



**REGIONE SICILIANA**  
Assessorato Regionale Infrastrutture e Mobilità  
Dipartimento Regionale Infrastrutture-Mobilità-Trasporti  
SERVIZIO 8



**STUDIO GEOLOGICO PER IL PROGETTO DEFINITIVO INERENTI I  
LAVORI PER LA MESSA IN SICUREZZA DEL PORTO DI  
MARETTIMO A SUD DEL CENTRO ABITATO**  
ai sensi dell'art. 5 della L.R. n. 21/1998.

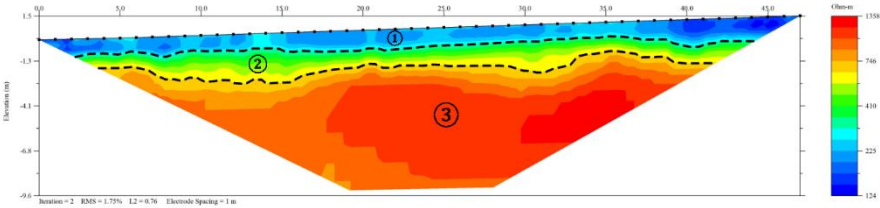
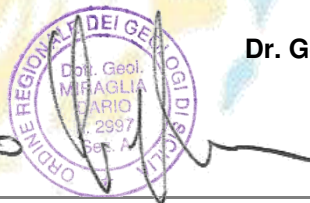
**A.2**

**INDAGINI GEOFISICHE**

**Indagine sismica Down Hole**  
**Tromografie Geoelettriche**  
**Indagine sismica HVSR**  
**Indagine sismica REMI-MASW**



**IL R.U.P**

<b>MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E TRASPORTI</b> PROVVEDITORATO INTERREGIONALE ALLE OPERE PUBBLICHE UFFICIO 3°: Tecnico e Opere Marittime per la Sicilia Piazza Giuseppe Verdi n. 16 Palermo			
<b>Commissione Regionale dei Lavori Pubblici</b> <b>PROGETTO DEI LAVORI DI MESSA IN SICUREZZA DEL PORTO A SUD DEL</b> <b>CENTRO ABITATO, AI SENSI DELL'ART. 5 DELLA L.R.21/1998</b> Indagini geognostiche a supporto della progettazione			
<b>Comune di Favignana (TP) – Isola di Marettimo</b>			
<b>PROGETTO DEFINITIVO</b>			
Ditta esecutrice:  Pietro Montanelli Trivellazioni	D.L. attività geologiche  Dott. Geol. C. Caradonna	Dirigente Serv. 8  Arch. C. Ricciardo	RUP  Ing. S. Ponte
<b>RELAZIONE INDAGINI GEOFISICHE</b> <b>TOMOGRAFIE GEOELETTICHE</b>			<b>R3</b>
			
<i>Rif. Lav.:</i> <b>003/2021</b>	Date indagini: 28/01/2021 29/01/2021	Data emissione: 30/01/2021	Il Tecnico: <b>Dr. Geol. Dario Miraglia</b> 

## 1. PREMESSE

Il Dott. Geol. Piero Montanelli n.q. di responsabile delle attività geologiche, ha conferito al sottoscritto l'incarico per lo studio geologico relativo al progetto di cui al frontespizio di questo elaborato.

