



INDAGINI GEOFISICHE PER L'INDIVIDUAZIONE DI STRUTTURE ARCHEOLOGICHE PRESSO LE SORGENTI AQUA VIRGO (ROMA): INDAGINI ERT

IL DIRETTORE

DOTT.SSA COSTANZA MILIANI

IL RESPONSABILE SCIENTIFICO

DR GIOVANNI LEUCCI

Aprile 2023



PREMESSA

Con riferimento al progetto HHU-AQ.VIRG.S. con responsabile la Dott.ssa Maria Elisa Amadasi (call E-RIHS di accesso a MOLAB del 02/12/2021 chiusa il 28/02/2022 e con notifica per l'accesso alla user del 06/06/2022) si riportano di seguito i risultati ottenuti dall'indagine geofisica.

Le indagini sono state realizzate mediante metodologie non distruttive con apparecchiature in dotazione al Laboratorio di Geofisica Applicata ai Beni Archeologici e Monumentali della sede del CNR-ISPC di Napoli.

Allo scopo di individuare strutture di interesse archeologico eventualmente presenti all'interno dell'area indagata, è stata impiegata la metodologia di indagine geofisica denominata georadar. E' stato inoltre utilizzato una stazione GPS (differenziale) per la georeferenziazione dei risultati.

E' stato impiegato il georesistivimetro Syscal Pro con 10 canali attivi e 96 elettrodi e dispositivo Wenner-Schlumberger.

Le indagini geofisiche sono state effettuate in data 18/04/2023, sotto il coordinamento del Dott. Vincenzo Di Fiore. Le indagini sul campo sono state realizzate dal Dott. Michele Punzo. Le elaborazioni dei dati geofisici sono a cura del Dr. Vincenzo Di Fiore e la Dott.ssa Daniela Tarallo.

1. PROSPEZIONI ERT

La strumentazione per le indagini elettriche tomografiche (Electrical resistivity Tomography - ERT) utilizzata è un georesistivimetro, in dotazione al Laboratorio di Geofisica per l'Archeologia ed i Beni Monumentali della sede ISPC di Napoli. La metodologia ERT è una tecnica di indagine indiretta e non invasiva che consente l'individuazione di anomalie sepolte a diversa profondità attraverso la stima del parametro fisico resistività elettrica.

Per il processing dei dati è stato utilizzato il software Res2Dinv. La fase di elaborazione ed interpretazione dati è principalmente basata sull'individuazione di anomalie di resistività, sul calcolo della loro posizione in profondità e delle loro dimensioni. Essa è preceduta da una elaborazione (inversione dei dati), che utilizza metodi iterativi (trial and error) che consente di passare dalla pseudosezione di resistività apparente alla distribuzione 2D della resistività nel sottosuolo.



1.1 RISULTATI

Sono stati acquisiti 5 profili. Per i profili da 1 a 4 sono stati utilizzati 72 elettrodi con distanza interelettrodica di 1m mentre per il profilo 5 sono stati utilizzati 96 elettrodi con distanza interelettrodica di 0.5m (Tab 1).

Tabella 1. Profili ERT

NOME PROFILO	Δx (m)	N ELETTRODI	LUNGHEZZA PROFILO (m)
Profilo 01	1	72	71
Profilo 02	1	72	71
Profilo 03	1	72	71
Profilo 04	1	72	71
Profilo 05	0.5	96	47.5

L'ubicazione dei profili è riportata in Figura 1.

Profilo 1

L'analisi dei dati relativi al profilo 1 ha evidenziato (Figura 2) un sottosuolo eterogeneo con valori di resistività compresi tra 25 ohm m e 200 ohm m. In Figura 1 è possibile distinguere:

- una anomalia (indicata con A), evidenziata dalle linee bianche tratteggiate, con valori di resistività compresi tra 20 e 50 ohm m circa. Tale anomalia potrebbe essere correlata alla presenza di un canale tagliato nella sua sezione longitudinale. La sua profondità è compresa tra 1.5 m e 3.0 m circa;
- una anomalia (indicata con B), evidenziata dal rettangolo nero tratteggiato, con valori di resistività compresi tra 150 e 200 ohm m circa. Tale anomalia potrebbe essere correlata alla presenza di un canale tagliato nella sua sezione trasversale. La sua profondità è compresa tra 3.9 m e 5.0 m circa;
- una anomalia (indicata con T), evidenziata dal cerchio nero tratteggiato, con valori di resistività compresi tra 80 e 100 ohm m circa. Tale anomalia potrebbe essere correlata alla presenza di un canale che intercetta il canale indicato con A tagliato nella sua sezione trasversale. La sua profondità è compresa tra 1.5 m e 2.5 m circa.

