostazione teorica del lavoro terminerà con un breve excursus sull'evoluzione del metodo della resistività in contesti archeologici: verrà trattato lo sviluppo dell'uso del metodo geoelettrico in archeologia da metà Novecento ad oggi, senza trascurare l'evoluzione delle strumentazioni e degli obiettivi della ricerca archeologica.

La maggiore difficoltà pratica incontrata nell'attuare misure di resistività mediante un georesistivimetro ad accoppiamento galvanico consiste nell'inserire gli elettrodi nel terreno, operazione che richiede molto tempo e che non facilita la rapida realizzazione di più rilievi di resistività nell'area da indagare, soprattutto quando si intende produrre un modello tridimensionale della resistività del sottosuolo². Questo ostacolo può essere facilmente superato con l'impiego del georesistivimetro ad accoppiamento capacitivo OhmMapper, strumento prodotto dalla Geometrics Inc. e recentemente commercializzato.

Il funzionamento dell'OhmMapper, basato su elettrodi ad accoppiamento capacitivo, sarà presentato nel **Capitolo 2**, in cui, oltre alle caratteristiche fisiche dell'accoppiamento capacitivo, saranno illustrati i componenti dell'OhmMapper e le procedure di campagna necessarie a realizzare diverse tipologie di modelli di resistività monodimensionali, bidimensionali e tridimensionali.

La conoscenza dettagliata dello strumento e delle sue caratteristiche fisiche e funzionali è fondamentale per lo studio delle potenzialità dell'OhmMapper per individuare elementi sepolti di natura archeologica con la stessa affidabilità di uno strumento di utilizzo più tradizionale come un georesistivimetro ad accoppiamento galvanico.

La configurazione utilizzata dallo strumento è assimilabile a quella di un dipolo-dipolo, molto sensibile alle variazioni orizzontali della resistività: per questo l'OhmMapper risulta particolarmente adatto all'individuazione di strutture verticali, come cavità e strutture antropiche murarie. Questo tipo di configurazione, unita all'alta densità dei dati acquisiti, permette di ottenere profili di resistività ad alta risoluzione anche in situazioni complesse del sottosuolo: grazie a queste peculiarità, l'OhmMapper è particolarmente adeguato nelle indagini geoelettriche applicate all'archeologia, dove le strutture antropiche (muri, tombe, fondazioni, strade) solitamente hanno un andamento verticale e si trovano a basse profondità. Tramite l'OhmMapper si possono realizzare anche ricostruzioni tridimensionali del sottosuolo e mappe di resistività a profondità diverse.

² Papadopulos 2006.

Per verificare l'affidabilità dello strumento è stato realizzato uno studio sistematico (**Capitolo 3**) attraverso il confronto dei risultati ottenuti utilizzando l'OhmMapper con quelli ottenuti utilizzando il georesistivimetro tradizionale ad accoppiamento galvanico Terrameter SAS 1000 (ABEM, Sweden) nel contesto noto e controllato dell'Area Test di Bosco della Città gestita dal Museo Civico di Rovereto (TN): il confronto dei profili di resistività realizzati con i due differenti strumenti sullo stesso target noto, con caratteristiche compatibili con quelle di strutture presenti in un sito archeologico, ha permesso di ottenere un'importante taratura dello strumento e di valutare l'attendibilità dei risultati.

Alla luce degli elementi ottenuti dal confronto incrociato dei due strumenti, sono state compiute con l'OhmMapper indagini geoelettriche estese e sistematiche in alcuni siti archeologici campione.

Nei **Capitoli 4 e 5** saranno presentati i risultati delle indagini realizzate con il georesistivimetro ad accoppiamento capacitivo OhmMapper in siti archeologici che si trovano in contesti urbani moderni (Rosarno e Sesto Fiorentino) e in contesti extraurbani (campagna di Siena, Tivoli e Sassoferrato), utilizzando in tutti i casi lo stesso approccio di analisi. I siti archeologici selezionati sono quelli in cui le indagini di resistività effettuate con l'OhmMapper sono risultate essere più complete e verificabili. Lo strumento è stato utilizzato in modo sperimentale anche in altri numerosi siti in Italia e all'estero³, in collaborazione con altre Università, Soprintendenze Archeologiche ed Enti Pubblici.

Dopo un breve inquadramento archeologico e geologico dell'area, sarà definita la metodologia di analisi dei risultati, dal momento che una buona interpretazione necessita di una scala di rappresentazione adeguata. Successivamente verranno riportati i risultati delle indagini, corredati da tutti i dati tecnici: ogni modello di resistività deriva da un processo di inversione applicato mediante software specializzati (Res2Dinv e Res3Dinv, Geotomo Software) e, una volta prodotto, è interpretato in chiave archeologica. Infine, per ognuno dei siti indagati, saranno riportati i dati archeologici o di altre indagini di resistività che

³ Durante i tre anni dedicati alla ricerca, l'OhmMapper è stato utilizzato anche nel castrum romano di Burnum (Dmiš – Croazia), nei territori dei comuni di Capannole (AR) e Carpi (MO), per l'indagine delle miniere preistoriche di selce in Gargano (FG), nel sito della città etrusca di Marzabotto (BO), in altre aree della città romana di Sentinum (AN), nella città romana di Suasa (AN), all'interno della chiesa di Santa Maria Assunta di Trento e nei pressi dell'edificio della contrada Valdimontone a Siena. Le indagini sono state svolte grazie alla collaborazione con il Dipartimento di Archeologia dell'Università degli Studi di Bologna, i gruppi archeologici di Carpi e di Capannole, le Soprintendenze Archeologiche e i Comuni di competenza di ogni sito archeologico indagato.

permettono di confermare le interpretazioni dei segnali individuati sui modelli di resistività realizzati con l'OhmMapper.

I risultati ottenuti consentiranno di verificare l'attendibilità delle misure in situ rapportandole con i dati ottenuti nell'Area Test di Rovereto. Infatti, nello studio conclusivo di ogni sito sarà analizzato l'andamento di un profilo campione in corrispondenza di un target interpretato come archeologico e confrontato con l'andamento di uno dei profili acquisiti nell'Area Test di Rovereto in corrispondenza del target noto. In questo modo potrà essere ulteriormente confermata l'efficacia dello strumento per individuare elementi ad alta resistività con andamento verticale immersi in un contesto a resistività più bassa.

In particolare, nel sito della città romana di Sentinum (Sassoferrato – AN) l'OhmMapper è stato utilizzato al massimo delle sue potenzialità per l'acquisizione di misure di resistività, sia in sezione che in pianta, realizzando modelli bidimensionali e tridimensionali del sottosuolo con margini d'errore noti per quanto riguarda la geometria e la localizzazione delle strutture archeologiche. Per ottenere un'ulteriore verifica dell'efficacia delle misure, alcune sezioni di resistività realizzate con l'OhmMapper sono state ripetute con il georesistivimetro ad accoppiamento galvanico Terrameter SAS 1000 utilizzando una configurazione dipolo-dipolo (analoga a quella utilizzata dall'OhmMapper) e confrontate con il rilievo archeologico di dettaglio della sezione esposta in corrispondenza della tratta ferroviaria Fabriano-Urbino che attraversa il sito della città romana. Il confronto delle misure di resistività realizzate con i due strumenti con le evidenze archeologiche visibili in sezione ha permesso di dimostrare l'efficacia delle indagini realizzate con il georesistivimetro OhmMapper in contesti archeologici con caratteristiche analoghe a quelle della città romana di Sentinum.

Un'analisi del genere permette una revisione a posteriori delle evidenze scaturite dall'indagine di campagna, solo se integrata con le competenze archeologiche relative ad ogni singolo contesto preso in esame. I casi di studio presentati sono situazioni ideali per l'utilizzo dell'OhmMapper e per questo adeguate a perseguire l'obiettivo della ricerca, ossia sperimentare l'efficacia dello strumento in campo archeologico.

1 Il metodo della resistività e sue applicazioni in campo archeologico

In questo capitolo verranno presentati gli elementi indispensabili per una comprensione consapevole di una misura di resistività elettrica e di come può essere utilizzata per individuare bersagli di natura archeologica.

In particolare, dopo aver presentato brevemente i riferimenti teorici di fisica che stanno alla base del metodo della resistività, sarà trattato più nel dettaglio il sistema ad accoppiamento capacitivo, alla base del funzionamento del georesistivimetro OhmMapper.

A conclusione del capitolo, un breve excursus storico sull'applicazione dei metodi geoelettrici in campo archeologico e sulla loro evoluzione nel tempo.

1.1 Teoria alla base del metodo geoelettrico

Le indagini geoelettriche sono tra i metodi geofisici più utilizzati per lo studio del sottosuolo in contesti archeologici: lo scopo è quello di ricavare informazioni riguardanti la geometria e la localizzazione dei corpi stratigrafici e di elementi antropici sepolti alla luce delle loro proprietà elettriche. In particolare il metodo della resistività si realizza attraverso la misura della differenza di potenziale elettrico in diversi punti della superficie del terreno. L'obiettivo è ricostruire modelli di resistività del sottosuolo attraverso un processo di inversione dei dati acquisiti in campagna.

Questa tipologia di rilievi non invasivi (si definiscono “non invasivi” poiché non prevedono significative perturbazioni del suolo come saggi di scavo, buche o pozzi; va segnalato, tuttavia, che l'immissione per alcuni cm di elettrodi metallici in determinanti contesti quali pavimentazioni storiche, lastricati e selciati può essere considerata “invasiva”) si basa sui principi che descrivono la conduzione elettrica attraverso un mezzo: più una sostanza si lascia attraversare da portatori di carica, più essa viene definita conduttiva; viceversa essa è definita resistiva. Quando si fanno fluire ΔQ cariche elettriche attraverso un conduttore è possibile misurarne il passaggio in un tempo Δt ; è possibile pertanto definire il concetto di corrente elettrica (I):

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = I \quad (1.1)$$

In presenza di un conduttore ohmico⁴ la corrente elettrica incontra una resistenza (R), misurata in Ohm, che dipende dalla differenza di potenziale (V), misurata in Volt, e dalla corrente (I) secondo la relazione (Legge di Ohm):

$$R = \frac{V}{I} \quad (1.2)$$

Per un conduttore omogeneo⁵, isotropo⁶ e cilindrico di sezione S e lunghezza l (Fig. 1.1), la resistenza elettrica (R) può essere espressa come:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1.3)$$

dove con (ρ) si indica la resistività tipica del materiale: la resistività è l'attitudine di un materiale a opporre resistenza al passaggio delle cariche elettriche. Dall'equazione (1.3) risulta evidente che la resistenza elettrica di un materiale dipende non solo dalle sue proprietà fisiche ma anche dalle sue caratteristiche geometriche.

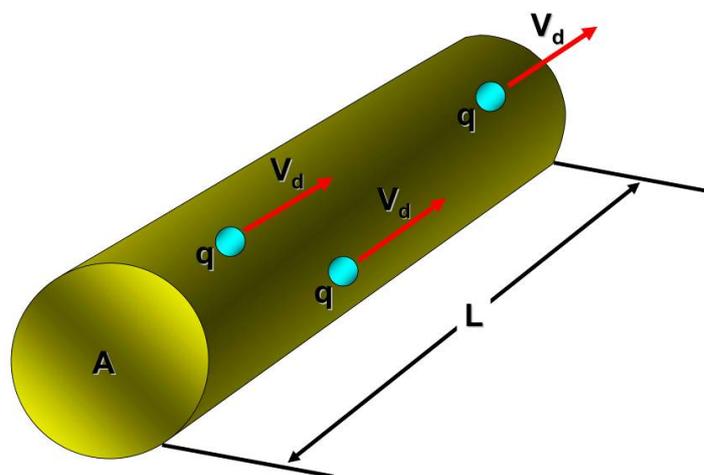


Fig. 1.1 - La resistenza di un filo dipende dal materiale con cui è fatto e dalle sue dimensioni.

⁴ Un conduttore ohmico è un conduttore elettrico per cui vale la legge di Ohm.

⁵ Per conduttore omogeneo si intende un corpo in cui ogni sua parte ha le stesse proprietà fisiche.

⁶ È definito isotropo un corpo le cui proprietà fisiche non dipendono dalla direzione lungo le quali vengono considerate.

1.2 Descrizione del metodo della resistività

Il metodo geoelettrico della resistività prevede l'energizzazione del terreno (generalmente attraverso una batteria) con corrente continua I ed una misura diretta sulla superficie del suolo della differenza di potenziale (V). Combinando le relazioni (1.2) e (1.3) è possibile scrivere la relazione:

$$g \frac{V}{I} = \rho_a \quad (1.4)$$

dove con (g) si indica un fattore geometrico (misurato in metri) e con ρ_a resistività apparente, la quale è influenzata dal contributo delle diverse resistività degli elementi presenti nel sottosuolo. A differenza del modello cilindrico precedentemente descritto, nel caso di una misura geofisica non si verificano le condizioni di omogeneità ed isotropia del mezzo (il sottosuolo è generalmente molto eterogeneo ed anisotropo dal punto di vista elettrico): è pertanto necessario introdurre il concetto di resistività apparente (Fig. 1.2). Un successivo processo di inversione consente di passare dalle misure di resistività apparente al modello di resistività.

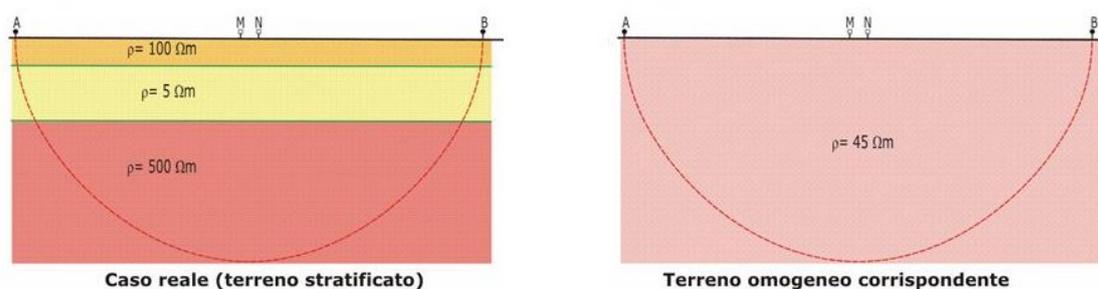


Fig. 1.2 – Esempificazione schematica delle diverse resistività del terreno (a sinistra) e della resistività apparente misurata dallo strumento (a destra).

Per realizzare misure di resistività si utilizzano 2 elettrodi conduttivi (chiamati convenzionalmente C_1 e C_2) che, a contatto con il terreno, permettono l'immissione della corrente elettrica. A distanza nota, attraverso altri due elettrodi (chiamati convenzionalmente P_1 e P_2), viene misurata la differenza di potenziale (ΔV).

Nella maggior parte delle indagini, la differenza di potenziale si misura tra due punti (normalmente posizionati in superficie). Si considerano dunque due elettrodi di corrente C_1 e C_2 posti alle distanze r_1 ed r_2 dal punto P_1 (Fig. 1.3), il potenziale V_{P_1} in P_1 sarà la somma di due potenziali $V_{P_1}^1$ e $V_{P_1}^2$ dovuti rispettivamente a C_1 e C_2 , per cui, tenendo conto che la corrente I nei due elettrodi è uguale, ma di segno opposto, risulta:

$$V_{P_1} = V_{P_1}^1 + V_{P_1}^2 = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (1.5)$$

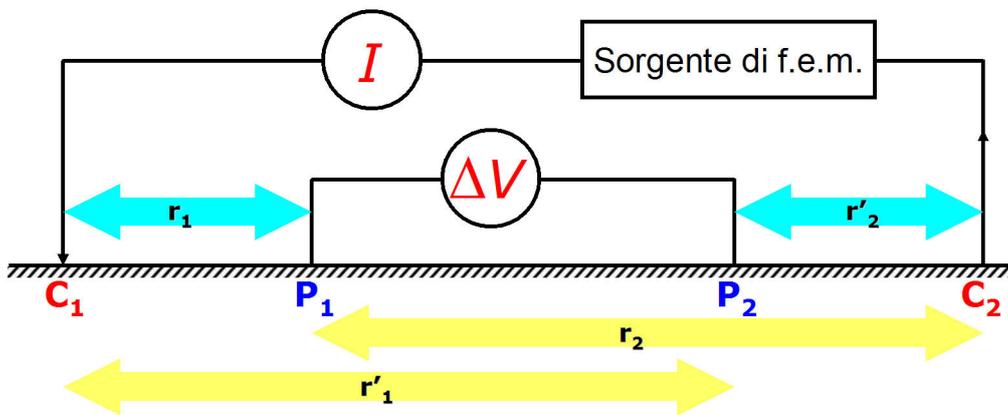


Fig. 1.3 - Disposizione quadripolare. C_1 e C_2 elettrodi di corrente, P_1 e P_2 elettrodi di potenziale.

Se si considera un altro punto P_2 , nel quale viene infissa una seconda sonda, il potenziale in P_2 sarà:

$$V_{P_2} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r'_1} - \frac{1}{r'_2} \right) \quad (1.6)$$

Dove r'_1 ed r'_2 sono le distanze della seconda sonda rispettivamente da C_1 e C_2 . La differenza di potenziale ΔV tra i punti P_1 e P_2 sarà espressa da:

$$\Delta V = V_{P_1} - V_{P_2} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{C_1P_1}} - \frac{1}{r_{C_2P_1}} - \frac{1}{r_{C_1P_2}} + \frac{1}{r_{C_2P_2}} \right) \quad (1.7)$$

Questa equazione fornisce il potenziale misurabile in un mezzo omogeneo con una disposizione di 4 elettrodi. A questa disposizione, in cui si impiegano due elettrodi di corrente e due elettrodi di potenziale, si dà il nome di quadripolo. La Fig. 1.4 rappresenta in pianta ed in sezione verticale e linee di equipotenziale (in azzurro) e dei filetti di corrente (in verde).

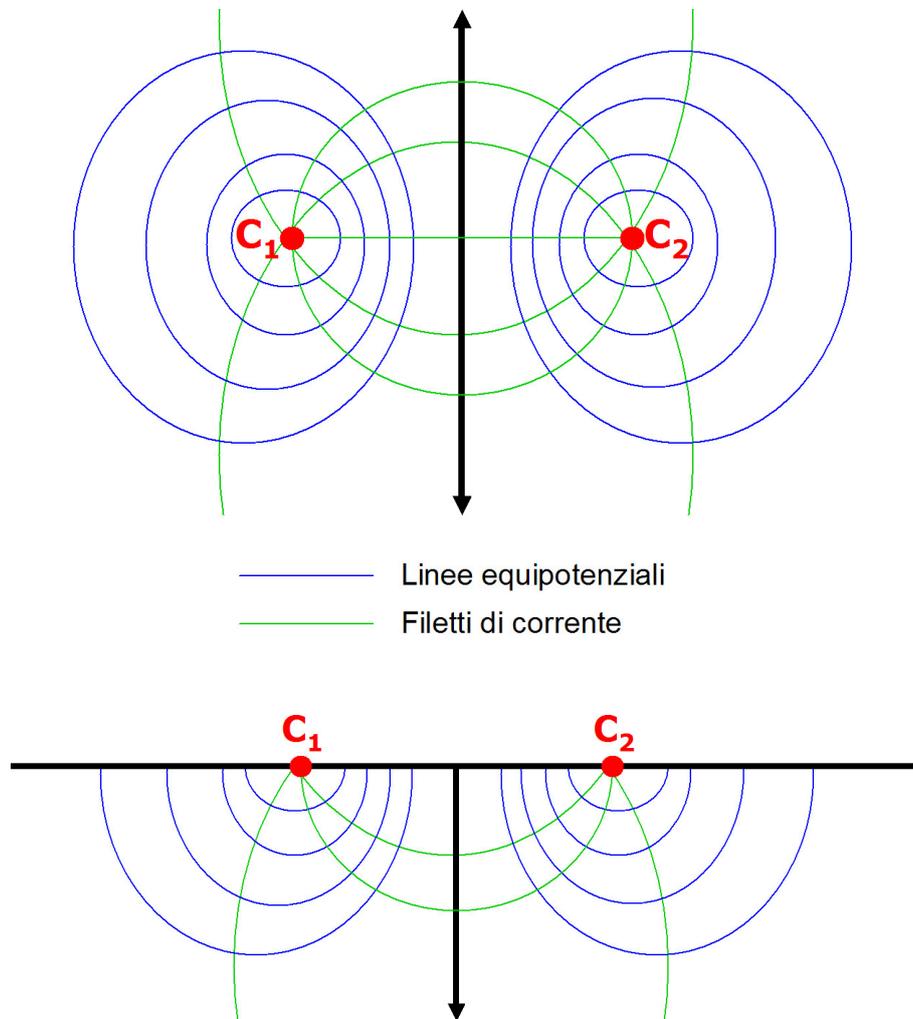


Fig. 1.4 - Rappresentazione delle linee di equipotenziale e dei filetti di corrente in pianta ed in sezione.

Nella configurazione a quadripolo le cariche nel passare da un elettrodo all'altro percorrono linee di corrente a profondità diverse: maggiore è la separazione tra C_1 e C_2 , maggiore è la diffusione della corrente nel terreno (e di conseguenza la profondità raggiunta) e minore è la differenza di potenziale registrata in superficie al centro del quadripolo (con P_1 e P_2 fissati).

1.3 Disposizioni elettrodeiche

Le indagini condotte in casi reali sono realizzate su un mezzo non omogeneo dove la resistività del sottosuolo ha una distribuzione tridimensionale. Le misure di resistività sono effettuate immettendo corrente nel terreno attraverso i due elettrodi di corrente (C_1 e C_2) e misurando la relativa differenza di potenziale in corrispondenza dei due elettrodi di potenziale (P_1 e P_2) (Fig. 1.5).

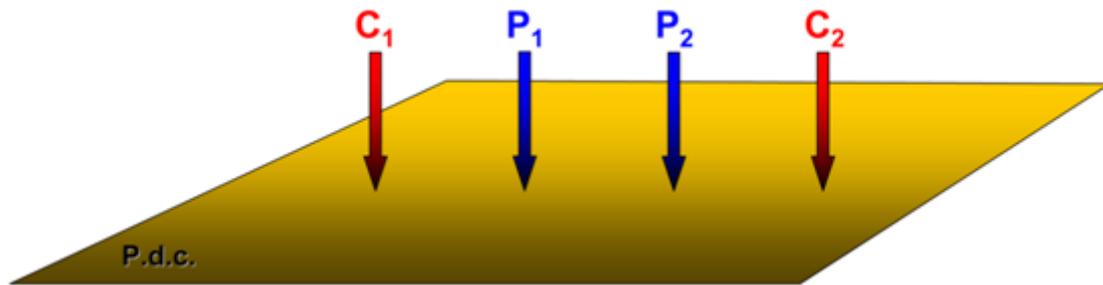


Fig. 1.5 - Un tipico array con 4 elettrodi per misure di resistività del sottosuolo dal piano di campagna (P.d.c.).

Gli elettrodi di corrente e di potenziale vengono disposti sul terreno con diverse configurazioni. L'equazione (1.7) associata al quadripolo vale per qualsiasi disposizione degli elettrodi, inoltre occorre precisare che tale formula è valida anche se considerassimo P_1 e P_2 elettrodi di corrente mentre C_1 e C_2 di potenziale.

La metodologia di acquisizione può variare a seconda di come vengono disposti sul terreno gli elettrodi di corrente e di potenziale: le configurazioni più comunemente utilizzate in contesti archeologici sono chiamate Wenner, Schlumberger e dipolo-dipolo.

La disposizione Wenner considera i quattro elettrodi allineati ed equidistanti (Fig. 1.6).



Fig. 1.6 - Configurazione elettrodeica Wenner.

Per cui se indichiamo:

$$C_1-P_1 = r_1 = a$$

$$C_1-P_2 = r'_1 = 2a$$

$$P_1-C_2 = r_2 = 2a$$

$$P_2-C_2 = r'_2 = a$$

Partendo da

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{C_1P_1}} - \frac{1}{r_{C_2P_1}} - \frac{1}{r_{C_1P_2}} + \frac{1}{r_{C_2P_2}} \right)$$

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{a} \right) = \left(\frac{2}{a} - \frac{1}{a} \right) = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{a} \right)$$

(1.8)

Questo metodo di acquisizione risulta essere particolarmente sensibile ai cambiamenti verticali di resistività al di sotto del centro dello stendimento, ma meno sensibile alle variazioni di resistività orizzontali. Esso, pertanto, risulta essere adeguato nel caso si vogliano individuare strutture orizzontali (quali stratificazioni o pavimentazioni). In presenza di strutture verticali (ovvero con variazioni di resistività orizzontali) questo metodo risulta essere meno adatto.

Nella disposizione Schlumberger la distanza tra gli elettrodi di misura P_1 e P_2 è piccola rispetto alla distanza C_1-C_2 ; gli elettrodi sono in linea e generalmente viene rispettata la simmetria rispetto al punto di stazione (Fig. 1.7). In questo caso la distanza è determinata da n (numero naturale).

Questa configurazione è discretamente sensibile sia alle strutture orizzontali sia alle strutture verticali.

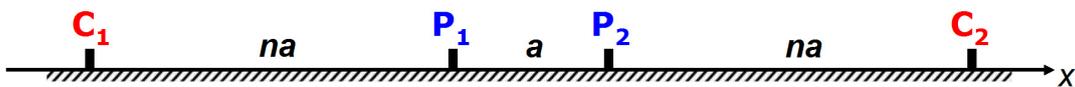


Fig. 1.7 - Configurazione elettrodica Schlumberger.

Per cui se indichiamo:

$$C_1-P_1 = r_1 = na$$

$$C_1-P_2 = r'_1 = (n+1)a$$

$$P_1-C_2 = r_2 = (n+1)a$$

$$P_2-C_2 = r'_2 = na$$

Partendo sempre da
$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{C_1P_1}} - \frac{1}{r_{C_2P_1}} - \frac{1}{r_{C_1P_2}} + \frac{1}{r_{C_2P_2}} \right)$$

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{2}{na} - \frac{2}{(n+1)a} \right) = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{2(n+1) - 2n}{n(n+1)a} \right) = \frac{\rho I}{\pi n(n+1)a} \quad (1.9)$$

La disposizione dipolo-dipolo prevede gli elettrodi di corrente collocati a molta distanza dagli elettrodi di misura (Fig. 1.8).

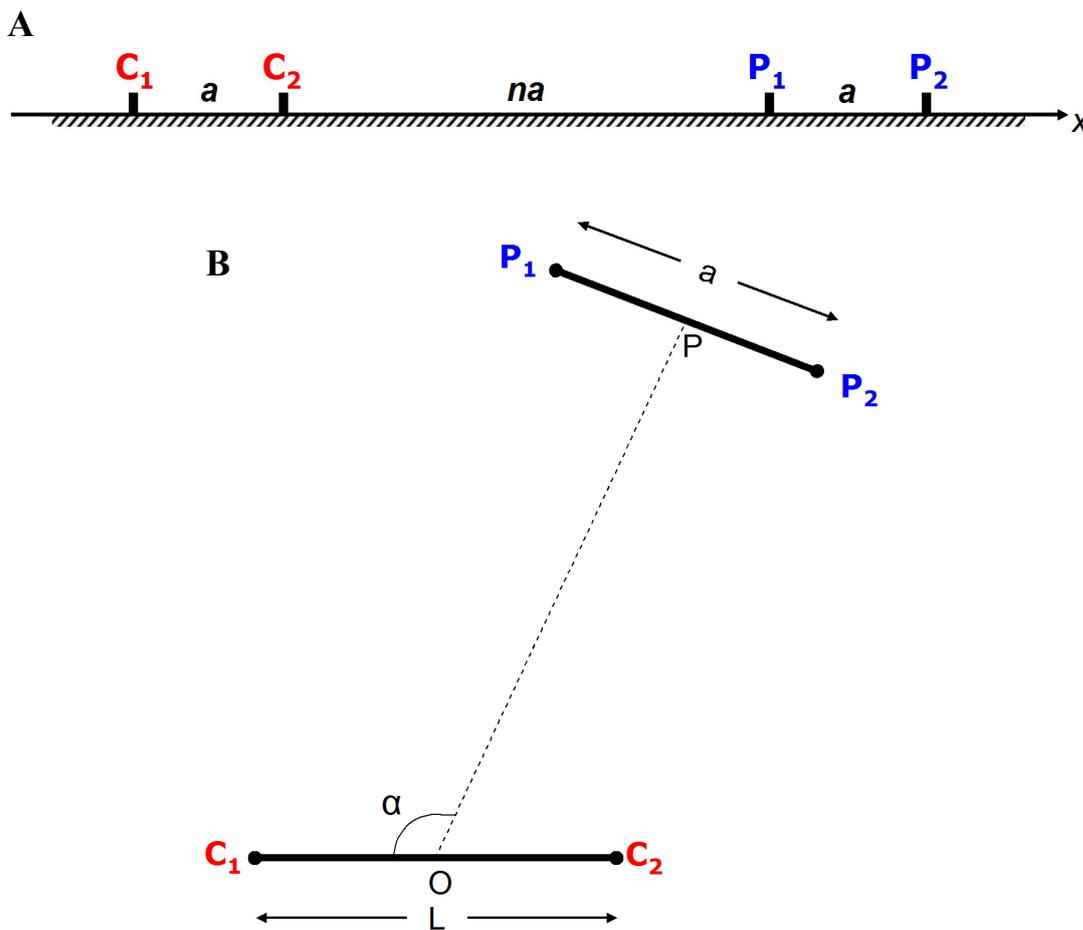


Fig. 1.8 - Configurazione elettroica dipolo-dipolo con gli elettrodi di potenziale in asse con quelli di corrente (A), oppure fuori asse (B).

Per cui se indichiamo:

$$C_1-P_1 = r_1 = (n+1)a$$

$$C_1-P_2 = r'_1 = (n+2)a$$

$$P_1-C_2 = r_2 = na$$

$$P_2-C_2 = r'_2 = (n+1)a$$

Partendo sempre da
$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{C_1P_1}} - \frac{1}{r_{C_2P_1}} - \frac{1}{r_{C_1P_2}} + \frac{1}{r_{C_2P_2}} \right)$$

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{(n+2)n - (n+1)(n+2) - (n+1)n + (n+2)n}{(n+1)(n+2)na} \right) = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{-2}{(n+1)(n+2)na} \right)$$

$$\Delta V = -\frac{\rho I}{\pi(n+1)(n+2)na}$$

(1.10)

Questo assetto è particolarmente sensibile alle strutture verticali, ma poco adatto all'indagine stratigrafica orizzontale: per questa ragione può essere particolarmente efficace in contesti archeologici il cui obiettivo spesso è quello di evidenziare strutture antropiche (muri, cisterne, trincee, ecc.) che provocano forti discontinuità orizzontali di resistività.

Dai valori di corrente (I) e di potenziale (ΔV), si calcola un valore di resistività apparente ρ_a .

$$\rho_a = kR$$

(1.11)

Dove

$$k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{r_{C_1P_1}} - \frac{1}{r_{C_2P_1}} - \frac{1}{r_{C_1P_2}} + \frac{1}{r_{C_2P_2}} \right)}$$

(1.12)

K è un fattore geometrico che dipende dal tipo di disposizione dei 4 elettrodi. Gli strumenti di misura della resistività forniscono normalmente un valore di resistenza, $R = \Delta\phi/I$, quindi il valore di resistività apparente viene calcolato mediante l'equazione (1.11).

Come risulta evidente dai precedenti valori di ΔV ricavati, per ogni configurazione elettrodica è possibile determinare il relativo fattore k :

Wenner
$$K = 2\pi a$$

(1.13)

Schlumberger
$$K = \pi n(n+1)a$$

(1.14)

Dipolo-dipolo
$$K = \pi n(n+1)(n+2)a$$

(1.15)

Una volta che sono stati posizionati gli elettrodi C_1 , C_2 , P_1 e P_2 , è possibile compiere una misura di resistività, alimentando con una corrente elettrica C_1 e C_2 e registrando la differenza di potenziale in P_1 e P_2 . Allargando ad ogni misura i quattro elettrodi mantenendo invariato il centro del quadripolo si ottiene un sondaggio elettrico verticale (SEV) (Fig. 1.9), mentre spostando ad ogni misura i quattro elettrodi lungo un allineamento orizzontale si realizza un profilo di resistività a profondità costante o sondaggio elettrico orizzontale (SEO).

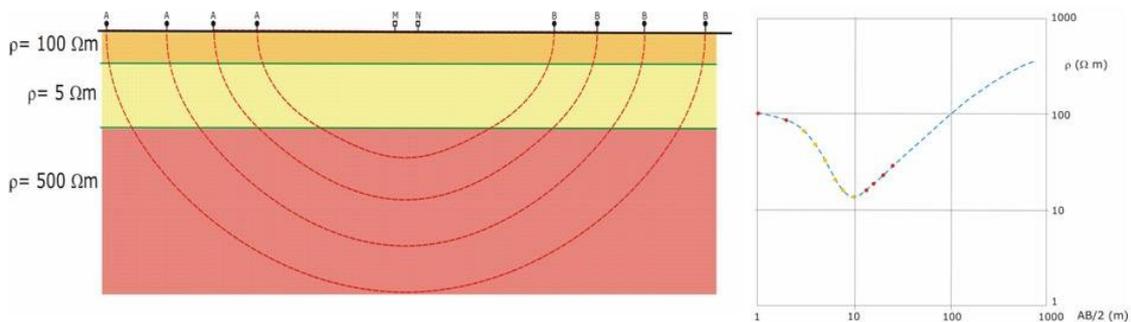


Fig. 1.9 – Esempificazione schematica di un SEV realizzato con il metodo Schlumberger e relativo modello di resistività 1D.

In contesti archeologici in cui la profondità delle strutture antropiche è nota con una buona approssimazione, il profilo di resistività è il metodo 1D più comunemente utilizzato.

Fissata una linea è possibile realizzare più profili a profondità crescenti: il risultato è un insieme di misure che formano una sezione 2D di resistività apparente, detta pseudosezione. Un sondaggio elettrico 2D (Fig. 1.10) è pertanto un'indagine bidimensionale che permette lo studio delle variazioni di resistività sia lungo la direzione verticale sia lungo una direzione orizzontale.

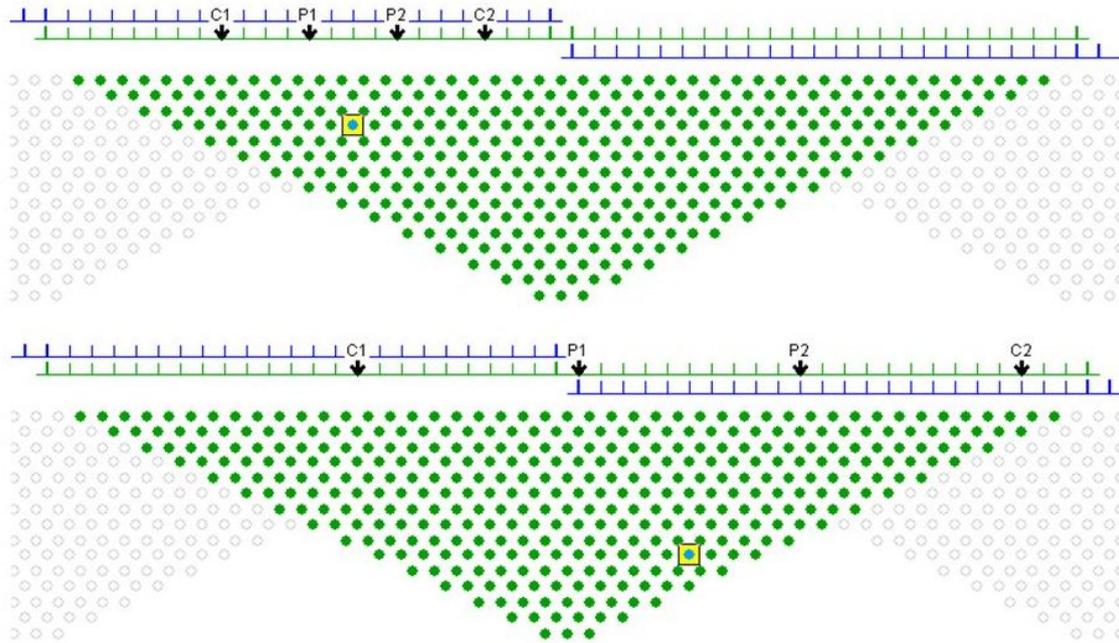


Fig. 1.10 – Rappresentazione schematica della realizzazione di un'acquisizione 2D con un georesistivometro ad accoppiamento galvanico.

Attraverso un processo di inversione è possibile elaborare le misure di resistività apparente per ottenere un modello 2D di resistività del sottosuolo chiamato tomografia elettrica.

Questo tipo di acquisizione 2D è indubbiamente molto laboriosa se gli elettrodi del quadripolo devono essere spostati sul terreno ogni volta che si compie la misura: questo problema è stato risolto impiantando nel terreno decine di elettrodi collegati attraverso cavi elettrici ad una centralina computerizzata che ne gestisce l'attivazione. Con i recenti georesistivometri (Fig. 1.11) si è in grado di realizzare misure con stendimenti formati da centinaia di elettrodi.

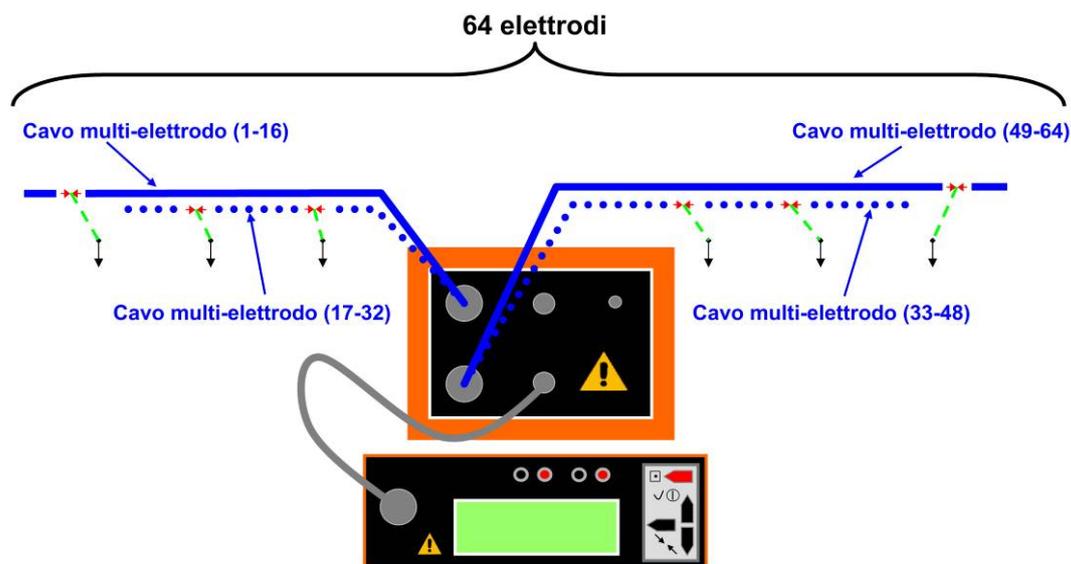


Fig. 1.11 – Schema semplificato di un georesistivometro: cavo multielettrodo (64 elettrodi) collegato agli elettrodi (rappresentati dalle frecce nere) e alla centralina di alimentazione e gestione del sistema.

Divisa un'area con una maglia regolare di linee parallele (Fig. 1.12) è possibile realizzare più sezioni di resistività: il risultato è un insieme di misure che formano un modello 3D di resistività apparente. Un'indagine elettrica 3D è pertanto un'indagine tridimensionale che permette lo studio delle variazioni di resistività in un'area del sottosuolo. Attraverso un processo di inversione è possibile elaborare le misure di resistività apparente per ottenere un modello 3D di resistività del sottosuolo, che tiene conto delle variazioni di resistività in ogni direzione.

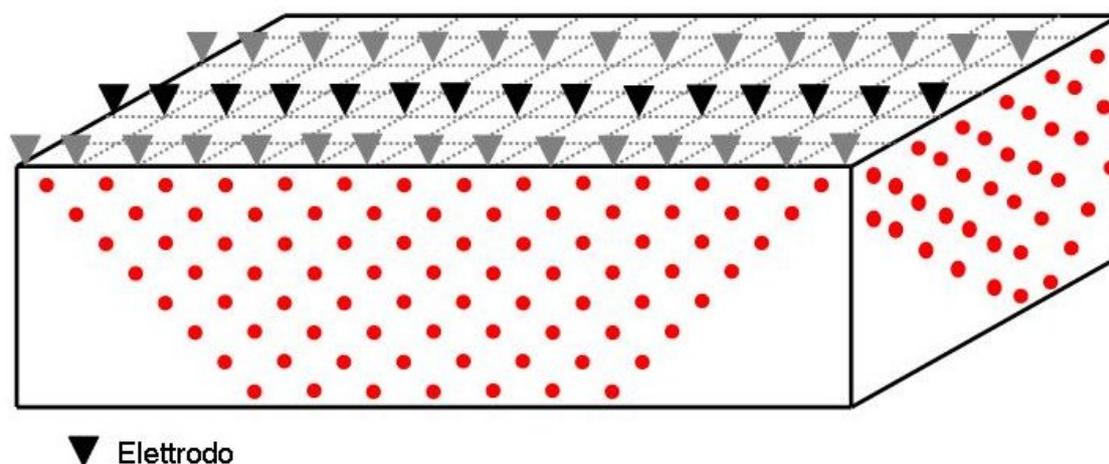


Fig. 1.12 – Rappresentazione schematica della realizzazione di un'acquisizione 3D con un georesistivometro ad accoppiamento galvanico.

1.4 Dal modello di resistività all'interpretazione

Come visto nel paragrafo precedente l'obiettivo delle indagini geoelettriche è la ricostruzione di modelli di resistività del sottosuolo partendo da misure di resistività apparente. I modelli di resistività 1D, 2D e 3D sono il risultato di un insieme di delicate operazioni sul campo e in laboratorio: solo un operatore pienamente consapevole di tutti i passaggi è in grado di ricavare informazioni utili da un'indagine geoelettrica. L'interpretazione dei modelli di resistività, soprattutto in campo archeologico, va condotta con la massima attenzione e prudenza. È molto facile, infatti, cadere in facili approssimazioni o arrivare a conclusioni troppo affrettate.

Prima di tutto va ricordato che, oltre alle inevitabili anisotropie e disomogeneità del terreno che impediscono una ricostruzione univoca del modello geometrico, la resistività del sottosuolo dipende da diversi fattori quali porosità, presenza di fluidi, composizione mineralogica, grado di fratturazione, grado di saturazione nonché presenza di sostanze organiche (idrocarburi, solventi, etc.). In particolare, la resistività delle rocce è sempre maggiore a quella dell'acqua nei pori, è minima in corrispondenza del grado di saturazione massimo ed è tanto minore quanto maggiore è la porosità. Come risulta evidente osservando i valori riportati in Tab 1.1, anche per singole classi di rocce o terreni si registra una grande variabilità di valori di resistività, a volte anche di diversi ordini di grandezza.

I sedimenti non consolidati generalmente hanno resistività inferiore rispetto alle rocce sedimentarie, tuttavia, proprio perché poco consolidati, risulta difficile stimare il valore della loro resistività, che dipende dalla porosità e dal contenuto in argilla. I terreni argillosi possiedono comunemente valori di resistività inferiori a quelli dei terreni sabbiosi. Il contenuto idrico, infine, ricopre un ruolo importante nella determinazione della resistività apparente del terreno, provocandone un abbassamento della resistività media. Alla luce di queste considerazioni del tutto generali è evidente che non esiste una corrispondenza biunivoca tra valore di resistività riscontrato nel modello e materiale presente nel suolo e nel sottosuolo: solo un'interpretazione che tenga conto delle caratteristiche geologiche, archeologiche e fisiche del sito indagato può dipanare il rebus dato dalla variabilità dei valori di resistività.

	Intervallo di resistività (Ωm)					
	Norinelli 1996	Musset 2003	Telford 1990	Loke 2004	Peltoniemi 1998	Ward 1990
Argille	1-120	1-100	1-100	1-100	30-70	3-40
Limi	/	/	10 - 800	10 - 800	80-200	/
Sabbie	100-1000	500-5000	10-800	/	500-1000	/
Ghiaie	/	100-5000	/	/	1000-2000	/
Argille e sabbia	/	/	30-215	/	/	50-300
Granito	300-10 ⁴	100-10 ¹⁰	/	100*10 ⁶	/	/
Areanarie	60-10 ⁴	1-10 ⁸	1-6*10 ⁴	/	/	300-3000
Calcari	100-5000	50-10 ⁷	50-10 ⁷	50-4*10 ²	/	500-3500
Conglomerato	/	/	2*10 ³ - 10 ⁴	/	/	/

Tab. 1.1 - Intervalli di resistività per alcune tipologie di rocce e terreni incontrati comunemente durante indagini geoelettriche in siti archeologici, secondo diversi autori.

1.5 L'impiego delle indagini geoelettriche in contesti archeologici

I pionieri delle indagini geofisiche applicate ai contesti archeologici sono senza dubbio i britannici, che per primi applicarono le tecnologie utilizzate per la geologia e l'ingegneria civile all'individuazione di anomalie di possibile origine antropica.