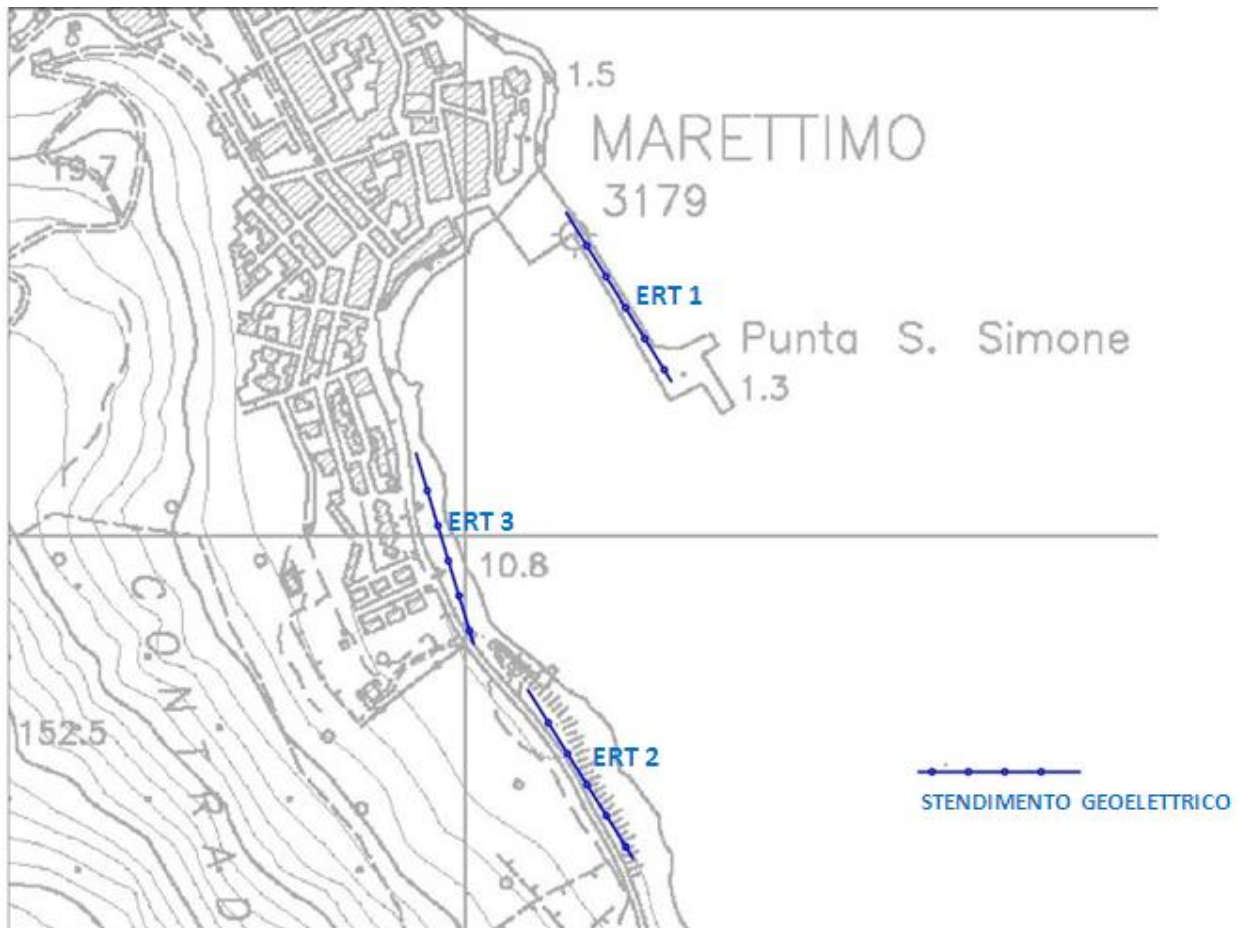
Scopo dello studio è stato quello di eseguire prospezioni geofisiche di superficie tramite metodologia geoelettrica di tipo tomografico. L'interpretazione dei risultati ha consentito di ottenere, in modo non invasivo, sezioni bidimensionali del sottosuolo con un elevato dettaglio risolutivo fino a profondità di circa 40 m dal p.c. allo scopo di valutare la successione stratigrafica.

Nello specifico sono state acquisite:

- n.3 tomografie elettriche (**ERT 1÷ERT 3**) così come indicato nella planimetria allegata.

Nella tabella seguente è riportato un riepilogo delle prospezioni elettriche tomografiche eseguite.

<b>PROSPEZIONI GEOFISICHE</b>				
<b>Tomografia Elettrica 2D</b>				
Linea di indagine	Configurazione elettrodica	N° Elettrodi	Distanza elettrodica	Lunghezza profilo
<b>ERT 1÷ ERT 3</b>	Dipolo-dipolo	48	3 m	141 m



## 2. LA TOMOGRAFIA ELETTRICA 2D

I dati sono stati acquisiti con un georesistivimetro multicanale utilizzando da 48 elettrodi con interdistanza di 3 m.

Il metodo elettrico tomografico si basa sulla misura della resistività elettrica nel terreno e consente di ottenere sezioni bidimensionali caratterizzate dalla variazione dello stesso parametro fisico nel sottosuolo la cui distribuzione può evidenziare zone anomale e discontinuità stratigrafiche.

### Principi generali del metodo geoelettrico

Negli ultimi decenni la prospezione geoelettrica ha subito molte innovazioni, in termini di miglioramenti applicativi (sorgenti di corrente, elettrodi, movimentazione degli stendimenti, ecc.) e di elaborazione ed interpretazione dei dati, con il risultato di ottenere molti vantaggi, tra i quali un aumento significativo del potere risolvante delle indagini ed un conseguente ampliamento dei campi di utilizzo.

Oggi, le tecniche di indagine geoelettriche non sono più mirate, come lo erano quasi sempre una volta, all'analisi delle variazioni di resistività in una sola direzione dello spazio, come ad esempio i sondaggi monodimensionali verticali o orizzontali, ma sono oramai in grado di restituire immagini tomografiche 2D o 3D della distribuzione di resistività nel mezzo indagato.