•



Profilo 2

L'analisi dei dati relativi al profilo 2 ha evidenziato (Figura 3) una anomalia (indicata con C), evidenziata dalle linee bianche tratteggiate, con valori di resistività compresi tra 300 e 700 ohm m circa. Tale anomalia potrebbe essere correlata alla presenza di un canale tagliato nella sua sezione longitudinale. La sua profondità è compresa tra 1.5 m e 4.0 m circa. I Valori relativamente alti di resistività fanno pensare alla probabile presenza di spazi vuoti.

- Una anomalia (indicata con B), evidenziata dal rettangolo nero tratteggiato, con valori di resistività compresi tra 150 e 200 ohm m circa. Tale anomalia potrebbe essere correlata alla presenza di un canale tagliato nella sua sezione trasversale. La sua profondità è compresa tra 3.9 m e 5.0 m circa;
- una anomalia (indicata con T), evidenziata dal cerchio nero tratteggiato, con valori di resistività compresi tra 80 e 100 ohm m circa. Tale anomalia potrebbe essere correlata alla presenza di un canale che intercetta il canale indicato con A tagliato nella sua sezione trasversale. La sua profondità è compresa tra 1.5 m e 2.5 m circa.

Profilo 3

L'analisi dei dati relativi al profilo 3 ha evidenziato (Figura 4):

- Una anomalia (indicata con D) con valori di resistività compresi tra 700 e 800 ohm m circa. Tale anomalia potrebbe essere correlata alla presenza di un canale tagliato nella sua sezione trasversale. La sua profondità è compresa tra 1.5 m e 2.7 m circa;
- Una anomalia (indicata con E) con valori di resistività compresi tra 650 e 700 ohm m circa. Tale anomalia potrebbe essere correlata alla presenza di un canale tagliato nella sua sezione trasversale. La sua profondità è compresa tra 2.5 m e 3.8 m circa;
- Una anomalia (indicata con F) con valori di resistività compresi tra 300 e 400 ohm m circa. Tale anomalia potrebbe essere correlata alla presenza di un canale tagliato nella sua sezione trasversale. La sua profondità è compresa tra 3.0 m e 4.5 m circa;
- una anomalia (indicata con A), che intercetta trasversalmente l'anomalia indicata con A nel profilo 1 di Figura 2.



Profilo 4

L'analisi dei dati relativi al profilo 4 ha evidenziato (Figura 5)

- Una anomalia (indicata con G) con valori di resistività compresi tra 700 e 800 ohm m circa. Tale anomalia potrebbe essere correlata alla presenza di un canale tagliato nella sua sezione trasversale. La sua profondità è compresa tra 1.5 m e 2.5 m circa;
- Una anomalia (indicata con H) con valori di resistività compresi tra 650 e 700 ohm m circa. Tale anomalia potrebbe essere correlata alla presenza di un canale tagliato nella sua sezione trasversale. La sua profondità è compresa tra 2.5 m e 3.5 m circa;
- una anomalia (indicata con A), che intercetta trasversalmente l'anomalia indicata con A nel profilo 1 di Figura 2.

Profilo 5

L'analisi dei dati relativi al profilo 5 ha evidenziato (Figura 6):

- Una anomalia (indicata con K) con valori di resistività compresi tra 700 e 800 ohm m circa. Tale anomalia potrebbe essere correlata alla presenza di un canale tagliato nella sua sezione trasversale. La sua profondità è compresa tra 1.6 m e 3.5 m circa;
- Una anomalia (indicata con I) con valori di resistività compresi tra 250 e 300 ohm m circa. Tale anomalia potrebbe essere correlata alla presenza di un canale tagliato nella sua sezione trasversale. La sua profondità è compresa tra 1.6 m e 2.6 m circa.

2. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Nell'area indagata i risultati hanno consentito di individuare anomalie riferibili a probabili strutture di interesse archeologico sepolti a diversi metri di profondità (fino a circa 5.0 m) e coperti da materiali poco coerenti (terra e pietre). E' stata evidenziata la presenza di canalizzazioni note e di una canalizzazione non nota (indicata in giallo nella Figura 7).