La prima indagine geofisica applicata alla ricerca archeologica fu svolta da Richard Atkinson nel 1946: nei pressi di Dorchester, Atkinson utilizzò un metodo di investigazione geoelettrico per determinare la posizione di fossi e buche di natura antropica già individuati attraverso i cropmarks visti dal pioniere dell'archeologia aerea Maggiore G.W.G. Allen. Il metodo utilizzato consisteva nella misura della resistenza del suolo al passaggio della corrente elettrica⁷, realizzata attraverso uno strumento (Megger Earth Tester) caratterizzato da due elettrodi di corrente e due di potenziale in configurazione Wenner che venivano spostati nell'area indagata mantenendo fissa la distanza intercatodica. Alle indagini a profondità diverse realizzate per l'ingegneria civile negli anni compresi tra le due Guerre Mondiali, Atkinson preferì indagini areali, più efficaci per individuare "anomalie" di possibile origine antropica tra i valori uniformi di un sottosuolo indisturbato. In Fig. 1.13 sono riportati

⁷ Clark 1996.

l'immagine schematica dello strumento utilizzato da Atkinson e il risultato dell'indagine geoelettrica condotta nel sito archeologico presso Dorchester.

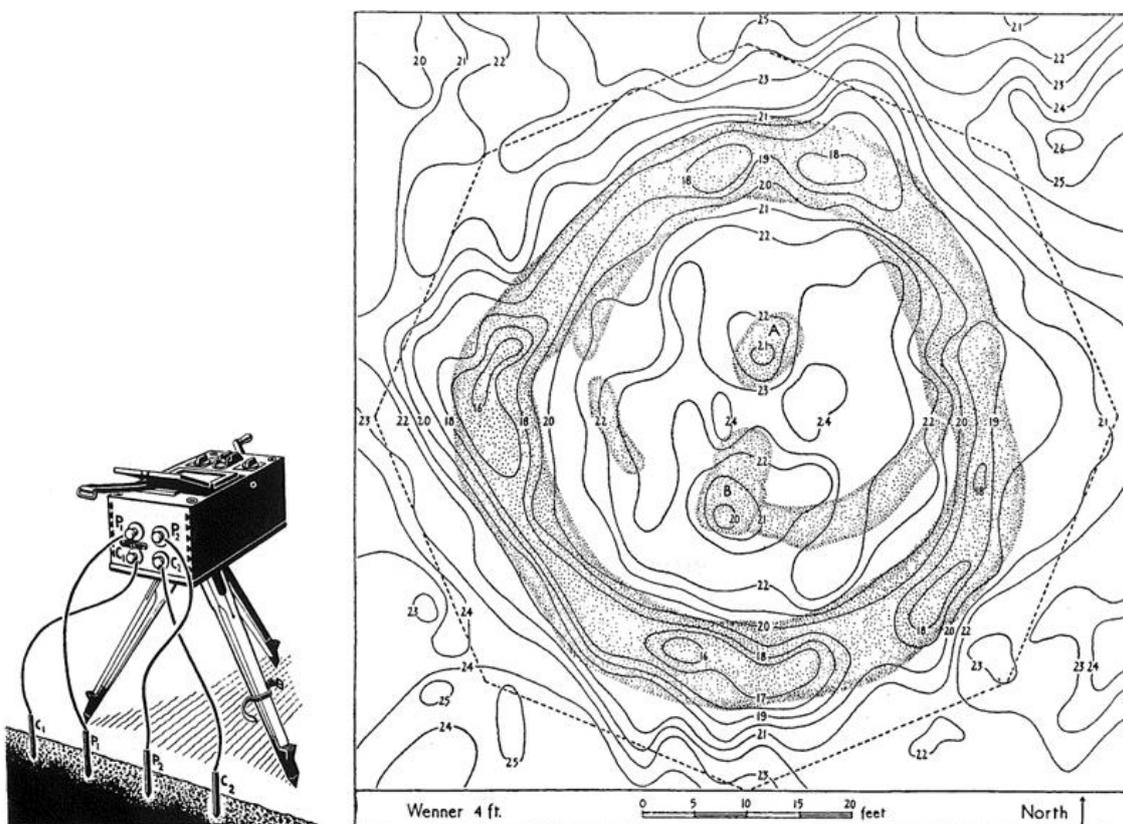


Fig. 1.13 – Rappresentazione schematica del Megger Earth Tester utilizzato da Atkinson e la mappa delle aree di iso-resistività del sito presso Dorchester. I valori di resistività sono espressi in Ohm*Piedi. In puntinato sono riportati i risultati dello scavo archeologico condotto nel 1963 (da Clark 1996).

Per circa dieci anni lo strumento adottato da Atkinson fu il solo utilizzato per individuare e indagare siti di interesse archeologico, finché nel 1956, grazie allo sviluppo delle tecnologie, fu brevettato da John Martin e Anthony Clark un georesistivimetro appositamente concepito per le indagini archeologiche: lo strumento (Martin-Clark), più compatto e caratterizzato da un circuito elettrico più complesso del precedente, fu sperimentato nel sito della città romana di Cunetio, in Wiltshire, con buoni risultati. Lo strumento fu commercializzato nel 1960.

Le prime elaborazioni al computer di dati di resistività risalgono al 1958, ad opera di Irwin Scollar del Landesmuseum di Bonn.

Per quanto riguarda l'Italia, nel 1954 la Sezione Prospezioni Archeologiche della Fondazione C. M. Lerici del Politecnico di Milano fu la prima a specializzarsi

nell'individuazione di tombe etrusche utilizzando il metodo della resistività; nel 1964 vennero introdotti i primi corsi istituzionali di geofisica per l'archeologia a Roma e fu pubblicata la rivista "Prospezioni Archeologiche", edita fino al 1974.

Lo sviluppo degli strumenti per realizzare indagini geoelettriche nei contesti archeologici si specializza e si differenzia da quello per indagini di tipo geologico o ingegneristico: infatti, mentre per queste ultime finalità si potenziano strumentazioni che permettono di ottenere in modo più rapido e dettagliato sezioni di resistività del sottosuolo, in archeologia si brevettano strumenti in grado di individuare anomalie di resistività ad una profondità nota e ottenere così mappe di resistività, tra cui l'esempio più noto e diffuso è il georesistivimetro Geoscan RM nelle sue diverse versioni (Fig. 1.14). Il georesistivimetro OhmMapper, pur non essendo stato progettato per indagini di tipo archeologico, risponde perfettamente all'esigenza del mondo archeologico di visualizzare in pianta le anomalie di resistività del sottosuolo di possibile natura antropica.



Fig. 1.14 – Resistance Meter RM4 (dal sito web Geoscan Research).

Negli ultimi vent'anni l'evoluzione delle tecnologie ha portato allo sviluppo di sistemi caratterizzati dalla possibilità di acquisire in una sola giornata un numero cospicuo di dati su aree anche di decine di ettari, come nel caso del sistema ARP[®] (Automatic Resistivity Profiler

– Fig. 1.15), sviluppato e gestito da Terranova, spin-off dell'Università di Parigi⁸. I sistemi di indagine estensiva permettono non solo di indagare il sito archeologico nel loro dettaglio, ma soprattutto di analizzare il contesto e gli eventuali rapporti tra siti vicini.



Fig. 1.15 – Il sistema di acquisizione ARP[®].

Il futuro delle indagini di resistività in archeologia è proiettato verso le indagini in estensione, caratterizzate da rapidità di esecuzione, alta densità di dati acquisiti e possibilità di ricostruzione di modelli tridimensionali del sottosuolo il più possibile affidabili. L'OhmMapper risponde in parte a queste esigenze per la rapidità di acquisizione rispetto ai sistemi tradizionali ad accoppiamento galvanico e per la possibilità di realizzare facilmente indagini in pianta e in sezione, che permettono di ottenere modelli tridimensionali del sottosuolo.

⁸ Dabas 2008.

2 Il georesistivimetro ad accoppiamento capacitivo OhmMapper

Per una migliore comprensione delle strategie di indagine adottate durante la ricerca e dei risultati ottenuti, si è ritenuto necessario introdurre i caratteri principali del georesistivimetro OhmMapper (Geometrics Inc.) ad accoppiamento capacitivo, integrando quanto riportato in letteratura con l'esperienza pratica dell'utilizzo e della sperimentazione dello strumento in diversi contesti archeologici.

Dopo una sintetica descrizione del sistema, saranno analizzati i vari componenti dell'OhmMapper e le modalità con cui devono essere assemblati per realizzare una campagna di indagine, dalla scelta delle caratteristiche geometriche dei diversi componenti, da cui dipende la profondità di indagine raggiunta, alle tipologie di sondaggi elettrici realizzabili e alle corrette procedure di campagna da seguire.

2.1 Il sistema ad accoppiamento capacitivo

Il principio alla base di un sistema ad accoppiamento capacitivo è il passaggio della corrente alternata attraverso un condensatore. In uno strumento ad accoppiamento capacitivo, come l'OhmMapper, un cavo coassiale agisce come una delle piastre metalliche di un condensatore, mentre la superficie del terreno agisce come l'altra piastra. Questo accoppiamento capacitivo cavo-terreno è caratterizzato da una capacità elettrica variabile dipendente dalle condizioni del terreno; una corrente alternata (AC) generata dal trasmettitore con una frequenza di circa 16,5 kHz (nel caso dell'OhmMapper) passerà per capacità dal cavo al terreno; la guaina isolante che fa le veci dell'isolante del condensatore (Fig. 2.1). Il terreno è quindi caricato per induzione e non per contatto, come nel caso dei georesistivimetri ad accoppiamento galvanico, nei quali la corrente viene immessa nel terreno attraverso un elettrodo costituito da materiale conduttivo. Il ricevitore è caricato in modo uguale e contrario al trasmettitore, permettendo alle componenti elettroniche del ricevitore di misurare il potenziale elettrico alternato. Il ricevitore di uno strumento ad accoppiamento capacitivo è concettualmente equivalente ad un voltmetro per corrente alternata.

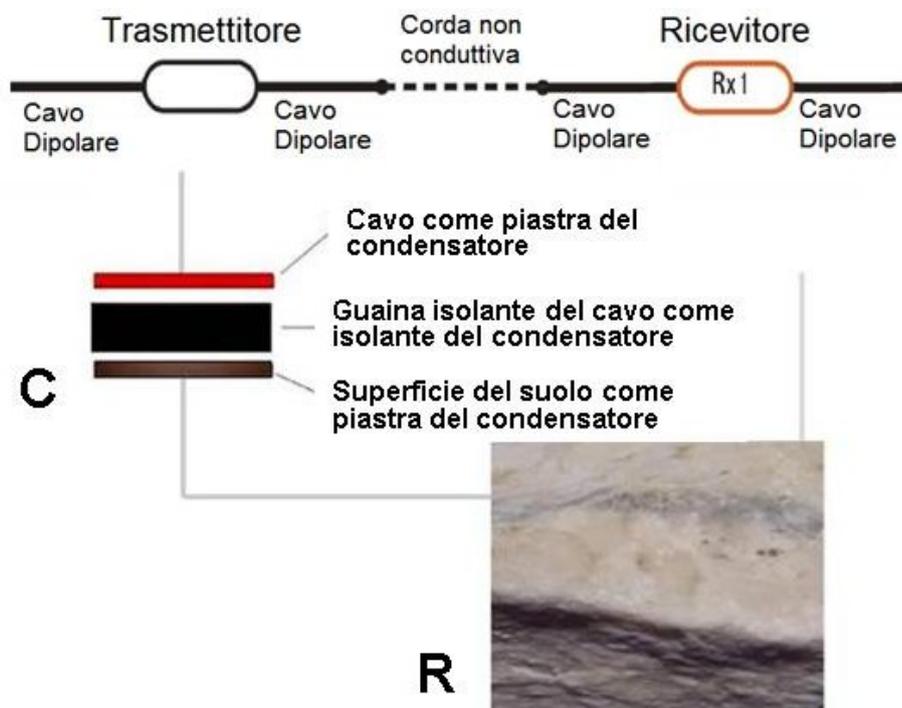


Fig. 2.1 – Schematizzazione dell'accoppiamento cavo-terreno assimilabile a quello delle piastre di un condensatore.

La capacità elettrica del cavo è determinata principalmente dalla sua lunghezza: più il cavo è lungo, maggiore sarà la sua capacità e quindi la possibilità di accoppiare più corrente nel terreno.

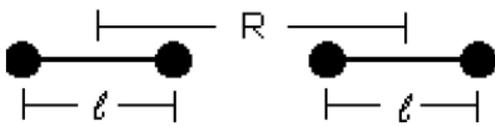
Durante la normale acquisizione dei dati, la tecnologia che utilizza l'accoppiamento capacitivo per misurare la resistività del mezzo non viene considerata come uno strumento che emette onde elettromagnetiche, in quanto le frequenze utilizzate sono basse (16,5 kHz): infatti l'OhmMapper è in tutto e per tutto un georesistivimetro e misura soltanto i campi elettrici, tuttavia questo non vuol dire che i fenomeni elettromagnetici non siano presenti e che non influenzino in qualche modo le misure. È stato possibile stimare⁹ che, se la distanza tra il trasmettitore e il ricevitore rimane al di sotto di un fattore skin-depth, gli errori di misura introdotti dagli effetti dell'elettromagnetismo sono inferiori al 2%, ossia meno di quanto sia l'errore strumentale o le condizioni del contesto, quali il rumore di fondo. Questa soglia del 2% è stata stimata attraverso calcoli teorici e confronto tra le misure ottenute con georesistivimetri ad accoppiamento galvanico e ad accoppiamento capacitivo.

⁹ Millet 1967

Come per i georesistivimetri ad accoppiamento galvanico, anche per i georesistivimetri ad accoppiamento capacitivo la profondità di investigazione dipende dalla geometria dell'array e non dalla frequenza del segnale né dal tempo di acquisizione.

Come per i dati acquisiti attraverso i georesistivimetri ad accoppiamento galvanico, la resistività apparente (ρ_a) è calcolata utilizzando il fattore k (equazione (1.11)). Il fattore geometrico per uno strumento ad accoppiamento galvanico che immette nel terreno corrente continua attraverso una sorgente puntuale (elettrodo infisso nel terreno) è differente da quello di uno strumento ad accoppiamento capacitivo che energizza il terreno con una corrente alternata generata da un cavo.

Il fattore geometrico per convertire le misure dell'OhmMapper in resistività¹⁰ è riportato nell'equazione (2.1).



$$\frac{1}{K} = \frac{\Delta V}{\rho_{\omega} I} = \frac{1}{\pi} \int_0^{l_1} \int_0^{l_2} \frac{I(L_1)}{I_{(L_1=0)}} \frac{I(L_2)}{I_{(L_2=0)}} \frac{dL_1 dL_2}{R^3}$$

$$K = \frac{l\pi}{\ln \left[\left(\frac{b^2}{b^2-1} \right)^{2b} \left(\frac{b^2+2b}{(b+1)^2} \right)^{b+2} \left(\frac{b^2-2b}{(b-1)^2} \right)^{b-2} \right]} \quad \text{dove } b = \frac{2R}{l} \quad (2.1)$$

L'array utilizzato nell'OhmMapper è quindi assimilabile a quello di un dipolo-dipolo, in quanto il ricevitore (elettrodi di potenziale per il sistema ad accoppiamento galvanico) è esterno rispetto al trasmettitore (elettrodi di corrente), come è possibile vedere chiaramente in Fig. 2.2. In quanto assimilabile all'array dipolo-dipolo, l'OhmMapper è molto sensibile ai cambiamenti orizzontali nella resistività: per questa ragione è particolarmente adatto all'individuazione di strutture verticali quali strutture murarie, fondazioni o fossati.

¹⁰ Timofeev 1994

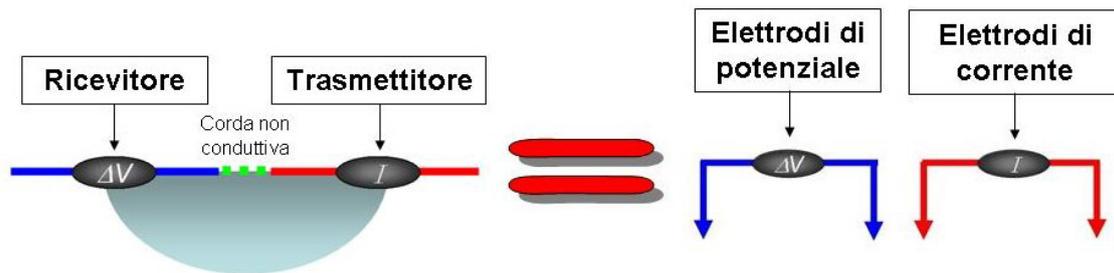


Fig. 2.2 – Confronto schematico tra la disposizione geometrica delle antenne dell’OhmMapper e l’array dipolo-dipolo di un quadripolo elettrico.

2.2 Descrizione del sistema

L’OhmMapper è un sistema ad accoppiamento capacitivo realizzato per misurare la resistività sub-superficiale nelle aree caratterizzate da alta resistività superficiale in cui le esplorazioni un georesistivimetro tradizionale ad accoppiamento galvanico sono difficilmente praticabili.

L’OhmMapper è costituito da un dipolo trasmettitore-ricevitore superficiale. Il funzionamento è relativamente semplice: una corrente alternata è accoppiata in modo capacitivo nel terreno ad una frequenza specifica (16,5 kHz) da un voltaggio alternato applicato dal trasmettitore; la misura viene effettuata sul risultante voltaggio accoppiato al ricevitore. Questo voltaggio sarà proporzionale alla resistività del terreno che separa i due dipoli e alla corrente emessa dal trasmettitore.

Il trasmettitore e il ricevitore sono schierati in una configurazione dipolo-dipolo, in cui il trasmettitore e il ricevitore sono posizionati lungo una linea e separati da interi o frazioni della lunghezza del dipolo stesso (0,25; 0,5; 1; 1,5; 2; ...).

Esattamente come per un sistema a corrente continua, la resistività apparente è calcolata moltiplicando il fattore geometrico appropriato per il voltaggio del ricevitore, normalizzato con la corrente emessa dal trasmettitore.

Due importanti restrizioni limitano il funzionamento dell’OhmMapper:

1. il trasmettitore e il ricevitore non devono essere immersi in acqua;
2. la distanza tra il trasmettitore e il ricevitore non deve eccedere un fattore *skin-depth*. Il fattore *skin-depth* è calcolato in metri e risulta approssimativamente essere $500 \cdot \sqrt{\text{resistività}/\text{frequenza}}$. La frequenza dell’OhmMapper è di circa 16,5 kHz.

L'OhmMapper è stato progettato per essere trascinato sul terreno come una fune e in questo modo permette di realizzare un profilo quasi continuo di resistività apparente.



Fig. 2.3 – Operatore che trascina l'OhmMapper durante l'acquisizione.

Questo aspetto incrementa il potere risolutivo e la produttività del sistema rispetto a quelli di un georesistivimetro a corrente continua e ad accoppiamento galvanico: infatti, dal momento che le misure sono acquisite in continuo al ritmo di una al secondo, la densità lungo la linea di indagine non dipenderà dalla distanza tra gli elettrodi, ma dalla velocità dell'operatore che trascina lo strumento. I cavi dipolari e gli alloggiamenti dello strumento sono realizzati in plastica resistente al logoramento dato dall'uso.

L'OhmMapper è comandato attraverso la console G-858 agganciata ad un'imbragatura. Durante l'acquisizione il ricevitore è collegato ad una delle porte seriali della console attraverso una fibra ottica e un cavo isolante. I dati misurati vengono registrati al momento dell'acquisizione e sono anche visualizzati in tempo reale attraverso un grafico sullo schermo della console. Il ricevitore acquisisce un dato al secondo; la console può quindi registrare misure in memoria pari a circa 24 ore di acquisizione continua.



Fig. 2.4 – La console G-858 dell’OhmMapper.

I dati acquisiti con l’OhmMapper sono processati utilizzando il software proprietario MagMap2000, prodotto dalla Geometrics Inc., attraverso il quale è possibile esportare i dati di resistività apparente in diversi formati standard per la presentazione o per l’inversione utilizzando i più diffusi software commerciali per l’interpretazione dei dati di resistività.

2.3 OhmMapper: componenti, assemblaggio e attivazione

In questo paragrafo saranno trattati singolarmente i componenti dell'OhmMapper (Fig. 2.5 e Tab. 2.1) e sarà specificato in che modo devono essere assemblati tra loro per poter realizzare una campagna di indagine geoelettrica.

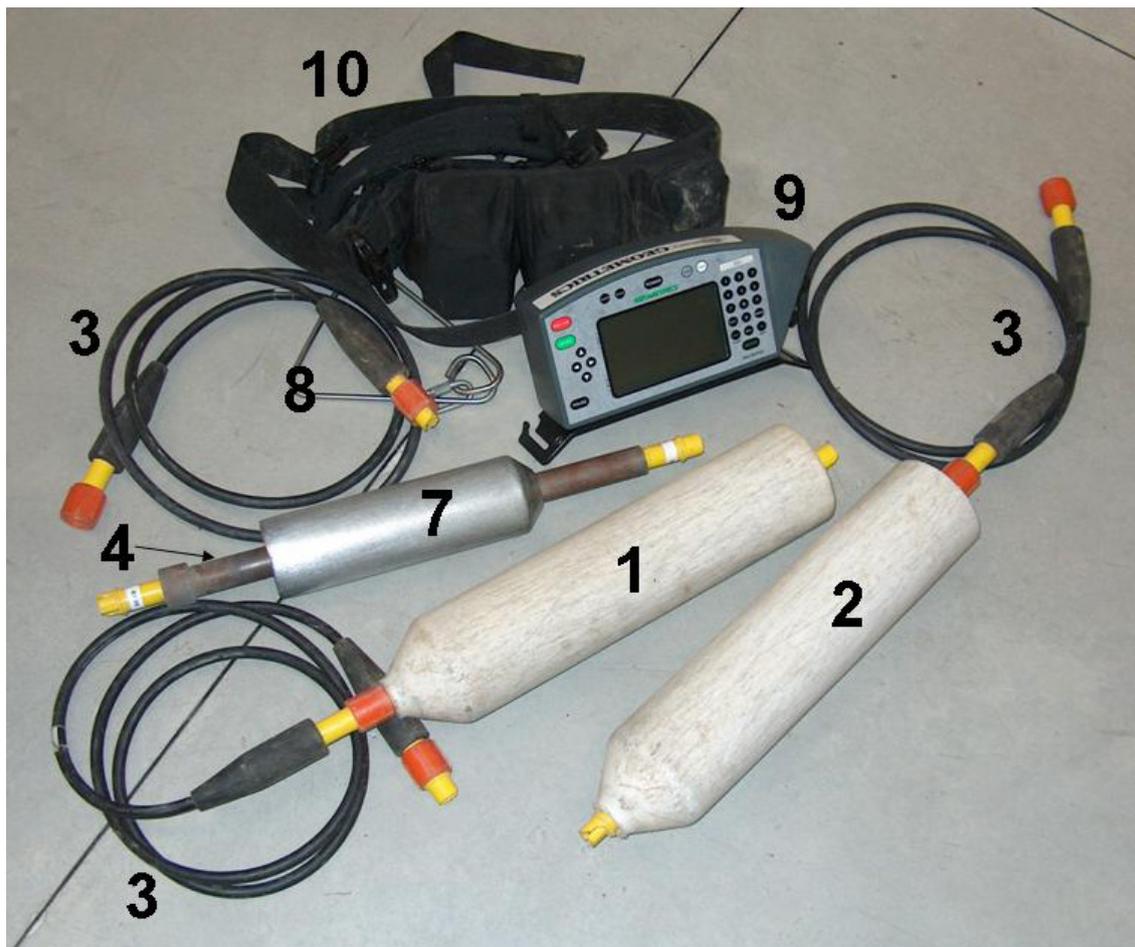


Fig. 2.5 – I componenti principali dell'OhmMapper. I numeri riportati in figura si riferiscono a Tab. 2.1.

N°	Nome del componente	Breve descrizione
1	Trasmittitore	Alloggiamento per le batterie, batterie, telaio con i connettori, elettronica, protezione in plastica resistente. Il trasmettitore propriamente detto comprende anche i cavi dipolari collegati a questo componente dell'OhmMapper.
2	Ricevitore	Alloggiamento per le batterie, batterie, telaio con i connettori, elettronica,

		protezione in plastica resistente. Il ricevitore propriamente detto comprende anche i cavi dipolari collegati a questo componente dell'OhmMapper.
3	Cavi dipolari	Cavi da 2,5 e 5 metri, compresi i connettori. Questi cavi sono parte integrante del trasmettitore o del ricevitore, quando collegati ai componenti n° 1 e 2, oppure sono semplici cavi per il trasferimento dei dati dal ricevitore alla console, quando collegati tra la console e la fibra ottica.
4	Fibra ottica	Componente necessario per convertire il segnale da elettrico a ottico e viceversa, per scambiare le informazioni tra la console e i componenti alle spalle dell'operatore.
5	Cavo della console	Cavo per collegare la console al sistema trasmettitore-ricevitore.
6	Corda non conduttiva	Corda per tenere distanziati trasmettitore e ricevitore e per trascinarli contemporaneamente. La corda può essere di diverse lunghezze a seconda della distanza a cui si vogliono tenere distanziati trasmettitore e ricevitore.
7	Peso	Peso, posizionato attorno alla fibra ottica, indispensabile per tenere il più possibile a terra il ricevitore e utile per proteggere in parte la fibra ottica.
8	Gancio di traino	Gancio di acciaio infilato nella parte retrostante della cintura e dotato di connettore e moschettone per evitare di sollecitare il cavo della console con la continua trazione esercitata dallo strumento.
9	Console	Console dello strumento costituita da elettronica, schermo e tastiera.
10	Cintura con batterie	Cintura su cui è agganciata la console, contenente anche alloggiamenti per le batterie della console stessa.
11	Bretelle	Bretelle per distribuire il peso di console e batterie sulle spalle.
12	Cavo RS232	Cavo per scaricare i dati dalla console al PC
13	Caricabatterie trasmettitore e ricevitore	Caricabatterie di trasmettitore e ricevitore
14	Caricabatterie OhmMapper	Caricabatterie per la console dell'OhmMapper

Tab. 2.1 – Descrizione sintetica dei principali componenti dell'OhmMapper TR1.

L'immagine in Fig. 2.6 schematizza l'assemblaggio dei diversi componenti dell'OhmMapper al fine di realizzare un'indagine di resistività, descritti qui di seguito in modo più dettagliato:

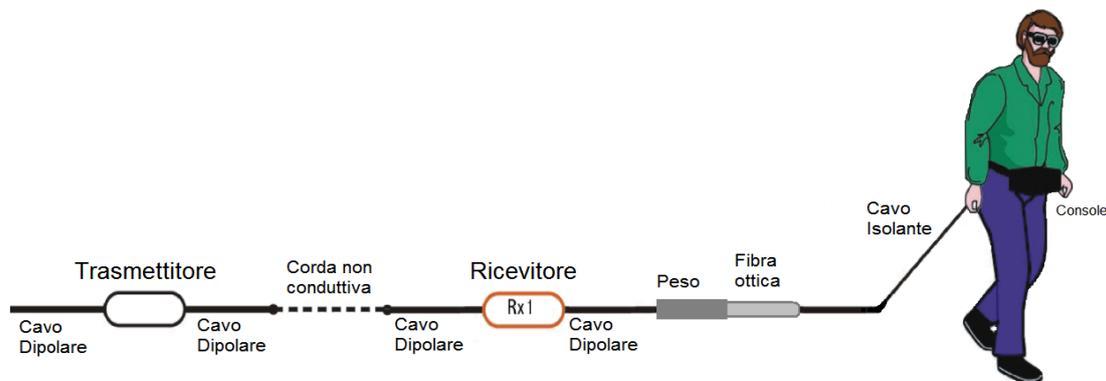


Fig. 2.6 – Assemblaggio dei componenti principali del georesistivimetro OhmMapper (da OhmMapper Operation Manual, 2001).

1. I cavi dipolari devono essere connessi agli alloggiamenti delle batterie del ricevitore e del trasmettitore, realizzando così le 2 antenne.
2. Agli estremi liberi dei cavi del trasmettitore e all'estremo libero del cavo del ricevitore rivolto verso il trasmettitore vengono avvitati tre tappi caratterizzati da un anello di corda.
3. La fibra ottica è fatta scorrere all'interno del peso
4. Collegare la corda non conduttiva al ricevitore e al trasmettitore attraverso i tappi con corda. La lunghezza della corda non conduttiva, proporzionale alla lunghezza delle antenne, è scelta dall'operatore in base alla profondità che si intende investigare
5. Collegare la fibra ottica al ricevitore e al cavo dipolare (di 2,5 o di 5 metri) che collega il tutto con la console. La lunghezza del cavo dipolare deve essere scelta in base all'altezza dell'operatore al fine di non sollevare durante l'acquisizione i componenti fibra ottica e peso e quindi il ricevitore.
6. Collegare il cavo della console alla console e al gancio di traino alle spalle dell'operatore.

L'OhmMapper, così assemblato, è pronto per essere utilizzato per realizzare un'indagine di resistività.

Inizialmente bisogna accendere il trasmettitore ruotando in senso orario la manopola posta nella parte posteriore degli alloggiamenti delle batterie: si accende una spia rossa, a cui fa seguito una spia verde lampeggiante, che indica la trasmissione del segnale. Quindi è possibile attivare allo stesso modo il ricevitore: la spia rossa indica l'accensione del ricevitore, quella blu lampeggiante indica che il trasmettitore riesce a ricevere il segnale emesso dal ricevitore. Una volta attivate e messe in comunicazione le antenne, è possibile accendere la console dell'OhmMapper.

Prima di iniziare qualsiasi tipo di acquisizione, è necessario impostare nella console dell'OhmMapper i parametri geometrici dello strumento attraverso il menu "OhmMapper geometry" (Fig. 2.7): con questo processo sarà possibile non solo determinare in modo corretto il posizionamento della misura acquisita rispetto alla posizione dell'operatore, ma anche calcolare il fattore n indispensabile per l'inversione dei dati di resistività. La scelta dei parametri geometrici sarà trattata in modo più approfondito nel paragrafo 2.4.

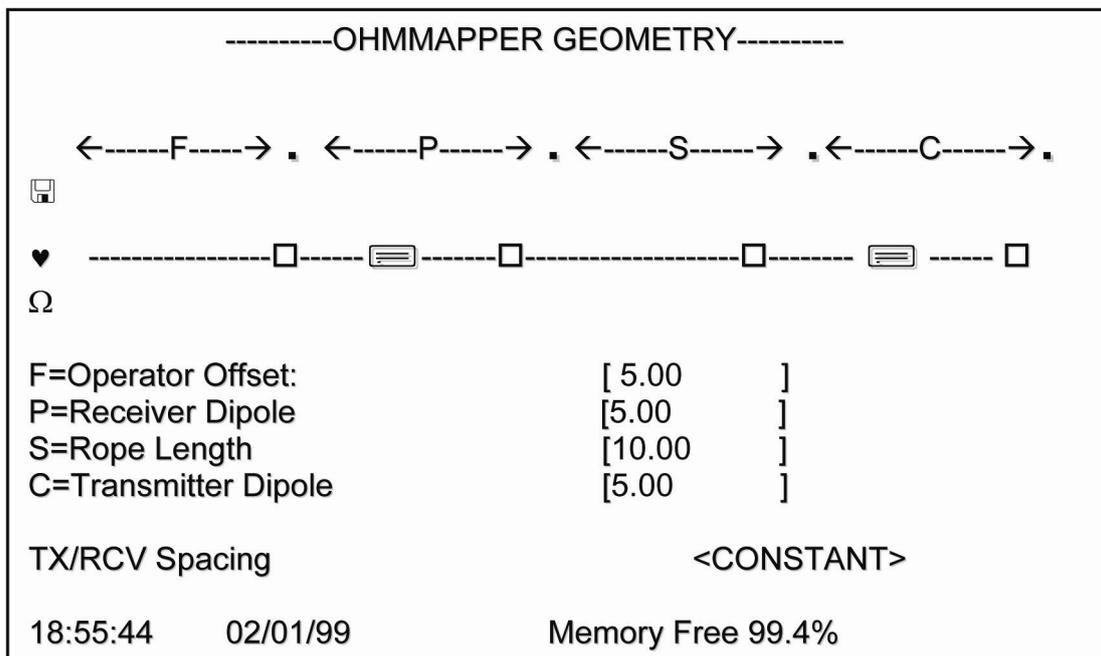


Fig. 2.7 – Schermata del menu OhmMapper Geometry (da OhmMapper Operation Manual, 2001).

Come richiesto dal menu "OhmMapper geometry" è necessario specificare

- la distanza in metri tra l'operatore e la fibra ottica
- le lunghezze in metri di ricevitore e trasmettitore
- la lunghezza in metri della corda non conduttiva che collega trasmettitore e ricevitore

- se la distanza tra il trasmettitore e il ricevitore sarà costante o variabile durante l'acquisizione.

È necessario che l'operatore modifichi le variabili nel menu "OhmMapper geometry", ogni volta che durante l'acquisizione viene variato uno dei parametri sopra descritto.

2.4 Profondità di Indagine

La profondità di indagine dell'OhmMapper dipende dalla lunghezza delle antenne ($a = 2,5 \text{ m}, 5 \text{ m}, 7,5 \text{ m}, 10 \text{ m}$)¹¹ e dalla separazione del trasmettitore dal ricevitore (na), secondo i rapporti specifici¹² riportati nelle Tab 2.2 e 2.3.

Fattore n	Configurazione con antenne (a) da 2,5 m			Configurazione con antenne (a) da 5 m		
	Lunghezza corda non conduttiva (na) [m]	Profondità indagata [m]	Lunghezza totale dello strumento [m] (con offset di 5 m)	Lunghezza corda non conduttiva (na) [m]	Profondità indagata [m]	Lunghezza totale dello strumento [m] (con offset di 5 m)
0,25	0,625	0,5	10,625	1,25	1	16,25
0,5	1,25	0,7	11,25	2,5	1,4	17,5
0,75	1,875	0,9	11,875	3,75	1,7	18,75
1	2,5	1	12,5	5	2	20
1,25	3,125	1,2	13,125	6,25	2,4	21,25
1,5	3,75	1,4	13,75	7,5	2,8	22,5
1,75	4,375	1,6	14,375	8,75	3,1	23,75
2	5	1,7	15	10	3,5	25
2,25	5,625	1,9	15,625	11,25	3,8	26,25
2,5	6,25	2	16,25	12,5	4,2	27,5
2,75	6,875	2,2	16,875	13,75	4,5	28,75
3	7,5	2,4	17,5	15	4,8	30
3,25	8,125	2,6	18,125	16,250	5,1	31,25
3,5	8,75	2,7	18,75	17,500	5,5	32,5
3,75	9,375	2,9	19,375	18,750	5,8	33,75
4	10	3,1	20	20	6,1	35

Tab. 2.2 – Configurazione geometrica dell'OhmMapper con antenne da 2,5 m e 5 m.

¹¹ Lunghezze possibili delle antenne combinando i cavi coassiali in dotazione con lo strumento.

¹² Il fattore n deve assumere un valore di $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, 1, 2, 3, 4, etc.

Fattore n	Configurazione con antenne (a) da 7,5 m			Configurazione con antenne (a) da 10 m		
	Lunghezza corda non conduttiva (na) [m]	Profondità indagata [m]	Lunghezza totale dello strumento [m] (con offset di 5 m)	Lunghezza corda non conduttiva (na) [m]	Profondità indagata [m]	Lunghezza totale dello strumento [m] (con offset di 5 m)
0,25	1,875	1,5	21,875	2,5	2,0	27,5
0,5	3,75	2,1	23,75	5	2,7	30
0,75	5,625	2,6	25,625	7,5	3,5	32,5
1	7,5	3,1	27,5	10	4,2	35
1,25	9,375	3,7	29,375	12,5	4,9	37,5
1,5	11,25	4,2	31,25	15	5,6	40
1,75	13,125	4,7	33,125	17,5	6,3	42,5
2	15	5,2	35	20	6,9	45
2,25	16,875	5,7	36,875	22,5	7,6	47,5
2,5	18,75	6,2	38,75	25	8,3	50
2,75	20,625	6,7	40,625	27,5	9,0	52,5
3	22,5	7,2	42,5	30	9,6	55
3,25	24,375	7,7	44,375	32,5	10,3	57,5
3,5	26,25	8,2	46,25	35	10,9	60
3,75	28,125	8,7	48,125	37,5	11,6	62,5
4	30	9,2	50	40	12,2	65

Tab. 2.3 – Configurazione geometrica dell’OhmMapper con antenne da 7,5 m e 10 m.

Come per un array dipolo-dipolo di un georesistivimetro ad accoppiamento galvanico, secondo cui maggiore è la distanza tra gli elettrodi di corrente e quelli di potenziale, maggiore sarà la profondità investigata, così anche nella configurazione geometrica dell’OhmMapper, maggiore è la distanza tra il ricevitore e il trasmettitore, maggiore sarà la profondità di indagine (Fig. 2.8).

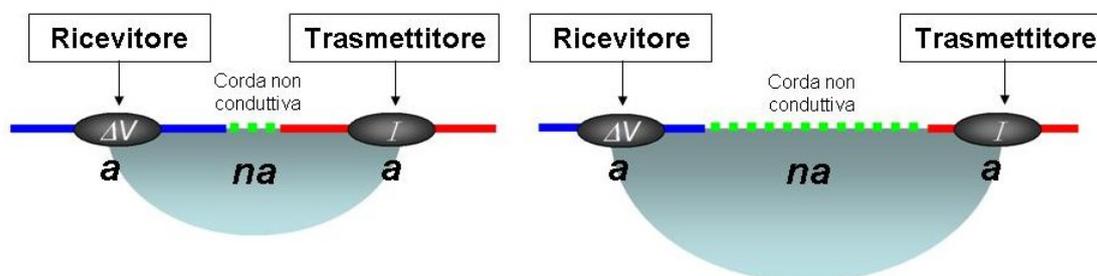


Fig. 2.8 – Esempificazione schematica dell’aumentare della profondità di indagine dell’OhmMapper in rapporto all’aumento della distanza tra il ricevitore e il trasmettitore.

La profondità massima a cui l'OhmMapper può individuare variazioni di resistività nel sottosuolo dipende dalla massima separazione possibile tra il trasmettitore e il ricevitore, ossia dalla distanza fino a cui il segnale emesso dal trasmettitore può essere recepito e decodificato dal ricevitore. Questa distanza è determinata soprattutto dalla resistività/conducibilità del sito in cui si sta effettuando l'indagine.

Resistività del terreno: l'attenuazione del segnale durante il suo percorso dal trasmettitore al ricevitore è inversamente proporzionale al cubo della distanza. Quindi, se la distanza tra il ricevitore ed il trasmettitore è aumentata da 10 a 20 metri, il segnale giungerà al ricevitore smorzato di 1/8 rispetto alla sua intensità originale. La profondità massima di investigazione dipenderà da quanto lontano il ricevitore potrà recepire il segnale emesso dal trasmettitore. Dalla legge di Ohm sappiamo che l'ampiezza del voltaggio è direttamente proporzionale alla resistenza del mezzo che la corrente attraversa, ossia $V=RI$, dove V è il potenziale elettrico, I la corrente e R la resistenza. Data una corrente, se la resistenza del terreno è alta, il potenziale elettrico generato è anch'esso alto, rendendo così più facile la realizzazione della misura. Invece, se la resistenza del terreno è bassa, il potenziale risultante sarà basso e le misure saranno più difficoltose.

L'attenuazione è rapida sia in condizioni di alta che di bassa resistenza, ma il segnale scompare più rapidamente nei terreni più conduttivi, quindi il trasmettitore può essere individuato dal ricevitore a distanza maggiore se segnale viene trasmesso in un mezzo resistivo.

Effetto skin-depth del segnale trasmesso: sebbene la profondità di investigazione sia unicamente determinata dalla geometria della disposizione dipolo-dipolo, per un segnale trasmesso in corrente alternata la separazione massima tra il trasmettitore e il ricevitore in un ambiente conduttivo dipende dalla *skin-depth*. Se la distanza tra il trasmettitore e il ricevitore è maggiore di una *skin-depth*, generalmente il segnale trasmesso non potrà essere individuato dal ricevitore. Una buona approssimazione del fattore *skin-depth* in metri è $500 \cdot \sqrt{\rho/f}$, dove ρ è la resistività e f la frequenza di trasmissione, che, nel caso dell'OhmMapper è di circa 16,5 kHz. Questo spiega perché in terreni conduttivi (quindi a bassa resistività), la profondità massima raggiunta è inferiore a quella investigata in terreni resistivi. Ad esempio, il fattore *skin-depth* di 16,5 kHz in un terreno con resistività 10 Ωm è di circa 12,5 m; secondo questi calcoli, la separazione massima tra trasmettitore e ricevitore in questo contesto non

potrà essere maggiore di 12,5 metri. In un terreno con resistività di 100 Ωm , il fattore *skin-depth* di 16,5 kHz di frequenza è circa 39 metri. In un terreno con resistività di 1000 Ωm , il fattore *skin-depth* di 16,5 kHz di frequenza sarebbe di 123 metri, valore che supera i limiti fisici dell'OhmMapper basati sulla massima distanza tra trasmettitore e ricevitore per la trasmissione del segnale. In termini pratici, l'ampiezza del segnale decresce rapidamente una volta superato il fattore *skin-depth*, quindi nel caso in cui la distanza tra trasmettitore e ricevitore sia maggiore del fattore *skin-depth*, il segnale non viene più intercettato dal ricevitore.

Lo strumento e il rumore di fondo: i rumori di fondo non sono generalmente di disturbo per l'OhmMapper, grazie alla piccola ampiezza della banda di ricezione. Il segnale viene attenuato rapidamente mano a mano che il ricevitore viene messo ad una distanza maggiore dal trasmettitore; tuttavia, nonostante il segnale sia attenuato, il rumore non cambia. Ad un certo punto ci sarà un rapporto segnale-rumore oltre al quale non sarà più possibile effettuare misure. La distanza a cui il rumore sovrasta il segnale trasmesso è ovviamente determinata dal livello di rumore circostante. In contesti molto rumorosi, il trasmettitore dovrà trovarsi non troppo lontano dal ricevitore, riducendo in questo modo la profondità di investigazione.

Considerati tutti questi fattori e le variabili studiati dai produttori dell'OhmMapper e verificata la funzionalità dello strumento in campagna in numerosi contesti con caratteristiche differenti è possibile affermare che la profondità massima raggiunta dall'OhmMapper non supera in nessun caso i 15 metri di profondità e generalmente neanche i 10 metri. Questa caratteristica, che potrebbe essere vista come una limitazione dello strumento, in realtà non è un problema per le indagini di tipo archeologico: infatti la maggior parte dei depositi antropici si trova entro i primi 10 metri di profondità.

2.5 Modalità di acquisizione

Con il georesistivimetro OhmMapper è possibile acquisire i dati di resistività attraverso diverse modalità di acquisizione, a seconda del risultato che si desidera ottenere.

Search mode: impostando l'OhmMapper in search mode (modalità di ricerca) lo strumento acquisisce normalmente, senza registrare i dati. Sullo schermo dello strumento

viene visualizzata la traccia rappresentativa dei dati acquisiti. Questa modalità è utile per identificare rapidamente la posizione di bersagli con valori di resistività molto differenti dal contesto e anche per verificare le potenzialità dei sensori e il rumore di fondo dell'ambiente.

Simple survey mode: in modalità simple survey (acquisizione semplice) i dati acquisiti vengono registrati e vengono memorizzati anche la direzione di acquisizione, il punto di inizio e di fine di ogni linea acquisita e, se l'operatore lo ritiene opportuno, anche punti intermedi. In modalità simple survey è possibile realizzare un'acquisizione completa di misure, che saranno organizzate secondo la strategia di campagna scelta per l'acquisizione utilizzando il software MagMap2000.

La modalità di acquisizione simple survey permette di effettuare le più semplici operazioni di acquisizione con l'OhmMapper, a discapito di un maggiore lavoro di riorganizzazione dati sul PC. Con questa modalità di acquisizione è infatti necessario che l'operatore segni durante l'acquisizione tutte le informazioni necessarie per posizionare le misure correttamente con il software MagMap2000.

Mapped survey mode: la modalità mapped survey (acquisizione attraverso mappe) permette all'operatore di visualizzare meglio l'area di indagine durante l'acquisizione, anche se la forma della stessa non è regolare. Grazie ad uno schema dell'area da indagare visibile sullo schermo della console, è possibile scegliere il punto da cui si intende iniziare o proseguire l'indagine, senza rischiare di sbagliare il posizionamento dei dati acquisiti nella fase di correzione della geometria sul PC.

Con questa modalità di acquisizione è necessario inserire nell'OhmMapper un maggior numero di informazioni al momento dell'acquisizione: le informazioni spaziali correttamente inserite permettono allo strumento di impostare una griglia di acquisizione da seguire durante l'indagine, che può essere modificata manualmente ogni volta che ci si trova, ad esempio, in prossimità di un impedimento fisico.

2.6 Tipologie di sondaggi elettrici realizzabili con l'OhmMapper

Utilizzando l'OhmMapper è possibile realizzare indagini geofisiche al fine di ottenere modelli di resistività monodimensionali (1D), bidimensionali (2D) o tridimensionali (3D) del sottosuolo.