Il metodo geoelettrico si basa sul principio che la distribuzione di un campo di potenziale elettrico sulla superficie del terreno dipende, oltre che dalle caratteristiche geometriche della sorgente, anche dalla distribuzione della resistività elettrica nel sottosuolo. Se si considera una corrente immessa  $I$  nel sottosuolo da due elettrodi, A e B, posti sulla superficie del terreno, e due elettrodi, M ed N, tra i quali misurare una differenza di potenziale  $\Delta V$ , è possibile definire un volume indagato come quel volume all'esterno del quale, ogni variazione di resistività del mezzo, produce variazioni trascurabili del valore di  $\Delta V$  misurato fra M e N. Spostando i quattro elettrodi sulla superficie del terreno, mantenendo inalterate le loro posizioni relative, è possibile attribuire le variazioni della differenza di potenziale misurata a variazioni della distribuzione della resistività elettrica all'interno del

volume indagato dalla corrente. La forma e l'ampiezza del volume indagato dipendono anche dalla distribuzione della resistività elettrica nel sottosuolo.

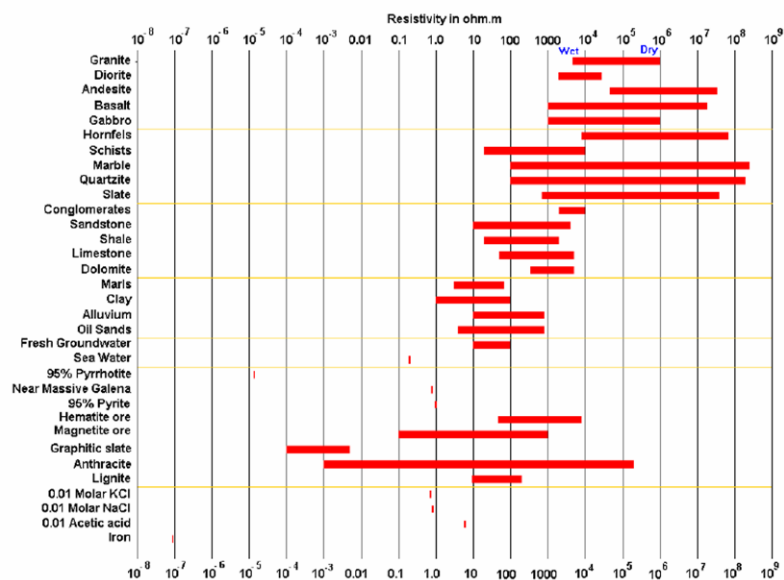
Per eseguire misure di potenziale è necessario disporre sulla superficie del terreno un minimo di quattro elettrodi, due di corrente e due di potenziale. In teoria, è possibile effettuare misure di resistività apparente disponendo i quattro elettrodi sul terreno senza una configurazione geometrica regolare. Nella pratica, tuttavia, le configurazioni non regolari si rivelano poco utili ai fini dell'interpretazione dei dati, in quanto diventa complicato calcolare la profondità di penetrazione della corrente, la profondità d'indagine e il coefficiente geometrico  $k$  necessario per calcolare il parametro resistività apparente:

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} k \quad (\Omega \cdot m).$$

Un set di dati può essere formato da misure effettuate con configurazioni elettrode differenti e secondo differenti direzioni degli stendimenti. Tuttavia, in pratica, esistono precise regole con le quali effettuare sondaggi di resistività apparente, interpretabili correttamente con modellistiche mono, bi e tridimensionali.

Nelle tomografie elettriche 2D si fa l'assunzione che la resistività nel mezzo indagato vari sia con la profondità, che lungo una direzione parallela alla superficie di acquisizione, mentre si ipotizza che sia costante lungo la terza dimensione dello spazio. Questo genere di assunzioni, pur essendo restrittive, consentono l'applicazione della metodologia geoelettrica su una varietà di situazioni sperimentali ben più ampia di quella consentita dai sondaggi monodimensionali. In questo caso i set di misure di resistività apparente vengono scelti facendo variare, per ogni stendimento utilizzabile, sia la posizione orizzontale del quadripolo, lungo la direzione parallela alla superficie di acquisizione in cui si ipotizza che vari la resistività nel mezzo indagato, sia la separazione tra gli elettrodi dei quadripoli, in modo da indagare anche sulle variazioni di resistività con la profondità.





Resistività di rocce, terreni e soluzioni

I sondaggi di tomografia elettrica 2D vengono di solito effettuati usando un numero elevato di elettrodi (nel nostro caso 48), collegati ad un cavo multipolare. Per selezionare in modo automatico i quattro elettrodi relativi ad ogni misura, viene usata un'unità di commutazione elettronica (*switching*).

Normalmente la spaziatura elettrodoica viene mantenuta costante. Il cavo è collegato ad un commutatore elettronico a sua volta connesso ad un computer.

### Configurazione elettrodoica

Per ottenere una buona rappresentazione 2D del sottosuolo, la copertura delle misure deve essere, ovviamente, bidimensionale. Il numero di misure che possono essere ottenute per ciascuna distanza interelettrodoica, per un determinato numero di elettrodi, dipende anche dal tipo di configurazione utilizzata. Nella campagna di indagini eseguita è stata utilizzata la configurazione elettrodoica *dipolo-dipolo*.