FIGURE



- Profilo01
- Profilo02
- Profilo03
- Profilo04
- Profilo05

Fig. 1: Ubicazione dei profili ERT

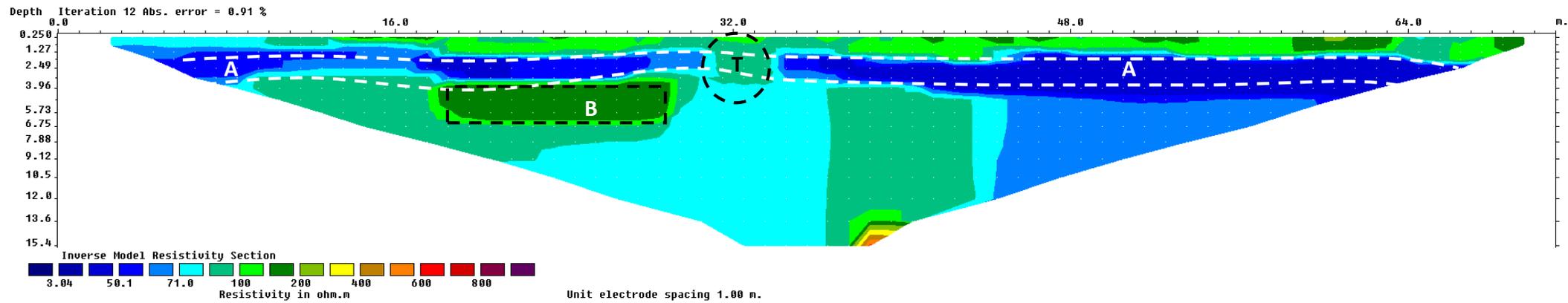


Fig. 2: Distribuzione 2D della resistività elettrica relativa al Profilo 1

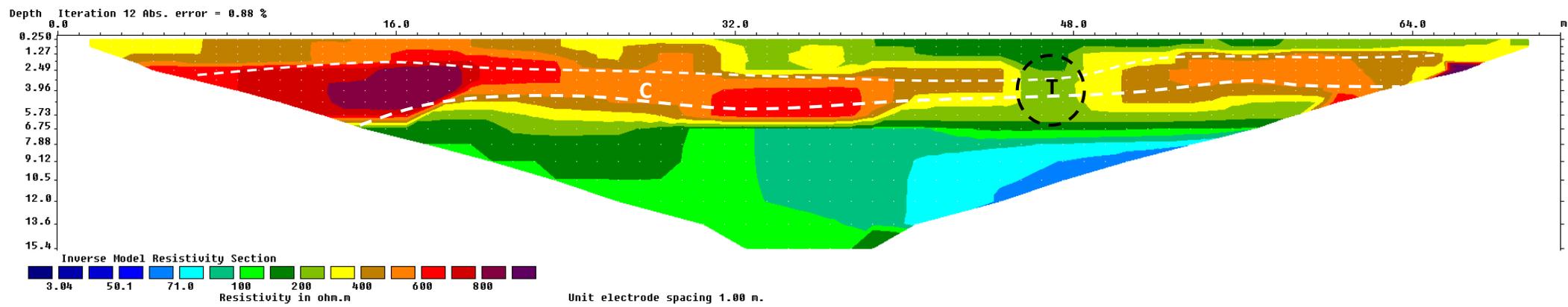


Fig. 3: Distribuzione 2D della resistività elettrica relativa al Profilo 2