L'indagine monodimensionale più facilmente realizzabile con l'OhmMapper è il profilo di resistività (o sondaggio elettrico orizzontale – SEO). Per ottenere un profilo (Fig. 2.9) è necessario

- scegliere la corda non conduttiva della lunghezza adeguata alla profondità che si vuole investigare
- trascinare l'OhmMapper lungo una direzione definita per la distanza desiderata mantenendo un passo costante

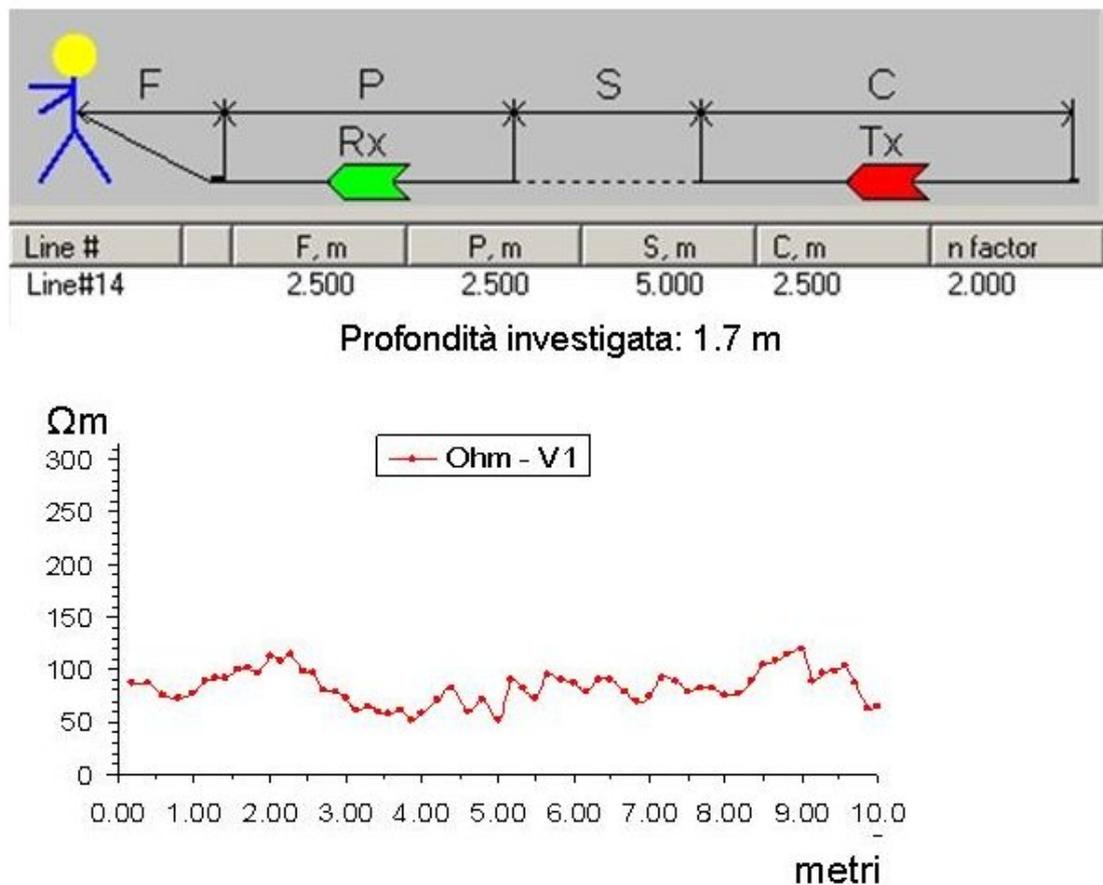


Fig. 2.9 – Caratteristiche geometriche dell'OhmMapper per la realizzazione di un profilo di resistività e corrispondente modello di resistività 1D.

Per realizzare una sezione di resistività, quindi un modello bidimensionale lungo gli assi y e z, con l'OhmMapper si acquisiscono profili di resistività a profondità differenti seguendo questa procedura (Fig. 2.10):

- si scelgono le corde non conduttive di lunghezza adeguata alle profondità che si intendono investigare
- si trascina l'OhmMapper lungo la stessa linea di indagine per la distanza desiderata sostituendo la corda non conduttiva per variare la profondità di indagine

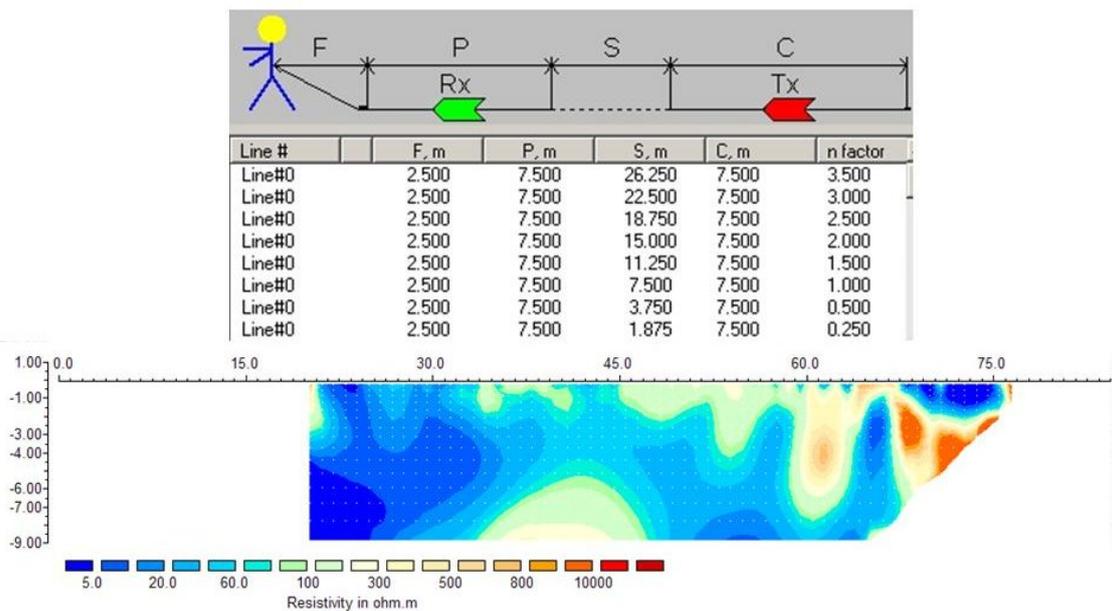


Fig. 2.10 - Caratteristiche geometriche dell'OhmMapper per la realizzazione di una pseudosezione di resistività e corrispondente modello di resistività 2D.

Per realizzare una mappa di resistività con l'OhmMapper, ossia un modello di resistività lungo gli assi x e y, è sufficiente acquisire più profili paralleli alla stessa profondità (Fig. 2.11).

- si sceglie la corda non conduttiva di lunghezza adeguata alla profondità che si vuole investigare
- si trascina l'OhmMapper lungo linee parallele per la distanza desiderata mantenendo un'andatura costante

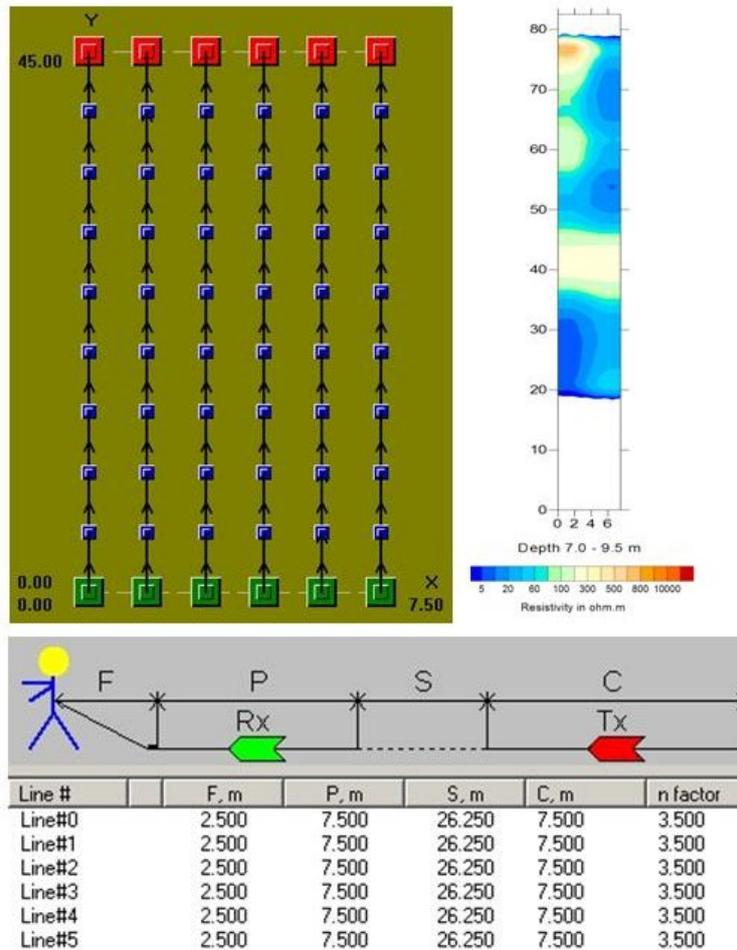


Fig. 2.11 - Caratteristiche geometriche dell'OhmMapper per la realizzazione di una mappa di resistività e corrispondente modello di resistività 2D.

La strategia più rapida per acquisire un set di dati adeguato ad ottenere un modello tridimensionale di resistività con l'OhmMapper (Fig. 2.12) è realizzare più piante sovrapposte:

- si scelgono le corde non conduttive di lunghezza adeguata alle profondità che si intendono investigare
- si trascina l'OhmMapper lungo linee parallele per la distanza desiderata mantenendo un'andatura costante
- una volta completata una mappa utilizzando una corda, si sostituisce la corda e si realizza una nuova mappa a una diversa profondità d'indagine

È possibile ottenere un modello 3D di resistività anche realizzando più sezioni e poi unendo assieme i dati in uno stesso file: questa procedura risulta essere più lunga e laboriosa per gli operatori in campagna, in quanto dovranno cambiare corda non conduttiva ogni volta

che sarà stato acquisito un profilo di resistività, fino ad ottenere dati necessari ad una sezione, per poi ricominciare con la sezione successiva.

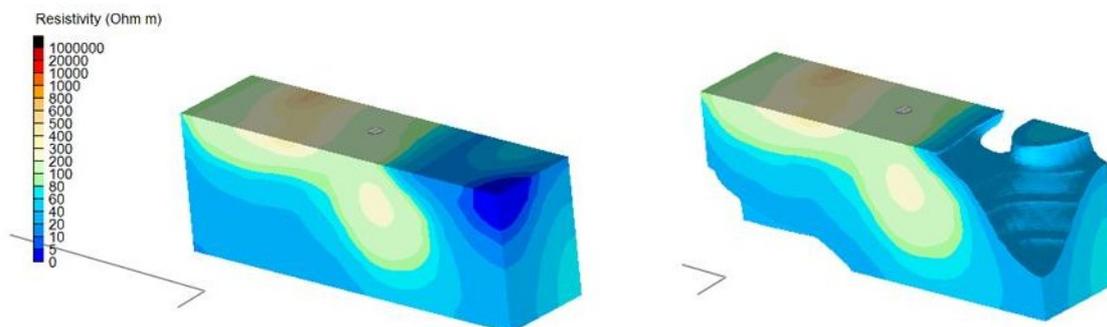


Fig. 2.12 – Esempio di modello di resistività tridimensionale realizzato attraverso l’elaborazione di dati acquisiti con l’OhmMapper.

L’acquisizione con l’OhmMapper di un intero set di dati sufficiente a ricostruire un modello di resistività apparente ρ_a del sottosuolo è più veloce della stessa tipologia di acquisizione realizzata con un georesistivimetro monocanale ad accoppiamento galvanico. Con un georesistivimetro di tipo tradizionale è infatti necessario inserire un numero di elettrodi finito nel terreno, attendere il tempo necessario dell’acquisizione e spostare l’intero set di elettrodi tante volte quante necessario a coprire tutta l’area di interesse.

2.7 Procedure di campagna con l’OhmMapper

Di seguito saranno elencate sinteticamente le principali procedure adottate in campagna per acquisire dati di resistività con l’OhmMapper. Per realizzare un’indagine accurata con l’OhmMapper è opportuno coinvolgere almeno due persone; se il numero di persone coinvolte aumenta, fino a quattro, i benefici saranno soprattutto in termini di tempo impiegato per organizzare il campo di lavoro.

1. Organizzazione del campo di lavoro: indicare sul terreno con picchetti o bandierine il punto di inizio e di fine dell’indagine; se opportuno, posizionare anche segnali a distanza regolare lungo ogni linea precorsa, sia per permettere all’operatore di percorrere correttamente le linee, sia per distribuire in modo omogeneo nello spazio le misure acquisite. Nel caso di realizzazione di una griglia caratterizzata da più linee parallele, posizionare un segnale evidente all’inizio e alla fine di ogni linea. I vertici

dell'area indagata dovranno essere riportati su una carta topografica o almeno posizionati in uno schizzo attraverso il riferimento con oggetti superficiali fissi e visibili, per poter localizzare correttamente i valori di resistività del sottosuolo e non rendere vana l'indagine. La spaziatura tra le linee e la velocità dell'operatore dovranno essere adeguate al tipo di bersaglio che si intende individuare e al livello di dettaglio che si vuole raggiungere.



Fig. 2.13 – Realizzazione di un'indagine di resistività con l'OhmMapper.

2. Realizzazione di un test di acquisizione in modalità search mode per analizzare la resistività del terreno
3. Impostazione della geometria dello strumento opportuna all'acquisizione e realizzazione di un profilo-test in entrambe le direzioni, per verificare la qualità dei dati acquisiti
4. Realizzazione dell'indagine: effettuare l'acquisizione di tutti i profili in modalità simple survey o mapped survey, segnando su un blocco di appunti la direzione di acquisizione, il punto di inizio e di fine di ogni profilo. L'operatore, oltre a procedere in linea retta, deve il più possibile mantenere un'andatura omogenea lungo ogni linea e per la durata dell'intero survey, così da campionare in modo omogeneo tutte le aree percorse. Se l'acquisizione dei dati viene realizzata in continuo (quindi un dato al

secondo), l'andatura dell'operatore deve essere proporzionata alle dimensioni del bersaglio che si intende individuare.

5. Operazioni di ausilio all'operatore: aiutare l'operatore a seguire in modo corretto il percorso scelto, correggendo anche le eventuali deviazioni di rotta dello strumento, senza mai sollevarlo da terra. In caso di impedimenti nel percorso o di distrazioni, l'operatore può mettere in pausa lo strumento e riprendere l'acquisizione una volta risolto l'eventuale problema
6. Esportazione dei dati su PC: alla fine dell'indagine, scaricare i dati sul PC, correggere, se necessario, la geometria di acquisizione con il software proprietario MagMap2000 ed esportare il file in un formato adeguato per essere elaborato o visualizzato attraverso appositi software commerciali quali Res2Dinv, Res3Dinv, ResiX2D e Surfer.

3 Studio sistematico dell'OhmMapper in situazioni controllate

In questo capitolo saranno trattate nel particolare le indagini svolte nell'Area Test per la geofisica gestita dal Museo Civico di Rovereto (TN). Dopo un paragrafo introduttivo sulle principali caratteristiche dell'Area Test, saranno riportate le motivazioni che hanno spinto ad utilizzare l'OhmMapper in un sito con caratteristiche controllate. Per verificare l'attendibilità delle misure di resistività realizzate con l'OhmMapper, le stesse sono state eseguite con il georesistivimetro monocanale ad accoppiamento galvanico Abem Terrameter SAS 1000: il confronto tra i dati di resistività sarà indispensabile per interpretare in modo corretto le anomalie individuate durante i survey in contesti archeologici.

3.1 L'area Test per la Geofisica "Bosco della Città"

In località Bosco della Città, area verde pubblica posta a pochi chilometri dal centro abitato di Rovereto (TN), il Museo Civico ha progettato e realizzato un'Area Test mirata alla sperimentazione e alla taratura di metodologie geofisiche. Il sito si colloca all'interno di un pianoro privo di copertura arborea e inerbato (Fig. 3.1), la cui superficie è di circa 3000 m².



Fig. 3.1 – L'area Test di Rovereto vista da Nord-Ovest.

Questa zona è caratterizzata dalla presenza, a ca. 3 m dal piano campagna, di un substrato roccioso (calcare micritico Cretacico appartenente alla Formazione del Biancone) dall'andamento irregolare ricoperto da un deposito Quaternario eterogeneo che nella porzione inferiore è di natura glaciale, mentre superiormente è costituito da terreno agricolo ricco in humus (Fig. 3.2).

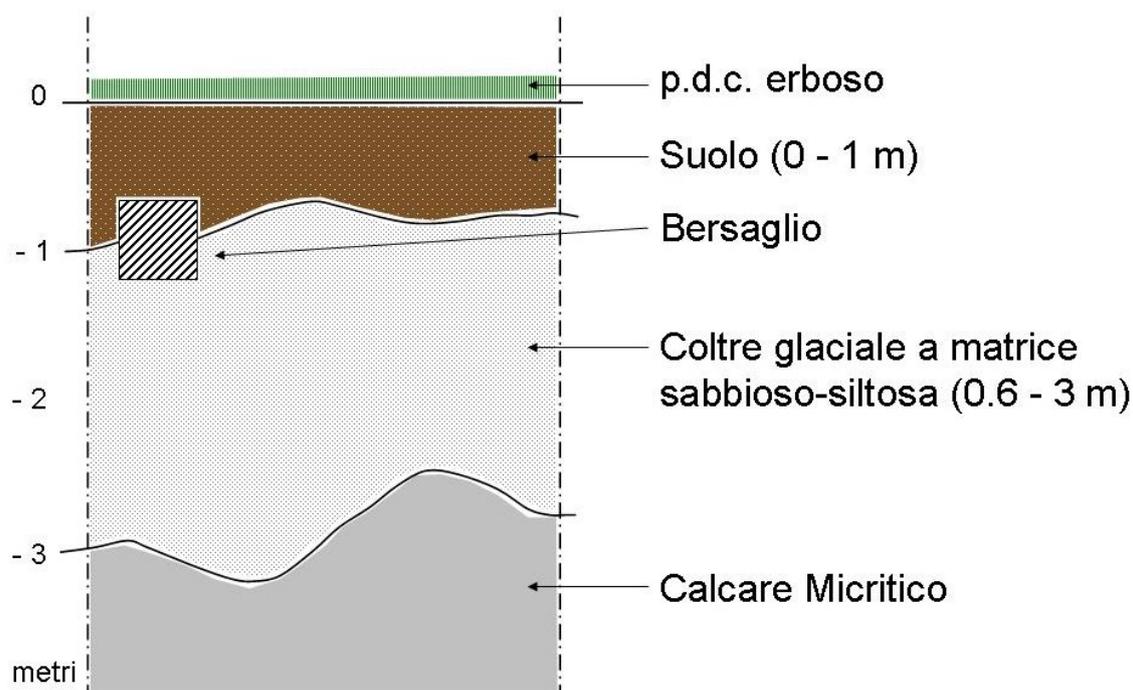


Fig. 3.2 – Sezione schematica dell'Area Test di Rovereto.

Tali caratteristiche geologiche e geomorfologiche hanno indirizzato verso il seppellimento, a profondità modesta, di target ricostruiti a scala reale, di interesse archeologico ed ingegneristico-civile.

Il sito di “Bosco della città” è stato rilevato in dettaglio e georeferenziato, al fine di posizionare con estrema precisione non solo gli elementi superficiali (punti di riferimento per le indagini geofisiche), ma anche i target sepolti. Le fosse in cui sono stati sepolti i target sono state ricoperte con gli stessi materiali scavati, per assicurare la continuità geotecnica col terreno lasciato indisturbato: per questo motivo l'area test di Rovereto si presenta come un sito con caratteristiche naturali, come quelle incontrate durante la maggior parte delle indagini geofisiche in contesti archeologici.

I bersagli dell'area test sono muri a secco, muri con malta e intonaco, muri in mattoni pieni, platee, strade e vuoti, con caratteristiche idonee a simulare possibili bersagli di natura archeologica ed ingegneristica.

Tutti i bersagli sono coperti da 0,6m di suolo agrario, che caratterizza il materiale di copertura di tutta l'area. Le strutture si differenziano per forma, proprietà e tipo di riempimento, come mostrato schematicamente nella tabella Tab. 3.1 e nell'immagine Fig. 3.3.

Num.	Tipo di bersaglio	Materiale	Dimensioni
1	Muro	Sassi a secco + tratto in bentonite	altezza 0,6 m, larghezza 0,6 m
2	Muro	Sassi allettati con malta + intonaco	altezza 0,6 m, larghezza 0,6 m
3	Muro	Mattoni in argilla allettati con malta	altezza 0,6 m, larghezza 0,6 m
4	Platea	Cemento	3 m x 3 m x 0,3 m
5	Strada	Sassi e cemento	2 m x 8 m x 0,3 m
6	Platea	Cemento e rete elettrosaldata	3 m x 3 m x 0,3 m
7	Fossa	Argilla limosa lacustre	altezza 0,6 m, larghezza 0,6 m
8	Vuoto	Polistirolo	3 m x 3 m x 3 m

Tab. 3.1 – Tipologia, materiali e dimensioni dei bersagli dell'Area Test di Rovereto.

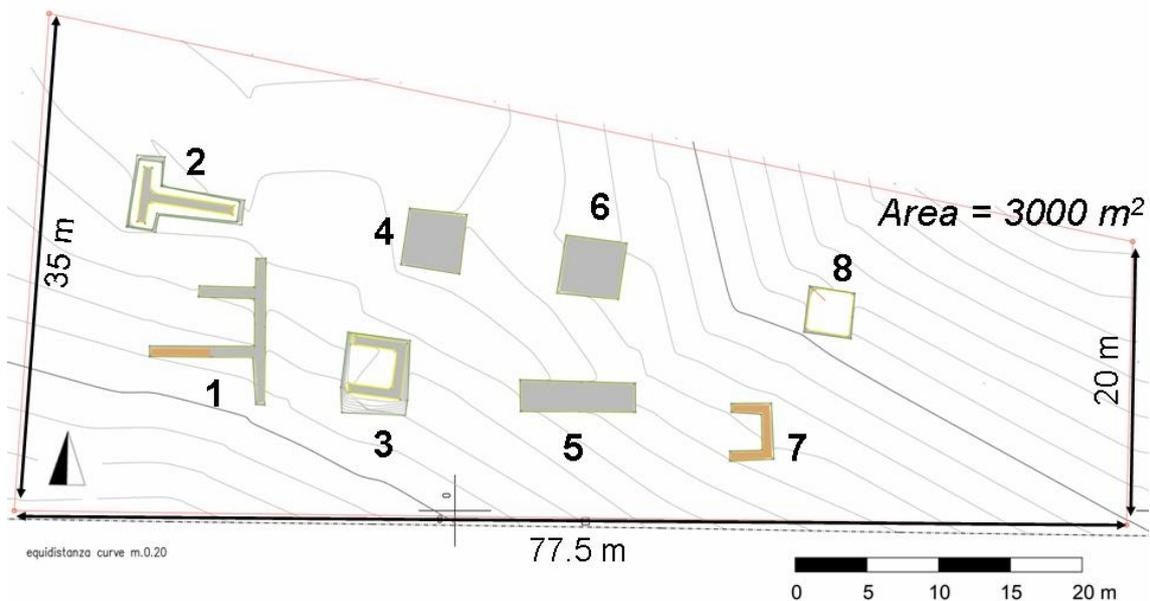


Fig. 3.3 – Distribuzione dei bersagli nell'Area Test di Rovereto (da Finotti 2003). I numeri si riferiscono alla tabella 3.1.

3.2 Misure di resistenza e resistività con OhmMapper e georesistivimetro ad elettrodi: confronto in situazione controllata

All'inizio del progetto di ricerca il georesistivimetro OhmMapper è stato utilizzato in diversi siti archeologici in Italia e all'estero: in queste occasioni, è stata verificata l'efficacia dei risultati acquisiti soprattutto in sezione, ma per un uso più consapevole dello strumento si è ritenuto indispensabile confrontare i risultati ottenuti con l'OhmMapper con quelli ottenuti con un georesistivimetro ad accoppiamento galvanico, di uso più comune e dall'efficacia comprovata da decenni di attività.

Per poter realizzare un confronto affidabile dei risultati ottenuti con l'OhmMapper con quelli ottenuti utilizzando il georesistivimetro tradizionale ad accoppiamento galvanico Terrameter SAS 1000 (ABEM, Sweden) è stata organizzata una campagna di indagini sistematiche rigorose nel contesto noto e controllato nell'Area Test del Museo Civico di Rovereto: il confronto dei profili di resistività realizzati con i due differenti strumenti sullo stesso target noto, con caratteristiche compatibili con quelle di strutture presenti in un sito archeologico, ha permesso di ottenere un'importante taratura dello strumento e valutarne l'attendibilità dei risultati; tale taratura si pone l'obiettivo di colmare una lacuna nella recente letteratura in materia.

Il target su cui è stato compiuto il confronto è il n°1 della tabella Tab. 3.1, nel tratto costituito da pietre allettate a secco (Fig. 3.4).

La scelta di effettuare il confronto tra i dati di resistività sul muro in pietra a secco è stata dettata dalla forma regolare e dalle caratteristiche elettriche del materiale di cui è costituito il target, che sicuramente generano un'anomalia di resistività ben definita: la possibilità di analizzare le caratteristiche di un segnale certo che non si possa confondere con un rumore o una variazione delle proprietà elettriche della copertura quaternaria rende più efficace il confronto tra i dati acquisiti con l'OhmMapper e quelli acquisiti con il Terrameter. Inoltre il bersaglio n°1 ha caratteristiche compatibili con la maggior parte delle strutture archeologiche oggetto della ricerca.



Fig. 3.4 – Muro a secco (n° 1 in Tab. 3.1) durante la realizzazione dell'Area Test di Rovereto (da Finotti 2003).

L'indagine è stata effettuata realizzando lungo la stessa linea profili di resistività con il georesistivimetro ad accoppiamento capacitivo OhmMapper e con il georesistivimetro ad accoppiamento galvanico Terrameter SAS 1000. Perché i rilievi potessero essere confrontabili, si è scelto di utilizzare un array dipolo-dipolo con geometria analoga a quella dell'OhmMapper per il georesistivimetro Terrameter.

Per quanto l'indagine geoelettrica in contesti archeologici restituisca alla fine un modello di resistività 2D o 3D, più adatto all'interpretazione e alla pubblicazione, per effettuare un confronto puntuale dei dati acquisiti, si è ritenuto opportuno realizzare dei profili singoli con entrambi gli strumenti.

Assumendo che la stessa configurazione geometrica dei due strumenti permetta, nelle stesse condizioni di contesto, di raggiungere la stessa profondità di indagine, sono stati realizzati diversi profili di resistività, con eguale lunghezza, lungo la stessa linea di indagine.

Nella tabella (Tab. 3.2) sono riportate nel dettaglio le configurazioni geometriche dei due strumenti utilizzate durante il confronto.

N	Lunghezza rilievo [m]	Lunghezza antenne [m] O.Mapper	Ampiezza dipolo [m] Terrameter	Distanza Antenne [m] O.Mapper	Distanza dipoli [m] Terrameter	Profondità indagata [m]
1	10	2,5	2,5	0,625	0,625	0,5
2	10	2,5	2,5	1,25	1,25	0,7
3	10	2,5	2,5	1,875	1,875	0,9
4	10	2,5	2,5	5	5	1,7

Tab. 3.2 – Tabella riassuntiva delle caratteristiche geometriche e profondità di indagine dei profili realizzati nell'Area Test di Rovereto con l'OhmMapper e con il Terrameter SAS 1000.

La tipologia di andamento di un profilo realizzato con dipolo-dipolo in corrispondenza di una discontinuità verticale con resistività maggiore rispetto al contesto è caratterizzato da un innalzamento dei valori di resistività in prossimità dei limiti verticali della discontinuità, con all'interno un picco verso il basso¹³ (Fig. 3.5): questo andamento ad M si suppone caratterizzati anche i profili realizzati con l'OhmMapper.

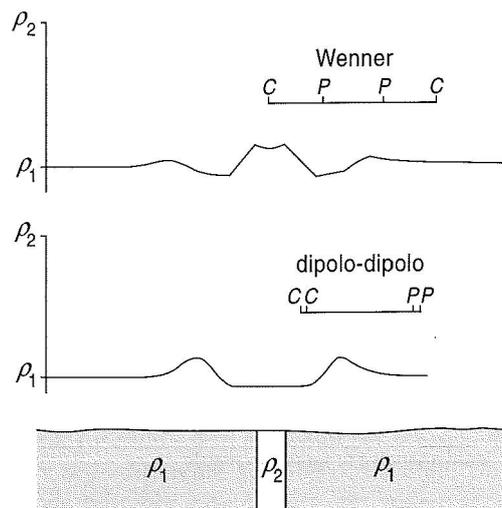


Fig. 3.5 – Confronto tra i profili di resistività realizzati in presenza di un target con andamento verticale di resistività maggiore rispetto al contesto ($\rho_2 > \rho_1$) utilizzando gli array Wenner e dipolo-dipolo (da Musset 2003).

Per completezza di informazioni ognuno dei profili con l'OhmMapper è stato realizzato a due velocità differenti: con la prima velocità (V1) l'operatore ha percorso i 10 m del rilievo con una velocità tale da acquisire una misura ogni 15 cm circa; con la seconda velocità (V2) l'operatore ha percorso i 10 m del rilievo con una velocità tale da acquisire una misura ogni metro. La scelta di realizzare l'indagine con l'OhmMapper a due velocità (e quindi con due

¹³ Musset 2003.

diversi ordini di risoluzione orizzontale) è motivata dalla volontà di verificare quanto avere una risoluzione orizzontale dettagliata sia vantaggioso per una migliore interpretazione dei dati.



Fig. 3.6 – Acquisizione dei profili con l'OhmMapper nell'Area Test del Museo Civico di Rovereto. A sinistra dell'operatore è possibile notare l'attrezzatura utilizzata per realizzare i profili con il georesistivimetro ad accoppiamento galvanico Terrameter SAS1000.

Il confronto è stato inizialmente effettuato tra i valori di Resistenza (misurati in Ω) dei 4 profili a profondità differenti ottenuti lungo la stessa linea di indagine utilizzando l'OhmMapper (a due velocità) e il Terrameter.

Profili di Resistenza a 0,5 m di profondità

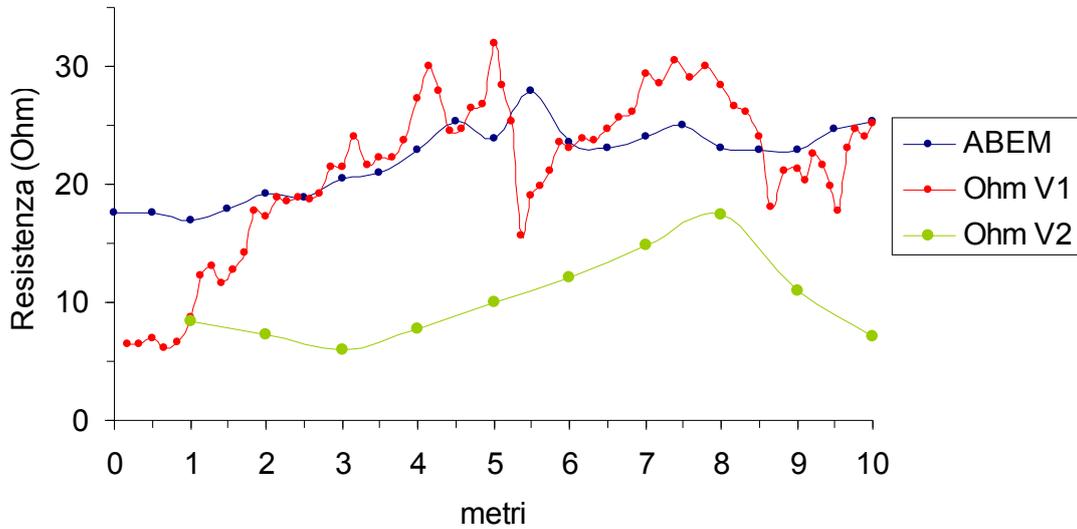


Fig. 3.7 – Grafico di confronto tra i profili di Resistenza realizzati con l'OhmMapper a due velocità (Ohm V1 e Ohm V2) e con il Terrameter SAS 1000 (ABEM), utilizzando una distanza tra i dipoli di 0,625 m e indagando una profondità di 0,5 m circa.

Profili di Resistenza a 0,7 m di profondità

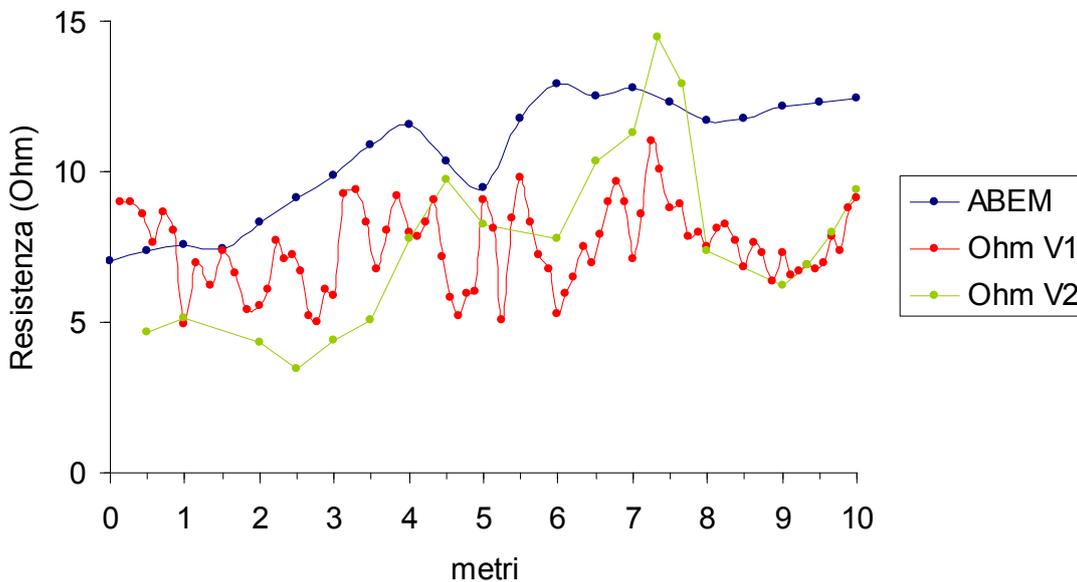


Fig. 3.8 – Grafico di confronto tra i profili di Resistenza realizzati con l'OhmMapper a due velocità (Ohm V1 e Ohm V2) e con il Terrameter SAS 1000 (ABEM), utilizzando una distanza tra i dipoli di 1,25 m e indagando una profondità di 0,7 m circa.

Profili di Resistenza a 0,9 m di profondità

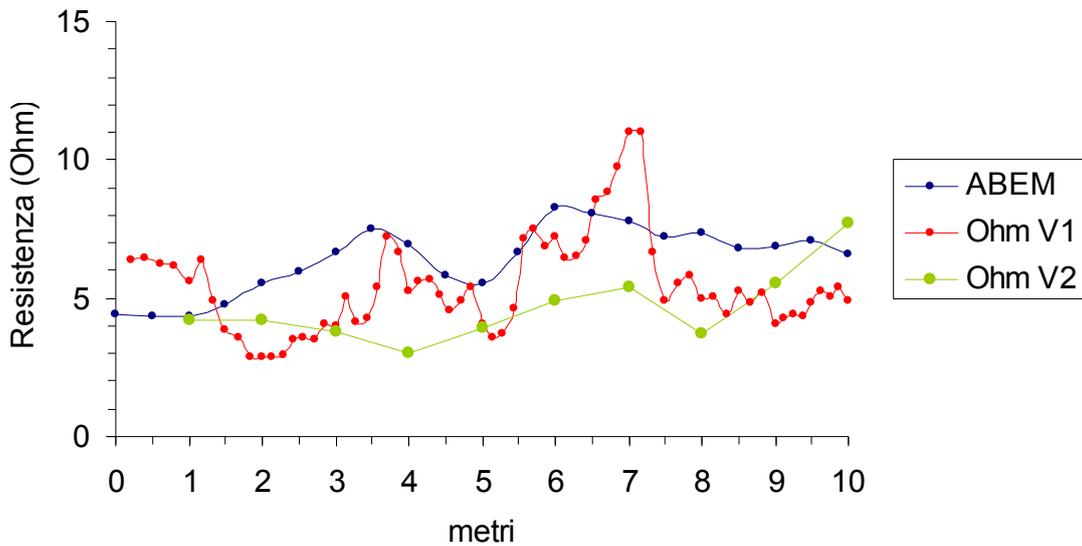


Fig. 3.9 – Grafico di confronto tra i profili di Resistenza realizzati con l'OhmMapper a due velocità (Ohm V1 e Ohm V2) e con il Terrameter SAS 1000 (ABEM), utilizzando una distanza tra i dipoli di 1, 875 m e indagando una profondità di 0,9 m circa.

Profili di Resistenza a 1,7 m di profondità

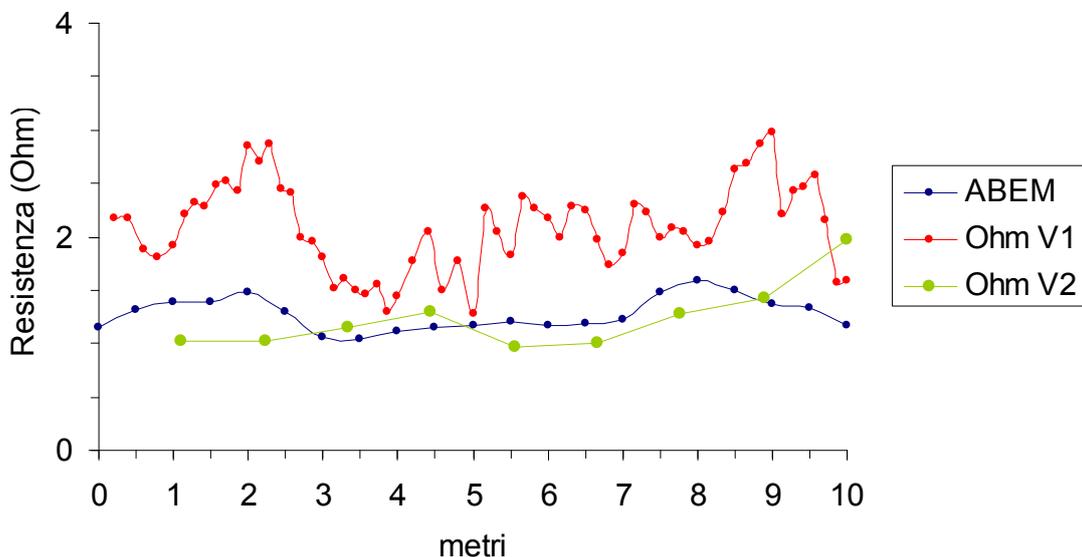


Fig. 3.10 – Grafico di confronto tra i profili di Resistenza realizzati con l'OhmMapper a due velocità (Ohm V1 e Ohm V2) e con il Terrameter SAS 1000 (ABEM), utilizzando una distanza tra i dipoli di 5 m e indagando una profondità di 1,7 m circa.

Analizzando i profili di resistenza acquisiti alle varie profondità è possibile notare che:

- l'ordine di grandezza dei valori di resistenza acquisiti con l'OhmMapper e con il georesistivimetro ad accoppiamento galvanico è confrontabili
- nei profili realizzati con il Terrameter SAS 1000 a 0,7 e a 0,9 metri dalla superficie (Fig. 3.8 e 3.9 in blu) è possibile vedere chiaramente l'andamento a M tipico della presenza di un target ad andamento verticale e resistività più alta rispetto al contesto
- anche nei profili realizzati con l'OhmMapper a velocità V2 a 0,7 e a 0,9 metri dalla superficie (Fig. 3.8 e 3.9 in verde) è possibile riconoscere l'andamento a M tipico della presenza di un target ad andamento verticale e resistività più alta rispetto al contesto, con picchi a 4 e a 6-8 m.
- nei profili realizzati con l'OhmMapper a velocità V1 a 0,7 e a 0,9 metri dalla superficie (Fig. 3.8 e 3.9 in rosso) il dettaglio di risoluzione orizzontale molto più elevato rispetto alle altre acquisizioni maschera in parte l'andamento ad M, più evidente in Fig. 3.7.
- nei profili di resistenza realizzati a 1,7 metri circa di profondità (Fig. 3.10) è possibile riconoscere un andamento ad M molto allargato, con picchi a 2 e a 8-9 m, dovuto al passaggio di corrente attraverso il target che si trova più in superficie, comportamento tipico delle acquisizioni con array dipolo-dipolo.

Utilizzando il fattore k noto in letteratura per l'array dipolo-dipolo¹⁴ e per la particolare configurazione dell'OhmMapper¹⁵, si è calcolata la resistività apparente a partire dai valori di resistenza misurata.

¹⁴ Paragrafo 1.3; equazione (1.15).

¹⁵ Paragrafo 2.1; equazione (2.1).

Profili di Resistività a 0,5 m di profondità

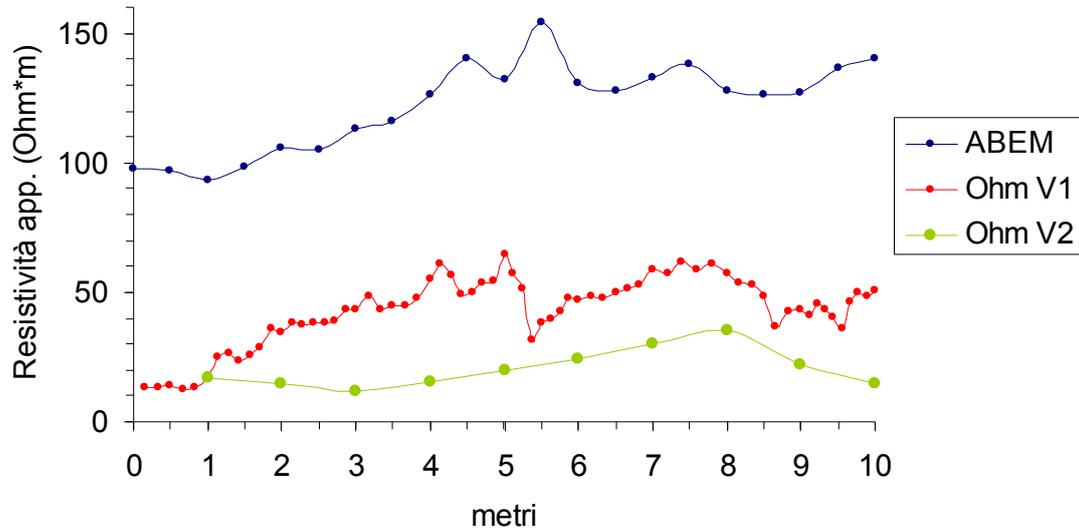


Fig. 3.11 – Grafico di confronto tra i profili di Resistività apparente realizzati con l'OhmMapper a due velocità (Ohm V1 e Ohm V2) e con il Terrameter SAS 1000 (ABEM), utilizzando una distanza tra i dipoli di 0,625 m e indagando una profondità di 0,5 m circa.

Profili di Resistività a 0,7 m di profondità

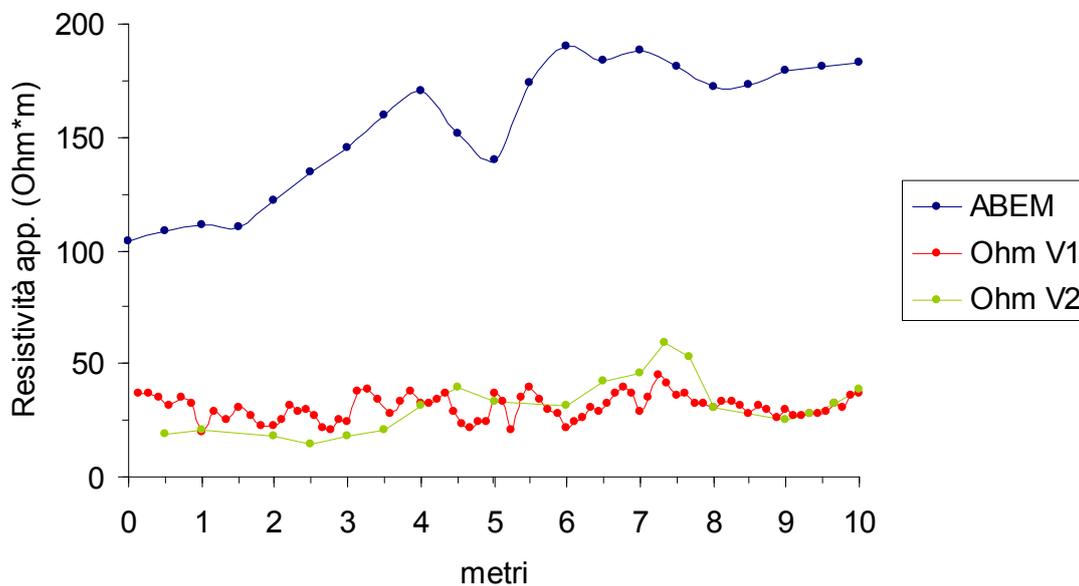


Fig. 3.12 – Grafico di confronto tra i profili di Resistività apparente realizzati con l'OhmMapper a due velocità (Ohm V1 e Ohm V2) e con il Terrameter SAS 1000 (ABEM), utilizzando una distanza tra i dipoli di 1,25 m e indagando una profondità di 0,7 m circa.