Ogni tipo di array ha un proprio utilizzo ottimale in determinate condizioni geologiche, in base alla sua sensibilità. La sensibilità è un indice di quanto un cambiamento di resistività del terreno influenzi la misura di potenziale, e risulta con questo in relazione di proporzionalità diretta.

Di norma i dispositivi Wenner e Wenner-Schlumberger sono più adatti ad evidenziare variazioni verticali, il dispositivo dipolo-dipolo è più adatto ad evidenziare variazioni laterali ma presenta un rapporto segnale/rumore più sfavorevole, il dispositivo polo-dipolo presenta un rapporto segnale/rumore migliore e consente inoltre di scendere più in profondità, il dispositivo del gradiente multiplo risulta un buon compromesso tra capacità risolutiva sia in senso laterale che verticale e rapporto segnale /rumore comparabile ai dispositivi Wenner e Schlumberger. Più nel dettaglio l'array Wenner consente di ottenere medesimi risultati con un minor numero di misure rispetto alle altre geometrie, garantendo una buona copertura orizzontale. La sensibilità è distribuita perlopiù orizzontalmente attraverso il centro del profilo, ecco perchè è indicato per rilevare variazioni verticali più che orizzontali. L'intensità del segnale è inversamente proporzionale al fattore geometrico,  $2\pi a$  (piuttosto piccolo), quindi essendo il segnale molto forte, risulta andare più in profondità rispetto alle altre geometrie. La profondità di investigazione è circa la metà della spaziatura "a". Una configurazione del tipo " Wenner-Schlumberger è un'ibrida ed è indicata in aree contenenti sia strutture verticali che orizzontali, e rappresenta un buon compromesso tra il Wenner ed il dipolo-dipolo. Un aspetto importante nella pianificazione dell'indagine, che determina la scelta dello stendimento da utilizzare, è il rapporto segnale-rumore nelle misure di resistività apparente.

La misura di resistività apparente è ottenuta dal rapporto tra la differenza di potenziale misurata tra gli elettrodi MN e la corrente immessa tra gli elettrodi AB, moltiplicato per il coefficiente geometrico. La misura della differenza di potenziale è quella più affetta da errore: questo generalmente aumenta al diminuire del valore misurato. Se consideriamo due misure di resistività apparente effettuate con quadripoli diversi, ma sullo stesso mezzo omogeneo e isotropo, e con la stessa immissione di corrente, il rapporto tra i potenziali misurati sarà uguale all'inverso del rapporto dei rispettivi coefficienti geometrici.

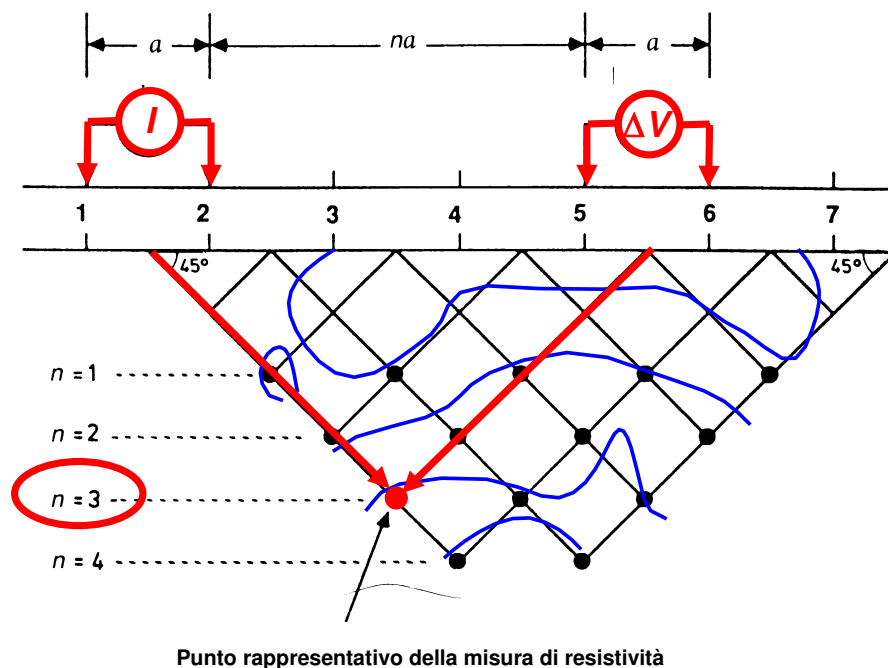
Gli stendimenti che hanno una distribuzione dei coefficienti geometrici con valori più bassi, hanno normalmente un minore contenuto d'errore nelle misure.



Rappresentazione dei dati e processo di inversione

Per rappresentare graficamente i dati ottenuti attraverso un'indagine geoelettrica 2D, il metodo che viene spesso usato è quello della costruzione grafica della "pseudosezione". La costruzione di pseudosezioni, è stata proposta per la prima volta da Hallof (1957), con l'utilizzo della configurazione lineare dipolo-dipolo per l'acquisizione delle misure di resistività apparente. L'ordine dipolare  $n$  viene progressivamente incrementato (così come mostrato in figura), ottenendo valori di resistività apparenti, relativi a volumi maggiori e sempre più estesi in profondità.