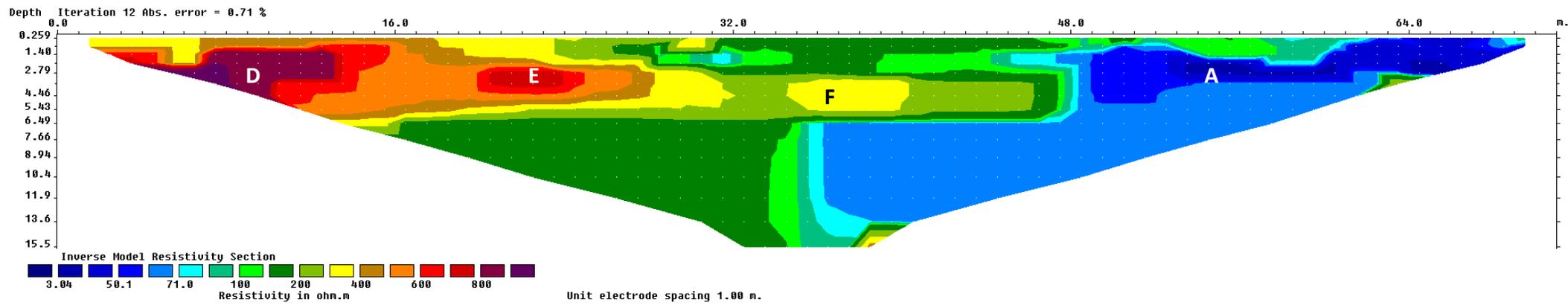


Fig. 4: Distribuzione 2D della resistività elettrica relativa al Profilo 3

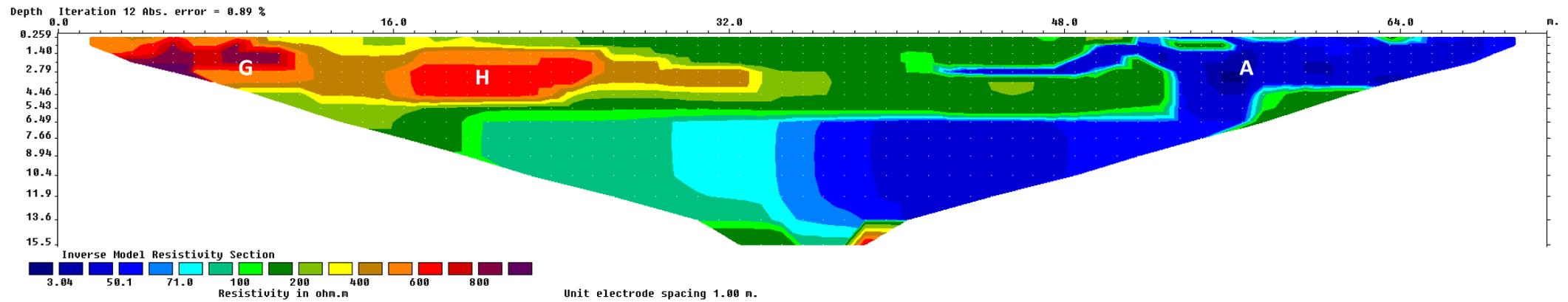


Fig. 5: Distribuzione 2D della resistività elettrica relativa al Profilo 4

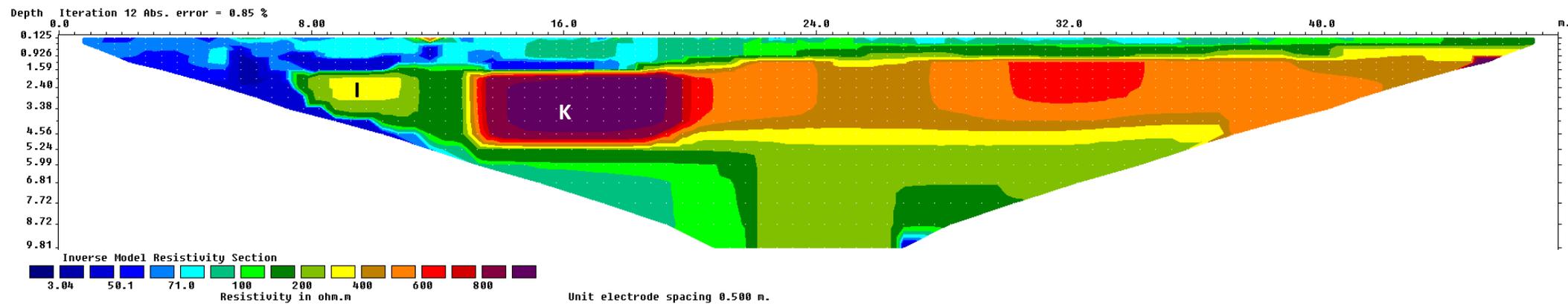
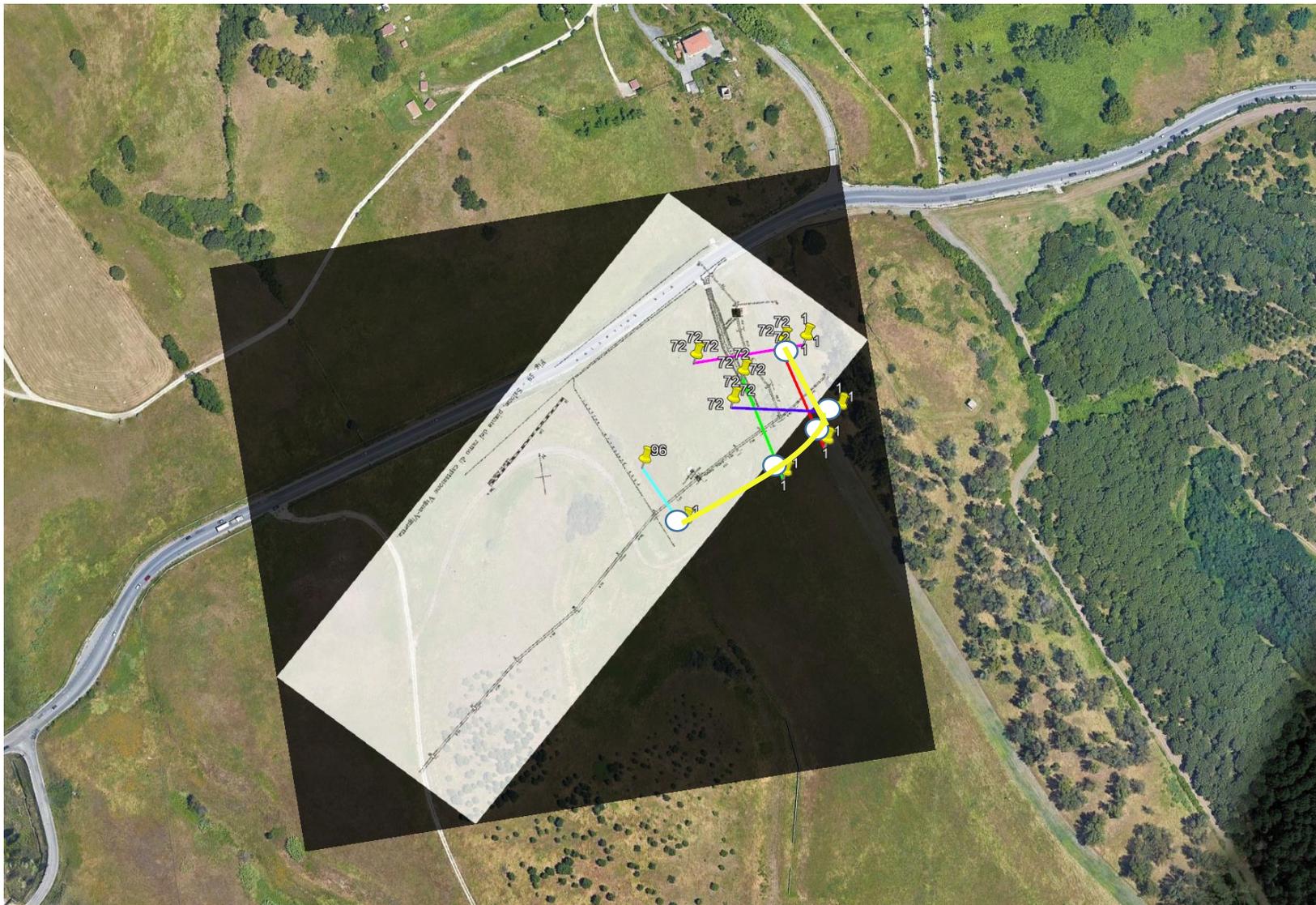