Profili di Resistività a 0,9 m di profondità

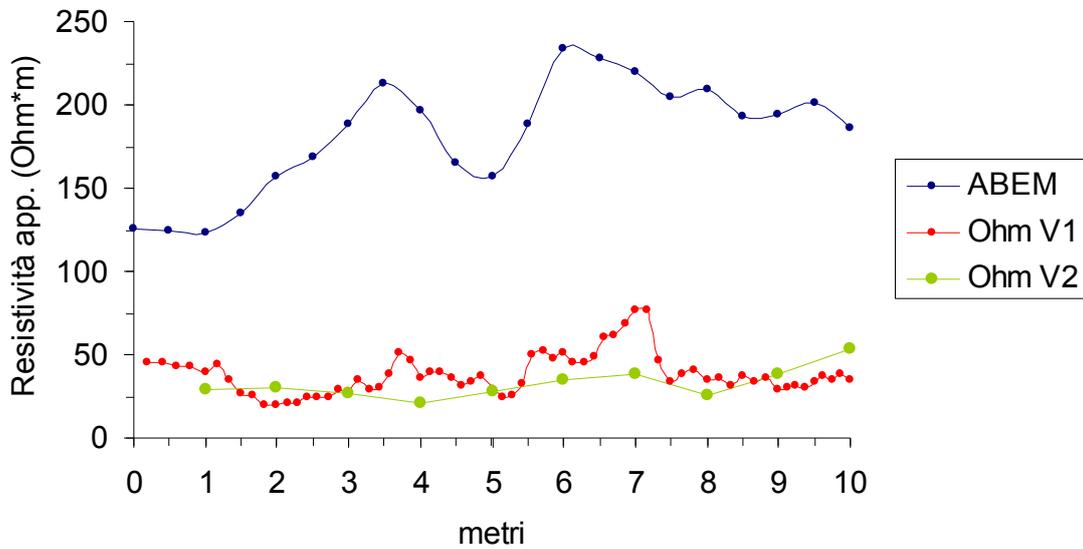


Fig. 3.13 – Grafico di confronto tra i profili di Resistività apparente realizzati con l'OhmMapper a due velocità (Ohm V1 e Ohm V2) e con il Terrameter SAS 1000 (ABEM), utilizzando una distanza tra i dipoli di 1, 875 m e indagando una profondità di 0,9 m circa.

Profili di Resistività a 1,7 m di profondità

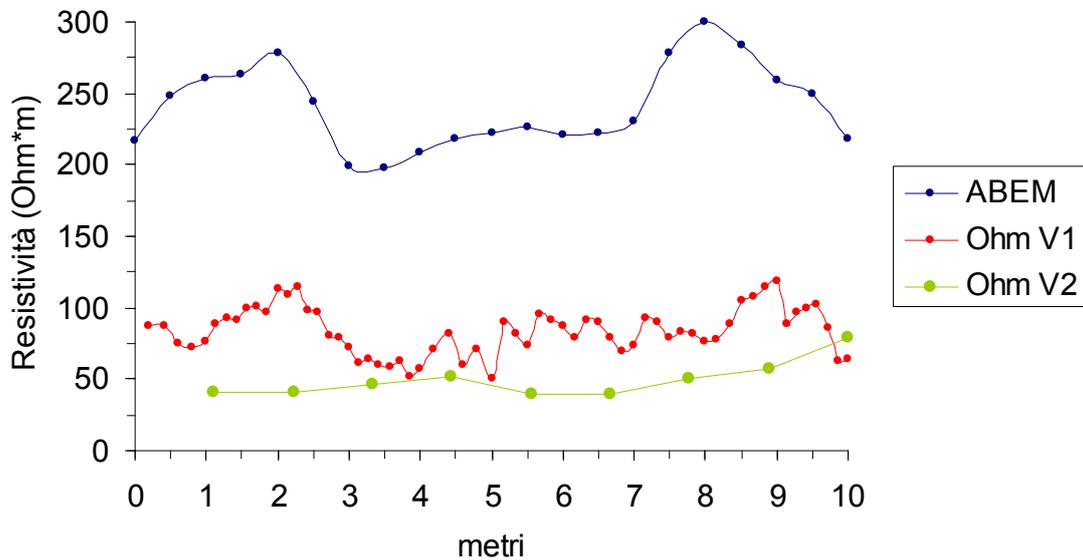


Fig. 3.14 – Grafico di confronto tra i profili di Resistività apparente realizzati con l'OhmMapper a due velocità (Ohm V1 e Ohm V2) e con il Terrameter SAS 1000 (ABEM), utilizzando una distanza tra i dipoli di 5 m e indagando una profondità di 1,7 m circa.

Come è possibile facilmente notare dai grafici di Fig. 3.11, 3.12, 3.13 e 3.14 i valori di resistività apparente dei profili realizzati con il georesistivimetro ad accoppiamento galvanico

risultano essere sempre più elevati rispetto a quelli dei profili acquisiti con il georesistivimetro ad accoppiamento capacitivo OhmMapper. Questa discordanza di valori, visibile qui in modo puntuale, si ripercuote anche su modelli di resistività più complessi, bidimensionali e tridimensionali, frutto dell'inversione dei dati: in Fig. 3.15 è riportato un esempio di come questo fenomeno sia stato verificato anche nel sito della città romana di Sentinum, dove è stato possibile realizzare grossomodo lungo la stessa linea due sezioni di resistività con l'OhmMapper e con il georesistivimetro Terrameter SAS 1000.

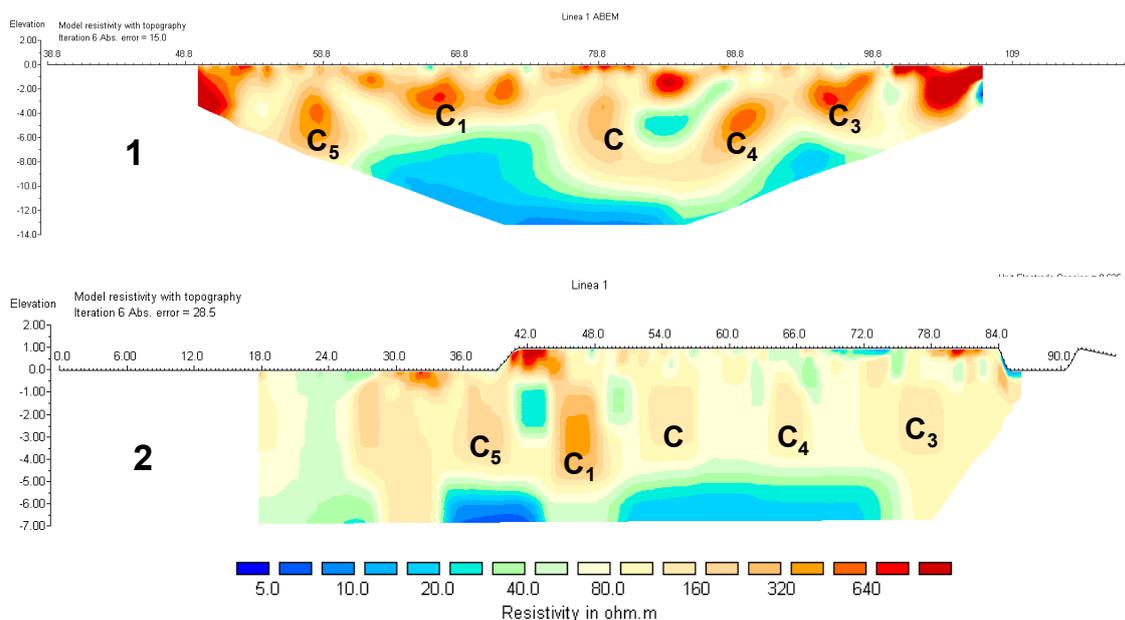


Fig. 3.15 – Dall'alto verso il basso, modello di resistività realizzato con il georesistivimetro ad accoppiamento galvanico ABEM Terrameter SAS1000 e sezione di resistività corrispondente al Rilievo 1 realizzato con l'OhmMapper nel sito della città romana di Sentinum. Nonostante la scala di valori utilizzata per i due modelli di resistività sia la medesima, è possibile apprezzare come i segnali ad alta resistività visibili sulla tomografia elettrica realizzata con il Terrameter abbiano valori più elevati rispetto ai corrispondenti sulla sezione di resistività ottenuta con l'OhmMapper.

Nonostante questa discordanza di valori, dovuta al calcolo del fattore k secondo la formula studiata da Timofeev¹⁶ e adottata dalla Geometrics Inc.¹⁷, casa produttrice dello strumento, i profili di resistività apparente realizzati con l'OhmMapper presentano in corrispondenza del target il tipico andamento ad M caratteristico degli array con il dipolo di potenziale esterno rispetto al dipolo di corrente (Fig. 3.16).

¹⁶ Timofeev 1994.

¹⁷ DATAMAP 2001.

OhmMapper Profili di Resistività a 0,9 m di profondità

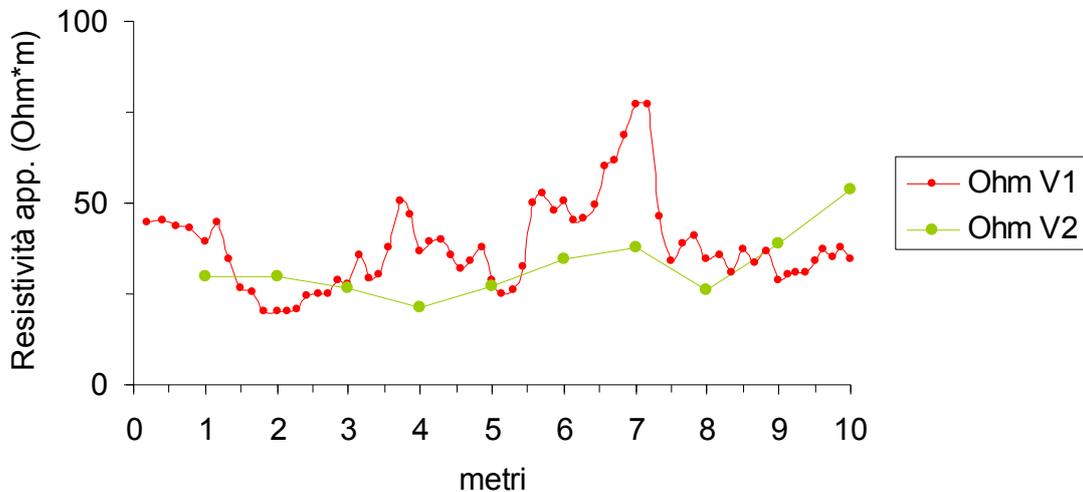


Fig. 3.16 – Profili di Resistività apparente realizzati con l'OhmMapper a due velocità (Ohm V1 e Ohm V2) utilizzando una distanza tra i dipoli di 1, 875 m e indagando una profondità di 0,9 m circa. Per quanto il profilo Ohm V1 (in rosso) sia molto frastagliato, perché caratterizzato da numerose acquisizioni, è possibile riconoscere il tipico andamento a M caratteristico degli array con il dipolo di potenziale esterno rispetto al dipolo di corrente.

Alla luce di questo confronto analitico in un contesto controllato come quello dell'Area Test per la Geofisica del Museo Civico di Rovereto è possibile affermare che l'OhmMapper permette di individuare in modo chiaro target con caratteristiche analoghe a quelle di una struttura archeologica con andamento verticale e con resistività maggiore rispetto al contesto: l'andamento delle misure è assimilabile a quello dei dati acquisiti con uno strumento ad accoppiamento galvanico configurato secondo un array dipolo-dipolo.

Inoltre la risoluzione spaziale orizzontale di acquisizione con l'OhmMapper non dipende dalla configurazione, ma soltanto dalla velocità dell'operatore: lo strumento risulta quindi molto adeguato all'applicazione in campo archeologico dove i target sono spesso di dimensioni decimetriche.

Un'ulteriore caratteristica da non sottovalutare è la rapidità con cui è possibile acquisire le misure: per realizzare i profili di 10 m con l'OhmMapper è stato sufficiente al massimo poco più di un minuto, mentre, per realizzare lo stesso profilo con il georesistivimetro ad accoppiamento galvanico, caratterizzato da un numero inferiore di misure, sono stati necessari almeno 25 minuti (Tab. 3.3).

Strumento	Profili a 0,5 m di profondità		Profili a 0,7 m di profondità	
	Numero di misure	Tempo di acquisizione	Numero di misure	Tempo di acquisizione
OhmMapper V1	67	1'06''	80	1'19''
OhmMapper V2	10	10''	19	13''
Terrameter SAS 1000	21	30'	21	28'
Strumento	Profili a 0,9 m di profondità		Profili a 1,7 m di profondità	
	Numero di misure	Tempo di acquisizione	Numero di misure	Tempo di acquisizione
OhmMapper V1	66	1'05''	62	1'01''
OhmMapper V2	9	09''	9	08''
Terrameter SAS 1000	21	25'	21	27'

Tab. 3.3 – Confronto tra il numero di misure e i tempi di acquisizione dei profili di lunghezza 10 m realizzati con l'OhmMapper a velocità V1 e V2 e con il Terrameter SAS 1000.

4 Utilizzo dell'OhmMapper per indagini di resistività in siti archeologici in contesti urbani moderni

In questo capitolo sono riportati i risultati di due indagini geoelettriche realizzate con il georesistivimetro ad accoppiamento capacitivo OhmMapper per l'individuazione di possibili elementi sepolti di natura archeologica in contesti urbani moderni.

I siti archeologici analizzati si trovano nei contesti urbani moderni di Rosarno (RC) e Sesto Fiorentino (FI) e sono stati selezionati in quanto rappresentativi delle caratteristiche tipiche di un rilievo realizzato con l'OhmMapper in contesti urbani.

In particolare sarà riportata una scheda per ogni sito indagato: dopo una breve introduzione archeologica e geologico-geomorfologica, saranno presentate la tipologia di target da individuare, le configurazioni geometriche utilizzate e i dettagli tecnici con cui sono stati eseguiti i rilievi.

I modelli di resistività ottenuti saranno analizzati e interpretati in chiave archeologica. La scala di valori di resistività è scelta ad hoc per ogni sito indagato, in base alle caratteristiche dei target e del contesto in cui essi si trovano. Alla fine di ogni scheda di sito i modelli di resistività interpretati saranno confrontati, quando possibile, con altri dati geofisici o dati archeologici relativi alla stessa area, al fine di verificare l'efficacia dello strumento nel contesto in esame.

Come ulteriore approfondimento sarà analizzato in dettaglio parte di un profilo di resistività apparente acquisito in corrispondenza di uno dei target interpretati come evidenza archeologica, in modo da verificare se il suo andamento sia analogo o assimilabile a quello riscontrato nei profili acquisiti nell'Area Test di Rovereto (Par. 3.2).

Si è scelto di presentare in un capitolo a parte i siti archeologici che si trovano in contesti urbani moderni, in quanto le fasi di acquisizione, elaborazione ed interpretazione dei dati sono spesso soggette a complicazioni risolvibili attraverso strategie differenti da quelle utilizzate per un sito extraurbano. Infatti, per quanto l'OhmMapper sia adatto alla realizzazione rapida e non invasiva di rilievi di resistività su asfalto, cemento e pavimentazioni storiche, il contesto urbano è spesso caratterizzato anche dalla presenza di impedimenti fisici in superficie (quali palazzi e scalinate), che limitano lo spazio a disposizione. Per quanto riguarda l'elaborazione e l'interpretazione dei dati, bisogna tenere

conto dei possibili elementi di natura antropica, ma non archeologica, presenti nel sottosuolo e spesso aventi caratteristiche elettriche paragonabili ai target di interesse: in questi casi la fase interpretativa deve essere molto cauta, soprattutto quando i dati archeologici a disposizione sono scarsi o poco chiari.

4.1 Santuario della colonia greca di Medma (Rosarno – RC)

4.1.1 Caratteristiche del sito e pianificazione del survey a Rosarno

<i>Nome del sito</i>	Colonia greca di Medma
<i>Target</i>	Area sacra di periodo greco: fondazioni di ciottoli, pietre granitiche e massi di arenaria allettati con terra o a secco
<i>Ubicazione</i>	Rosarno (RC) - Mattatoio in disuso
<i>Periodo storico</i>	VI-II sec. a.C.
<i>Geologia</i> ¹⁸	Sabbie e sabbie siltose di origine Pliocenica conglomerati sabbiosi di origine Pleistocenica
<i>Geomorfologia</i>	Terrazzo fluviale

Il contesto urbano attuale del centro di Rosarno (RC), nel quale è inserita l'area dell'ex mattatoio, ha condizionato la scelta del posizionamento dei rilievi: le aree indagate con l'OhmMapper sono localizzate all'interno e all'esterno del Mattatoio (Fig. 4.1), al fine di intercettare ortogonalmente le eventuali strutture archeologiche inerenti all'area sacra greca, in accordo con la dott.ssa Iannelli della Soprintendenza Archeologica della Calabria.

Il posizionamento dei rilievi è stato in parte condizionato dalla presenza di impedimenti fisici (muri ed edifici), che hanno limitato la manovrabilità dello strumento, permettendo comunque di indagare aree strategiche a profondità di investigazione adeguate (Tab. 4.1) al fine di individuare eventuali strutture archeologiche.

In questa sede saranno presentati solo i risultati del Rilievo 1, per i quali è possibile effettuare un confronto con rilievi di natura archeologica pubblicati¹⁹ e quindi più indicati a rappresentare l'efficacia dell'utilizzo del georesistivimetro OhmMapper in un contesto archeologico urbano.

¹⁸ Gioria G. 1967. Foglio 246 – III N.O. “Rosarno”, Carta d'Italia 1:25.000 dell'I.G.M., Carta geologica della Calabria.

¹⁹ Iannelli 2005.



Fig. 4.1 – Posizionamento dei rilievi nell'area dell'ex mattatoio comunale di Rosarno su uno stralcio della Carta Topografica in scala 1:2000 fornita dall'Ufficio Tecnico del Comune di Rosarno.

Configurazione con antenne da 2.5 m		
Lunghezza corda non conduttiva [m]	Profondità indagata [m]	Lunghezza totale dello strumento [m] (con offset di 5 m)
0,625	0,5	10,625
1,25	0,7	11,25
1,875	0,9	11,875
2,5	1	12,5
3,125	1,2	13,125
3,75	1,4	13,75
4,375	1,6	14,375
5	1,7	15
5,625	1,9	15,625
6,25	2	16,25
6,875	2,2	16,875
7,5	2,4	17,5

Tab. 4.1 – Configurazione dell'OhmMapper utilizzata durante il survey a Rosarno e relativa lunghezza dello strumento.

Alla luce delle caratteristiche geologiche e archeologiche del sito in esame è stata definita una scala caratterizzata da 17 intervalli di resistività corrispondenti ad altrettanti colori (Fig. 4.2): i valori più bassi di resistività ($\rho < 80 \Omega\text{m}$) corrispondono al layer di sabbie, a volte potenzialmente sature, caratteristico del contesto geologico superficiale dell'area in esame; i valori di resistività maggiori di $1000 \Omega\text{m}$, registrati ad una profondità mai inferiore ai 2 m, sono riferibili al deposito pleistocenico di conglomerato in matrice sabbiosa; i segnali caratterizzati da valori di resistività compresi tra 100 e $1000 \Omega\text{m}$ e posizionati a profondità comprese tra la superficie e 1,5 m possono essere interpretati come elementi antropici.

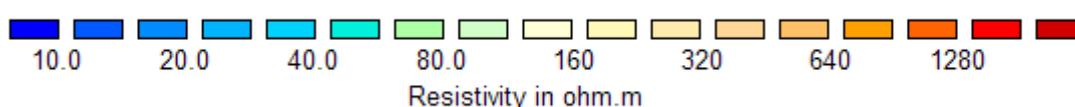


Fig. 4.2 – Scala di valori e colori utilizzata per l'interpretazione dei modelli di resistività di Rosarno.

Tutte le tomografie sono state invertite mediante software Res2Dinv utilizzando un modello di inversione raffinato, con larghezza della cella pari a metà della corda non conduttiva più corta utilizzata. Come descritto in letteratura²⁰, questo accorgimento è particolarmente adatto ad un contesto come quello oggetto di studio, in cui è presente una grande variabilità di resistività sia in orizzontale che in verticale, causata prevalentemente da interventi di natura antropica. Per accentuare la presenza di eventuali strutture antropiche, è stato anche impiegato il metodo di inversione robust che mette in evidenza le variazioni nette di resistività.

²⁰ Loke 2000.

4.1.2 Rilievo 1



Fig. 4.3 – Posizionamento del Rilievo 1 realizzato all'interno dell'ex mattatoio di Rosarno.

Dettagli tecnici

Numero di sezioni verticali	Distanza tra le linee [m]	Dimensioni area indagata [m]	Numero totale delle misure effettuate	Intervallo di profondità indagato [m]	Intervallo spaziale orizzontale [m]
10	circa 1	25 x 9	16686	2,4 – 0,5	circa 0,25

Modelli di resistività

L'intera area occupata dal Rilievo 1 (Fig. 4.3) si trova all'interno del mattatoio ed è stata interessata da numerosi interventi antropici nell'epoca moderna. Va inoltre evidenziato che alcuni settori del rilievo (tra i 10 e i 15 m dallo 0) sono ricoperti da lastroni in cemento, altri da terra battuta.

Un settore di questo rilievo (tra la linea 0 e linea 3 e tra i metri 12 e 22 circa dallo 0) copre completamente l'area del saggio archeologico (SAS2 1994/1995) realizzato dalla Soprintendenza Archeologica della Calabria negli anni 1994 e 1995: ciò ha permesso di ottenere una taratura del metodo sulle strutture antiche note.

Sezioni di resistività

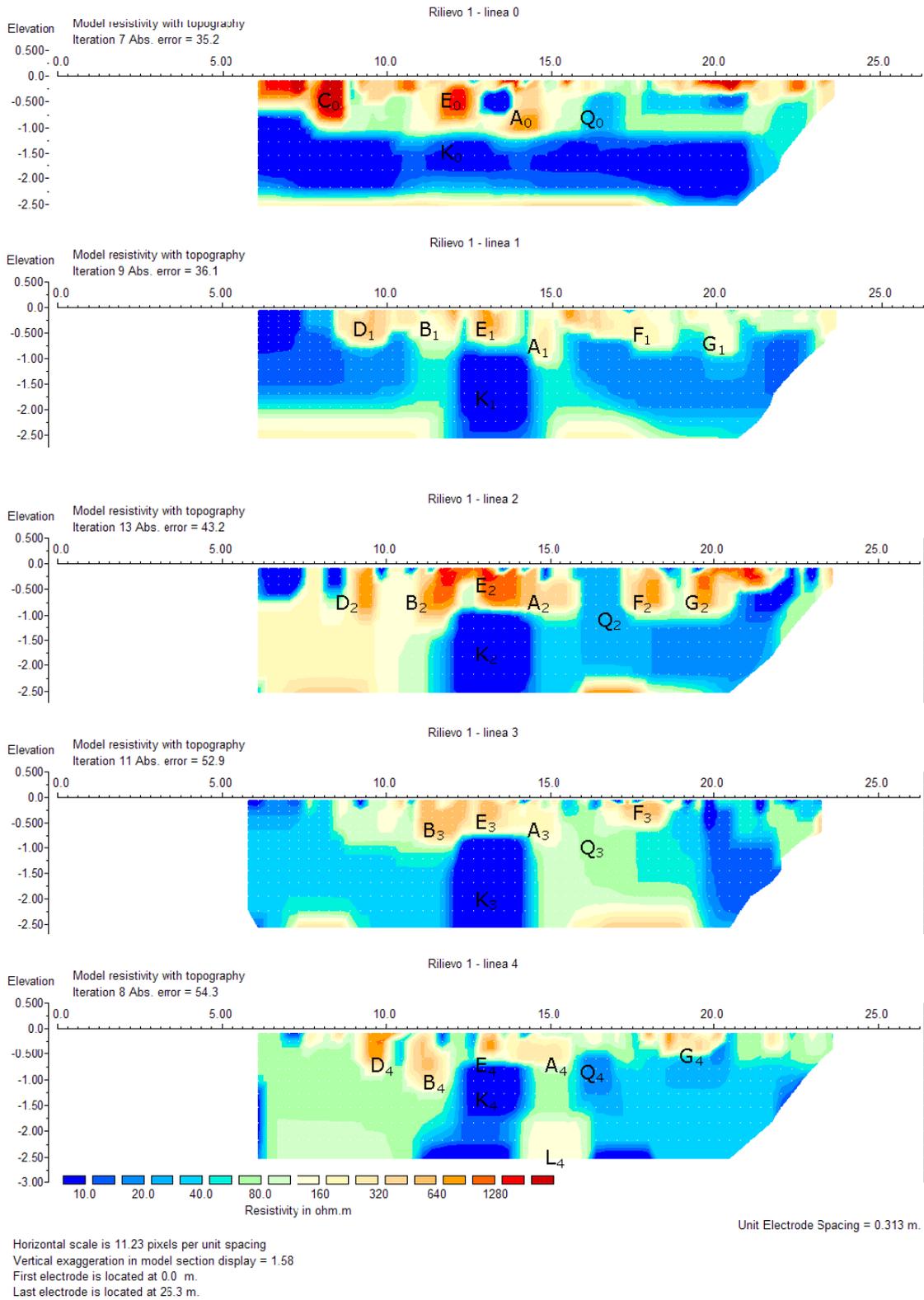


Fig. 4.4 – Rilievo 1 Rosarno – Sezioni di resistività 0-4.

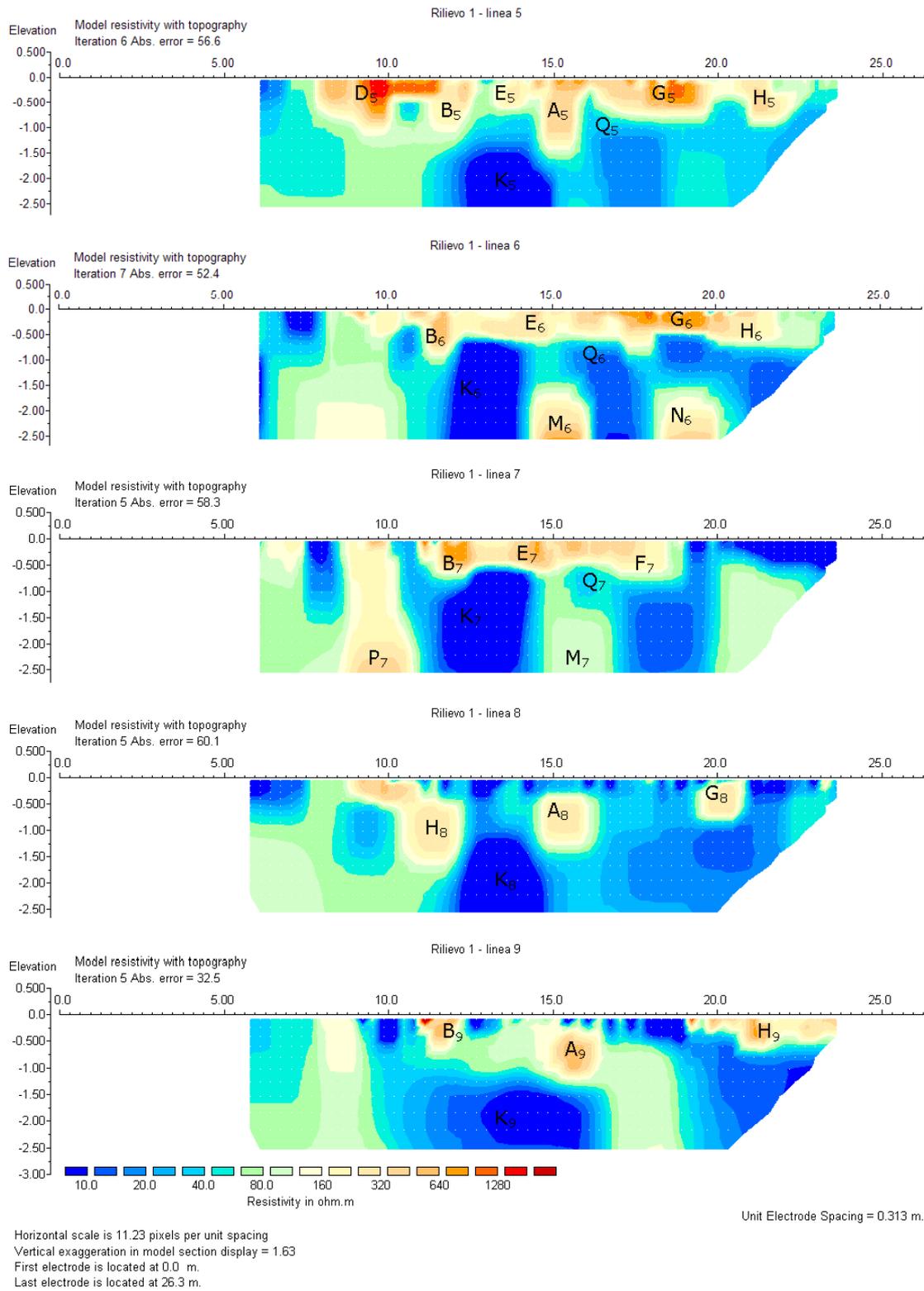


Fig. 4.5 - Rilievo 1 Rosarno – Sezioni di resistività 5-9.

Mappe di resistività

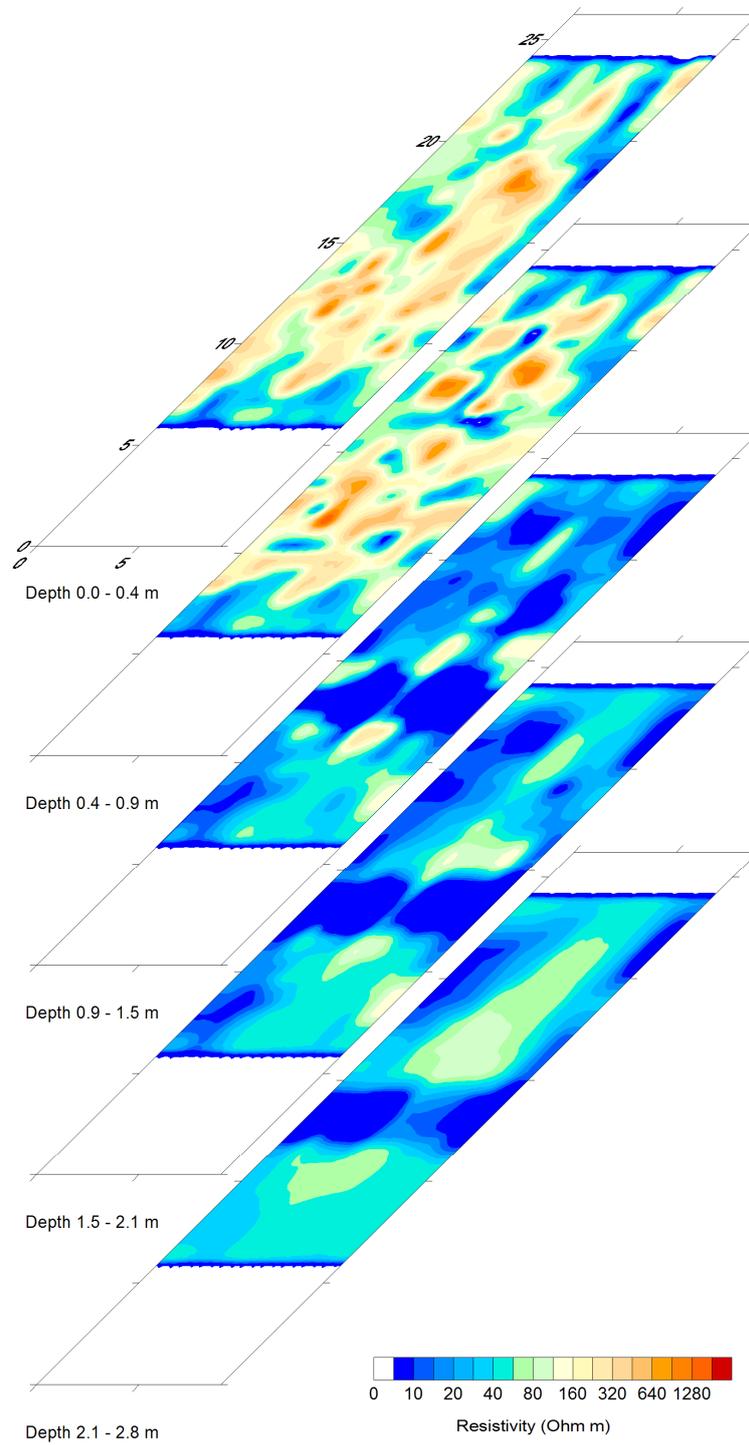


Fig. 4.6 - Rilievo 1 Rosarno – Mappe di resistività.

Prima di procedere con una descrizione dettagliata dei segnali si possono evidenziare alcune caratteristiche generali dei modelli di resistività. Al di sotto di uno strato antropizzato, caratterizzato da alti valori di resistività ($\rho > 300 \Omega\text{m}$), ad una profondità di circa 1 m, troviamo una zona vasta relativamente uniforme con bassi valori di resistività ($\rho < 80 \Omega\text{m}$) interpretabile geologicamente come layer di sabbie in alcune zone potenzialmente sature. Al di sotto di questo orizzonte (ad una profondità minima di 2,5 m) si può intuire in alcune sezioni la presenza di uno strato più resistivo, riferibile al deposito pleistocenico caratterizzato da conglomerati in matrice sabbiosa. Si nota inoltre che ai margini delle sezioni la natura litologica intatta (sabbie e limi) emerge fino alla superficie: ciò dà un'importante connotazione a questa indagine finalizzata all'individuazione delle strutture archeologiche, infatti possiamo affermare che i segnali candidati si trovano all'interno di queste emersioni laterali della costituzione geologica originaria.

I segnali corrispondenti alle strutture antropiche individuate durante il saggio di scavo hanno una resistività compresa tra i 200 e i 1000 Ωm , compatibili con i valori caratterizzanti granito e arenaria (materiali con cui sono costruite le strutture). Nel dettaglio topografico (Fig. 4.7) si riportano i segnali evidenziati nelle tomografie elettriche corrispondenti alle evidenze rilevate durante il saggio stratigrafico.

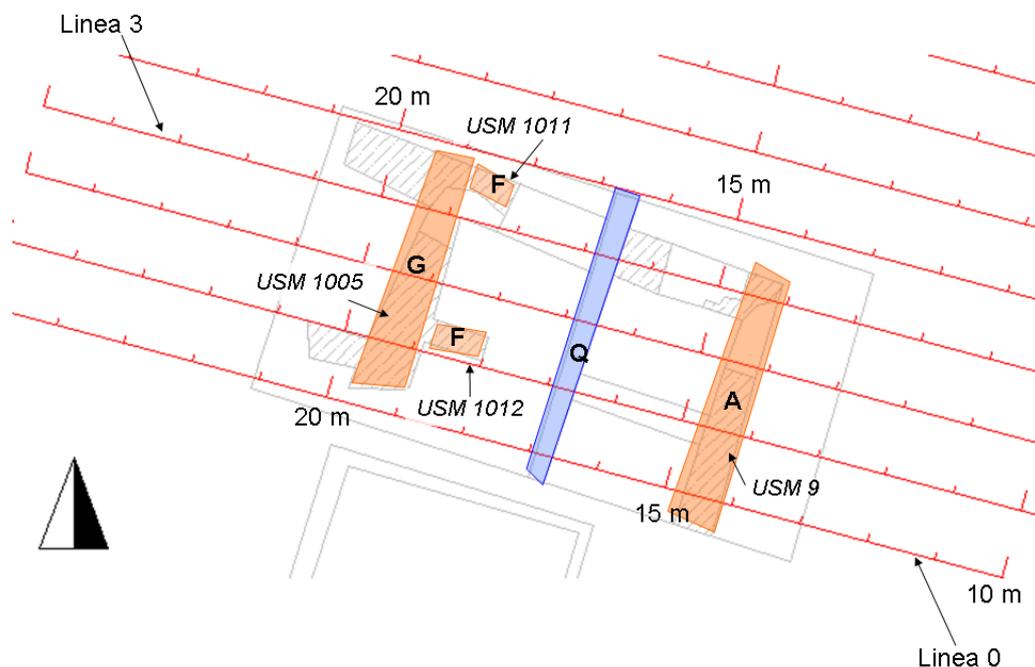


Fig. 4.7 – Particolare del Rilievo 1 limitatamente al settore che insiste sull'area dei SAS2 1994/1995 (in grigio – da Iannelli 2005). Con le lettere A, F e G sono indicati i segnali di resistività individuati nelle sezioni e corrispondenti alle Unità Stratigrafiche Murarie (USM) riportati nella pianta di scavo.

In generale si può notare che la presenza di strutture è più consistente al centro del piazzale antistante l'ingresso del Mattatoio e sembra scemare nei rilievi più prossimi all'ingresso stesso.

Segnale A: il segnale A è visibile in quasi tutte le sezioni di resistività a circa 15 m lungo la linea del rilievo e a circa 50 cm dalla superficie; la profondità massima è variabile (da 80 cm a poco oltre 1 m) e lo spessore è di circa 70 cm. I valori di resistività del Segnale A si collocano in un intervallo medio alto ($200 < \rho < 500 \Omega\text{m}$) rispetto al contesto.

Tenuto conto della posizione, delle dimensioni, della profondità e degli elevati valori di resistività rispetto al contesto questa serie di segnali può essere identificata con la struttura USM 9 portata alla luce durante lo scavo: nei punti in cui il segnale si attenua (segnale A₁ e A₃) è possibile che la struttura presenti dei tratti lacunosi. I rilievi geoelettrici sembrano confermare la prosecuzione della struttura USM 9 ben oltre il saggio: in particolare nelle linee 8 e 9 lungo la stessa direttrice ed alla stessa profondità si ritrovano marcati segnali simili a quelli riscontrati in corrispondenza di USM 9. In alcuni tratti il segnale sembra affievolirsi (linea 6 e linea 7): questo può essere interpretato come una possibile lacunosità della struttura.

Segnale B: il segnale visibile in tutte le tomografie, è collocato in superficie a circa 12 m dallo 0 fino ad una profondità non superiore agli 80 cm. Il segnale è caratterizzato da valori di resistività relativamente elevati ($250 < \rho < 1300 \Omega\text{m}$). Questi elementi, uniti al posizionamento in corrispondenza delle lastre di cemento della pavimentazione del cortile del mattatoio, possono far pensare ad una struttura antropica compatta, geologicamente non compatibile con il contesto. La simmetria rispetto alla struttura USM 9 è abbastanza evidente, tuttavia, tenuto conto dell'elevato grado di antropizzazione di questa particolare zona e della superficialità del segnale, non è possibile essere certi della natura archeologica di B. Il segnale, per le caratteristiche geometriche e gli alti valori di resistività, può essere paragonato al segnale E.

Segnale C: questo segnale appare molto evidente nella linea 0 a circa 8 metri lungo il rilievo. I valori di resistività superano i 1000 Ωm , poco compatibili con la natura geologica del sito. Si propende quindi ad interpretare questa evidenza come struttura antropica, compatta riconducibile ad una fondazione probabilmente moderna, vista la superficialità del segnale e la vicinanza con l'edificio a est dell'ingresso del mattatoio.

Segnale D: questo è il segnale più evidente e continuo al di fuori del SAS2 1994/1995. Esso si individua a circa 10 m lungo la linea del rilievo ad una profondità compresa tra i 30 cm e 1 m; i valori di resistività sono compresi tra 300 e 1500 Ωm , nettamente in contrasto con i valori circostanti. La regolarità della forma geometrica e gli elevati valori di resistività fanno propendere per una chiara interpretazione di natura antropica del segnale: infatti dal confronto con il segnale A (USM 9) si notano molte analogie (profondità, forma geometrica e valori di resistività). A nostro avviso questo segnale è uno dei candidati target archeologici più probabili dell'intera area indagata.

Segnale E: questa serie di segnali caratterizzata da alti valori di resistività ($\rho > 500 \Omega\text{m}$) si registra negli strati più superficiali (profondità inferiore a 70 cm) in corrispondenza delle coperture di cemento visibili in Fig. 4.3. Il segnale, per le caratteristiche geometriche e gli alti valori di resistività, può essere paragonato al segnale B.

È interessante notare come questo sottile layer sia sempre sovrapposto alla zona a bassa resistività indicata con la lettera K ed interpretata come un “canale saturo”.

Segnale F: con questa lettera si indicano una serie di segnali ad alta resistività che si individuano in più linee del Rilievo 1 tra i 17 e i 19 m. Questi segnali sono accomunati, oltre che dalla posizione e dalla geometria, da valori di resistività compresi tra 300 e 1500 Ωm , anomali rispetto al contesto geologico superficiale dell'area (sabbie in parte potenzialmente sature e limi).

Queste informazioni testimoniano il fatto che ci si trova di fronte a strutture di natura antropica: ciò che è difficile rivelare è la possibile continuità o discontinuità di esse e la possibile natura archeologica. Grazie al confronto con le evidenze portate alla luce durante lo scavo del SAS2 1994/1995 possiamo notare che questa serie di segnali si posiziona esattamente in corrispondenza di USM 1012 e USM 1011. Proseguendo oltre il saggio, questi segnali continuano per circa 2 m, oltre i quali il segnale (e presumibilmente la struttura) cessa.

Segnale G: questa serie di segnali superficiali posizionati su molte tomografie a circa 20 m lungo il rilievo è caratterizzata da valori di resistività relativamente alti per il contesto ($\rho > 200 \Omega\text{m}$), con contorni ben delineati e geometria regolare. È importante notare che, laddove questi segnali si trovano all'interno di SAS2 1994/1995, essi corrispondono all'evidenza

archeologica USM 1005: ciò induce a pensare che questa struttura persista anche al di fuori dell'area di scavo, anche se in modo lacunoso.

Segnale H: il segnale, individuabile lungo le linee 5 e 6 e visibile nuovamente lungo la linea 9 a circa 21 m dallo 0 e ad una profondità compresa tra 30 cm e 80 cm dalla superficie, presenta valori di resistività medio-alti rispetto al contesto ($250 < \rho < 400 \Omega\text{m}$). In base alla geometria ed ai valori di resistività, il segnale può essere interpretato come struttura antropica di possibile natura archeologica, visto le numerose analogie con il segnale A visibile lungo la stessa tomografia, anche se risulta essere più superficiale.

Segnale I: il segnale, individuabile lungo la linea 8 a circa 12 m dallo 0 e ad una profondità compresa tra 50 cm e 1,5 m dalla superficie, presenta valori di resistività medio-alti rispetto al contesto ($250 < \rho < 400 \Omega\text{m}$). In base alla geometria ed ai valori di resistività, il segnale può essere interpretato come struttura antropica di possibile natura archeologica, visto le numerose analogie con il segnale A₈ visibile lungo la stessa tomografia.

Segnale K: si tratta di un segnale a bassissima resistività ($\rho < 10 \Omega\text{ m}$) riscontrabile in tutte le tomografie tra i 12 e i 15 m lungo la linea del rilievo, ad una profondità compresa tra 1 e 3 m circa. È sorprendente notare come questo segnale si ripeta in tutte le tomografie nella stessa zona con valori di resistività ancora inferiori alle basse resistività tipiche delle sabbie potenzialmente sature che caratterizzano la geologia locale. L'interpretazione più attendibile di questo segnale può essere l'identificazione con un canale saturo funzionale alle attività del mattatoio.

Segnale Q: questa serie di segnali superficiali, che si registrano in quasi tutte le tomografie, è caratterizzata da valori a bassa resistività ($\rho < 20 \Omega\text{m}$) ed è posizionata sistematicamente fra 16 e 17 metri lungo la linea del rilievo. Valori così bassi di resistività segnalano la presenza di acqua nel sottosuolo: questa indicazione viene confermata dalla presenza di una tubazione che attraversa i SAS2 1994/1995 (individuata durante le attività di scavo), la quale in alcuni punti potrebbe presentare perdite d'acqua.

Sul fondo di alcune tomografie si nota un layer quasi continuo caratterizzato da alti valori di resistività ($\rho > 1000 \Omega\text{m}$) in netto contrasto con i livelli immediatamente superiori: il

layer può essere interpretato come il deposito continentale Pleistocenico costituito da conglomerati sabbiosi affiorante in questa area dell'altopiano di Rosarno. In alcuni casi i segnali sul fondo (**L**, **M**, **N** e **P**) sono caratterizzati da una forma geometrica abbastanza regolare, simile a quella riscontrata nei segnali di superficie corrispondenti alle strutture archeologiche individuate durante lo scavo del saggio SAS2: in base a queste caratteristiche non si può escludere che si tratti di elementi di origine archeologica. Quest'ultima ipotesi interpretativa si basa anche sui dati di scavo del SAS 1988 in cui le strutture murarie sono individuate a circa 2 m di profondità dal piano di campagna.