I dati vengono poi rappresentati graficamente sulla sezione verticale passante per il profilo di acquisizione. Tale metodo grafico consiste esattamente nell'attribuire la misura di resistività apparente ad un punto della sezione, al di sotto del centro dello stendimento, proprio all'intersezione di due rette che si dipartono, con un'inclinazione di  $45^\circ$ , dai centri dei due dipoli (nel caso di una configurazione dipolo-dipolo).



Costruzione grafica di una pseudosezione effettuata con una configurazione dipolo - dipolo.

Sebbene le pseudosezioni più comuni siano quelle rappresentate a partire da misure di tipo doppio dipolo, tuttavia è possibile ricavare pseudosezioni anche da dati presi con altri tipi di configurazioni elettrode (Wenner, polo-dipolo, polo-polo, ecc.). Per queste configurazioni (ma può essere usato anche per il doppio dipolo) esiste un altro metodo per rappresentare sulla sezione il valore relativo ad una misura: quello di porre verticalmente il punto di misura in corrispondenza alla profondità d'indagine media, o pseudo-profondità, relativa alla configurazione elettrode usata.

La pseudosezione, ottenuta effettuando il *contouring* dei valori di resistività apparente è un metodo conveniente e pratico per raffigurare le misure. Tuttavia, la pseudosezione fornisce una visualizzazione molto approssimativa e talvolta distorta della reale distribuzione della resistività nel sottosuolo, a causa del fatto che la forma delle iso-resistive dipende fortemente, oltre che dalla reale distribuzione della resistività, anche dal tipo di stendimento utilizzato.

Ovviamente, l'ambiguità interpretativa delle pseudosezioni risiede anche nella difficoltà di individuare correttamente la profondità reale delle discontinuità nel sottosuolo a partire dalle variazioni di resistività apparente verticali presenti nelle pseudosezioni. Ciò perché la pseudo-profondità, comunque la si voglia calcolare, è sempre un'informazione media sul volume indagato.

La risoluzione del problema geoelettrico inverso può essere di due tipi:

- *Risoluzione completa* (vera e propria inversione dei dati sperimentali);
- *Risoluzione speditiva*, più o meno approssimata (costruzione di pseudosezione e/o retro-proiezione dei dati sperimentali, altrimenti detta *back projection*).

Da alcuni anni sono state messe a punto tecniche di inversione e di *imaging*, grazie alle quali si ricavano sezioni di resistività tendenzialmente indipendenti dalle caratteristiche geometriche del sistema d'acquisizione utilizzato.

Tra queste tecniche ricadono i metodi che si basano sulla discretizzazione del mezzo, secondo superfici elementari, e nella successiva ottimizzazione del modello di resistività iniziale. Il metodo di ottimizzazione ai minimi quadrati di Gauss-Newton è uno di questi.

Nell'inversione geofisica, si cerca di trovare un modello che dia una risposta compatibile con i dati sperimentali. Il modello è una rappresentazione matematica idealizzata di una sezione del terreno, formata da un insieme di parametri che quantificano le proprietà fisiche che si vogliono stimare a partire dai dati osservati.

La risposta del modello è ottenuta dai dati sintetici che possono essere calcolati per mezzo delle relazioni matematiche che definiscono il modello stesso per un determinato insieme di parametri. Tutti i metodi d'inversione, essenzialmente, cercano di determinare un modello del sottosuolo la cui risposta sia compatibile con i valori misurati. Nei metodi d'inversione geoelettrica basati sulla suddivisione del sottosuolo in pixel o voxel omogenei come valore di resistività, i parametri da determinare sono i valori di resistività delle celle, mentre i dati sono i valori di resistività apparente misurati.

Le tecniche di inversione vere e proprie utilizzano algoritmi di risoluzione iterativi dell'equazione differenziale che lega la distribuzione del potenziale  $\varphi$  nel terreno, alla corrente immessa  $I$  (in termini di intensità della corrente e posizione della sorgente), e alla distribuzione della conducibilità  $\sigma$ .

La velocità di calcolo dei moderni computer, tra l'altro, consente oramai di invertire set di dati sperimentali, acquisiti con sondaggi bidimensionali, in pochi minuti, rendendo possibile l'interpretazione preliminare dei dati anche durante la fase di acquisizione.

### Acquisizione dei dati geoelettrici

Come detto, per effettuare una misura di resistività apparente è necessario immettere (e misurare) la corrente  $I$  nel terreno attraverso due elettrodi di corrente, e misurare la differenza di potenziale  $\Delta\varphi$  tra altri due elettrodi, detti appunto elettrodi di potenziale. La misura di resistività apparente non è altro che il prodotto della resistenza misurata, in termini di  $\Delta\varphi/I$ , e del fattore geometrico  $K$ , che si può calcolare conoscendo le posizioni degli elettrodi sul terreno. Per effettuare le misure di potenziale nel modo corretto però, in geoelettrica, bisogna tenere conto di due fenomeni che disturbano la misura, cioè la resistenza di contatto tra gli elettrodi e il terreno, e la presenza di potenziali spontanei.