Fig. 6: Distribuzione 2D della resistività elettrica relativa al Profilo 5



- Profilo01
- Profilo02
- Profilo03
- Profilo04
- Profilo05
- Canalizzazione nuova

Fig. 7: indicazione di una probabile struttura legata alla presenza di un canale

APPENDICE

I metodi geofisici impiegati nelle campagne di misura

Il Metodo geoelettrico

I metodi geoelettrici consentono di caratterizzare il sottosuolo dal punto di vista del parametro fisico resistività elettrica (ρ). Il metodo geoelettrico della resistività si basa sulla circolazione di corrente elettrica stazionaria (continua o a bassissima frequenza, affinché siano trascurabili i fenomeni di induzione) nel sottosuolo.

I mezzi materiali, infatti, rispondono ad un flusso di corrente in maniera diversa, in base al valore che assume il parametro fisico della resistività. Tipicamente, la resistività che i litotipi offrono alla circolazione di corrente elettrica dipende dal contenuto d'acqua interstiziale, dalla temperatura, dal contenuto di gas disciolti nell'acqua, dalla presenza di ioni liberi. Nella tabella 1 vengono riportati i range di variazione di resistività nei materiali costituenti le matrici del sottosuolo più comuni.

Tabella 1. Valori di resistività dei terreni più comuni (Leucci, 2019)

Roccia/Materiale	Resistività ($\Omega \cdot m$)
Argille, marne grasse	3 - 30
Argille, marne magre	10 - 40
Argille sabbiose, silt	25 - 105
Sabbie con argille	50 - 300
Sabbia, ghiaia in falda	200 - 400
Sabbia, ghiaia asciutta	800 - 5000
Calccare, gesso	500 - 3500
Arenaria	300 - 3000
Granito	2000 - 10 000
Gneiss	400 - 6000

La stima dei valori di resistività si realizza mediante un quadripolo elettrico costituito da due elettrodi A e B , detti di corrente, e due elettrodi M ed N detti di potenziale. Attraverso gli elettrodi A e B viene inviata nel sottosuolo una corrente di intensità I nota e tramite gli elettrodi M e N si misura la differenza di potenziale ΔV . I quattro elettrodi costituiscono, nel loro insieme, il dispositivo elettrodico di misura, che può presentare diverse geometrie di disposizione sul terreno, ognuna caratterizzata da un parametro K che prende il nome di “*fattore geometrico*”.

La relazione che lega i parametri fisici corrente elettrica (I), differenza di potenziale (ΔV), resistività elettrica (ρ) è la ben nota legge di Ohm:

$$\rho = K \Delta V/I.$$

Definendo ΔV in volts, I in Amperes e K in metri, la resistività ρ viene espressa in *Ohm m*. In realtà quella che viene calcolata è una resistività apparente (ρ_a) ossia è un valore di resistività dovuto ai diversi contributi di tutto il sottosuolo che si sentiranno, in maniera più o meno forte, a seconda della distanza dal dispositivo di misura.

Le tecniche di misura consistono in mappe, in profili di resistività, in sondaggi elettrici verticali (SEV) e in pseudosezioni e tomografie 2D e 3D. Le mappe vengono realizzate trasladando il dispositivo ortogonalmente alla sua lunghezza, ottenendo in tal modo informazioni sulle variazioni areali dei valori di resistività. Per la costruzione dei profili, invece, si trasla il dispositivo parallelamente alla sua lunghezza a partire da un punto fisso scelto come origine; questa tecnica consente di individuare variazioni laterali di resistività. Nei SEV, infine, l'array elettrodico viene progressivamente allargato rispetto ad un punto medio fisso, per ricavare informazioni circa l'andamento verticale dei valori di resistività.