Interpretazione in chiave archeologica dell'area indagata

La distribuzione dei segnali è particolarmente concentrata nell'area centrale del cortile in prossimità dei saggi SAS 1988 e SAS2 1994/1995, nei quali era stato individuato dagli archeologi un possibile muro di temenos (USM 9, 1021 e 1011) del santuario. Dall'osservazione dei segnali di alta resistività individuati nei rilievi di questo settore si può affermare che il muro di temenos continua oltre i limiti dei saggi di scavo verso nord (segnali Tn in Fig. 4.8). A est dell'allineamento formato dai segnali Tn sono presenti altri segnali di possibile origine archeologica (segnali E), che fanno supporre che l'area santuariale si estendesse ancora per almeno 5 m in questa direzione (Fig. 4.8).

Dai modelli di resistività risultano molto evidenti anche due aree (Re – Rw in Fig. 4.8) ad est ed ad ovest rispetto al saggio SAS2 1994/1995 decisamente meno perturbate da elementi antropici: qui si registrano valori di bassa resistività riconducibili ad uno strato di sabbie (in alcuni casi potenzialmente sature) perfettamente compatibile con il contesto geologico locale. Queste informazioni inducono a pensare l'assenza di interventi antropici sia moderni che antichi. In chiave archeologica, se ipotizziamo che le strutture emerse dagli scavi SAS 1988 e SAS2 1994/1995 siano riconducibili ad un'area santuariale, le zone "vergini" ad est ed ad ovest potrebbero essere interpretate come area di rispetto attigua al santuario²¹ e priva di strutture .

²¹ Greco 1999.

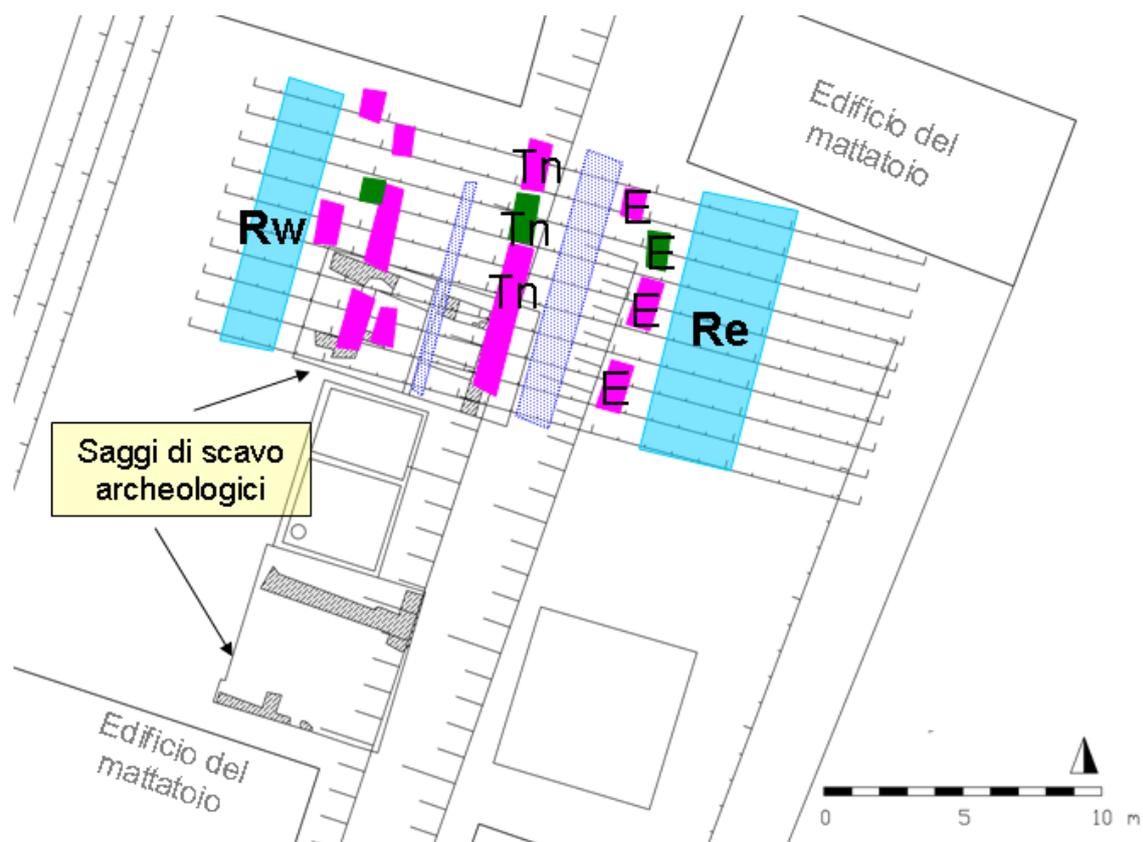


Fig. 4.8 – Posizionamento dei segnali di possibile natura archeologica superficiali (magenta) e profondi (verde) e delle aree meno perturbate da interventi antropici interpretabili come aree di rispetto attigue al santuario greco.

Confronto con altri dati a disposizione

Il saggio SAS2 1994/1995 è stato completamente coperto dalle prime 5 linee del Rilievo 1, permettendo di ottenere una chiave di lettura dei segnali di resistività e una conseguente taratura del metodo geoelettrico nell'area di indagine. In questa zona si nota una buona corrispondenza tra i segnali ad alta resistività individuati nelle sezioni e nelle piante di resistività e le evidenze emerse dagli scavi precedenti (Fig. 4.9).

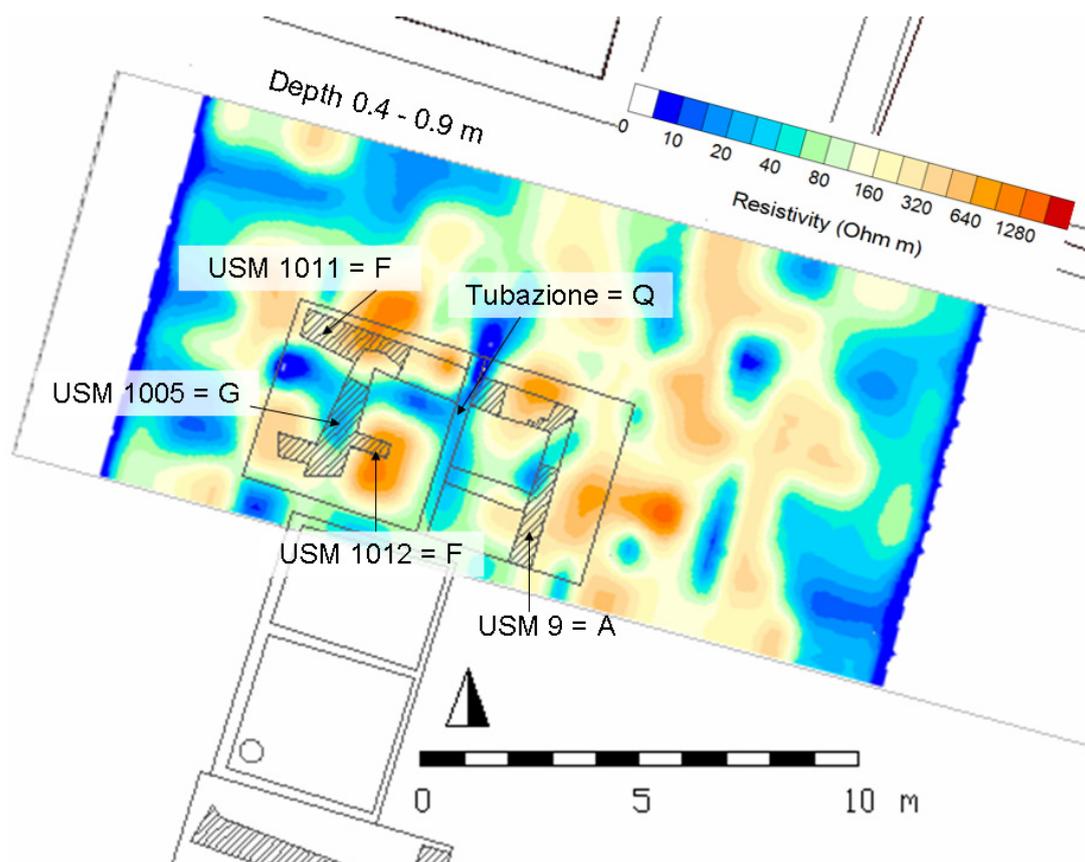


Fig. 4.9 – Corrispondenza tra le USM rilevate durante il saggio SAS2 1994/1995 (da Iannelli 2005) e i segnali di resistività individuati.

Analisi di un profilo di resistività campione

Il profilo (Fig. 4.10) acquisito con l'OhmMapper a circa 0,9 m di profondità lungo la linea 8 del Rilievo 1 realizzato nell'ex mattatoio comunale di Rosarno (RC) presenta, in corrispondenza del target A_8 , un andamento a M paragonabile a quello del profilo realizzato nell'Area Test di Rovereto in corrispondenza del target con andamento verticale e a resistività più alta rispetto al contesto²². È possibile quindi affermare che ci si trova in presenza di un bersaglio con caratteristiche analoghe a quello di Rovereto, bersaglio che, nel caso di Rosarno, è compatibile con le caratteristiche fisiche delle fondazioni dell'area sacra greca costituite da ciottoli, pietre granitiche e massi di arenaria allettati con terra o a secco e circondate da sabbie in parte sature.

²² Paragrafo 3.2.

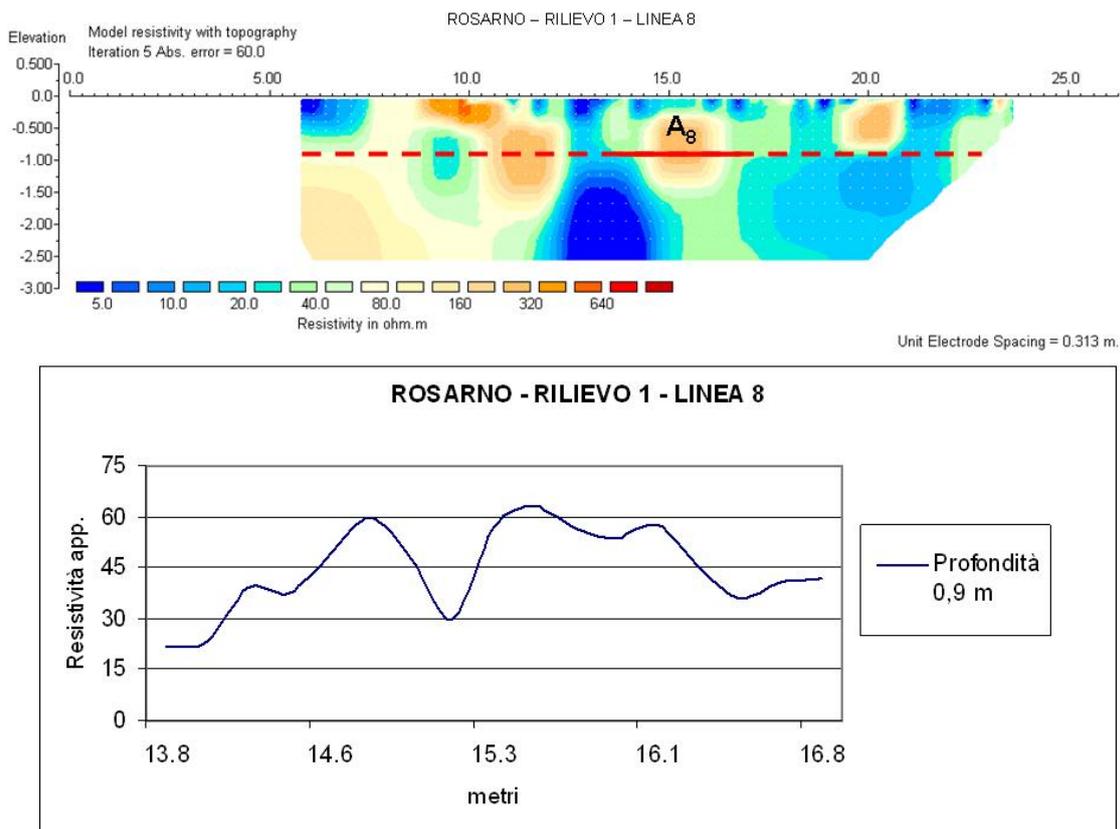


Fig. 4.10 – Analisi dell'andamento del profilo di resistività apparente acquisito con l'OhmMapper a Rosarno ad una profondità di circa 0,9 m in corrispondenza del target A_8 interpretato come fondazione di natura archeologica.

4.2 Acquedotto Romano di Firenze

4.2.1 Caratteristiche del sito e pianificazione del survey a Sesto

Fiorentino

<i>Nome del sito</i>	Sesto Fiorentino (FI)
<i>Target</i>	Acquedotto Romano con struttura muraria in pietra calcarea bianca di tipo “alberese” e calcestruzzo e speco cavo o parzialmente riempito da detriti.
<i>Ubicazione</i>	Cantiere CAVET - Alta velocità Firenze-Bologna
<i>Periodo storico</i>	I-II secolo d.C.
<i>Geologia</i> ²³	ciottoli ghiaie e sabbie in matrice limosa o limo-argillosa. Le componenti litoidi provengono dalla formazione di Monte Morello o Alberese (calcari marnosi, marne, arenarie calcaree, calcareniti e argilloscisti)
<i>Geomorfologia</i>	Pianura alluvionale

Durante i lavori per la realizzazione del tratto ferroviario per l'alta velocità Firenze-Bologna nei pressi del torrente Zambra in località Sesto Fiorentino (FI) è emerso un tratto dello speco interrato di un acquedotto romano, datato I-II secolo d.C. ca. (Fig. 4.11).

Le indagini geoelettriche sono state svolte sia all'interno del cantiere che in aree urbane circostanti, sempre in corrispondenza di pavimentazioni di asfalto o cemento, su cui risulta impossibile piantare elettrodi senza l'ausilio di un perforatore elettrico: l'OhmMapper si è dimostrato lo strumento ideale per la realizzazione delle indagini di resistività finalizzate allo studio dell'andamento del percorso dell'acquedotto romano nell'area compresa tra il cantiere per l'alta velocità (alla sinistra idrografica del torrente Zambra) e il parco di villa Solaria (parte Ovest) a Sesto Fiorentino. La strategia adottata per l'acquisizione è stata quella di realizzare indagini geoelettriche allontanandosi progressivamente dalla struttura intercettata dagli scavi, al fine di seguire il segnale interpretato come acquedotto romano, compatibilmente con gli spazi praticabili all'interno e all'esterno dell'area di cantiere (Fig. 4.12).

²³ Carta Geologica della Regione Toscana, sezioni 263110 e 263160 [scala 1:10000], 2004.



Fig. 4.11 – Speco e struttura dell'acquedotto romano di Firenze (in basso a destra nell'immagine) intercettato nel cantiere dell'alta velocità Firenze-Bologna.

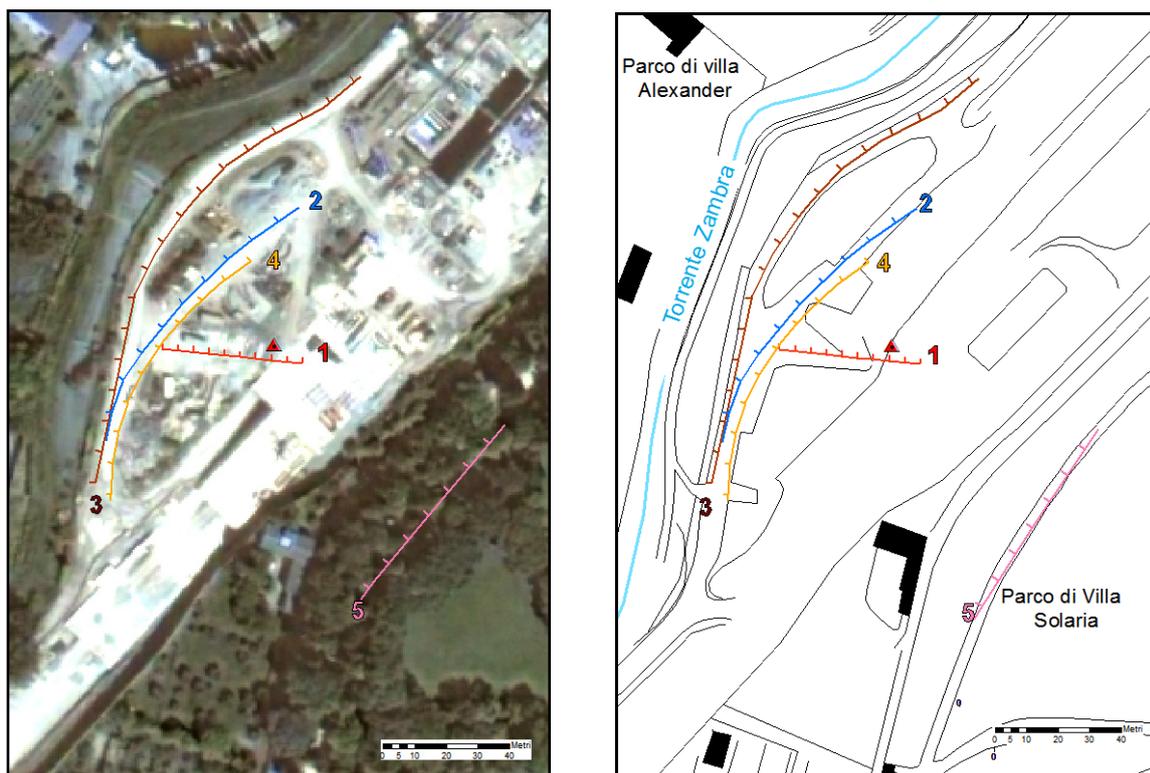


Fig. 4.12 – Posizionamento dei Rilievi sull'immagine da satellite orto rettificata (volo AIMA 2004) e sulla CTR della Regione Toscana in scala 1:10 000 (sezioni 263110 e 263150). Le tacche sulle linee indicano intervalli spaziali di 10 m per i Rilievi 2, 3, 4 e 5 e di 5 m per il Rilievo 1, corrispondenti alla spaziatura dei marks scelta durante l'acquisizione. Con il triangolo è indicata la posizione dell'acquedotto rinvenuto durante i lavori del cantiere.

Configurazione con antenne (a) da 5 m		
Lunghezza corda non conduttiva (na) [m]	Profondità indagata [m]	Lunghezza totale dello strumento [m] (con offset di 5 m)
2,5	1,4	17,5
5	2	20
7,5	2,8	22,5
10	3,5	25
12,5	4,2	27,5
15	4,8	30

Tab. 4.2 – Configurazione dell'OhmMapper utilizzata durante il survey a Sesto Fiorentino per il Rilievo 1 e relativa lunghezza dello strumento.

Configurazione con antenne (a) da 7,5 m		
Lunghezza corda non conduttiva (na) [m]	Profondità indagata [m]	Lunghezza totale dello strumento [m] (con offset di 5 m)
3,75	2,1	23,75
7,5	3,1	27,5
11,25	4,2	31,25
15	5,2	35
18,75	6,2	38,75
22,5	7,2	42,5
26,25	8,2	46,25

Tab. 4.3 – Configurazione dell'OhmMapper utilizzata durante il survey a Sesto Fiorentino per il Rilievo 4 e relativa lunghezza dello strumento.

Configurazione con antenne (a) da 10 m		
Lunghezza corda non conduttiva (na) [m]	Profondità indagata [m]	Lunghezza totale dello strumento [m] (con offset di 5 m)
5	2,7	30
10	4,2	35
15	5,6	40
20	6,9	45
25	8,3	50
30	9,6	55

Tab. 4.4 – Configurazione dell'OhmMapper utilizzata durante il survey a Sesto Fiorentino per i Rilievi 2, 3 e 5 e relativa lunghezza dello strumento.

Alla luce delle caratteristiche geologiche e archeologiche del sito in esame è stata definita una scala caratterizzata da 17 intervalli di resistività corrispondenti ad altrettanti colori (Fig. 4.13): le aree a bassa e media resistività non caratterizzate da alcuna forma

geometrica riconducibile ad un intervento antropico possono essere interpretate come detrito di conoide che in questa zona è costituito prevalentemente da frammenti e ciottoli di natura calcareo-marnosa in una matrice limo-argillosa; i segnali con resistività compresa tra 250 e 1000 Ωm possono essere interpretati come elementi antropici di possibile origine archeologica.

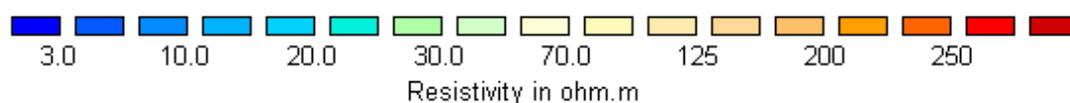


Fig. 4.13 – Scala di valori e colori utilizzata per l'interpretazione dei modelli di resistività di Sesto Fiorentino.

Tutte le tomografie sono state invertite mediante software Res2Dinv utilizzando per i Rilievi 1, 2, 3 e 4 un modello di inversione raffinato, con larghezza della cella pari a metà della corda non conduttiva più corta utilizzata. Per accentuare la presenza di eventuali strutture antropiche, è stato anche impiegato il metodo di inversione robust che esalta²⁴ le variazioni nette di resistività, tipiche di un contesto come quello in esame in cui si ipotizza la presenza di una struttura muraria probabilmente in parte cava al suo interno circondata da detriti e sedimenti di tipo alluvionale.

4.2.2 Rilievi realizzati a Sesto Fiorentino

Dettagli Tecnici

Numero del Rilievo	Lunghezza del Rilievo [m]	Numero totale delle misure effettuate	Intervallo di profondità indagato [m]	Intervallo spaziale orizzontale [m]
1	46	1957	1,3 – 4,8	circa 0,12
2	90	2309	2,7 – 9,6	Circa 0,23
3	176	3696	2,7 – 9,6	Circa 0,19
4	90	3735	2,1 – 8,2	Circa 0,21
5	95	2388	2,7 – 9,6	Circa 0,23

²⁴ Loke 2000.

Modelli di resistività – sezioni

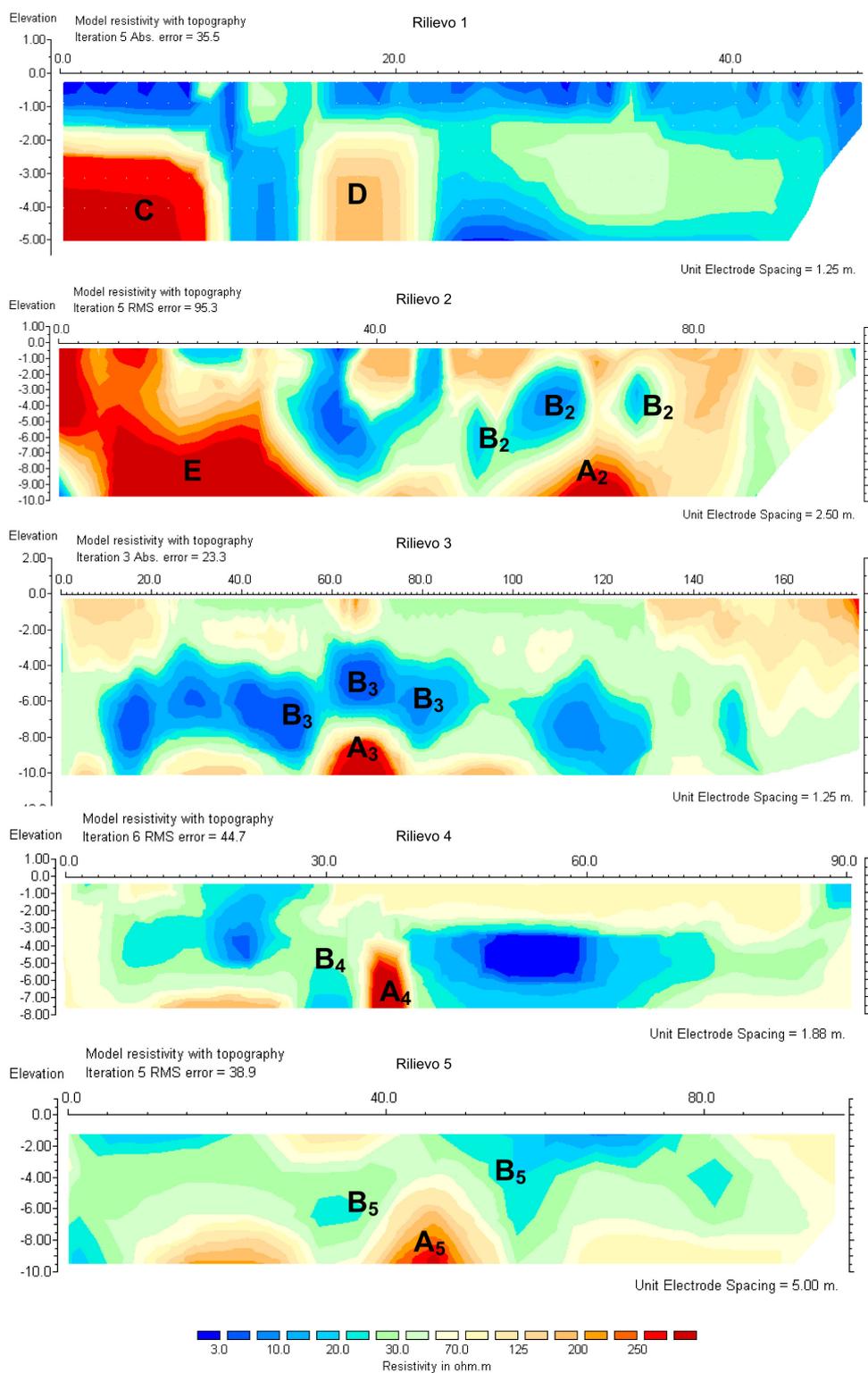


Fig. 4.14 – Sezioni di resistività del sito di Sesto Fiorentino.

Segnale A: Il segnale A è individuabile in quasi tutte le sezioni di resistività. La caratteristica forma geometrica verticale stretta e appuntita verso l'alto e l'elevata resistività della parte centrale del segnale (800-1000 Ωm) fanno supporre che si tratti dello speco cavo dell'acquedotto romano, mentre la sottile fascia evidenziata da valori di resistività compresi tra 280 e 800 Ωm potrebbe indicare la presenza delle pareti dell'acquedotto costituite da pietra calcarea immersa nel calcestruzzo.

Segnali B: La zona a bassa resistività (3-80 Ωm) indicata con B può essere interpretata come terreno rimaneggiato (ad alto contenuto di umidità) che circonda il manufatto dell'acquedotto romano. Questo segnale dalla forma caratteristica che "avvolge" il segnale A dell'acquedotto rappresenta un "marchio" distintivo della presenza del manufatto ed è possibile ritrovarlo più o meno marcato nelle sezioni di resistività in cui compare il segnale A. In Fig. 4.15 è rappresentato schematicamente il procedimento utilizzato dai romani per la costruzione degli acquedotti interrati, la cui volta era sigillata al di sopra da uno strato di terreno di riempimento (D in Fig. 4.15).

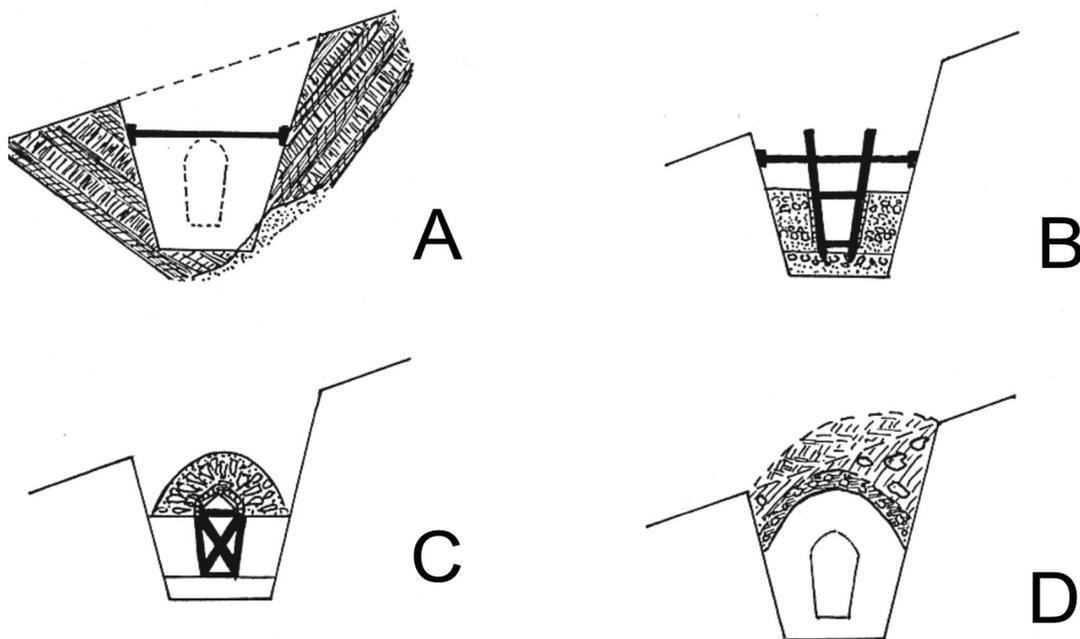


Fig. 4.15 – Varie fasi operative adottate dai Romani per la costruzione degli acquedotti interrati; A= preparazione dello scavo, B= getto del fondo e delle fiancate in calcestruzzo e pietra, C= sistemazione e posa in opera della copertura, D= strato protettivo inferiore e copertura di terreno superiore. (da Adam 1988)

Segnale C: Struttura ad alta resistività ($\rho > 600 \Omega\text{m}$) di lunghezza superiore ai 7 m ; risulta evidente a partire da 2 m di profondità al limite orientale della Tomografia 1, in corrispondenza della galleria dell'alta velocità (Fig. 4.16).



Fig. 4.16 – Cantiere della galleria dell'alta velocità Firenze-Bologna nel 2006 responsabile del segnale C nel Rilievo 1.

Segnale D: Il segnale D a media resistività (200-900 Ωm) evidente nella sezione di resistività ottenuta dal Rilievo 1, pur avendo una geometria ben definita, non può essere ricondotto all'acquedotto, ma è dovuto alla presenza di grossi blocchi di calcare marnoso rinvenuti durante le operazioni di cantiere di poco successive all'indagine geoelettrica. Oltre al segnale D, che si è rivelato essere un falso segnale di natura archeologica, il Rilievo 1, pur vicino allo speco ritrovato, non presenta altri segnali con caratteristiche geometriche e di resistività compatibili con quelle registrate in presenza dell'acquedotto, permettendoci di ipotizzare che il percorso della struttura idraulica romana sia caratterizzato in questa zona da una curvatura imprevista.

Segnale E: Struttura ad alta resistività ($\rho > 280 \Omega\text{m}$) di lunghezza pari a circa 23 m; risulta evidente a partire da 6 m di profondità fino al fondo della tomografia elettrica del Rilievo 2. Il segnale di grandi dimensioni e ad alta resistività è stato interpretato come elemento di origine

antropica o ammasso di pietre calcaree di grandi dimensioni. Questa seconda ipotesi è stata confermata da uno scavo realizzato nel cantiere poco dopo la realizzazione dei rilievi geoelettrici.

Interpretazione in chiave archeologica dell'area indagata

Attraverso le indagini geoelettriche realizzate con l'OhmMapper è stato possibile definire l'andamento sotterraneo dell'acquedotto romano oggetto di indagine per un tratto complessivo di 150 m, partendo dal torrente Zambra fino ad arrivare all'interno del parco di Villa Solaria (Fig. 4.17).

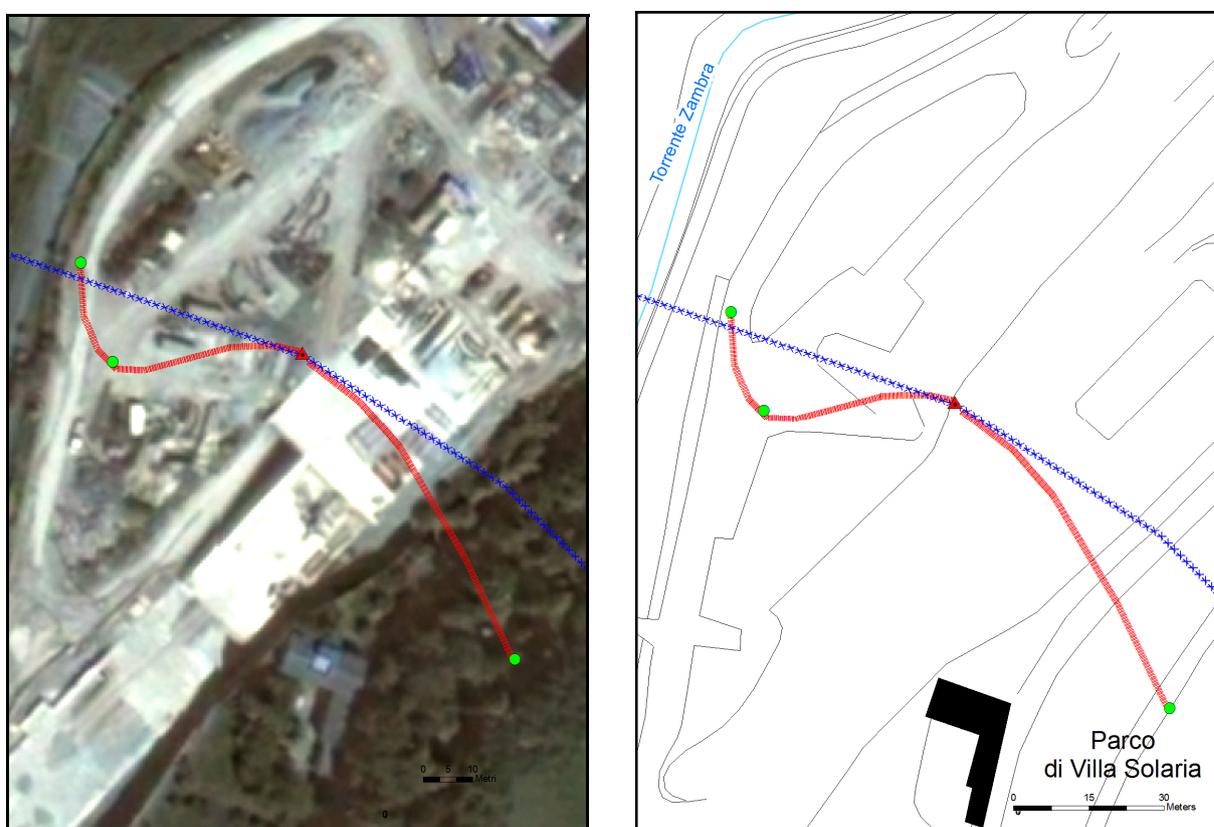


Fig. 4.17 – In rosso ricostruzione del percorso del tratto dell'acquedotto romano sull'immagine da satellite (volo AIMA 2004) e sulla CTR della Regione Toscana in scala 1:10 000 (sezioni 263110 e 263150). In blu è riportato il percorso ipotizzato da studi archeologici precedenti (Chiostrì 2002).

Con il Rilievo 1 è stato possibile smentire l'ipotesi archeologica secondo la quale l'andamento sotterraneo dell'acquedotto virasse bruscamente verso sud. I Rilievi 2, 3 e 4 sono stati realizzati ortogonalmente alla presunta direzione dell'acquedotto nord-ovest sud-est nella zona compresa tra il rinvenimento e il torrente Zambra: tutti i modelli di resistività elaborati

hanno evidenziato la presenza del manufatto riconoscibile ad una profondità di circa 5 m dal piano di campagna con valori di resistività maggiori di 200 Ω m. La forma geometrica, la profondità ed i valori di resistività sono compatibili con le caratteristiche geometriche e costruttive dell'acquedotto romano rinvenuto nei pressi delle indagini.

Il Rilievo 5 è stato compiuto all'interno del parco di Villa Solaria ad una distanza di 70 m dal ritrovamento. Anche in questo caso è stato possibile riconoscere nel modello di resistività la presenza della struttura ad una profondità di 7 m dal piano di campagna con valori di resistività maggiori di 300 Ω m.

Confronto con altri dati a disposizione

Poco dopo aver effettuato le indagini di resistività, sono stati realizzati dei saggi di scavo esplorativi in corrispondenza dei segnali D ed E con resistività anomala rispetto al contesto e di dubbia interpretazione: gli scavi, assistiti da archeologi della Soprintendenza della Toscana, hanno permesso di individuare in entrambi i casi la presenza di blocchi e lastre di calcare "alberese", responsabili dei valori di alta resistività. La disposizione caotica di questi blocchi, soprattutto nel caso del segnale E del Rilievo 2, fa pensare ad un accumulo intenzionale di materiale grossolano forse per liberare il terreno per la coltivazione.

Tuttavia, la tipologia del materiale calcareo ritrovato, in associazione con un cippo globulare in arenaria, è molto simile a quello utilizzato per la costruzione delle Tholoi etrusche di La Montagnola e La Mula, localizzate nel raggio di 2 km dall'area oggetto di studio, sulle sponde del torrente Zambra²⁵.

Analisi di un profilo di resistività campione

Il profilo (Fig. 4.18) acquisito con l'OhmMapper a circa 6 m di profondità lungo il Rilievo 4 realizzato nel cantiere CAVET a Sesto Fiorentino presenta, in corrispondenza del target A₄, un andamento a M paragonabile a quello del profilo realizzato nell'Area Test di Rovereto in corrispondenza del target con andamento verticale e a resistività più alta rispetto al contesto²⁶. È possibile quindi affermare che ci si trova in presenza di un bersaglio con caratteristiche analoghe a quello di Rovereto, bersaglio che, nel caso di Sesto Fiorentino, è

²⁵ Per Chiostrì 2002 il nome del torrente Zambra deriva dall'etrusco e significa "Fiume dei Morti".

²⁶ Paragrafo 3.2.

compatibile con le caratteristiche fisiche dello speco cavo dell'acquedotto romano di Firenze circondato da ciottoli ghiaie e sabbie in abbondante matrice limosa o limo-argillosa.

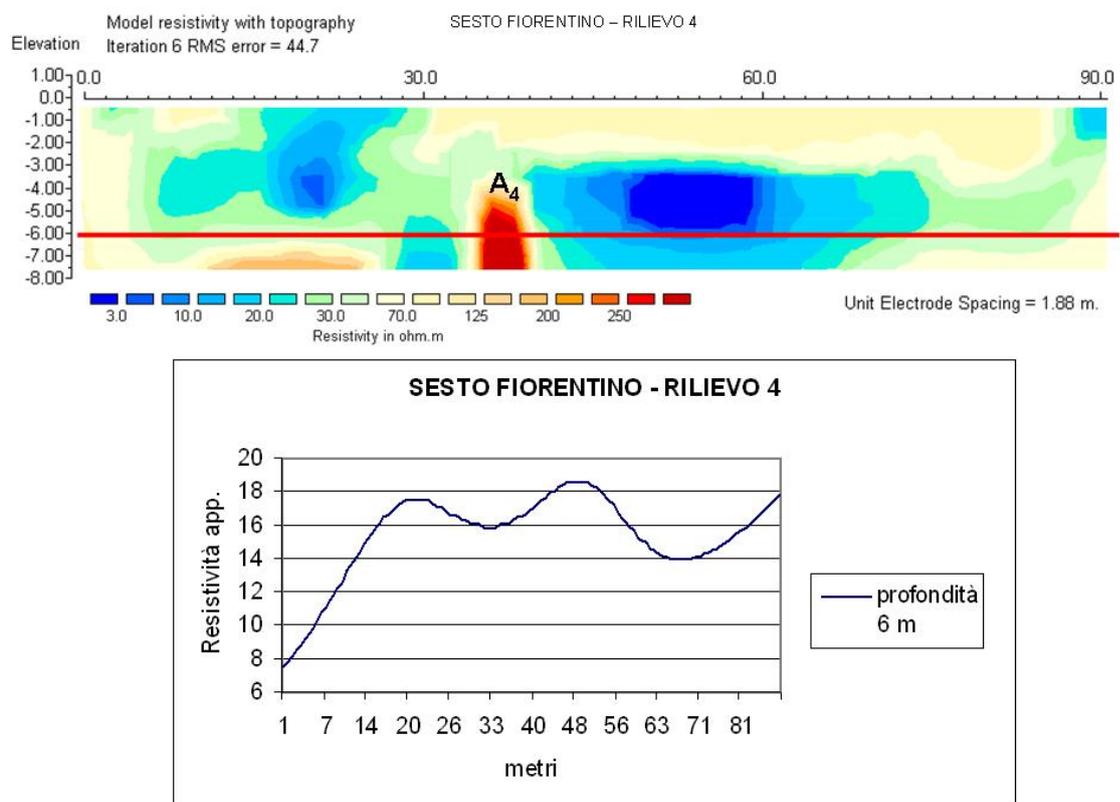


Fig. 4.18 – Analisi dell'andamento del profilo di resistività apparente acquisito con l'OhmMapper a Sesto Fiorentino ad una profondità di circa 6 m in corrispondenza del target A₄ (Rilievo 4) interpretato come speco dell'acquedotto romano.

4.3 Considerazioni generali sull'uso dell'OhmMapper per indagini archeologiche in contesti urbani

I risultati delle indagini geoelettriche realizzate a Rosarno e a Sesto Fiorentino sono la testimonianza dell'efficacia del georesistivimetro OhmMapper per individuare strutture murarie di natura archeologica in contesti urbani moderni. In particolare l'OhmMapper, grazie al sistema di energizzazione per induzione (Par. 2.1), non solo permette di realizzare indagini su asfalto, cemento e pavimentazioni in pietra senza dover spendere tempo a effettuare buchi con trapani o perforatori per inserire gli elettrodi, ma è anche insensibile alle resistenze di

contatto tipiche dei materiali molto resistivi di cui sono costituite le pavimentazioni dei centri abitati.

Come per tutte le indagini geofisiche applicate all'archeologia, anche nel caso di Rosarno e Sesto Fiorentino l'interpretazione archeologica dei dati di resistività è stata possibile grazie alla collaborazione con gli archeologi e i geologi competenti per l'area di indagine; a queste competenze professionali è stato necessario aggiungere le indicazioni fornite dai responsabili dell'Ufficio tecnico del Comune di Rosarno e del cantiere CAVET di Sesto Fiorentino che hanno aggiunto utili informazioni sugli strati più superficiali delle aree oggetto di indagine.

Alcuni fattori limitano l'uso dell'OhmMapper in contesti urbani: la presenza di edifici, muri perimetrali, scalinate e strade carrabili limitano la manovrabilità dello strumento, vincolando il percorso dell'operatore ed escludendo forzatamente dalle indagini zone di possibile interesse, come schematizzato in Fig. 4.19.

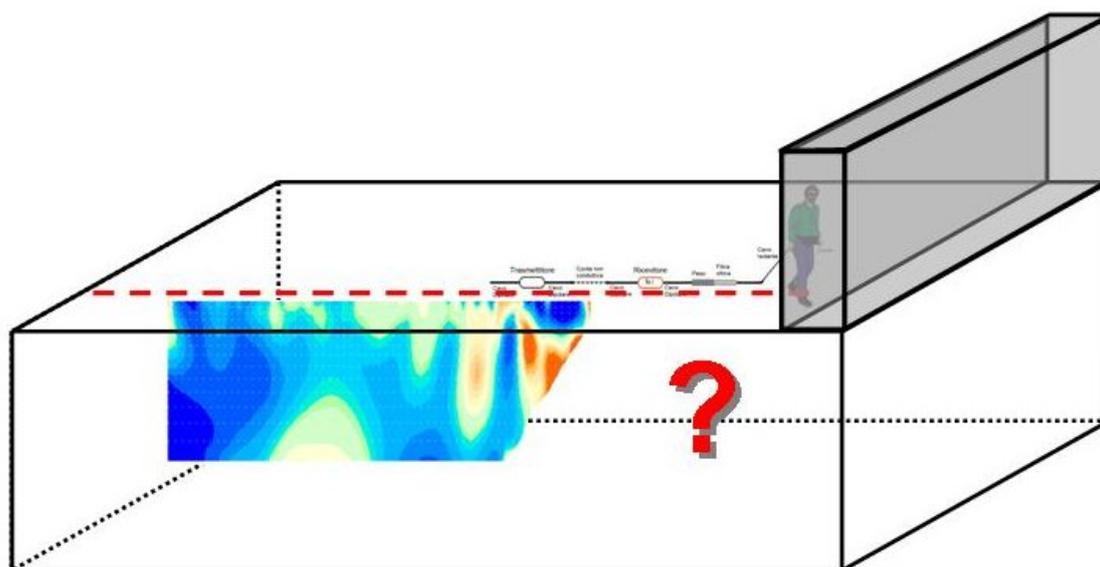


Fig. 4.19 – Ricostruzione schematica di un'indagine realizzata con l'OhmMapper in prossimità di un muro. Con la linea rossa è indicato il percorso effettuato dall'operatore. In una situazione come quella schematizzata non è possibile indagare le aree del sottosuolo in prossimità del muro.

5 Utilizzo dell'OhmMapper per indagini di resistività in siti archeologici in contesti extraurbani

In questo capitolo sono riportati i risultati di tre indagini geoelettriche realizzate con il georesistivimetro ad accoppiamento capacitivo OhmMapper per l'individuazione di possibili elementi sepolti di natura archeologica in contesti extraurbani.

I siti archeologici presentati in questo capitolo sono stati selezionati in quanto le indagini geoelettriche realizzate con l'OhmMapper sono state integrate con altri dati di natura archeologica o geofisica e per questo maggiormente indicati a rappresentare esempi esaurienti dell'efficacia dell'OhmMapper in contesti archeologici.