La resistenza di contatto nasce dal fatto che la conduzione, nel mezzo indagato, avviene prevalentemente attraverso il meccanismo elettrolitico, mentre negli elettrodi attraverso la conduzione elettronica: questo fa sì che tra gli elettrodi ed il mezzo indagato nasca una differenza di potenziale, di natura elettrochimica.

Una ragione che obbliga ad alternare il verso di percorrenza della corrente nel terreno, per effettuare correttamente le misure di potenziale, è la presenza nel mezzo indagato di differenze di potenziale non dovute alla corrente imposta dall'esterno, ma ad altri meccanismi che danno luogo alla formazione di potenziali spontanei. Questi, sempre presenti nei terreni, sono dovuti a molti fattori, alcuni naturali come i potenziali elettrochimici (di contatto) nel sottosuolo, i potenziali elettro-osmotici provenienti dal movimento di fluidi (acque sotterranee, corsi d'acqua, mare, vento), i potenziali provenienti da correnti di induzione, anche di origine esterna, ecc.; altri sono "artificiali" o comunque antropici, come quelli derivanti dalle perdite dalle linee di alta, media e bassa tensione o dalle scariche elettriche attraverso le prese di terra, ecc. I potenziali spontanei, misurabili tra due punti del terreno, hanno ampiezza differente nei vari punti e sono spesso variabili nel tempo.

Il potenziale  $\Delta\phi$  che si misura quindi tra gli elettrodi di potenziale, è la somma del potenziale imposto dal passaggio della corrente e del potenziale spontaneo. L'alternanza del verso di percorrenza della corrente immessa nel mezzo indagato durante la misura consente di eliminare il potenziale spontaneo semplicemente sottraendo le misure ottenute nei due versi della corrente.

Una singola misura di resistività apparente è quindi composta da almeno due immissioni di corrente. Per migliorare poi il rapporto segnale-rumore, normalmente una stessa misura viene ripetuta diverse volte (*stacking* della misura) con due modalità differenti, sia concettualmente sia in termini di efficacia: (1) misurando più volte il potenziale durante la stessa immissione di corrente o (2) effettuando una misura per ogni immissione e ripetendo più volte il ciclo di misura.

Negli ultimi decenni sono stati sviluppati georesistivimetri che effettuano automaticamente le operazioni appena descritte.

I sondaggi geoelettrici 2D sono stati eseguiti utilizzando un georesistivimetro **MAE X612EM+** con cavi multi-elettrodici con take-out a 3 m. La strumentazione consente di effettuare prospezioni geoelettriche multielettrodiche con fino a 72 elettrodi integrati. Caratteristica principale di questa strumentazione è l'alta velocità di esecuzione delle sequenze di misure programmate, resa possibile dall'adozione di un innovativo hardware che rende possibile l'acquisizione simultanea dei dati su quasi tutti i canali di input della strumentazione.

Le caratteristiche principali della strumentazione elettrica sono:

- Risoluzione 24 bit
- Pseudosezione in tempo reale
- CPU e display integrati.
- intensità massima: 10A a 50V
- Tensioni di uscita:  $\pm 50V$ ,  $\pm 100V$ ,  $\pm 250V$ ,  $\pm 500V$ ,  $\pm 800V$
- Potenza massima: 250W
- Tempo di immissione: impostabile a partire da 0,25 sec. (
- Precisione della misura:  $\pm 0,2\mu A$
- Fondo scala massimo:  $\pm 25V$
- Impedenza di ingresso: 2,5 MOHM
- Filtro frequenza di rete: 50 Hz
- Precisione della misura:  $\pm 1,5\mu V$  nel range  $\pm 25V$
- Riduzione del rumore: con media da 2 a 10 misure
- Azzeramento automatico del potenziale spontaneo
- Accuratezza della resistività misurata:  $\pm 0,5\%$
- Caricabilità misurata su quattro finestre temporali di durata complessiva di 1,2 sec.



Georesistivimetro multicanale MAE X612EM+

Come elettrodi sono stati utilizzati picchetti in acciaio inox, infissi nel terreno ad intervalli costanti e collegati tramite cavi elettrici multipolari all'unità di acquisizione dati.

Eseguito il posizionamento degli elettrodi sul terreno si è proceduto all'acquisizione dati secondo una sequenza di misura prestabilita che prevede, per ogni configurazione quadripolare, l'immissione di corrente nel terreno, la misura della differenza di potenziale ed il calcolo della resistività apparente. Ogni misura viene eseguita in corrente diretta ed inversa per annullare gli effetti dei potenziali spontanei/indotti e viene ripetuta per diverse iterazioni, calcolando la resistività apparente e la deviazione standard che ne definisce l'accuratezza.