Dispositivi elettrodici

I vari metodi di prospezione elettrica, differiscono tra loro essenzialmente per la disposizione dei quattro elettrodi sul terreno e il diverso modo di spostarli da una misura alla successiva. La scelta del particolare metodo da impiegare in ciascun caso, sarà legata alla possibilità di mettere in massimo risalto le variazioni di resistività dovute ai corpi che si vogliono evidenziare.

I dispositivi più usati sono il Wenner, lo Schlumberger e il Dipolo-dipolo (Fig. 1). I primi due dispositivi sono detti lineari, perché i quattro elettrodi si trovano tutti sulla stessa linea, mentre il terzo è, in generale, non lineare.

Il dispositivo Wenner utilizza quattro elettrodi tutti equispaziati tra loro come mostrato in figura. Indicando con "a" la distanza tra ciascuna coppia di elettrodi contigui, il fattore geometrico sarà

$$k = 2\pi a.$$

Nel dispositivo Schlumberger, che è simmetrico rispetto al suo punto centrale, i due elettrodi di corrente esterni C1 e C2, si trovano ad una distanza molto più grande dei due elettrodi di potenziale interni P1 e P2 (nella pratica si usa P1P2 compreso tra 1/5 e 1/25 di C1C2). Il fattore geometrico vale in questo caso

$$k = \pi \left[\frac{(C1C2/2)^2}{P1P2} - \frac{P1P2}{4} \right].$$

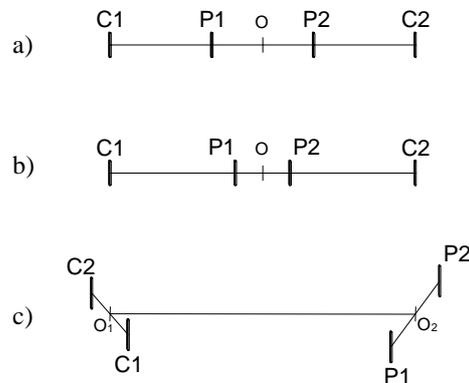


Fig. 1: Dispositivi quadripolari di misura. a) Dispositivo Wenner; b) Dispositivo Schlumberger; c) Dispositivo dipolo-dipolo.

Il dispositivo dipolo-dipolo, come dice il suo nome, utilizza un dipolo di corrente e un dipolo di potenziale. In questo caso, il fattore geometrico dipende dalle loro posizioni reciproche e dalle distanze tra i dipoli. Nel caso di disposizione lineare e simmetrica, indicando con a le distanze dipolari e con na la distanza tra i due elettrodi interni C1 e P1, k vale

$$k = \pi n(n+1)(n+2)a$$

Negli ultimi decenni è stata sviluppata una nuova tecnica di indagine, in cui le misure di resistività sono fatte usando un sistema costituito da un gran numero di elettrodi. Questa tecnica, indicata con il nome di tomografia geoelettrica, risulta particolarmente adatta per investigazioni in aree di interesse geologico, minerario, idrogeologico, ingegneristico ed archeologico. La tomografia elettrica, può essere bidimensionale o tridimensionale, a seconda che la zona di interesse sia una sezione piana verticale del sottosuolo o un intero volume di terreno. Nel primo caso, gli elettrodi saranno disposti sul terreno tutti allineati ed equispaziati, mentre nel secondo caso, saranno disposti sempre sulla superficie del terreno, ma sui nodi di una griglia quadrata. In Fig. 2 sono rappresentati i due modi in cui si possono disporre gli elettrodi.

Nel caso della multielettrodica, si lavora con una serie di elettrodi equispaziati collegati, per mezzo di un cavo multicanale, ad uno strumento in grado di gestire l'immissione di corrente e la misura della differenza di potenziale dai quattro elettrodi volta per volta interessati dalla misura; da qui se ne deduce la grande innovazione nell'indagine geoelettrica apportata dalla multielettrodica: essa infatti non solo

permette di raccogliere un gran numero di dati in poco tempo e a costi contenuti, ma anche di risolvere alcuni problemi, ad esempio quello della rappresentazione dei dati.

I vari dispositivi elettrodi, sono caratterizzati da una serie di parametri, dai quali dipenderà l'indagine. Sarà l'operatore a decidere, in base agli scopi dell'indagine, alle caratteristiche della regione interessata dalla misura, al tempo a disposizione e alla quantità di memoria disponibile sul computer, qual'è quello più adatto alle misure, caso per caso.