In particolare sarà riportata una scheda per ogni sito indagato: dopo una breve introduzione archeologica e geologico-geomorfologica, saranno presentate la tipologia di target da individuare, le configurazioni geometriche utilizzate e i dettagli tecnici con cui sono stati eseguiti i rilievi.

I modelli di resistività ottenuti saranno analizzati e interpretati in chiave archeologica. La scala di valori di resistività è scelta ad hoc per ogni sito indagato, in base alle caratteristiche dei target e del contesto in cui si trovano. Alla fine di ogni scheda di sito i modelli di resistività interpretati saranno confrontati, quando possibile, con altri dati geofisici o dati archeologici relativi alla stessa area, al fine di verificare l'efficacia dello strumento nel contesto in esame.

Come ulteriore approfondimento sarà analizzato in dettaglio parte di un profilo di resistività apparente acquisito in corrispondenza di uno dei target interpretati come evidenza archeologica, in modo da verificare se il suo andamento sia analogo o assimilabile a quello riscontrato nei profili acquisiti nell'Area Test di Rovereto (Par. 3.2).

Le indagini riportate in questo capitolo si riferiscono a siti archeologici con strutture di origine antropica caratterizzate generalmente da un alto contrasto di resistività con il terreno circostante. Le condizioni del contrasto di resistività target-contesto possono essere per la maggior parte paragonabili a quelle analizzate nell'Area Test di Rovereto: per individuare ed interpretare in modo oggettivo i segnali di resistività dovuti ad elementi di origine archeologica si è tenuto conto dei risultati delle indagini realizzate a Rovereto.

5.1 Villa di età tardo-antica presso Siena

5.1.1 Caratteristiche del sito e pianificazione del survey in prossimità della villa tardo-antica

<i>Nome del sito</i>	Villa di età tardo-antica presso Siena
<i>Target</i>	Villa tardo-antica: fondazioni in travertino di larghezza di circa 60 cm, pavimentazioni con rivestimento in marmo.
<i>Ubicazione</i>	Dintorni di Siena
<i>Periodo storico</i>	VII-X sec. d.C.
<i>Geologia</i> ²⁷	depositi pleistocenici e olocenici costituiti da sabbie fini e medio-fini, limi e limi-argillosi
<i>Geomorfologia</i>	Pianura alluvionale

La pianificazione e la scelta delle aree in cui effettuare le indagini di resistività si sono basate sulle informazioni fornite dalla direzione dello scavo archeologico e sulle osservazioni della morfologia dell'area di interesse.

Sono stati realizzati 9 rilievi, disposti intorno al perimetro dello scavo, (Fig. 5.1) parallelamente ai suoi limiti. La leggera inclinazione verso nord della piana alluvionale e le arature perpetrate fino agli anni Settanta del Novecento²⁸ hanno spinto gli archeologi a supporre che le strutture antropiche meglio conservate si trovassero sul margine nord dello scavo. Per questa ragione, si è deciso di indagare più a fondo quell'area realizzandovi 4 rilievi. In base alle indicazioni fornite dagli archeologi, sono stati realizzati 3 rilievi sul lato est e solo uno sui lati ovest e sud, lungo i quali le aspettative di rinvenire strutture antropiche erano minori.

²⁷ Carta Geologica della regione Toscana 1:10.000, sezione 286130.

²⁸ Nel 1977 l'area interessata dal sito archeologico è stata sottoposta a vincolo a norma della legge 1089 del 1939.

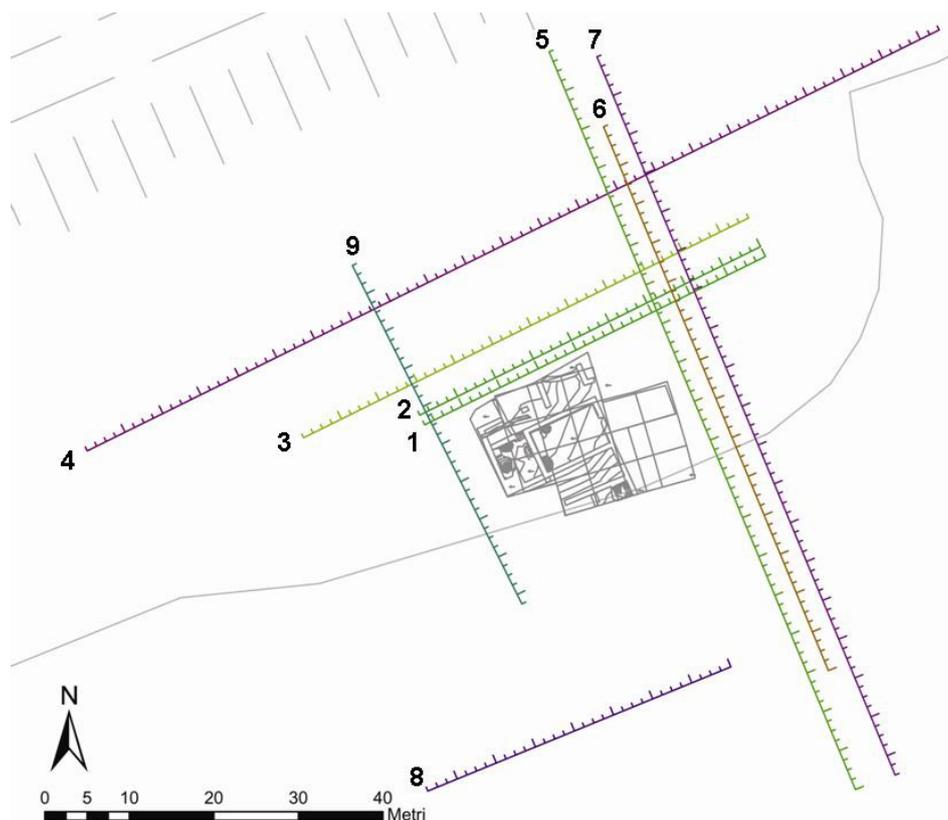


Fig. 5.1 – Posizionamento dei rilievi per l'indagine della villa tardo-antica presso Siena sulla CTR della Regione Toscana in scala 1:10 000 (sezione 286130).

Configurazione con antenne (a) da 2,5 m		
Lunghezza corda non conduttiva (na) [m]	Profondità indagata [m]	Lunghezza totale dello strumento [m] (con offset di 5 m)
0,625	0,5	10,625
1,25	0,7	11,25
1,875	0,9	11,875
2,5	1	12,5
3,125	1,2	13,125
3,75	1,4	13,75
4,375	1,6	14,375
5	1,7	15
5,625	1,9	15,625
6,25	2	16,25
6,875	2,2	16,875
7,5	2,4	17,5
8,125	2,6	18,125
8,75	2,7	18,75

Tab. 5.1 – Configurazione dell'OhmMapper utilizzata durante i Rilievi 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8 e 9 nella villa tardo-antica presso Siena e relativa lunghezza dello strumento. Per i Rilievi 1, 2 e 9 la profondità massima indagata è stata di circa 2 m; per i Rilievi 3 e 5 la profondità massima indagata è stata di circa 2,7 m; per i Rilievi 6 e 7 la profondità massima indagata è stata di circa 2,4 m; per il Rilievo 8 la profondità massima indagata è stata di circa 1,7 m.

Configurazione con antenne (a) da 5 m		
Lunghezza corda non conduttiva (na) [m]	Profondità indagata [m]	Lunghezza totale dello strumento [m] (con offset di 5 m)
1,25	1	16,25
2,5	1,4	17,5
3,75	1,7	18,75
5	2	20
6,25	2,4	21,25
7,5	2,8	22,5
8,75	3,1	23,75
10	3,5	25

Tab. 5.2 – Configurazione dell'OhmMapper utilizzata per realizzare il Rilievo 4 nella villa tardo-antica presso Siena e relativa lunghezza dello strumento.

Alla luce delle caratteristiche geologiche e archeologiche del sito in esame è stata definita una scala caratterizzata da 17 intervalli di resistività corrispondenti ad altrettanti colori (Fig. 5.2): i valori più bassi di resistività ($\rho < 500 \Omega\text{m}$) corrispondono al layer di sabbie, a volte potenzialmente sature, caratteristiche delle alluvioni pleistoceniche dell'area in esame; i segnali caratterizzati da valori di resistività compresi tra 500 e 1000 Ωm e posizionati a profondità comprese tra la superficie e 1,5 m possono essere interpretati come le fondazioni in tufo delle strutture della villa tardo-antica.

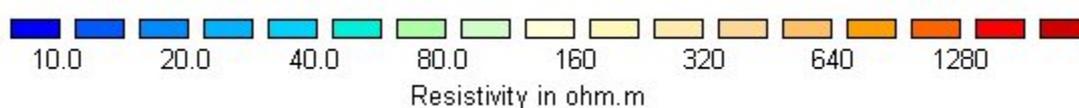


Fig. 5.2 – Scala di valori e colori utilizzata per l'interpretazione dei modelli di resistività nel sito della villa tardo-antica presso Siena.

Tutte le tomografie sono state invertite mediante software Res2Dinv utilizzando un modello di inversione raffinato, con larghezza della cella pari a metà della corda non conduttiva più corta utilizzata. Come descritto in letteratura²⁹, questo accorgimento è particolarmente adatto ad un contesto come quello oggetto di studio, in cui è presente una grande variabilità di resistività sia in orizzontale che in verticale, dovuta alla presenza di fondazioni di murature di origine antropica con grande contrasto di resistività rispetto al contesto di sabbie spesso sature. Per accentuare la presenza di eventuali strutture antropiche, è

²⁹ Loke 2000.

stato anche impiegato il metodo di inversione robust che mette in evidenza le variazioni nette di resistività.

5.1.2 Rilievi realizzati nel sito della villa tardo-antica presso Siena

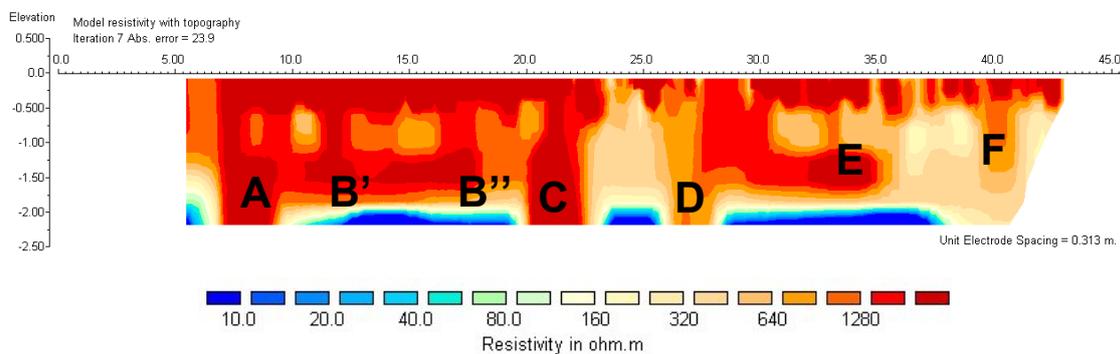
Dettagli tecnici dei Rilievi

Numero del Rilievo	Lunghezza del Rilievo [m]	Numero totale delle misure effettuate	Intervallo di profondità indagato [m]	Intervallo spaziale orizzontale [m]
1	35	3198	0,5 – 2	Circa 0,1
2	35	2918	0,5 – 2	Circa 0,1
3	45	3473	0,7 – 2,7	Circa 0,1
4	65	3554	1 – 3,5	Circa 0,15
5	60	5101	0,7 – 2,7	Circa 0,1
6	45	2676	0,7 – 2,4	Circa 0,2
7	60	3902	0,7 – 2,4	Circa 0,1
8	30	1581	0,5 – 1,7	Circa 0,1

Modelli di resistività

Sezioni di resistività

Rilievo 1



Il Rilievo 1 è stato posizionato a meno di un metro dal margine nord dello scavo, dove risulta evidente la prosecuzione di strutture murarie sotto il piano di campagna. Vista la sicura

presenza di muri, tale operazione è stata realizzata per verificare l'efficacia dello strumento: le evidenze individuate nella pseudosezione hanno reso possibile una migliore interpretazione delle misure realizzate a maggiori distanze dall'area di scavo archeologico.

L'analisi riportata di seguito per tutte le tomografie elettriche si concentra sui segnali ad alta resistività con caratteristiche tali da essere interpretati come strutture di natura archeologica.

Segnale A: Segnale ad alta resistività ($\rho > 1000 \Omega\text{m}$) che delimita una netta variazione verticale rispetto all'area adiacente a resistività inferiore e può essere interpretato come prosecuzione della struttura muraria in travertino che continua verso nord oltre il margine di scavo; questo segnale può essere utilizzato come un punto di riferimento per l'interpretazione di segnali analoghi come altrettante strutture archeologiche.

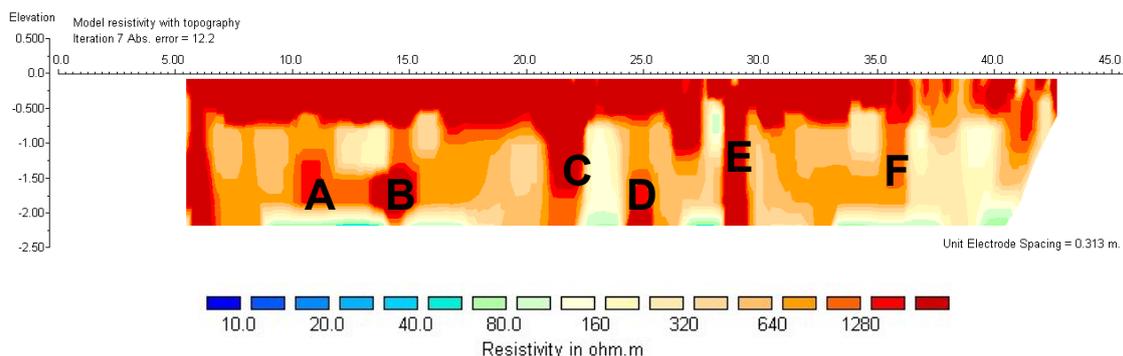
Segnali B: Coppia di segnali ad alta resistività caratterizzati da un andamento grossomodo orizzontale; per i valori di resistività e le caratteristiche geometriche potrebbe trattarsi dello strato di crollo compatto di una struttura in travertino, in cui sono evidenti due geometrie più definite (B' e B'') interpretabili come fondazioni.

Segnale C: Segnale con valori di resistività e geometria paragonabile al segnale A e per questo interpretabile come fondazione in travertino.

Segnali D ed E: Segnali ad alta resistività con geometria ben definita all'interno di un contesto a resistività poco più bassa con andamento orizzontale; potrebbe trattarsi di due fondazioni rimaste in situ all'interno di uno strato di crollo compatto.

Segnale F: Segnale a resistività medio alta (700-1000 Ωm), meno evidente rispetto ai segnali A e C, tuttavia visto l'andamento verticale è possibile ipotizzare la presenza di una struttura antropica compatta, eventualmente di dimensioni ridotte.

Rilievo 2

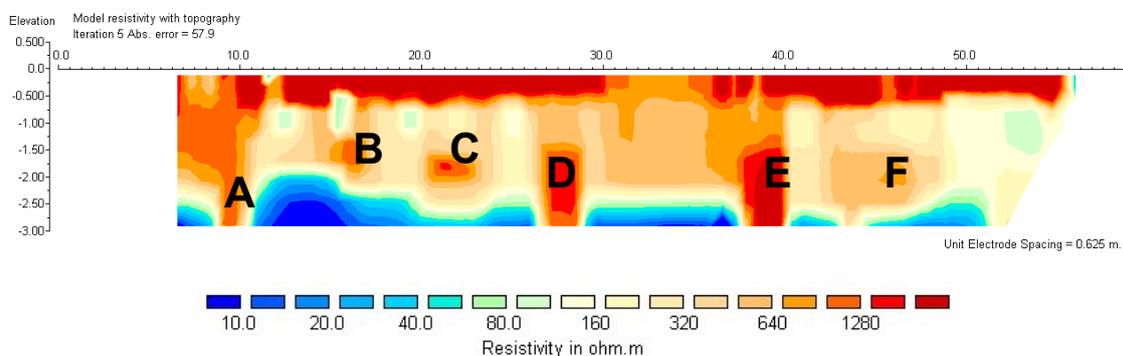


Segnali A e B: Segnali ad alta resistività con geometria ben definita all'interno di un contesto a resistività poco più bassa con andamento orizzontale; potrebbe trattarsi di due fondazioni rimaste in situ all'interno di uno strato di crollo.

Segnali C, D ed E: Segnali ad alta resistività e con caratteristiche geometriche tali da permettere l'interpretazione degli stessi come fondazioni in tufo delle strutture murarie della villa.

Segnale F: Segnale a resistività medio alta (700-1000 Ω m), meno evidente rispetto agli altri segnali del Rilievo 2 interpretati come strutture; tuttavia, visto l'andamento verticale, è possibile ipotizzare la presenza di una fondazione di dimensioni minori o mal conservata.

Rilievo 3

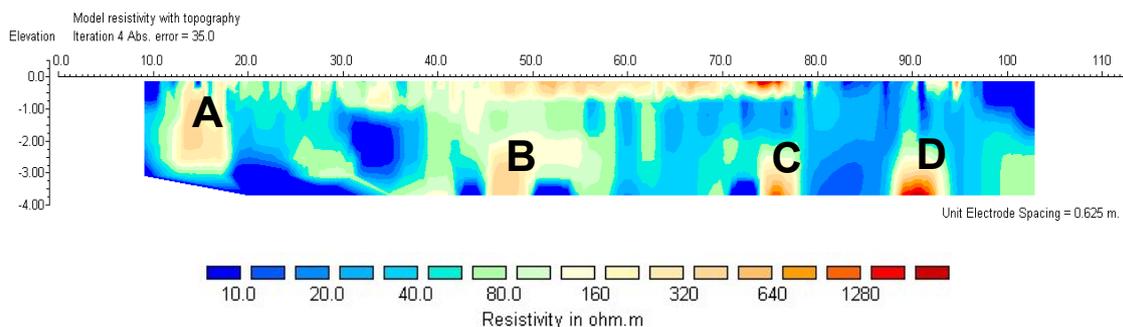


Segnali A, D ed E: Segnali ad alta resistività (circa 1000 Ωm) che delimitano una variazione verticale rispetto all'area adiacente a resistività inferiore; vista la forma particolarmente allungata viene interpretata come struttura muraria compatta e profonda.

Segnali B e C: Segnali ad alta resistività con geometria ben definita e contornata: tenuto conto della profondità e della geometria possono essere interpretati come strutture antropiche compatte di dimensioni inferiori e con fondazioni meno profonde rispetto ai segnali A, D ed E.

Segnale F: Segnale a resistività medio-alta e con estensione geometrica parallela al piano di campagna, tale da permettere l'interpretazione come strato di crollo compatto.

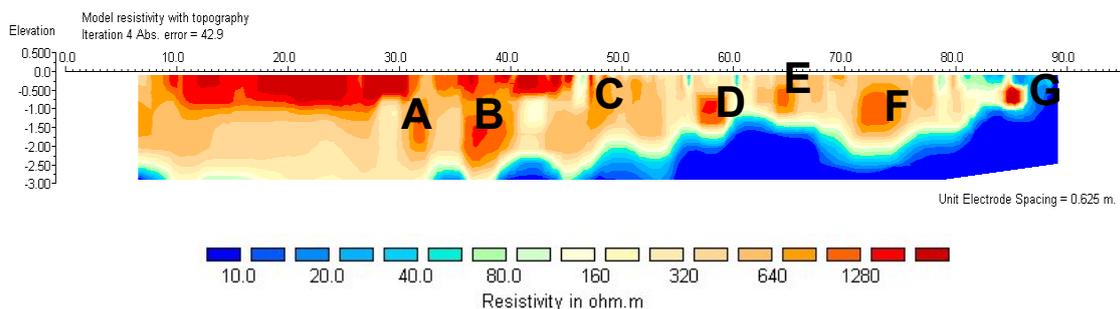
Rilievo 4



Segnali A e B: Segnali a resistività medio-bassa (circa 200 Ωm) che delimitano una variazione verticale e orizzontale rispetto all'area adiacente con resistività inferiore, che fa pensare ad elementi di origine antropica quali fondazioni mal conservate o di materiale diverso e meno resistivo rispetto al tufo.

Segnali C e D: Segnali a resistività medio-alta (500-1000 Ωm) individuabili sul fondo della tomografia, in base alla geometria possono essere interpretati come fondazioni profonde di origine archeologica.

Rilievo 5

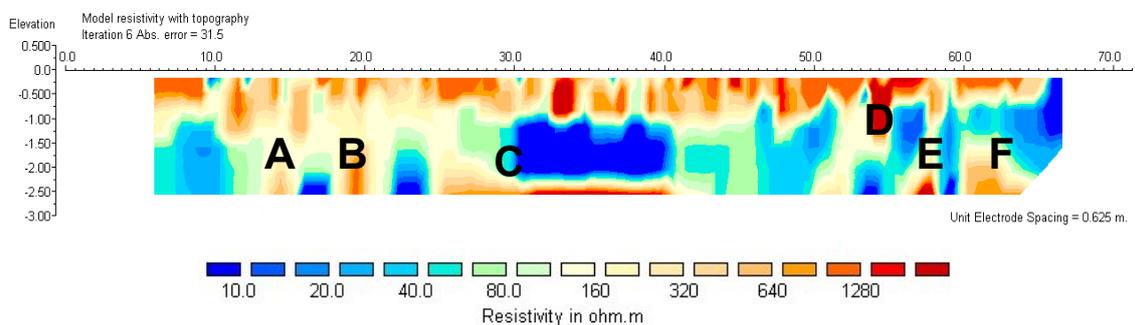


Segnali A e B: Segnali ad alta resistività (circa 1000 Ωm) con andamento verticale che taglia la zona a bassa resistività evidente sul fondo della tomografia, tale da far pensare a fondazioni profonde di dimensioni notevoli (soprattutto B).

Segnali C, D, E ed F: Segnali a resistività medio-alta con una geometria ben definita tali da far ipotizzare la presenza di probabili strutture antropiche di dimensioni ridotte e superficiali.

Segnale G: Segnale ad altissima resistività ($\rho > 1000 \Omega\text{m}$) la cui forma ben contornata e definita rispetto al contesto permette di ipotizzare che si tratti di un elemento di origine antropica, anche se le dimensioni ridotte del segnale non sembrano far riferimento ad una fondazione, quanto più ad un elemento singolo molto compatto o cavo.

Rilievo 6

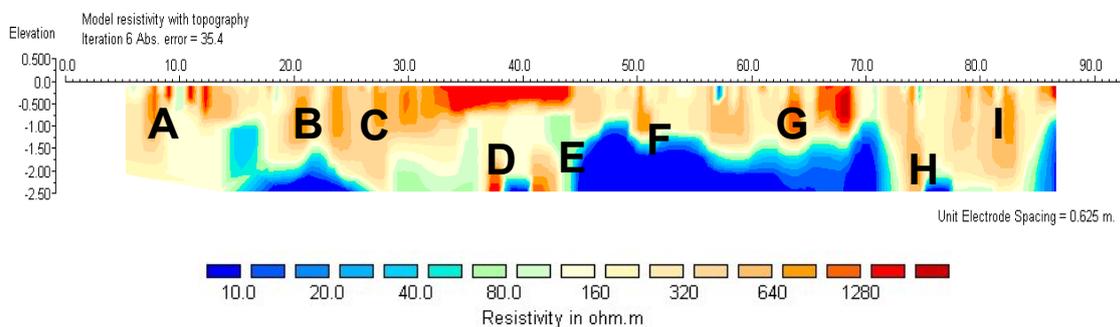


Segnali A, B, E ed F: Segnali a resistività medio-alta (500-1000 Ωm) con andamento verticale tale da far ipotizzare la presenza di fondazioni archeologiche profonde, che tagliano i livelli a resistività più bassa costituiti da sabbie parzialmente sature.

Segnale C: Segnale a resistività medio-alta che si sviluppa orizzontalmente sul fondo della tomografia elettrica e delimita un netto contrasto rispetto ai valori di resistività superiori e a sinistra del segnale. Sebbene il segnale si trovi sul fondo della tomografia e non sia possibile valutarne l'intera geometria è possibile ipotizzare che possa trattarsi di un elemento antropico con andamento orizzontale, quale uno strato di crollo compatto su un piano pavimentale.

Segnale D: Segnale poco profondo ad elevata resistività ($\rho > 1000 \Omega\text{m}$), che, per la geometria ben definita, può essere interpretato come elemento di natura antropica.

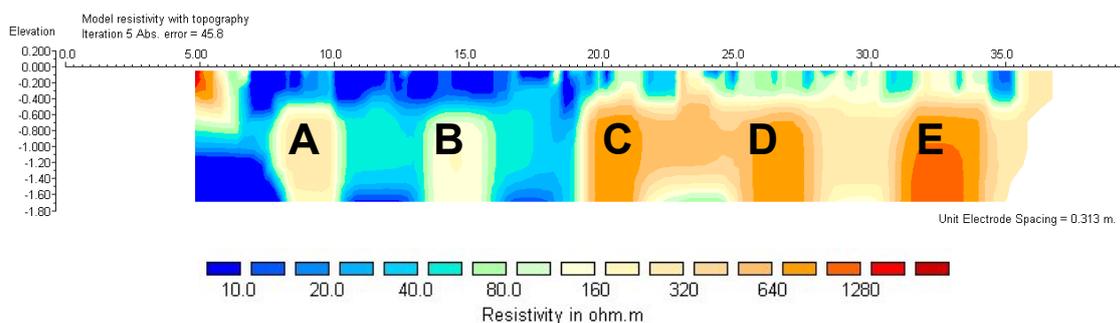
Rilievo 7



Segnali A, B, C, F, G e I: Gruppi di segnali superficiali a resistività medio-alta con andamento chiaramente verticale; possono essere interpretati come strutture antropiche superficiali solo parzialmente intaccate dai lavori di aratura.

Segnali D, E ed H: Segnali a resistività medio-alta (500-1000 Ωm) con andamento verticale tale da far ipotizzare la presenza di fondazioni archeologiche profonde, che tagliano i livelli a resistività più bassa costituiti da sabbie parzialmente sature.

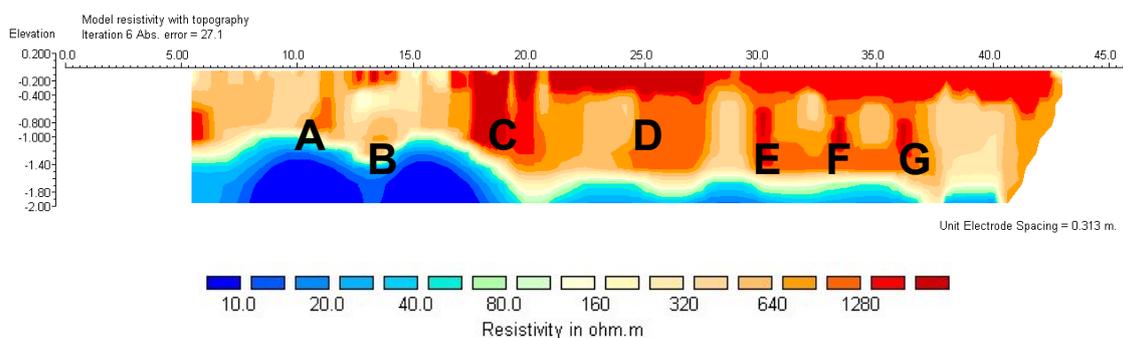
Rilievo 8



Segnali A e B: Segnali a resistività medio-bassa (circa 500 Ωm), con geometria ben definita, che delimitano una netta variazione verticale e orizzontale rispetto all'area adiacente a resistività inferiore. In base alla geometria i segnali possono essere interpretati come strutture antropiche, anche se i valori di resistività non permettono di affermare che si tratti di fondazioni in tufo.

Segnali C, D ed E: Segnali ad alta resistività (circa 1000 Ωm) molto evidenti e caratterizzati da una geometria regolare, con caratteristiche tali da poter essere interpretati come strutture di natura archeologica probabilmente in tufo. Da notare la regolarità dell'intervallo spaziale che divide le evidenze A, B, C, D, E.

Rilievo 9



Segnale A: Segnale ad alta resistività (circa 1000 Ωm) interpretabile come evidenza antropica di origine archeologica in base alle caratteristiche geometriche e alla netta variazione di resistività con il contesto sottostante di probabili sabbie sature.

Segnale B: Segnale a media resistività (circa 800 Ωm) con geometria poco definita, ma con andamento tendenzialmente verticale che taglia il livello sottostante di resistività più bassa; per le caratteristiche geometriche e di resistività in relazione al contesto il segnale è interpretabile come elemento di origine antropica probabilmente mal conservato.

Segnali C: Gruppo di due segnali ad elevata resistività ($\rho > 1000 \Omega\text{m}$) caratterizzati da una geometria verticale molto accentuata e interpretabili come strutture di origine archeologica.

Segnale D: Segnale ad alta resistività con forma geometrica non definita, ma con andamento verticale, interpretabile come un elemento di origine antropica, quale uno strato di crollo compatto.

Segnali E, F e G: Gruppo di tre segnali ad alta resistività caratterizzati da una stessa geometria verticale ben definita. I segnali sembrano far parte di una stessa struttura, come fondazioni di muri che separano ambienti diversi.

Interpretazione in chiave archeologica dell'area indagata

Se si prendono in esame tutte le sezioni di resistività, si notano 4 “zone” ricorrenti e particolarmente evidenti: l'arativo, la fascia antropizzata, il substrato e le strutture antropiche. La resistività del sottosuolo pertanto sembra mettere in evidenza “un ambiente” che può essere schematizzato come in Fig. 5.3. Ciascuna “zona” è caratterizzata da valori di resistività tipici e da posizioni spaziali comuni a tutte le sezioni di resistività.

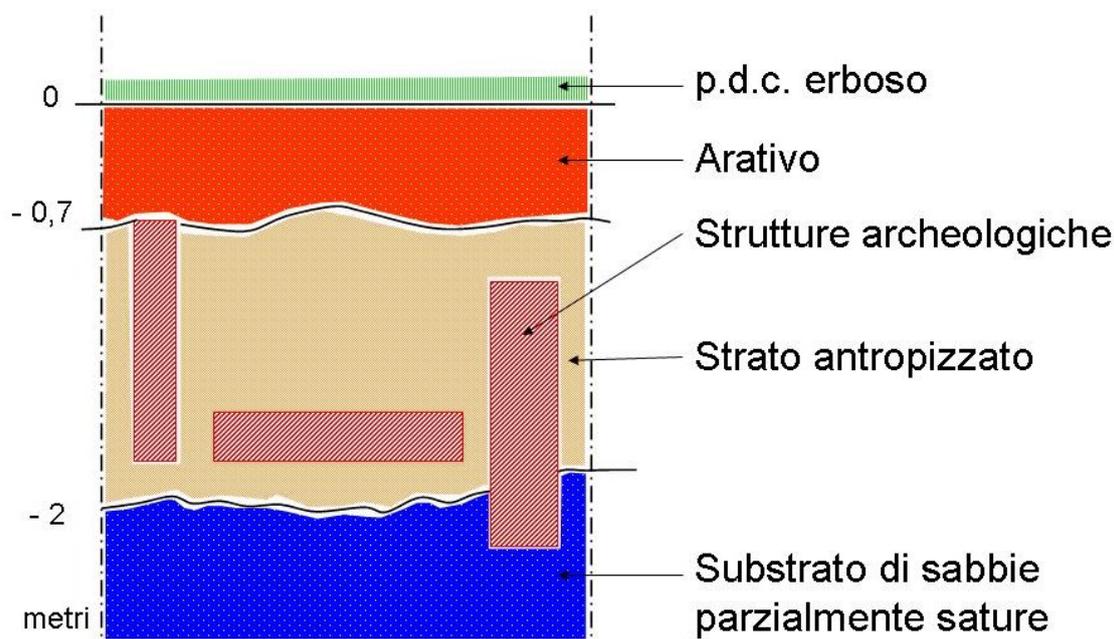


Fig. 5.3 – Schema illustrativo delle caratteristiche del sito. È possibile distinguere lo strato di arativo, lo strato antropizzato caratterizzato principalmente da crolli e dalla presenza delle strutture archeologiche, che in alcuni casi tagliano il substrato vergine di sabbie parzialmente sature.

La presenza di segnali ad alta resistività interpretabili come strutture di natura archeologica nella zona a nord dello scavo conferma solo in parte le aspettative

archeologiche: infatti, anche se si hanno importanti segnali di possibili strutture nella tomografia elettrica del Rilievo 4, posizionato a 16 metri dallo scavo, va fatto notare che esse sono rare e molto profonde.

La sorpresa maggiore da un punto di vista archeologico si trova a circa 25 m a sud dello scavo dove è possibile individuare, grazie al Rilievo 8, cinque segnali ben definiti con una resistività tale da far pensare indubbiamente a strutture di natura archeologica (Fig. 5.4).

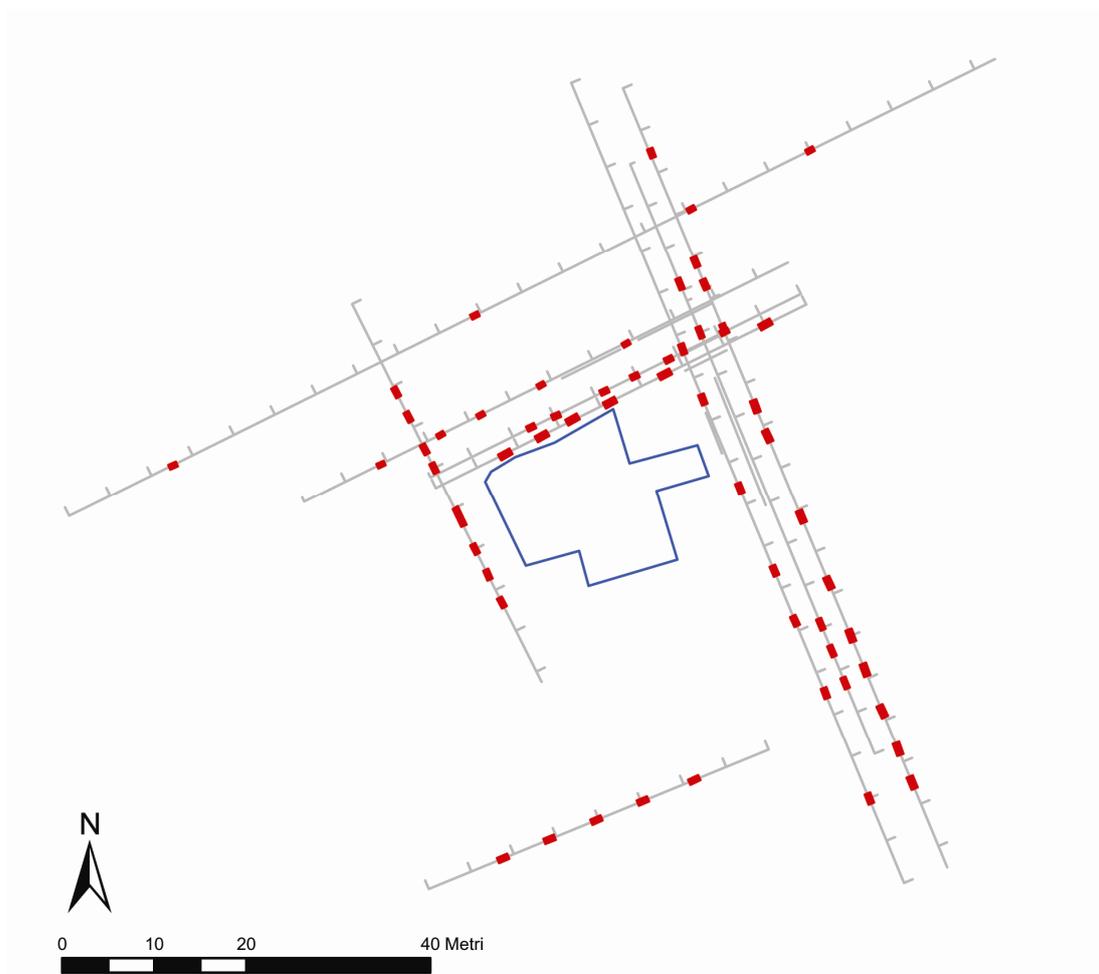


Fig. 5.4 – Distribuzione in pianta dei segnali di resistività interpretabili come elementi di natura archeologica attorno all'area di scavo della villa tardo-antica.

Confronto con altri dati a disposizione

L'interpretazione di alcuni dei segnali di alta resistività come strutture di natura archeologica è stata confermata dallo scavo stratigrafico che ha seguito la campagna di indagine geoelettrica. Come è possibile vedere in Fig. 5.5 sono evidenti le corrispondenze tra USM e segnali di resistività; inoltre è opportuno sottolineare che le aree ad alta resistività evidenti in particolare nei modelli dei Rilievi 1 e 2 hanno corrisposto in gran parte a strati di crollo compatto, che ha caratteristiche elettriche simili a una struttura muraria in situ.

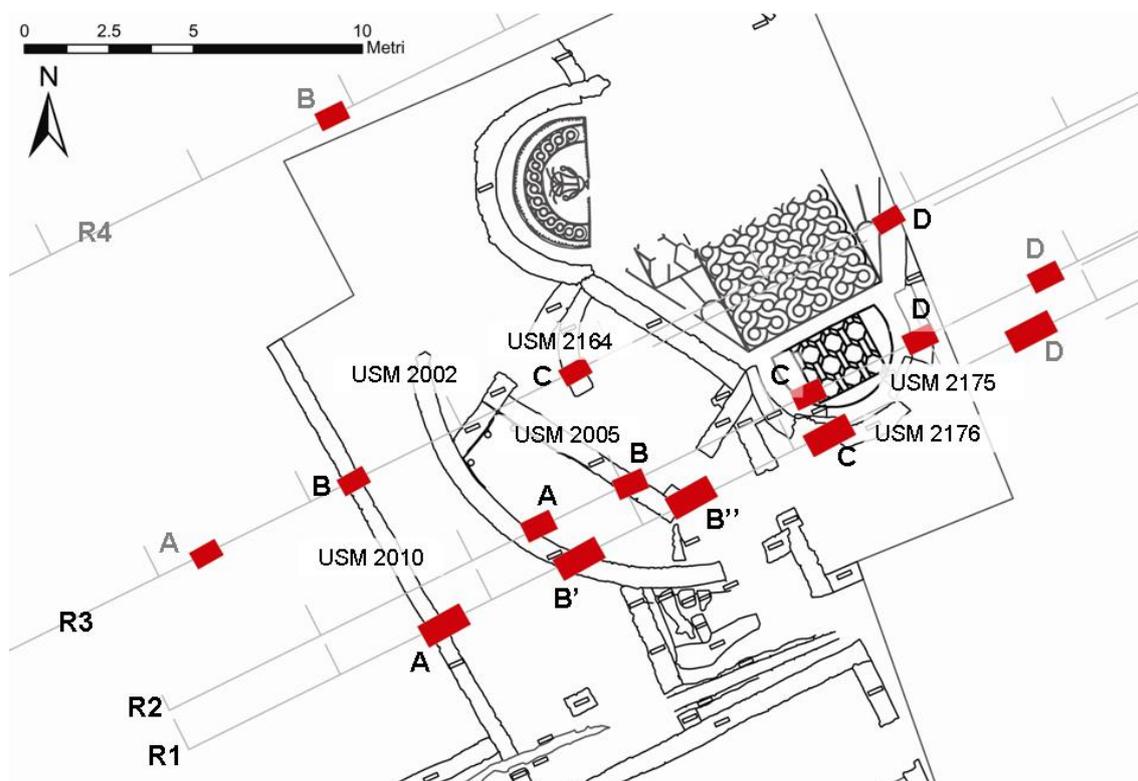


Fig. 5.5 – Corrispondenza tra le USM rilevate durante il saggio di scavo successivo alla campagna di indagini geoelettriche e i segnali di resistività individuati.

Analisi di un profilo di resistività campione

Il profilo (Fig. 5.6) acquisito con l'OhmMapper a circa 1 m di profondità lungo il Rilievo 8 realizzato nel sito della Villa tardo-antica presso Siena presenta in corrispondenza del target C un andamento a M paragonabile a quello dei profili realizzati nell'Area Test di Rovereto in corrispondenza del target con andamento verticale e a resistività più alta rispetto

al contesto³⁰. È possibile quindi affermare che ci si trova in presenza di un bersaglio con caratteristiche analoghe a quello di Rovereto, bersaglio che, nel caso della villa tardo-antica, è compatibile con le caratteristiche fisiche delle fondazioni costituite blocchi di travertino circondate da sabbie fini e medio-fini, limi e limi-argillosi.

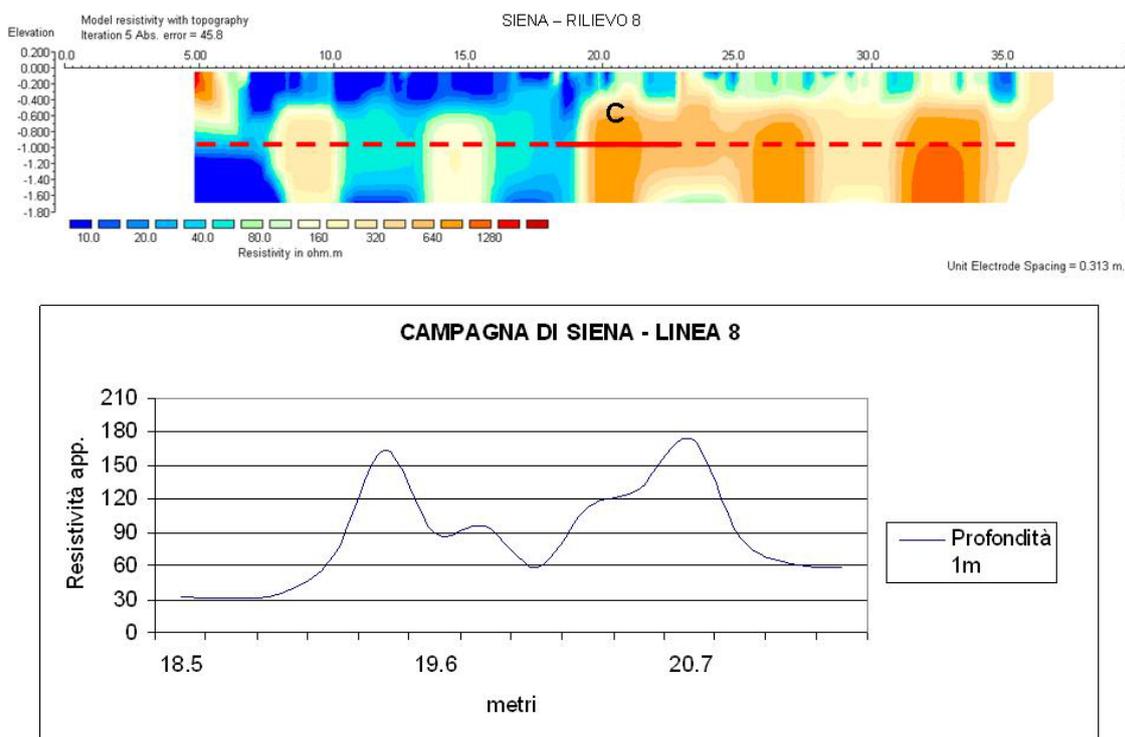


Fig. 5.6 – Analisi dell'andamento del profilo di resistività apparente acquisito con l'OhmMapper nei dintorni di Siena ad una profondità di circa 1 m in corrispondenza del target C (Rilievo 8), interpretato come fondazione di natura archeologica.

³⁰ Paragrafo 3.2.

5.2 Accademia di Villa Adriana (Tivoli – Roma)

5.2.1 Caratteristiche del sito e pianificazione del survey nell'Accademia di Villa Adriana

<i>Nome del sito</i>	Accademia di Villa Adriana (Tivoli – Roma)
<i>Target</i>	Cunicolo sotterraneo di passaggio tra i diversi ambienti
<i>Ubicazione</i>	Villa Adriana – Tivoli
<i>Periodo storico</i>	I-II sec. d.C.
<i>Geologia</i> ³¹	Banco tufaceo naturale
<i>Geomorfologia</i>	Terrazzo fluviale

L'Accademia di Villa Adriana si trova nell'estremo più orientale dell'intero complesso imperiale e nella zona morfologicamente più elevata, all'interno di una proprietà privata³². Lo scopo principale dell'indagine geoelettrica consiste nell'individuare, attraverso un'indagine non invasiva, la prosecuzione di un cunicolo sotterraneo il cui ingresso è ben visibile all'interno di un ambiente dell'Accademia, ma il cui percorso, pur noto attraverso alcune cartografie storiche e recenti³³, è ostruito da detriti che non permettono di seguirne la direzione (Fig. 5.7).

Per la realizzazione del survey (Fig. 5.8) è stato inizialmente utilizzato l'OhmMapper, in quanto esso permette di eseguire rapidamente indagini geoelettriche. Per adottare una configurazione adeguata dell'OhmMapper (Tab. 5.3) è stato necessario trovare un compromesso tra la profondità stimata del cunicolo e lo spazio di manovra a disposizione.