I dati acquisiti rappresentano una matrice di valori di resistività del terreno (pseudosezione); essa fornisce un'idea qualitativa della distribuzione delle resistività reali del sottosuolo e consente di verificare la coerenza dei dati acquisiti;

in questa fase è possibile evidenziare ed eliminare anomalie locali determinate da valori troppo alti o troppo bassi rispetto ai valori limitrofi.

### Elaborazione dei dati

Il software per l'elaborazione e l'interpretazione dei dati geoelettrici utilizzato è il ZondRes 2D della Geophysical Software.

Una routine per la modellazione diretta è stata utilizzata per calcolare valori di resistività apparente sintetici, attraverso il metodo degli elementi finiti. Un algoritmo basato sulla tecnica di ottimizzazione ai minimi quadrati non-lineare è stato invece utilizzato per l'inversione dei dati sperimentali. Il programma suddivide il sottosuolo in un certo numero di blocchi rettangolari che serviranno per definire una pseudosezione di resistività apparente (attraverso la modellazione diretta) caratterizzata dalla migliore compatibilità con i valori di resistività apparente misurati. Il metodo prevede la minimizzazione delle differenze tra i valori di resistività apparente misurati e quelli calcolati, modificando la resistività attribuita ad ogni blocco rettangolare. Ognuna di queste variazioni è detta iterazione.

Il software consente di utilizzare essenzialmente due diversi algoritmi di inversione: l'inversione standard vincolata sui minimi quadrati (detta anche *smoothed inversion* o inversione smussata) e l'inversione a vincoli robusti.

L'inversione a vincoli robusti consente di ottenere modelli di sottosuolo dove le zone a differenti valori di resistività assumono contorni netti. Questo tipo di algoritmo di inversione è stato quindi scelto perché consente di ottenere sezioni interpretative più rappresentative della situazione geologica studiata.

Il risultato è dato da una sezione di resistività reale ricostruita con precisione (nelle due dimensioni) pari a metà della più piccola distanza inter-elettrodica, con possibilità di selezionare le scale di tonalità dei colori per evidenziare in modo ottimale le anomalie presenti nel terreno.

Di seguito si discuterà dell'interpretazione delle 3 tomografie elettriche.



### Interpretazione dei dati

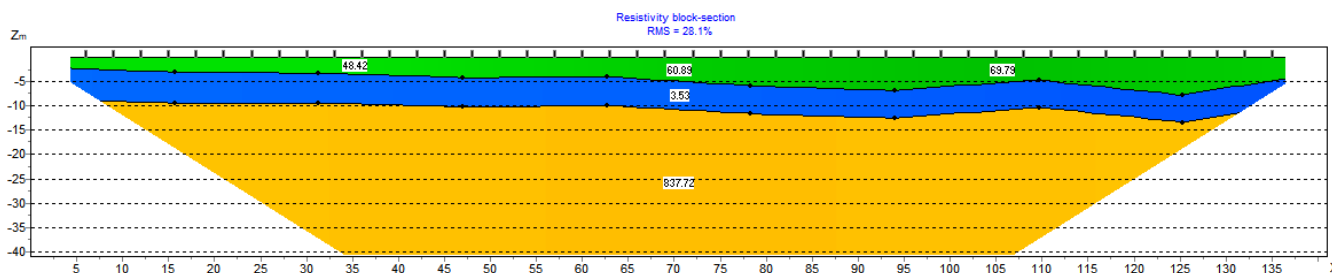
I dati sperimentali sono stati elaborati ed invertiti utilizzando una serie di parametri di inversione selezionati in funzione della qualità dei dati e delle conoscenze sulla successione stratigrafica del sito. Sono state eseguite un numero di iterazioni tali da ottenere sezioni interpretative caratterizzate da limiti di equivalenza stimati in una percentuale dell'errore quadratico medio (RMS error) valutato tra le misure teoriche e le misure sperimentali.

I modelli ottenuti mostrano un range di valori di resistività compresi tra 10 e 10.000  $\Omega \cdot m$ . In linea generale, i valori fortemente resistivi sono rappresentativi del substrato calcareo (brecciato e fratturato nella sua porzione superficiale) caratteristico dell'isola di Marettimo.

Si sintetizzano i risultati ottenuti per tutte le linee di indagine:

**ERT 1:** il sondaggio, acquisito lungo il molo portuale, ha consentito di raggiungere una profondità di indagine di circa 40 m. Al fine di accoppiare gli elettrodi al terreno, sono stati effettuati dei fori con un trapano elettrico. La sezione presenta un forte contrasto di resistività ad una profondità compresa tra 10 e 15 m dal p.c. attribuibile al contatto tra la struttura artificiale del molo (colore verde-blu) ed il sottostante substrato calcareo (colore giallo-rosso).