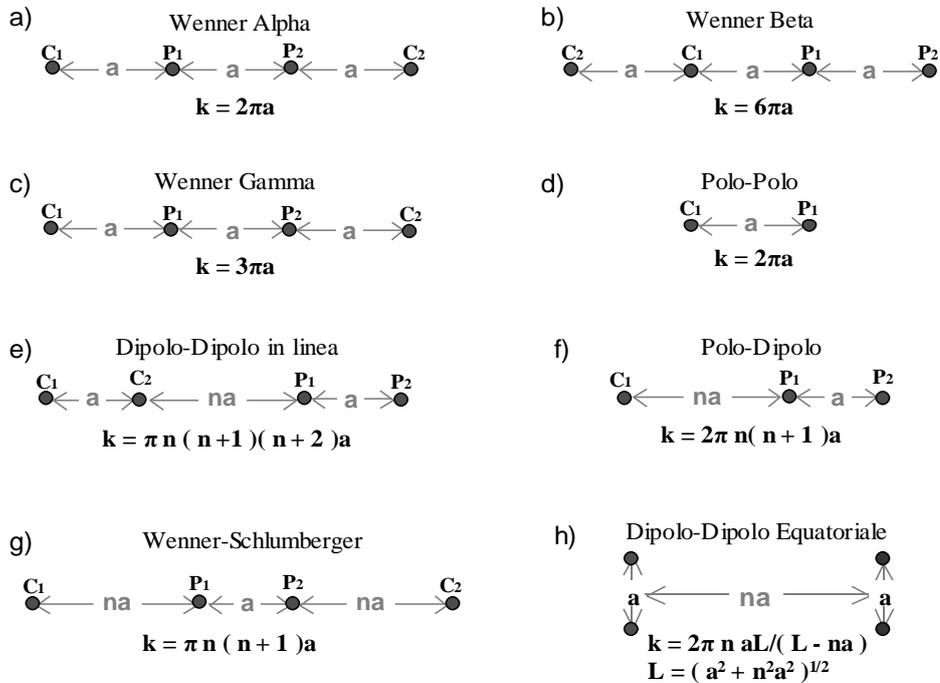


Fig. 2: Disposizione degli elettrodi sul terreno per indagini geoelettriche multielettrode 2D (a) e 3D (b).

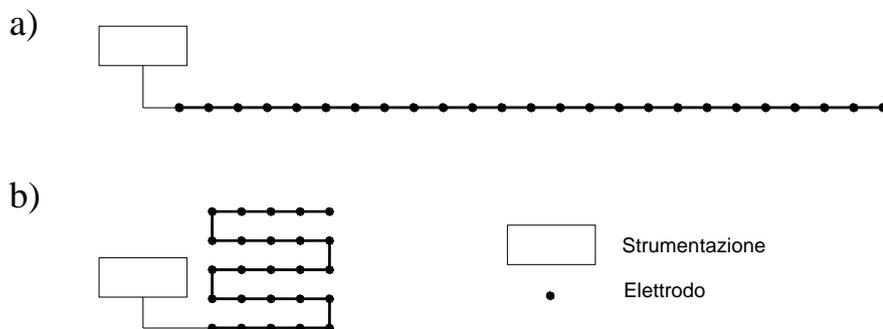


Fig. 3: Dispositivi elettrodi e corrispondenti fattori geometrici (Loke, 2001).

In Fig. 3 sono rappresentati i vari tipi di dispositivi elettrodi. Indicheremo sempre con C1 e C2 i due elettrodi di corrente e con P1 e P2 i due elettrodi di potenziale.

La strumentazione utilizzata per le misure contiene assemblati sia il sistema di energizzante che quello ricevente (Fig. 4). Il sistema di ricezione è costituito da un millivoltmetro digitale, atto a misurare la tensione correlata al segnale di corrente inviato; mentre il trasmettitore, alimentato da batteria esterna, invia nel terreno un segnale di corrente regolare. L'apparecchiatura procede ad una rimozione immediata del fattore di disturbo stazionario (generato da fenomeni di polarizzazione spontanea) tramite l'inversione della polarità del flusso di corrente continua nel sottosuolo, cioè grazie all'uso dell'onda quadra di corrente.



Fig. 4: strumentazione geoelettrica.

La scelta del dispositivo è influenzata dalla volontà di ottenere informazioni 3D. E' stato quindi utilizzato il dispositivo dipolare assiale (dipolo-dipolo) che, tramite una particolare procedura di campagna, consente di ottenere una griglia regolare di valori di resistività apparente nella sezione verticale sotto un profilo di indagine. Eseguendo profili con geometria non standard, adattata all'andamento degli edifici, avremo una griglia pseudo 3D di valori di ρ_a . Da questo set di dati si possono quindi estrarre sia Tomografie Geoelettriche Verticali XZ (TGV) che Orizzontali XY (TGO) a varie profondità che rendono un quadro chiaro della distribuzione di resistività nel sottosuolo.