Una volta verificata l'efficacia del metodo geoelettrico nel contesto indagato, si è scelto di procedere allontanandosi progressivamente dall'ingresso del cunicolo per ricostruirne il percorso. Questa seconda fase di indagine è stata effettuata con un georesistivimetro ad accoppiamento galvanico a causa degli impedimenti alla manovrabilità dello strumento dovuti alla presenza di muri in elevato.

In questa sede sarà presentato soltanto il Rilievo realizzato con l'OhmMapper a poco più di 3,5 metri dall'accesso al cunicolo e a meno di 1 m dal deposito di detriti all'interno dello stesso.

³¹ Alberti A., Dragone F., Manfredini M., Segre A.G., 1962. Foglio 150 "Roma" (II ed.), Carta Geologica d'Italia 1:25.000 dell'I.G.M.

³² Si ringrazia la Famiglia Bulgarini per aver concesso l'accesso al sito.

³³ Piranesi 1781; Salza 1973.

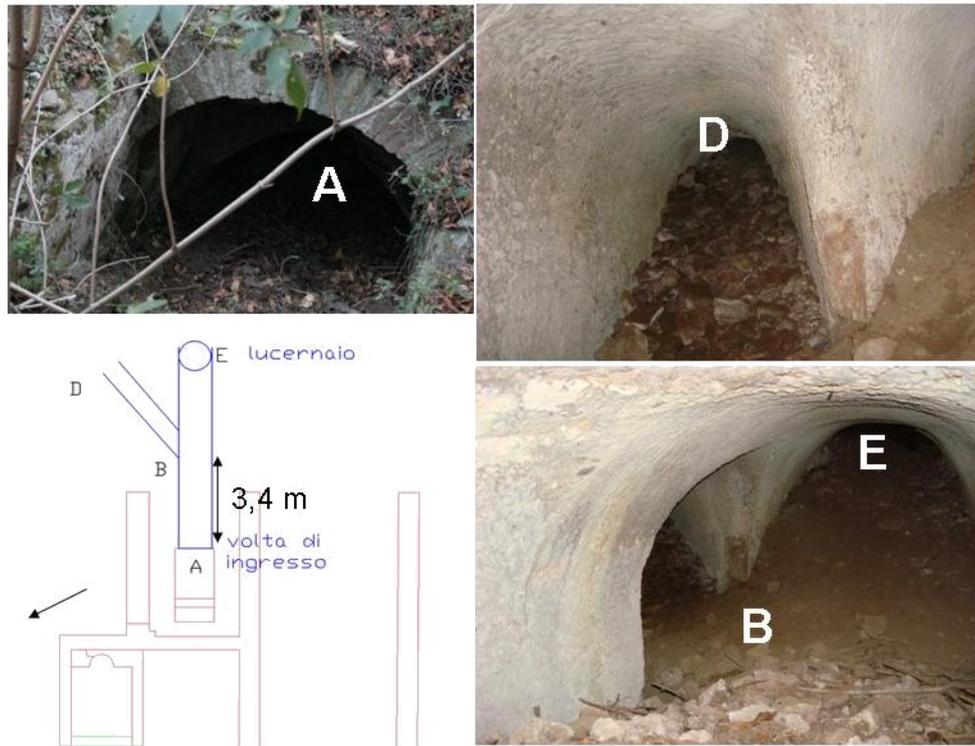


Fig. 5.7 – Schematizzazione della parte percorribile del cunicolo oggetto di indagine e immagini dell'ingresso (A) e dei tratti interessati dalla presenza di detriti (D ed E).

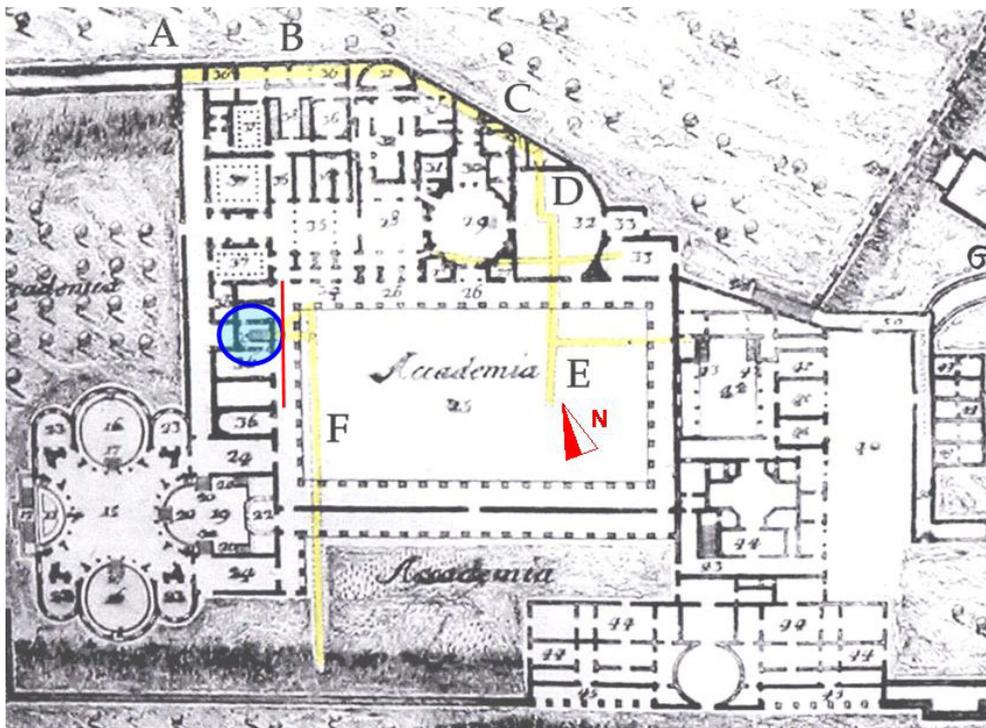


Fig. 5.8 – Posizionamento sulla pianta storica dell'Accademia di Villa Adriana redatta da Piranesi nel 1781 della linea di acquisizione di 32 m (in rosso) percorsa dall'operatore con l'OhmMapper. In giallo è possibile distinguere i percorsi dei cunicoli sotterranei riportati da Piranesi; cerchiato in azzurro l'ambiente da cui è possibile accedere al cunicolo oggetto di studio.

Configurazione con antenne (a) da 2,5 m		
Lunghezza corda non conduttiva (na) [m]	Profondità indagata [m]	Lunghezza totale dello strumento [m] (con offset di 5 m)
0,625	0,5	10,625
1,25	0,7	11,25
1,875	0,9	11,875
2,5	1	12,5
3,125	1,2	13,125
3,75	1,4	13,75
4,375	1,6	14,375
5	1,7	15
5,625	1,9	15,625
6,25	2	16,25
6,875	2,2	16,875
7,5	2,4	17,5
8,125	2,6	18,125
8,75	2,7	18,75
9,375	2,9	19,375
10	3,1	20
10,625	3,2	20,625
11,25	3,4	21,25
11,875	3,5	21,875

Tab. 5.3 – Configurazione dell'OhmMapper utilizzata durante il survey nell'Accademia di Villa Adriana e relativa lunghezza dello strumento.

Alla luce delle caratteristiche geologiche e archeologiche del sito in esame è stata definita una scala caratterizzata da 17 intervalli di resistività corrispondenti ad altrettanti colori (Fig. 5.9). Gli strati geologici non perturbati sono indubbiamente costituiti da tufo con valori di resistività inferiori a 160 Ωm : i valori più bassi segnalano un maggior contenuto d'acqua nei pori. Per valori di resistività maggiori di 160 Ωm è possibile ipotizzare la presenza di materiali da costruzione quali travertino e calcare, presenti nelle strutture antiche rimaste in elevato e più resistivi del tufo. In generale nelle zone più perturbate (ovvero più superficiali) è molto probabile che questi materiali siano mescolati al tufo stesso. Per valori di resistività maggiori di 1000 Ωm è possibile ipotizzare la presenza di cavità.

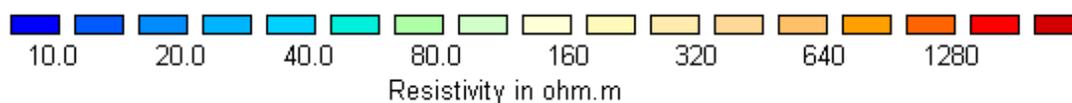


Fig. 5.9 – Scala di valori e colori utilizzata per l'interpretazione dei modelli di resistività dell'Accademia di Villa Adriana.

La tomografia elettrica è stata invertita mediante software Res2Dinv, utilizzando un modello di inversione raffinato, con larghezza della cella pari a metà della corda non conduttiva più corta utilizzata. Come descritto in letteratura³⁴, questo accorgimento è particolarmente adatto ad un contesto come quello oggetto di studio, in cui è presente una grande variabilità di resistività sia in orizzontale che in verticale, causata prevalentemente da interventi di natura antropica in superficie. Per accentuare la presenza di eventuali strutture cave nel substrato tufaceo, è stato anche impiegato il metodo di inversione robust che mette in evidenza le variazioni nette di resistività.

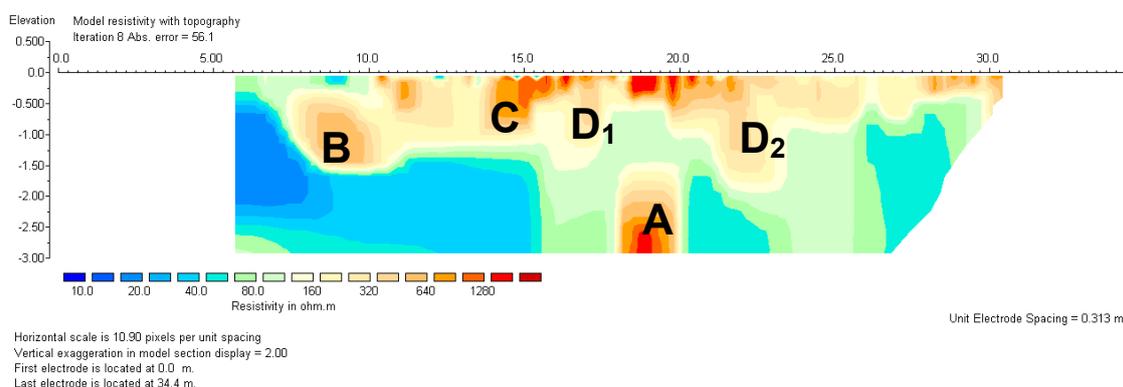
5.2.2 Rilievo realizzato con l'OhmMapper nell'Accademia di Villa Adriana

Dettagli Tecnici

Numero del Rilievo	Lunghezza del Rilievo [m]	Numero totale delle misure effettuate	Intervallo di profondità indagato [m]	Intervallo spaziale orizzontale [m]
1	25	4547	0,5 – 3,5	Circa 0,25

Modello di Resistività e interpretazione in chiave archeologica dei segnali

Sezione di Resistività



³⁴ Loke 2000.

Segnale A: Segnale di resistività con valori elevati ($\rho > 1000 \Omega\text{m}$) rispetto al contesto geologico e con una geometria tale da far pensare alla presenza di un intervento di origine antropica. Gli elevati valori di resistività, la posizione in asse con l'accesso al cunicolo e la profondità a cui è stato rilevato il segnale permettono di ipotizzare la presenza del cunicolo cavo oltre il deposito di detriti visibile in Fig. 5.7 (E).

Segnale B: Segnale a resistività medio-alta ($600 \Omega\text{m}$) e di geometria ben delineata interpretabile come fondazione di una struttura in parte ancora conservata a circa 8 m dall'inizio del rilievo (Fig. 5.10).



Fig. 5.10 – Posizionamento della linea di indagine e dei segnali A e B nell'area dell'Accademia di Villa Adriana. Veduta da Ovest.

Segnale C: Segnale superficiale a resistività medio-alta ($\rho > 600 \Omega\text{m}$) e di geometria regolare interpretabile, in base alla posizione, come fondazione dello stilobate del peristilio dell'Accademia.

Segnali D: Segnali superficiali caratterizzati da valori di media resistività possono essere interpretati, in base alla posizione, come fondazioni dei muri dell'ambiente interessato dall'accesso al cunicolo.

Confronto con altri dati a disposizione

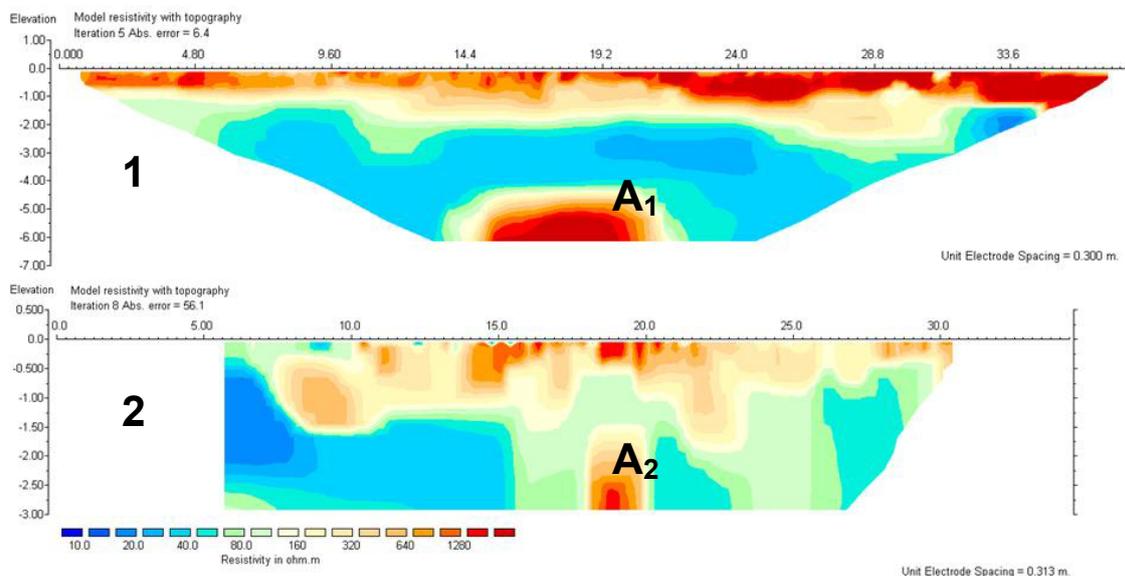


Fig. 5.11 – Confronto tra i modelli di resistività ottenuti con un georesistivimetro ad accoppiamento galvanico (array Schlumberger - 1) e l'OhmMapper (2) lungo la stessa linea di indagine nel sito dell'Accademia di Villa Adriana.

In corrispondenza del rilievo realizzato con l'OhmMapper, lungo la stessa linea di acquisizione, è stato effettuato un rilievo con array Schlumberger, utilizzando il georesistivimetro ad accoppiamento galvanico ABEM Terrameter SAS 1000. Come è possibile vedere dal confronto tra i due rilievi (Fig. 5.11) il Segnale A₂, visibile nel rilievo dell'OhmMapper è presente anche nella tomografia elettrica derivata dall'inversione del rilievo realizzato con il georesistivimetro ad accoppiamento galvanico (A₁): è possibile affermare quindi che il cunicolo, di cui è visibile l'accesso in superficie, non si interrompa in corrispondenza dei detriti, ma sia parzialmente percorribile verso il centro dell'Accademia.

Nel confronto tra i due modelli di resistività bisogna tenere conto che il modello realizzato con i dati acquisiti con l'OhmMapper (2 in Fig. 5.11), caratterizzato da un array assimilabile ad un dipolo-dipolo, tende ad accentuare l'andamento verticale dei segnali; inoltre il modello realizzato con i dati acquisiti con il georesistivimetro ad accoppiamento galvanico raggiunge una profondità maggiore e quindi intercetta non solo la parte superiore del cunicolo, ma anche gran parte della cavità.

Analisi di un profilo di resistività campione

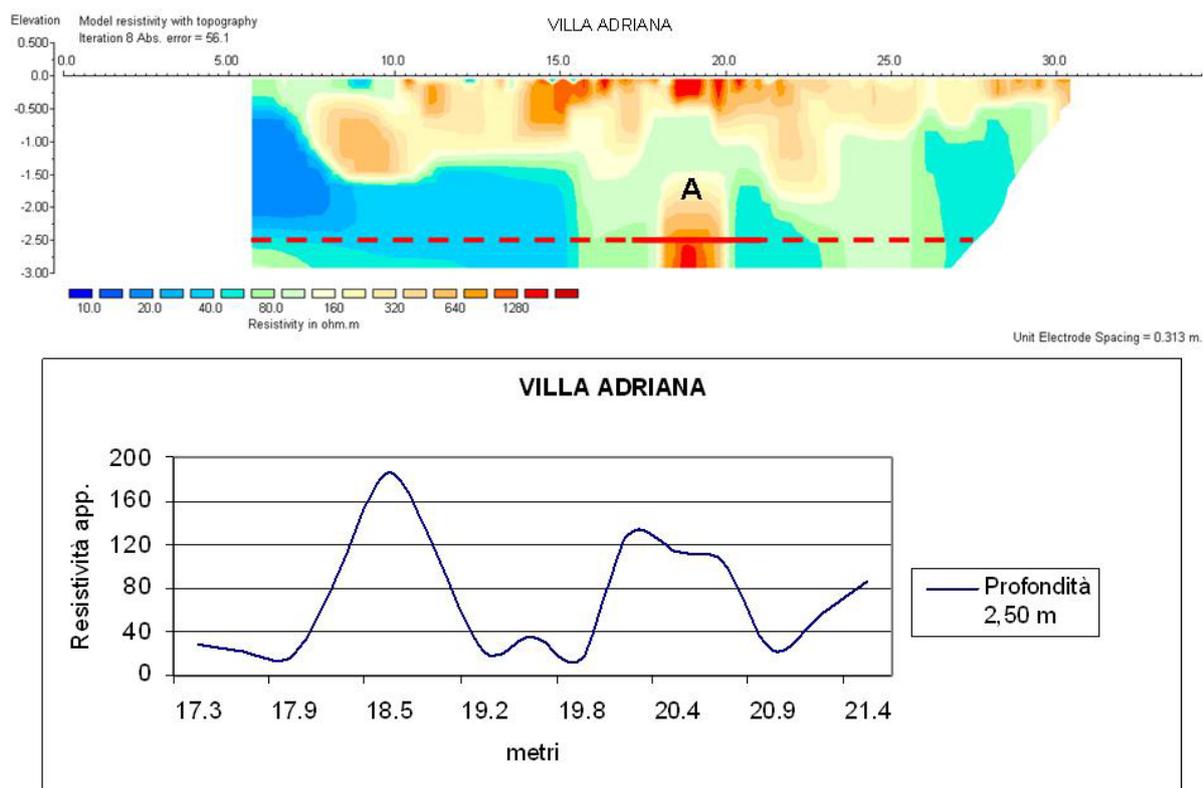


Fig. 5.12 – Analisi dell’andamento del profilo di resistività apparente acquisito con l’OhmMapper nell’Accademia di Villa Adriana ad una profondità di circa 2,50 m in corrispondenza del target A interpretato come cunicolo cavo di passaggio tra gli ambienti della Villa.

Il profilo (Fig. 5.12) acquisito con l’OhmMapper a circa 2,5 m di profondità lungo il Rilievo realizzato nell’Accademia di Villa Adriana (Tivoli - Roma) presenta, in corrispondenza del target A, un andamento a M paragonabile a quello del profilo realizzato nell’Area Test di Rovereto in corrispondenza del target con andamento verticale e a resistività più alta rispetto al contesto³⁵. È possibile quindi affermare che ci si trova in presenza di un bersaglio con caratteristiche analoghe a quello di Rovereto, bersaglio che, nel caso di Villa Adriana, è compatibile con le caratteristiche fisiche di un cunicolo cavo scavato nel tufo poroso e in parte saturo.

³⁵ Paragrafo 3.2.

5.3 Teatro Romano di Sentinum (Sassoferrato – AN)

5.3.1 Caratteristiche del sito e pianificazione del survey per l'individuazione del Teatro Romano di Sentinum

<i>Nome del sito</i>	Sentinum
<i>Target</i>	Teatro romano con strutture in calcare locale
<i>Ubicazione</i>	Città romana di Sentinum (Sassoferrato – AN)
<i>Periodo storico</i>	I sec. a.C. – V sec. d.C.
<i>Geologia</i> ³⁶	Depositi alluvionali terrazzati del Pleistocene Superiore: ghiaia calcarea in abbondante matrice limosa e argillosa.
<i>Geomorfologia</i>	Terrazzo fluviale

La città romana di Sentinum si trova nel territorio del comune di Sassoferrato in provincia di Ancona. La posizione occupata dalla città romana è di notevole importanza strategica: infatti questa ubicazione ha reso la piana zona di contatto tra popoli diversi (Umbri ed Etruschi ad occidente, Galli a settentrione, Piceni ad oriente e meridione), permettendo un ampio transito commerciale fin dall'età preromana.

Configurazione con antenne (a) da 7,5 m		
Lunghezza corda non conduttiva (na) [m]	Profondità indagata [m]	Lunghezza totale dello strumento [m] (con offset di 5 m)
1,875	1,5	21,875
3,75	2,1	23,75
5,625	2,6	25,625
7,5	3,1	27,5
9,375	3,7	29,375
11,25	4,2	31,25
13,125	4,7	33,125
15	5,2	35
16,875	5,7	36,875
18,75	6,2	38,75
20,625	6,7	40,625
22,5	7,2	42,5

Tab. 5.4 – Configurazione dell'OhmMapper utilizzata durante il survey a Sentinum e relativa lunghezza dello strumento.

L'impianto urbanistico regolare della città, fondata in Età Augustea (I sec. a.C. – I sec. d.C.), è stato indagato e analizzato grazie ad alcune campagne di prospezioni

³⁶ Carta Geologica 1:10.000 della Regione Marche, sezione 291150, Foglio Pergola, 2001.

magnetometriche³⁷, che hanno anche permesso di distinguere aree pubbliche da aree residenziali. Tuttavia, per quanto dettagliati, i risultati delle indagini magnetometriche non hanno permesso di individuare il teatro della città romana, elemento tipico delle fondazioni di Età Augustea.

L'obiettivo finale di questo studio è l'individuazione della possibile presenza dell'edificio del teatro di Sentinum attraverso la realizzazione di modelli di resistività 3D realizzati con l'OhmMapper (Fig. 5.13 e Tab. 5.4), in una zona già investigata con scarso successo con le indagini magnetometriche e potenzialmente adatta ad ospitare l'edificio³⁸.

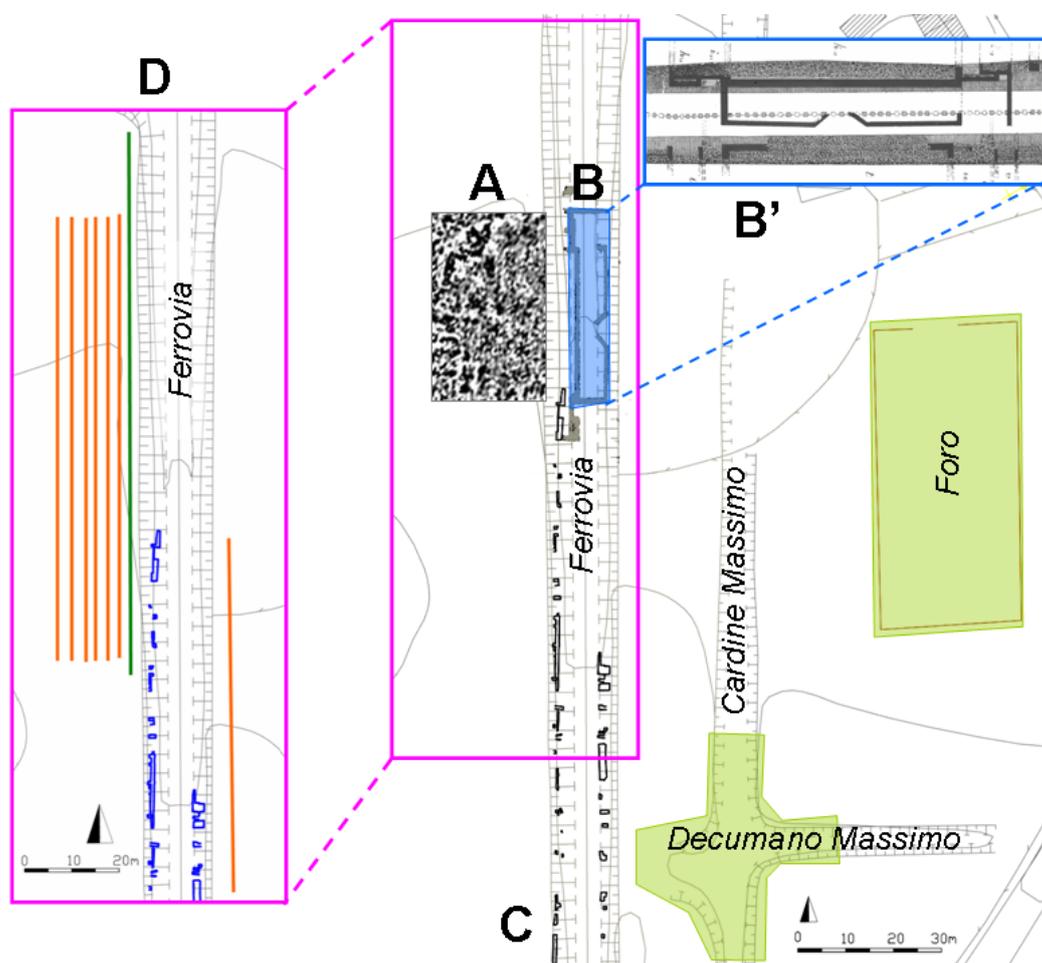


Fig. 5.13 – Posizionamento (dettaglio in D) dei Rilievi realizzati con l'OhmMapper (in arancione) e con il Terrameter SAS 1000 (in verde) sulla CTR in scala 1:10000 della Regione Marche (2001). Con A sono indicati i risultati poco chiari delle indagini magnetometriche (Bottacchi 2008), con B le fondazioni monumentali scoperte nel 1890 durante gli scavi della tratta ferroviaria Fabriano-Urbino (Mengarelli 1892) e con C le strutture archeologiche visibili in sezione sulle scarpate ai lati della ferrovia (Medri 2008).

³⁷ Bottacchi 2008.

³⁸ Medri 2008.

Alla luce delle caratteristiche geologiche e archeologiche del sito in esame è stata definita una scala caratterizzata da 17 intervalli di resistività corrispondenti ad altrettanti colori (Fig. 5.14): i valori più bassi di resistività ($\rho < 60 \Omega\text{m}$) corrispondono al layer di ghiaie calcaree in matrice argillosa caratteristico del contesto geologico superficiale dell'area in esame; lo strato antropizzato presenta valori di resistività compresi tra 70 e 200 Ωm , perché è costituito da alluvioni rimaneggiate e da rocce calcaree, che derivano dai crolli delle strutture archeologiche. Le fondazioni, principalmente costruite con blocchi di rocce calcaree, sono caratterizzate da resistività compresa tra 200 e 1100 Ωm .

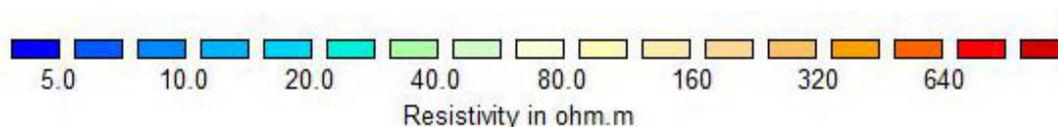


Fig. 5.14 – Scala di valori e colori utilizzata per l'interpretazione dei modelli di resistività di Sentinum.

Tutte le tomografie sono state invertite, mediante software Res2Dinv, utilizzando un modello di inversione raffinato, con larghezza della cella pari a metà della corda non conduttiva più corta utilizzata. Come descritto in letteratura³⁹, questo accorgimento è particolarmente adatto ad un contesto come quello oggetto di studio, in cui è presente una grande variabilità di resistività sia in orizzontale che in verticale, causata prevalentemente da interventi di natura antropica. Per accentuare la presenza di eventuali strutture antropiche, è stato anche impiegato il metodo di inversione robust che mette in evidenza le variazioni nette di resistività.

³⁹ Loke 2000.

5.3.2 Rilievo realizzato con l'OhmMapper nel sito della città romana di Sentinum



Fig. 5.15 – Visione da nord dell'area indagata con l'OhmMapper nel sito della città romana di Sentinum. Al centro dell'immagine è possibile vedere il gradino morfologico dovuto alla terra di risulta degli scavi archeologici.

Dettagli tecnici

Numero di sezioni verticali	Distanza tra le linee [m]	Dimensioni area indagata [m]	Numero totale delle misure effettuate	Intervallo di profondità indagato [m]	Intervallo spaziale orizzontale [m]
6	circa 2,5 (Tra linea 5 e 6= 3,5)	70 x 13.5	18201	1,5 – 7,2	Circa 0,4

Modelli di resistività

Sezioni di Resistività

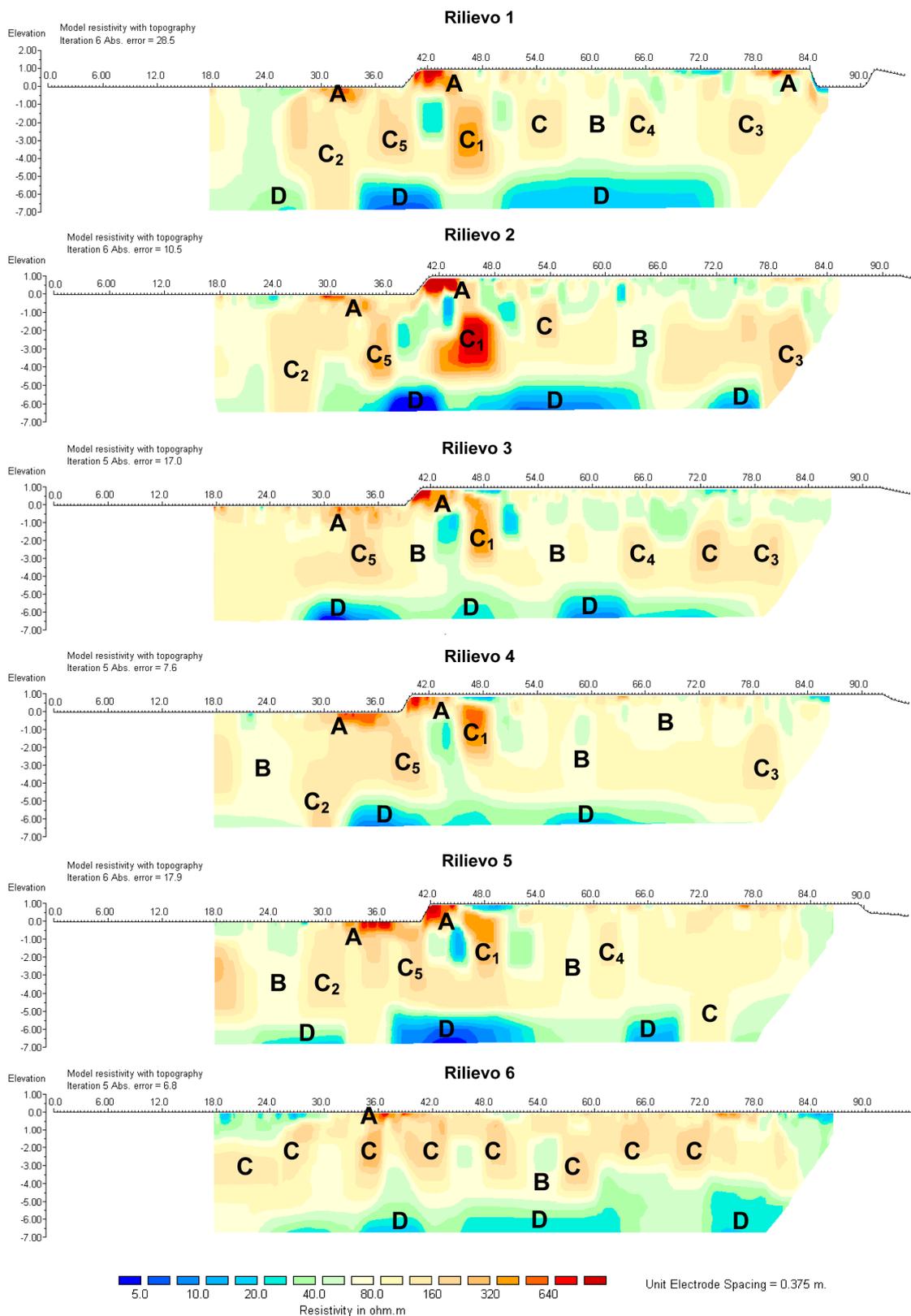


Fig. 5.16 - Rilievo nel sito della città romana di Sentinum – Sezioni di resistività.

Mappe di resistività

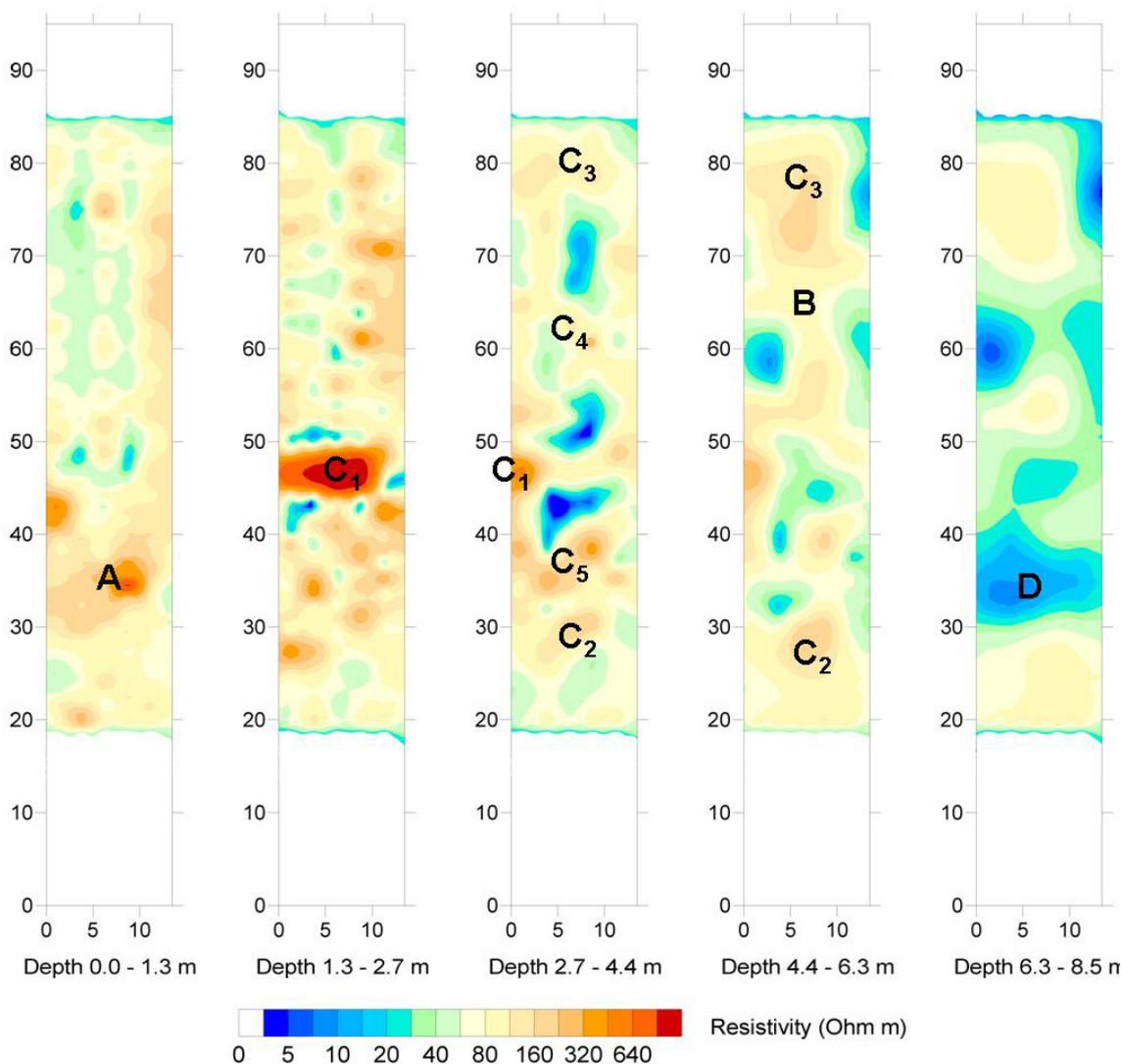


Fig. 5.17 – Rilievo nel sito della città romana di Sentinum – Mappe di resistività.

Segnali A: le zone indicate con la lettera A rappresentano i layer superficiali che sono caratterizzati da alti valori di resistività ($\rho > 650 \Omega\text{m}$), dovuti principalmente alla perturbazione presente per il rimaneggiamento subito dal terreno superficiale.

Possiamo inoltre notare che le prime cinque tomografie effettuate con l'OhmMapper presentano tutte un valore molto elevato di resistività dovuto, in questo caso, alla non perfetta aderenza delle antenne al terreno in corrispondenza di un netto cambio di pendenza della topografia (Fig. 5.15).

Segnali B: in un intervallo compreso tra 1 e 6 metri di profondità troviamo uno strato caratterizzato da valori di resistività compresi tra 70 e 200 Ωm . L'area è costituita principalmente da strutture crollate (quindi da rocce calcaree) e alluvioni rimaneggiate in antico durante le operazioni di costruzione degli edifici. Si può notare come in tutte le tomografie tra 60 e 80 m dall'inizio del rilievo ci siano segnali con valori di resistività compresi tra 150 e 200 Ωm , delimitati lateralmente in modo netto e interpretabili come crolli più compatti rispetto al materiale circostante.

Segnali C: i segnali indicati con la lettera C hanno valori di resistività compresi tra 200 e 1100 Ωm e sono identificabili con le fondazioni non crollate di età romana costruite generalmente con blocchi di calcare. Questi segnali sono caratterizzati da una geometria ben definita che permette di distinguerli facilmente rispetto al contesto (area B).

Di seguito saranno interpretati in modo più accurato i segnali C più significativi che si individuano nelle tomografie limitatamente all'area interessata alla possibile presenza del teatro: questi segnali sono tutti caratterizzati da uno spessore compreso tra 1 e 2,5 metri.

- **C₁:** segnali ad alta resistività (350-1100 Ωm) con geometria ben definita riscontrabili in tutte le tomografie, ad eccezione del Rilievo 6. I segnali si trovano a circa 48 metri dall'inizio del rilievo e presentano i valori più alti (500-1100 Ωm) nei modelli di resistività corrispondenti ai Rilievi 1, 2, 3 e 4; nel Rilievo 5 i valori sono più bassi (300-350 Ωm) e nel Rilievo 6 il segnale non viene rilevato. È possibile interpretare C₁ come la fondazione di maggiori dimensioni presente nell'area investigata.
- **C₂:** segnali con valori di resistività compresi tra 200 e 300 Ωm , riscontrabili nei modelli di resistività corrispondenti ai Rilievi 1, 2, 4 e 5. I segnali si trovano tra i 24 e i 36 metri dall'inizio del rilievo e raggiungono profondità maggiori di 7 metri. C₂ può essere interpretato come una fondazione più profonda rispetto alle altre presenti nell'area indagata.
- **C₃:** segnali con valori di resistività compresi tra 200 e 700 Ωm riscontrabili nei modelli di resistività corrispondenti ai Rilievi 1, 2, 3 e 4 a circa 78 m dall'inizio del rilievo, ad una profondità compresa tra 2 e 4,5 metri. I segnali sono caratterizzati da una geometria ben definita e corrispondono al prolungamento verso ovest della fondazione US176 presente nella sezione ovest della ferrovia (Fig. 5.18).

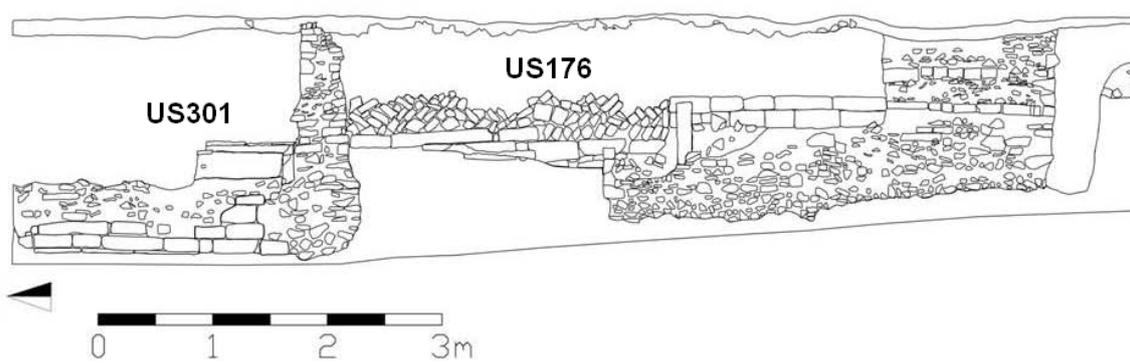


Fig. 5.18 – Rilievo archeologico delle strutture US301 e US176 individuate sulla parete della sezione ovest della tratta ferroviaria Fabriano-Urbino.

- **C₄**: i segnali indicati con C₄ hanno valori di resistività compresi tra 200 e 350 Ωm. Possiamo notare come il segnale non abbia sempre la stessa posizione nei modelli di resistività corrispondenti ai Rilievi 1, 3 e 5 ma tenda a spostarsi da circa 66 a 60 metri dall'inizio del rilievo: possiamo comunque affermare che si tratta dello stesso segnale perché presenta la stessa geometria e lo stesso intervallo di resistività. I segnali C₄ sono interpretabili come una fondazione con andamento non rettilineo localizzata ad una profondità compresa tra 2 e 4 m. Possiamo ipotizzare che questi segnali corrispondano al prolungamento verso ovest della fondazione US301 visibile in sezione (Fig. 5.18).
- **C₅**: i segnali indicati con C₅ hanno valori di resistività compresi tra 350 e 600 Ωm. Possiamo notare come il segnale non abbia sempre la stessa posizione nei modelli di resistività corrispondenti ai Rilievi 1, 2, 3, 4 e 5, ma tenda a spostarsi da circa 35 a 40 metri dall'inizio del rilievo: possiamo comunque affermare che si tratta dello stesso segnale perché presenta la stessa geometria e lo stesso intervallo di resistività. I segnali sono interpretabili come una fondazione con andamento non rettilineo localizzata ad una profondità compresa tra 1,5 e 4,5 m.

Nel modello di resistività corrispondente al Rilievo 6 i segnali indicati come C sono caratterizzati da dimensioni minori (inferiori al metro di spessore) rispetto ai segnali C dei Rilievi 1, 2, 3, 4 e 5, sono più frequenti ed hanno valori di resistività meno elevati ($200 < \rho < 500 \Omega\text{m}$).

Segnali D: le zone indicate con D sono caratterizzate da valori di resistività compresi tra 5 e 60 Ωm e si trovano ad una profondità maggiore di 5 metri. Queste aree possono essere interpretate come il layer geologico costituito dalle alluvioni su cui è stata fondata la città

romana. I valori bassi di resistività sono dovuti alla composizione siltoso-argillosa dei depositi alluvionali terrazzati del Pleistocene Superiore.

Modelli 3D di resistività

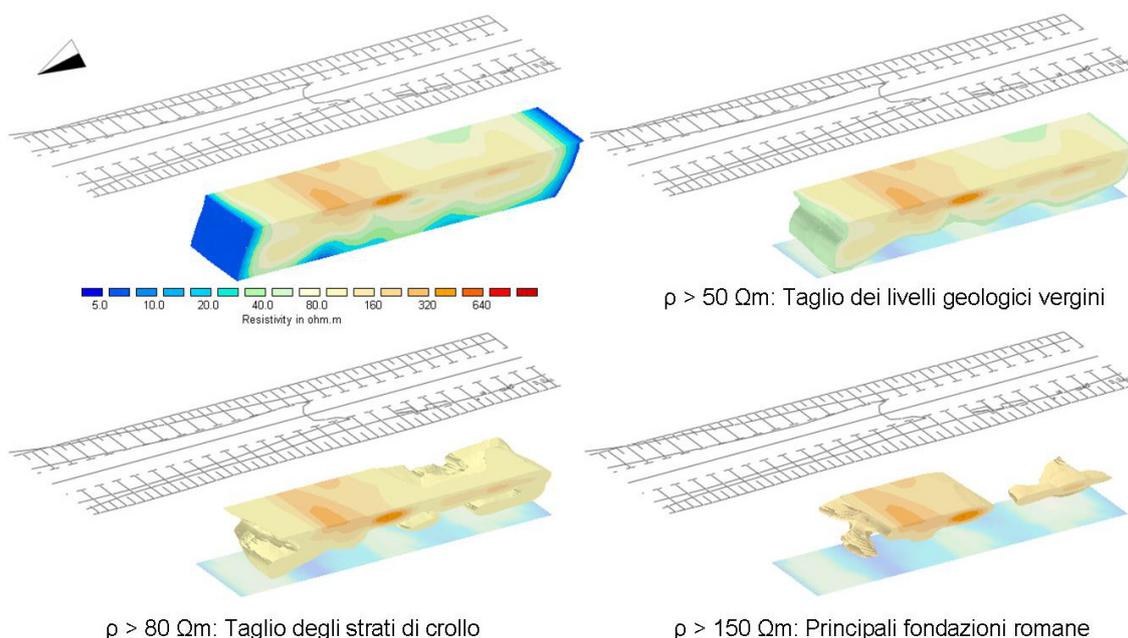


Fig. 5.19 – Rilievo nel sito della città romana di Sentinum – Modelli 3D di resistività.