Con la stessa strumentazione e geometria sono stati rilevati anche i potenziali spontanei

La pseudo-sezione di resistività fornisce un'immagine approssimativa ed immediata della distribuzione di resistività lungo la sezione verticale di sottosuolo sottesa al profilo di misura; può essere quindi considerata come un'immagine sfocata della configurazione elettrica del sottosuolo. La tomografia geoelettrica vera e propria si ottiene mettendo a fuoco l'immagine di resistività apparente in modo da definire meglio le geometrie dei corpi sepolti. E' possibile risolvere questo problema (cioè passare da una pseudo-sezione a una tomografia) applicando la tecnica d'inversione di Loke & Barker (1996).

La tecnica è essenzialmente un'ottimizzazione del metodo dei minimi quadrati in cui un modello di partenza viene iterativamente modificato finché la differenza tra questo e la pseudo-sezione sperimentale risulta ridotta al minimo. L'assunto di base della tecnica per la costruzione del modello è che nel sottosuolo ci sono tanti strati quanti sono i valori di resistività sulla curva sperimentale di ρ_a . La profondità media di ogni strato è uguale alla spaziatura elettrodica utilizzata per la misura di resistività moltiplicata per una costante il cui valore deve essere tale da ridurre al minimo la differenza tra la curva teorica (ricavata dal modello) e la curva sperimentale. Questa costante viene determinata utilizzando l'algoritmo del *trial and error*, ovvero calcolando la percentuale di scarto *root mean squared* (*r.m.s.*, *radice quadrata media*) tra i valori di ρ_a osservati ed i valori ρ_a calcolati nei punti considerati. Dopo ogni iterazione la curva modello di resistività apparente viene ricalcolata e confrontata con la curva di resistività apparente osservata. Questa procedura è ripetuta fino a quando la differenza *r.m.s.* tra le due curve è ridotta al minimo. Questa tecnica è stata estesa al caso bidimensionale da Barker (1992) e successivamente ampliata da Loke & Barker (1996); in questo caso il modello utilizzato è ottenuto suddividendo il sottosuolo in volumetti rettangolari ad ognuno dei quali corrisponde un valore di resistività apparente misurato in campagna. La profondità media di ciascuno di questi elementi sarà funzione delle differenti spaziature elettrodiche utilizzate (Tabella 2).

DISPOSITIVI ELETTRODICI		zmed/a	zmed/L
Wenner Alfa		0,519	0,173
Wenner Beta		0,416	0,139
Wenner Gamma		0,594	0,198
Dipolo-dipolo	n = 1	0,416	0,139
	n = 2	0,697	0,174
	n = 3	0,962	0,192
	n = 4	1,22	0,203
	n = 5	1,476	0,211
	n = 6	1,73	0,216
Wenner-Schlumberger	n = 1	0,52	0,173
	n = 2	0,93	0,186
	n = 3	1,32	0,189
	n = 4	1,71	0,19
	n = 5	2,09	0,19
	n = 6	2,48	0,19
Polo-dipolo	n = 1	0,52	
	n = 2	0,93	
	n = 3	1,32	
	n = 4	1,71	
	n = 5	2,09	
	n = 6	2,48	
Polo-polo		0,867	

Tabella 2: Profondità di investigazione dei vari dispositivi elettrodici (Loke, 2001) (L: lunghezza dello stendimento elettrodico; a: distanza interelettrodica; z: profondità di indagine; n: numero di livelli nel sottosuolo).

Da questo modello iniziale di sottosuolo si calcola una pseudo-sezione teorica di resistività apparente. Le differenze tra i valori di resistività apparente della pseudo-sezione teorica e della pseudo-sezione sperimentale vengono utilizzate per ricavare delle resistività quanto più vicine alla realtà per ognuno degli elementi del modello. L'intero processo è ripetuto iterativamente fino a quando la differenza *r.m.s.* raggiunge un valore minimo fissato dall'operatore. Non sempre, però, al più basso valore *r.m.s.* possibile, corrisponde il modello geologico di sottosuolo più vicino alla realtà. A volte, infatti, si possono ottenere variazioni poco realistiche nei valori di resistività del modello. Pertanto, l'approccio più corretto è quello di scegliere il modello di sottosuolo corrispondente all'iterazione dopo la quale l'errore *r.m.s.* non cambia significativamente.

Bibliografia

- Leucci G., 2015, Geofisica Applicata all'Archeologia e ai Beni Monumentali, Dario Flaccovio Editore Palermo, pp 368.
- Leucci G., 2019, Nondestructive Testing for Archaeology and Cultural Heritage: A practical guide and new perspective. Springer editore pp 217, ISBN 978-3-030-01898-6
- Loke, M. H.: Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies, A practical guide to 2-D and 3-D surveys: RES2DINV Manual, IRIS Instruments, www.iris-instruments.com, 2001.
- Loke, M. H. and Barker R. D.: Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method, Geophys. Prosp., 44, 131–152, 1996.