Interpretazione in chiave archeologica dell'area indagata

I segnali della tipologia C riscontrabili nei modelli di resistività corrispondenti ai Rilievi 1, 2, 3, 4 e 5 hanno caratteristiche diverse rispetto a quelli riscontrati nel modello del Rilievo 6. Questi segnali sono stati interpretati come fondazioni di grandi dimensioni e si presentano con meno frequenza rispetto ai segnali C individuati nel Rilievo 6. In particolare nella mappa di resistività corrispondente all'intervallo di profondità 2,7-4,4 m è possibile distinguere la forma con andamento curvo dei segnali individuati come C₄ e C₅, compatibili con l'ipotesi archeologica della presenza del teatro e della sua cavea.

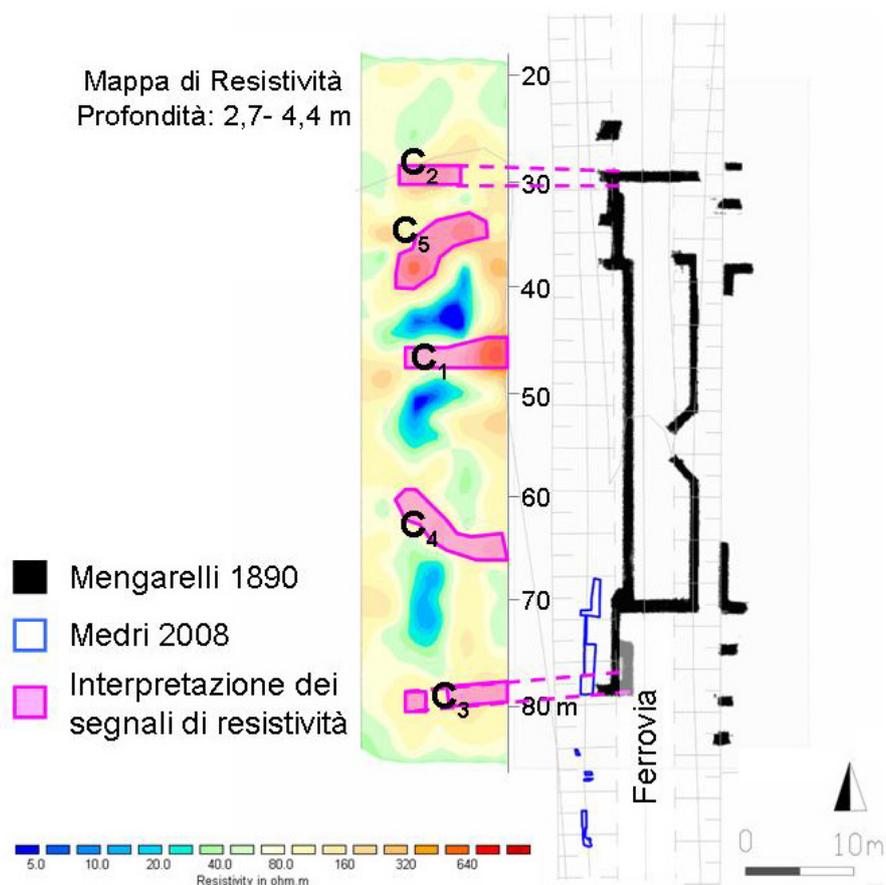


Fig. 5.20 – Risultati dell'interpretazione archeologica dei segnali di resistività individuati durante il survey nella città romana di Sentinum.

Confronto con altri dati a disposizione

Per ottenere una chiave interpretativa dei valori di resistività individuati nelle sezioni e nelle mappe è stata realizzato un altro rilievo utilizzando il georesistivimetro ad accoppiamento galvanico ABEM Terrameter SAS1000, lungo una linea a ridosso della scarpata, spostata a est di 2,5 m rispetto al Rilievo 1 realizzato con l'OhmMapper (Fig. 5.13).

I modelli di resistività realizzati con l'OhmMapper e con il Terrameter sono stati confrontati con il rilievo archeologico della sezione Ovest della ferrovia Fabriano-Urbino (Fig. 5.21). Dal confronto tra le strutture che si vedono in sezione e i segnali riscontrati nelle tomografie è stato possibile ricavare gli intervalli di resistività corrispondenti a ciascun elemento presente nel sottosuolo.

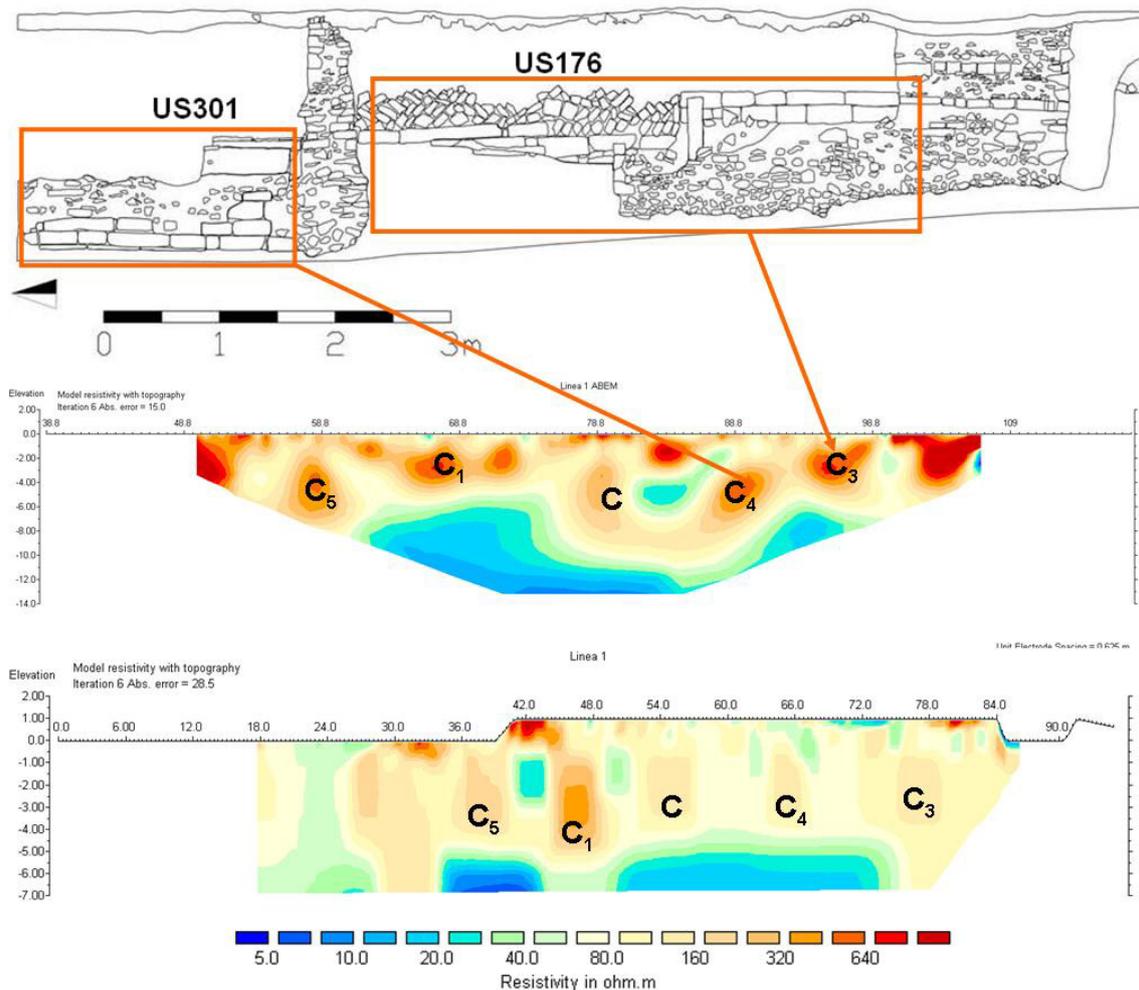


Fig. 5.21 – Dall’alto verso il basso, sezione archeologica della scarpata ovest della ferrovia, modello di resistività realizzato con il georesistivimetro ad accoppiamento galvanico ABEM Terrameter SAS1000 e sezione di resistività corrispondente al Rilievo 1 realizzato con l’OhmMapper. In evidenza le corrispondenze tra le strutture presenti nel sottosuolo.

Come si può chiaramente vedere in Fig. 5.21, è possibile trovare una corrispondenza tra alcuni segnali di resistività e alcune strutture rilevate nel 2003: la geometria ben definita, la posizione e le dimensioni dei segnali C₄ e C₃ presenti in entrambe le tomografie elettriche consentono di affermare che si tratta delle strutture murarie indicate dagli archeologi come US301 e US176; inoltre i valori di resistività sono compatibili con i valori attribuiti al calcare in bibliografia⁴⁰.

Nel modello di resistività ottenuto dall’inversione dei dati acquisiti con il georesistivimetro ad accoppiamento galvanico si evidenziano altri tre segnali, C, C₁ e C₅, che si ritrovano, per geometria e posizione, anche nel modello di resistività del Rilievo 1 realizzato con l’OhmMapper. Questa corrispondenza permette di ritenere i rilievi effettuati

⁴⁰ Cfr. Tab. 1.1.

con l'OhmMapper affidabili e adeguati alla realizzazione di un'indagine in un sito archeologico complesso come quello in esame.

Analisi di un profilo di resistività campione

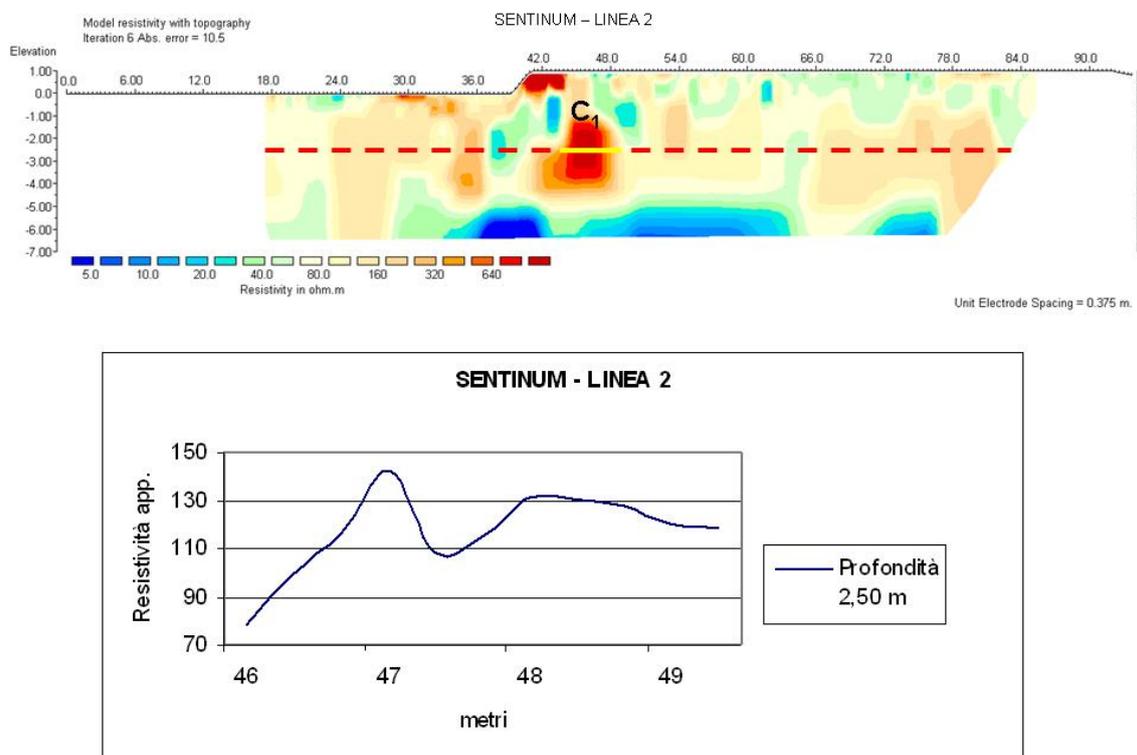


Fig. 5.22 – Analisi dell'andamento del profilo di resistività apparente acquisito con l'OhmMapper a Sentinum lungo la linea 2, ad una profondità di circa 2,5 m, in corrispondenza del target C₁ interpretato come fondazione di natura archeologica.

Il profilo acquisito con l'OhmMapper (Fig. 5.22) a circa 2,5 m di profondità lungo la linea 2 del Rilievo realizzato nel sito della città romana di Sentinum (Sassoferrato - Ancona) presenta, in corrispondenza del target C₁, un andamento grossomodo ad M assimilabile a quello del profilo realizzato nell'Area Test di Rovereto in corrispondenza del target con andamento verticale e a resistività più alta rispetto al contesto⁴¹. È possibile quindi affermare che ci si trova in presenza di un bersaglio con caratteristiche analoghe a quello di Rovereto, bersaglio che, nel caso di Sentinum, è compatibile con le caratteristiche fisiche delle fondazioni in calcare locale circondate da ghiaia calcarea in abbondante matrice limosa e argillosa.

⁴¹ Paragrafo 3.2.

5.4 Considerazioni generali sull'uso dell'OhmMapper per indagini archeologiche in contesti extraurbani

I risultati delle indagini geoelettriche realizzate nei siti extraurbani presso Siena, Tivoli e Sassoferrato testimoniano che con il georesistivimetro ad accoppiamento capacitivo OhmMapper è possibile ottenere le informazioni adeguate all'interpretazione in chiave archeologica del sottosuolo.

Tranne che nel caso di Villa Adriana, dove erano presenti strutture in elevato che ostacolavano la manovrabilità dello strumento, gli esempi di Siena e Sassoferrato hanno dimostrato che i siti extraurbani sono l'ideale per sfruttare tutte le potenzialità dell'OhmMapper: infatti è possibile realizzare in poco tempo numerosi rilievi su più linee di indagine, fino a permettere la realizzazione di un modello 3D (Fig. 5.19), senza dovere impiegare tempo a piantare elettrodi conduttivi e a stendere cavi.

Anche per gli esempi di indagini in contesti extraurbani, l'interpretazione in chiave archeologica è stata possibile grazie alla collaborazione della direzione di scavo di ogni sito; inoltre, nel caso della villa tardo-antica presso Siena, i dati geofisici sono stati confermati dai risultati dello scavo (Fig. 5.5) e nei casi di Villa Adriana e Sassoferrato, supportati dalle informazioni già note (accesso del cunicolo nel primo caso e sezione ovest della ferrovia nel secondo) e dai risultati ottenuti dai rilievi realizzati con il georesistivimetro ad accoppiamento galvanico Terrameter SAS1000, di utilizzo più tradizionale anche in campo archeologico.

Alcuni fattori limitano l'uso dell'OhmMapper anche in contesto extraurbano: la presenza di terreno molto dissestato o di una superficie caratterizzata dalla presenza di ghiaia a grana grossa o pietrisco rischia di sollevare a tratti lo strumento e di rendere nulle le acquisizioni. I casi sopra descritti sono situazioni ideali per l'utilizzo dell'OhmMapper e per questo adeguati a perseguire l'obiettivo della ricerca, ossia sperimentare l'efficacia dello strumento in campo archeologico.

6 Conclusioni e Prospettive

Le indagini geoelettriche in archeologia

Le indagini geoelettriche sono tra le metodologie geofisiche maggiormente applicate in campo archeologico per l'individuazione di elementi sepolti di possibile origine antropica. In particolare il metodo della resistività si realizza attraverso la misura della differenza di potenziale elettrico in diversi punti della superficie del terreno: l'obiettivo è ricostruire modelli di resistività del sottosuolo attraverso un processo di inversione dei dati acquisiti in campagna. La necessità di svolgere in tempi brevi indagini geofisiche dettagliate ed affidabili è data dai tempi spesso limitati a disposizione degli archeologi per individuare, studiare e documentare un contesto antropico antico venuto alla luce durante lavori di scavo per la costruzione di opere pubbliche o private.

Verifica dell'efficacia del sistema ad accoppiamento capacitivo in situazioni controllate

Il georesistivimetro OhmMapper, oggetto di studio di questa tesi, basa il suo funzionamento sull'acquisizione per induzione, in base alle proprietà dell'accoppiamento capacitivo.

Il sistema ad accoppiamento capacitivo è una tecnologia geofisica ancora poco utilizzata che permette di acquisire in tempi brevi misure di resistività apparente dove i più tradizionali sistemi ad accoppiamento galvanico sono difficoltosi da utilizzare o non permettono di ottenere buoni risultati a causa delle elevate resistenze di contatto.

Il lavoro descritto in questa tesi ha avuto l'obiettivo di verificare l'efficacia delle acquisizioni con il georesistivimetro ad accoppiamento capacitivo OhmMapper in campo archeologico, confrontando sistematicamente i risultati con quelli ottenuti attraverso il georesistivimetro ad accoppiamento galvanico Terrameter SAS 1000 (ABEM) in una situazione controllata come quella dell'Area Test per la geofisica gestita dal Museo Civico di Rovereto.

Il confronto tra i due strumenti è stato effettuato realizzando due profili di resistenza lungo la stessa linea di indagine su un target con caratteristiche compatibili con quelle di una struttura archeologica: perché l'analisi fosse affidabile, entrambi gli strumenti sono stati configurati con lo stesso array. Dal momento che l'OhmMapper ha una configurazione unica

assimilabile ad un dipolo-dipolo, è stato necessario modificare ad hoc la configurazione del georesistivimetro ad accoppiamento galvanico con gli elettrodi di potenziale esterni a quelli di corrente e distanziati tra loro di una misura pari alla lunghezza delle antenne dell'OhmMapper (2,5 m); la distanza tra di dipoli è stata scelta in base alla lunghezza della corda non conduttiva utilizzata nei rilievi con l'OhmMapper.

Grazie a questi accorgimenti di configurazione è stato possibile confrontare i profili realizzati con i due differenti strumenti: in corrispondenza del target di tipo verticale a resistività maggiore rispetto al contesto l'andamento a M delle misure di resistenza tipico dell'array dipolo-dipolo⁴² è constatabile sia per i rilievi realizzati con l'OhmMapper che con quelli realizzati con il georesistivimetro tradizionale (Fig. 6.1).

Profili di Resistenza a 0,9 m di profondità

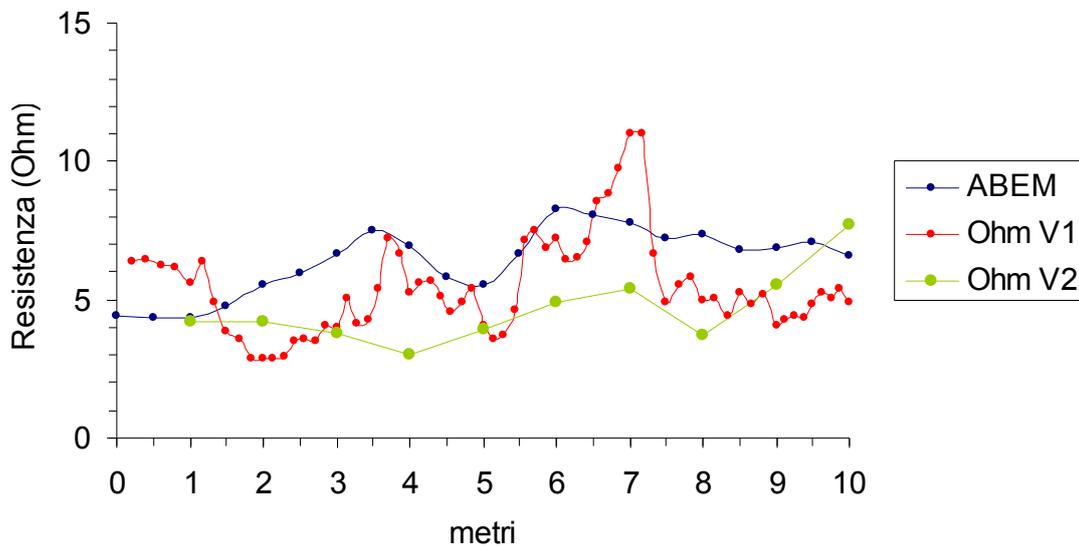


Fig. 6.1 – Area Test per la geofisica: grafico di confronto tra i profili di Resistenza realizzati con l'OhmMapper a due velocità (Ohm V1 e Ohm V2) e con il Terrameter SAS 1000 (ABEM), utilizzando una distanza tra i dipoli di 1, 875 m e indagando una profondità di 0,9 m circa.

In termini di valori di resistenza i due profili risultano confrontabili, ma, una volta calcolata la resistività apparente, utilizzando il fattore k appropriato per ogni strumento, i dati acquisiti con l'OhmMapper, pur mantenendo ovviamente lo stesso andamento, presentano valori di resistività apparente inferiori a quelli acquisiti con il georesistivimetro ad accoppiamento galvanico. Il fattore k utilizzato per calcolare la resistività apparente delle

⁴² Musset 2003.

misure acquisite con l'OhmMapper è quello riportato in letteratura da Timofeev⁴³ e utilizzato dalla stessa Geometrics Inc. nel software proprietario Magmap 2000. La stessa differenza di valori si è anche notata nel confronto tra i modelli di resistività realizzati nell'Accademia di Villa Adriana nel sito di Sentinum (Fig. 6.2), dove è stato possibile utilizzare le due tipologie di georesistivimetri grossomodo lungo la stessa linea di indagine in condizioni ambientali analoghe.

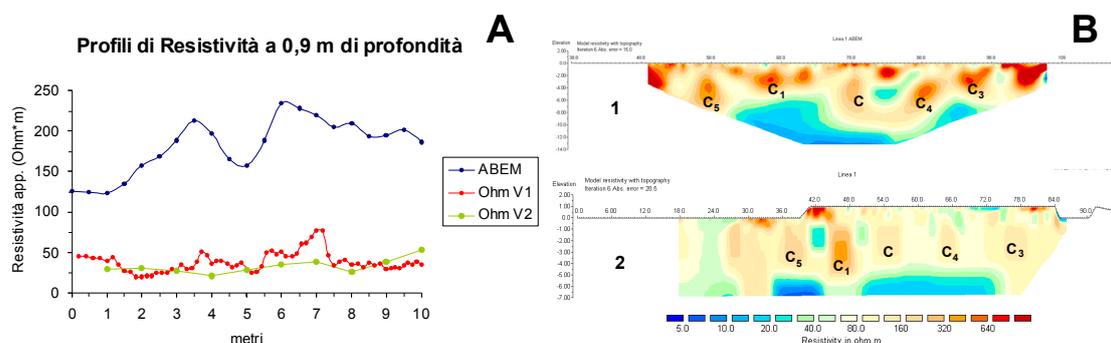


Fig. 6.2 – Immagine esemplificativa della differenza di valori di resistività (apparente in A e reale in B) nei modelli realizzati nell'Area Test di Rovereto (A) e nel sito della città romana di Sentinum (B), ottenuti attraverso l'acquisizione con l'OhmMapper e con il georesistivimetro Terrameter SAS 1000.

Efficacia delle misure geoelettriche in situ

L'acquisizione di misure di resistività apparente con il georesistivimetro OhmMapper in cinque siti archeologici campione ha permesso di raccogliere 79922 letture totali, grazie alle quali è stato possibile presentare in questa tesi 29 sezioni, 10 mappe e 4 modelli tridimensionali di resistività, attraverso l'applicazione di processi di inversione standard. Attraverso i modelli di resistività è stato possibile individuare forme anomale rispetto al contesto interpretabili come elementi di origine archeologica, grazie alla conoscenza del contesto archeologico e geologico e alle caratteristiche dello strumento. Per confermare l'affidabilità delle misure, dove possibile, i segnali di resistività interpretati come elementi di origine archeologica sono stati confrontati con i segnali evidenti su sezioni di resistività ottenute utilizzando il georesistivimetro ad accoppiamento galvanico Terrameter SAS 1000 (ABEM) (Fig. 6.3 e 6.4) o con dati di scavo stratigrafico messi a disposizione dalla direzione di scavo (Fig. 6.5).

⁴³ Timofeev 1994.

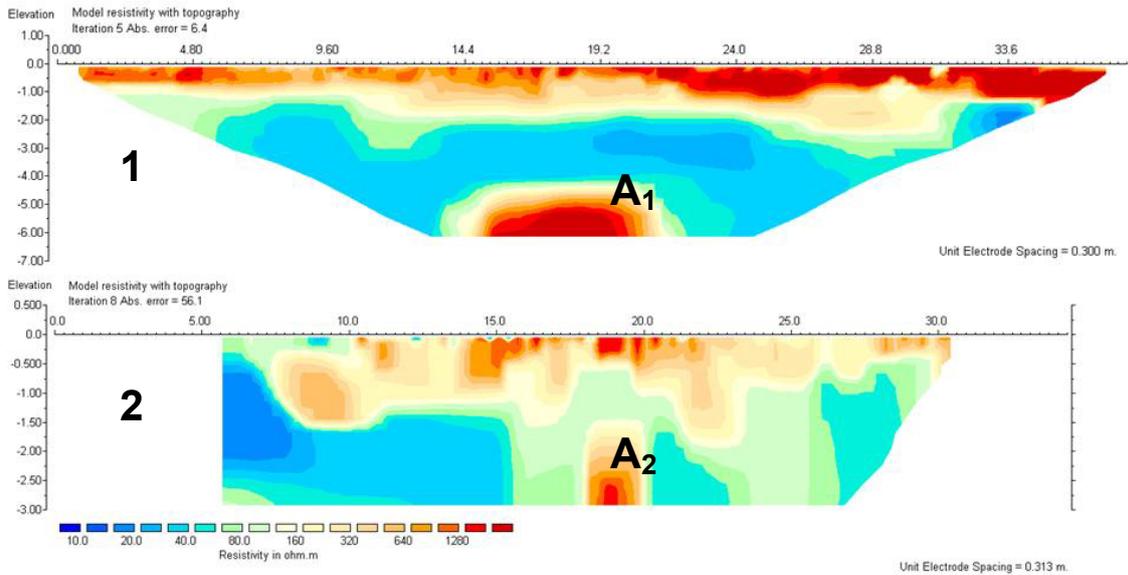


Fig. 6.3 – Sito dell’Accademia di Villa Adriana: confronto tra i modelli di resistività ottenuti con un georesistivimetro ad accoppiamento galvanico (array Schlumberger - 1) e l’OhmMapper (2) lungo la stessa linea di indagine. È possibile notare la corrispondenza tra i segnali interpretati come elementi di natura archeologica in entrambi i modelli.

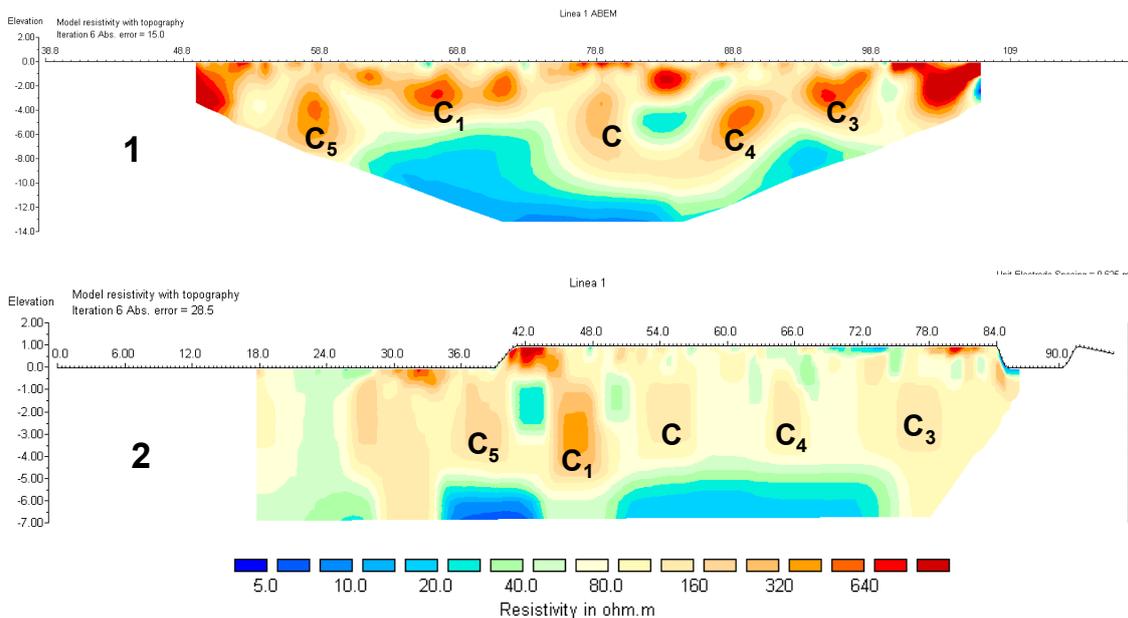


Fig. 6.4 – Sito della città romana di Sentinum: confronto tra i modelli di resistività ottenuti con un georesistivimetro ad accoppiamento galvanico (array dipolo-dipolo - 1) e l’OhmMapper (2) grossomodo lungo la stessa linea di indagine. È possibile notare la corrispondenza tra i segnali interpretati come elementi di natura archeologica in entrambi i modelli.

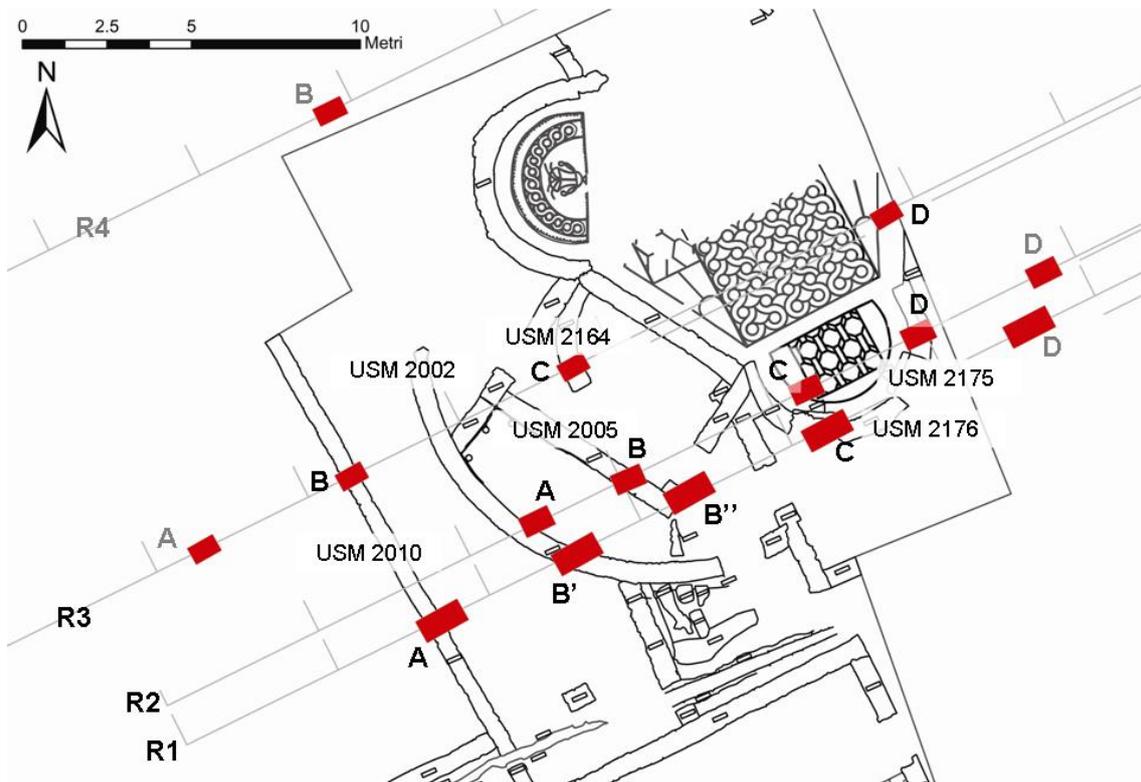


Fig. 6.5 – Villa Tardo-Antica presso Siena: corrispondenza tra le USM rilevate durante il saggio di scavo successivo alla campagna di indagini geoelettriche e i segnali di resistività (in rosso) interpretati come fondazioni di probabile natura archeologica.

Nello studio conclusivo di ogni sito archeologico indagato è stato anche analizzato l'andamento a M di un profilo campione in corrispondenza di un target interpretato come archeologico, paragonabile all'andamento di uno dei profili acquisiti nell'Area Test di Rovereto in corrispondenza del target noto: in questo modo è stata ulteriormente confermata l'efficacia dello strumento per individuare elementi ad alta resistività con andamento verticale immersi in un contesto a resistività più bassa (Fig. 6.6), tipici dei siti archeologici che sono stati oggetto di indagine durante questo progetto di dottorato.

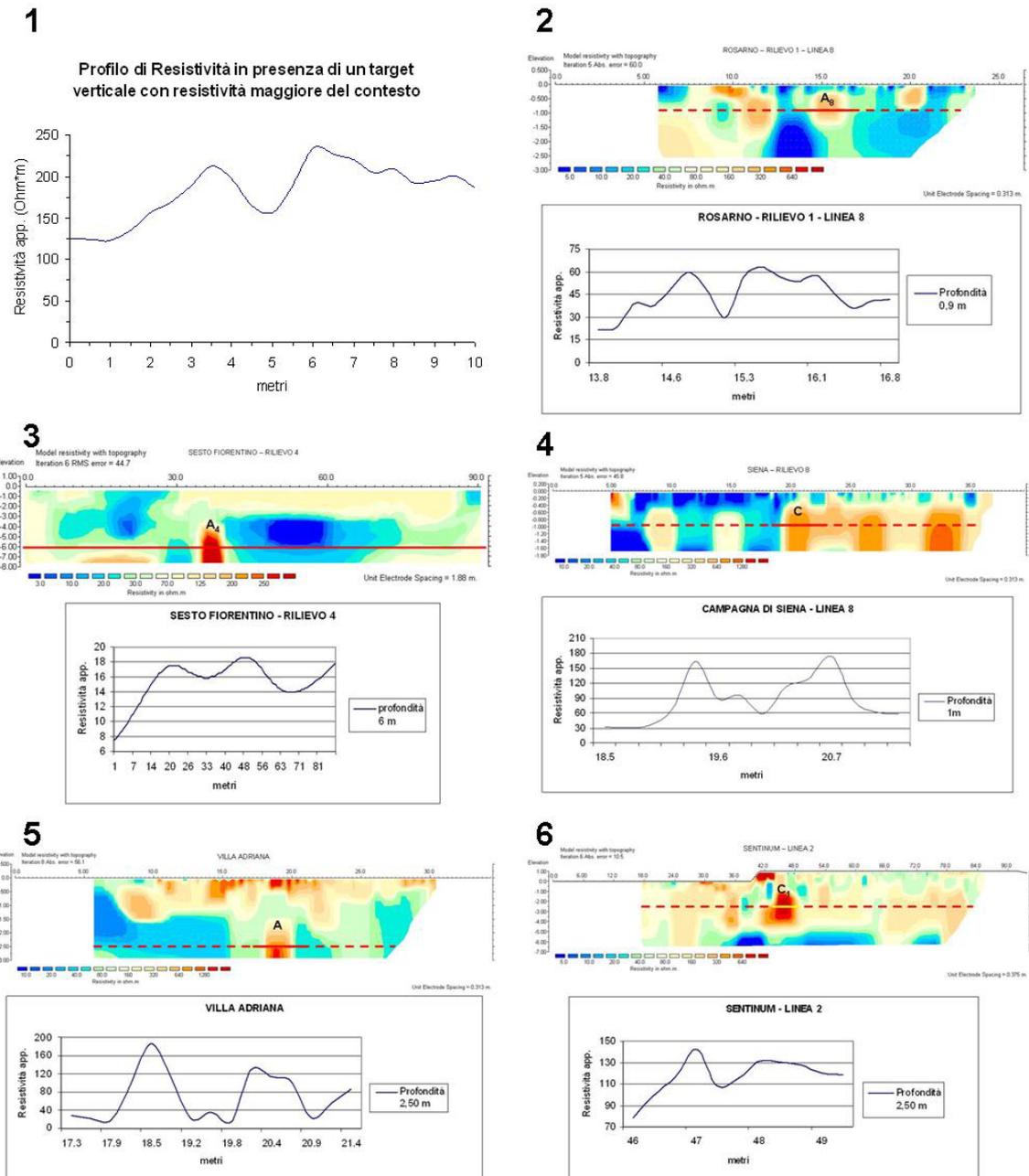


Fig. 6.6 – Confronto tra un profilo di resistività tipico acquisito in corrispondenza di un target verticale con resistività maggiore del contesto (1) e l'andamento dei profili di resistività acquisiti su target interpretati come elementi di natura archeologica nei siti di Medma - Rosarno (2), Sesto Fiorentino (3), campagna presso Siena (4), Villa Adriana - Tivoli (5) e Sentinum - Sassoferrato (6).

Prospettive

Per analizzare in modo più completo l'efficacia dell'OhmMapper nei contesti archeologici si intende approfondire la ricerca sulle potenzialità dello strumento per realizzare rapidamente modelli di resistività tridimensionali. Le indagini saranno svolte in estensione in siti ampi come quello della città romana di Sentinum, al fine di indagare un volume di sottosuolo tale da intercettare un numero potenzialmente elevato di strutture, in modo da poter vedere dalle sezioni e dalle mappe di resistività, la continuità di ambienti e la sovrapposizione di fasi differenti.

I risultati saranno confrontati con modelli bidimensionali e tridimensionali di resistività ottenuti attraverso l'inversione di dati ipotizzati attraverso appositi software di modellazione: in questo modo si pensa sia possibile valutare il margine di errore strumentale nell'acquisizione dei dati e il rumore di fondo e quindi estrarre dai dati di campagna le variabili che tendono ad oscurare i risultati ottimali.

Riconoscimenti

(in ordine alfabetico)

Prof. Luigi Carmignani (CGT - Centro di GeoTecnologie dell'Università degli studi di Siena): Presidente del CGT e appassionato della tecnologia in campo archeologico.

Dott. Geol. Andrea Casella: contributo di esperienza nel campo dell'indagine geoelettrica in situ, elaborazione dati ed interpretazione geologica.

Dott. Geol. Tommaso Colonna (CGT - Centro di GeoTecnologie dell'Università degli studi di Siena): supporto tecnico durante le misure geoelettriche in situ, per l'elaborazione dati e nella stesura della tesi.

Prof. Leonardo Disperati (CGT - Centro di GeoTecnologie dell'Università degli studi di Siena): tutor del lavoro di tesi.

Prof. Fabio Mantovani (Dipartimento di Fisica - Università degli studi di Ferrara - INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare): supporto nelle prime fasi del lavoro di analisi dello strumento e comprensione dei principi fisici.

Dott.ssa Sara Mariani (CGT - Centro di GeoTecnologie dell'Università degli studi di Siena): aiuto durante le misure geoelettriche in situ.

Prof.ssa Maura Medri (Dipartimento di Studi Storico-Artistici, Archeologici e sulla Conservazione, Università degli Studi Roma Tre): supporto per l'interpretazione archeologica dei dati.

Inoltre vorrei ringraziare le mie colleghe del Laboratorio di Geotecnologie per l'Archeologia del Centro di GeoTecnologie dell'Università degli Studi di Siena, *Dott.ssa Sara Cappelli* e *Dott.ssa Valentina Turco*, che hanno supportato il mio lavoro di ricerca e sostenuto mirabilmente tutto il restante lavoro del Laboratorio.

Un grazie particolare ai miei genitori, che mi hanno incoraggiato e appoggiato durante tutto il mio percorso di studi.

Bibliografia

AA.VV., 1991. *Atti del seminario "Geofisica per l'Archeologia"*, Porano 21-23 Settembre 1988, Roma.

AA.VV., 2008. *Geofisica per l'Archeologia: possibilità e limiti. Atti del Convegno*, 10 Dicembre 2008, Roma.

Adam J.P., 1988. *L'arte di costruire presso i Romani. Materiali e Tecniche*, Milano.

Aspinall A., Saunders M.K., 2005, *Experiments with the Square Array*, *Archaeological Prospection*, 12, pp. 115-129.

Bottacchi M., Hay S., 2008. *Dati delle prospezioni magnetometriche*, in M. Medri, *Sentinum. Ricerche in corso I*, pp. 60-82.

Chiostrì F., 2002. *L'acquedotto romano di Firenze*, Firenze.

Clark A., 1996. *Seeing Beneath the Soil: Prospecting Methods in Archaeology*, Londra.

Dabas M., 2008. *Theory and Practice of the new fast electrical imaging system ARP[®]*, Campana e Piro (a cura di) *Seeing the unseen. Geophysics and landscape archaeology*.

DATAMAP, 2001. *OhmMapper user guide*, Geometrics.

Finotti F., Iliceto V., Zandonai F., 2003. *L'area test "Bosco della città" Rovereto (TN)*, in *Geologia tecnica & ambientale*, 2, aprile-giugno 2003, pp. 21-27.

Greco E., 1999. *La città greca antica: istituzioni, società e forme urbane*.

Groom D., 2007. *Common misconceptions about capacitively-coupled Resistivity (CCR). What it is and how it works*, San Jose, CA.

Hauck C., Kneisel C., 2006. *Application of Capacitively-coupled and DC Electrical Resistivity Imaging for Mountain Permafrost Studies*, *Permafrost and Periglacial Processes*, 17, pp. 169-177.

Iannelli M.T., Cerzoso M., 2005. *Stipi votive nella subcolonia locrese di Medma; l'area sacra del Mattatoio*, in Comella A., Mele S., (a cura di), "Depositi votivi e culti dall'età arcaica a quella tardo repubblicana", pp. 677-688.

Jones D.M. (a cura di), 2008. *Geophysical survey in archaeological field evaluation*, English Heritage.

Kuras O., 2002. *The Capacitive Resistivity Technique for Electrical Imaging of the Shallow Subsurface*, PhD Thesis.

Kuras O., Beamish D., Meldrum P.I., Ogilvy R.D., 2007. *Fundamentals of the capacitive resistivity technique*, British Geological Survey, Nottingham.

Loke M.H., 2004. *Electrical imaging surveys for hydrogeological, environmental and engineering studies*, Geofluid, Piacenza.

Medri M., 2008. *Materiali per una nuova forma urbis di Sentinum*, in Medri M. (a cura di), *Sentinum. Ricerche in Corso I*, pp. 199-218.

Mengarelli R., 1892. *Notizie sulla topografia di Sentinum e sugli scavi eseguiti in quella città nel 1881*.

Millet R.B. Jr., 1967. *Electromagnetic coupling of collinear dipoles on a uniform half-space*, *Minino Geophysics*, vol. II, pp. 401-419.

Mussett A. E., Khan M. A., 2003. *Esplorazione del sottosuolo, un'introduzione alla geofisica applicata*, Bologna.

Norinelli A., 1996. *Elementi di Geofisica Applicata*, Bologna.

Ohm Mapper TR1, 2001. *Operation Manual*, Geometrics.

Papadopoulos N. G., Tsourlos P., Tsokas G. N., Sarris A., 2006. *Two-dimensional and three-dimensional resistivity imaging in archaeological site investigation*, *Archaeological Prospection*, 13, pp. 163-181

Piranesi G.B., 1781. *Pianta delle fabbriche esistenti nella Villa Adriana*, Roma.

Piro S., 2001. Integrazione di metodi geofisici ad alta risoluzione per l'indagine nei siti archeologici, in Campana S., Forte M. (a cura di), *Remote sensing in Archaeology*. XI ciclo di lezioni sulla ricerca applicata in Archeologia. Certosa di Pontignano (Siena), 6-11 dicembre 1999, Firenze, pp. 273-296.

Salza Prina Ricotti E., 1973. *Criptoportici e Gallerie sotterranee di Villa Adriana nella loro tipologia e nelle loro funzioni* in "Les Cryptoportiques dans l'architecture romaine - Colloque Rome 1972", Roma, pp. 219-259.

Timofeev V.M., Rogozinski A.W., Hunter J.A., Douma M., 1994. *A new ground resistivity method for engineering and environmental geophysics*, Proc. of Symp. On the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, EEGS, pp. 701-715.

Witten A.J., 2006. *Handbook of geophysics and archaeology*, London.

Cartografia geologica consultata

Alberti A., Dragone F., Manfredini M., Segre A.G., 1962. Foglio 150 “Roma” (II ed.), Carta Geologica d’Italia 1:25.000 dell’I.G.M.

Carta Geologica della Regione Toscana, 2004, sezione 286130 [scala 1:10000].

Carta Geologica della Regione Toscana, 2004, sezioni 263110 e 263160 [scala 1:10000].

Gioria G. 1967. Foglio 246 – III N.O. “Rosarno”, Carta d’Italia 1:25.000 dell’I.G.M., Carta geologica della Calabria.

Carta Geologica 1:10.000 della Regione Marche, sezione 291150, Foglio Pergola, 2001.

Riferimenti Legislativi

Decreto legge 63/2005, Disposizioni urgenti per lo sviluppo e la coesione territoriale, nonché per la tutela del diritto d'autore, in Gazzetta Ufficiale del 27 aprile 2005 - n. 96.

Decreto legislativo 163/2006, Codice dei contratti pubblici relativi a lavori, servizi e forniture in attuazione delle direttive 2004/17/CE e 2004/18/CE, in Gazzetta Ufficiale del 2 maggio 2006 - n. 100.