I risultati dell'elaborazione della tomografia elettrica si presentano tramite *pseudosezioni* e *sezioni di resistività del modello inverso* con indicazione dell'RMS ottenuto durante il processo di inversione. Per questa sezione si presenta, inoltre, una rappresentazione in modalità "layer" nella quale viene evidenziata, schematicamente, la presenza di acqua marina (colore blu) e del contatto col substrato calcareo (colore giallo-resistivo).



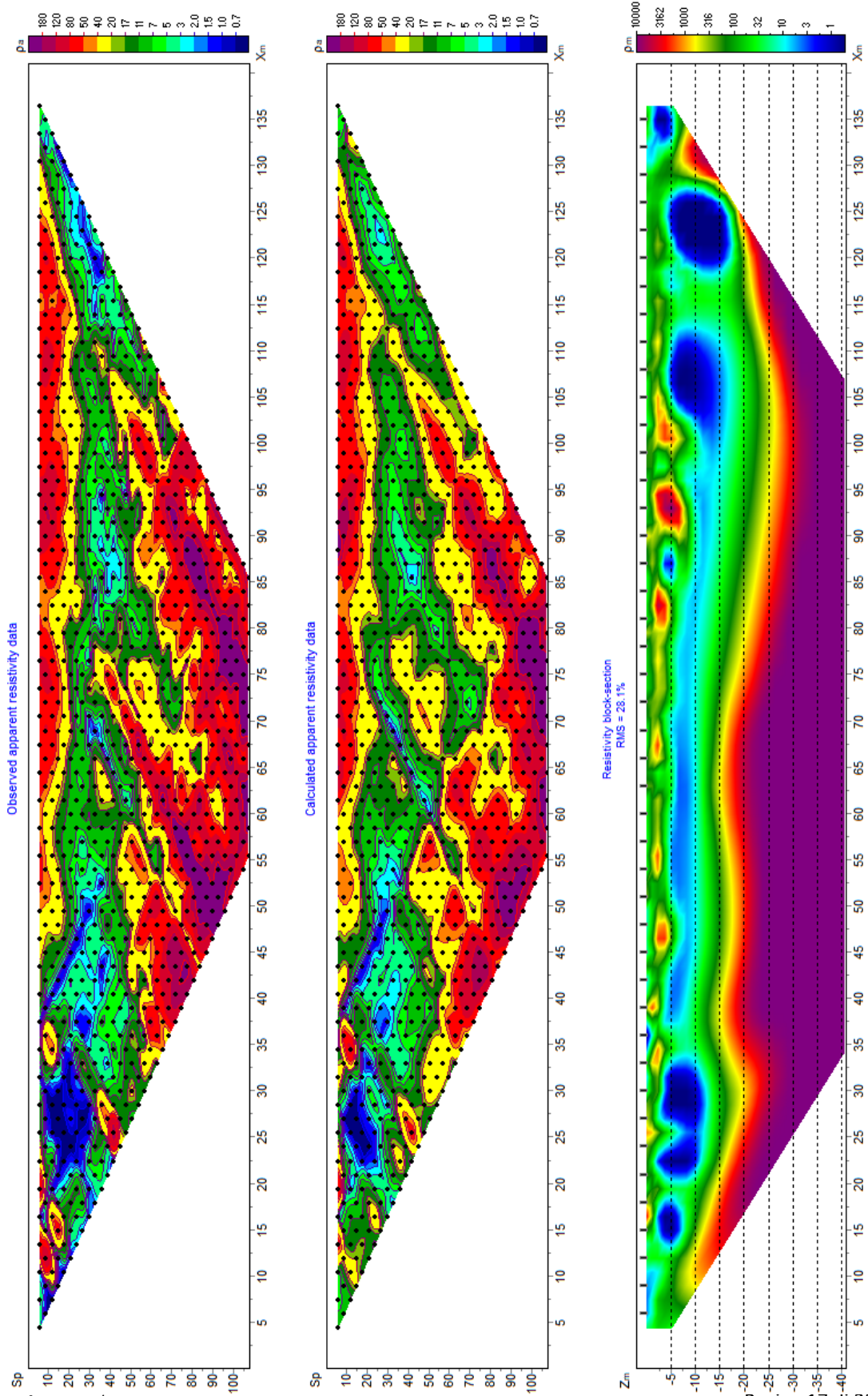
**ERT 2:** il sondaggio ha consentito di raggiungere una profondità di indagine di circa 40 m. La sezione presenta, a diverse profondità, variazioni nella distribuzione della resistività elettrica. I primi 10 m mostrano valori compresi tra 10 e 100  $\Omega\cdot m$  (colore blu-verde) imputabili all'alternanza tra sabbie e ghiaie che costituiscono una coltre di terreni di copertura. Da circa 10 m di profondità i valori aumentano (colore rosso) in corrispondenza del substrato calcareo brecciato (colore rosso) che si presenta compatto e massivo da una profondità di circa 30 m.

I risultati dell'elaborazione della tomografia elettrica si presentano tramite *pseudosezioni e sezioni di resistività del modello inverso* con indicazione dell'RMS ottenuto durante il processo di inversione.

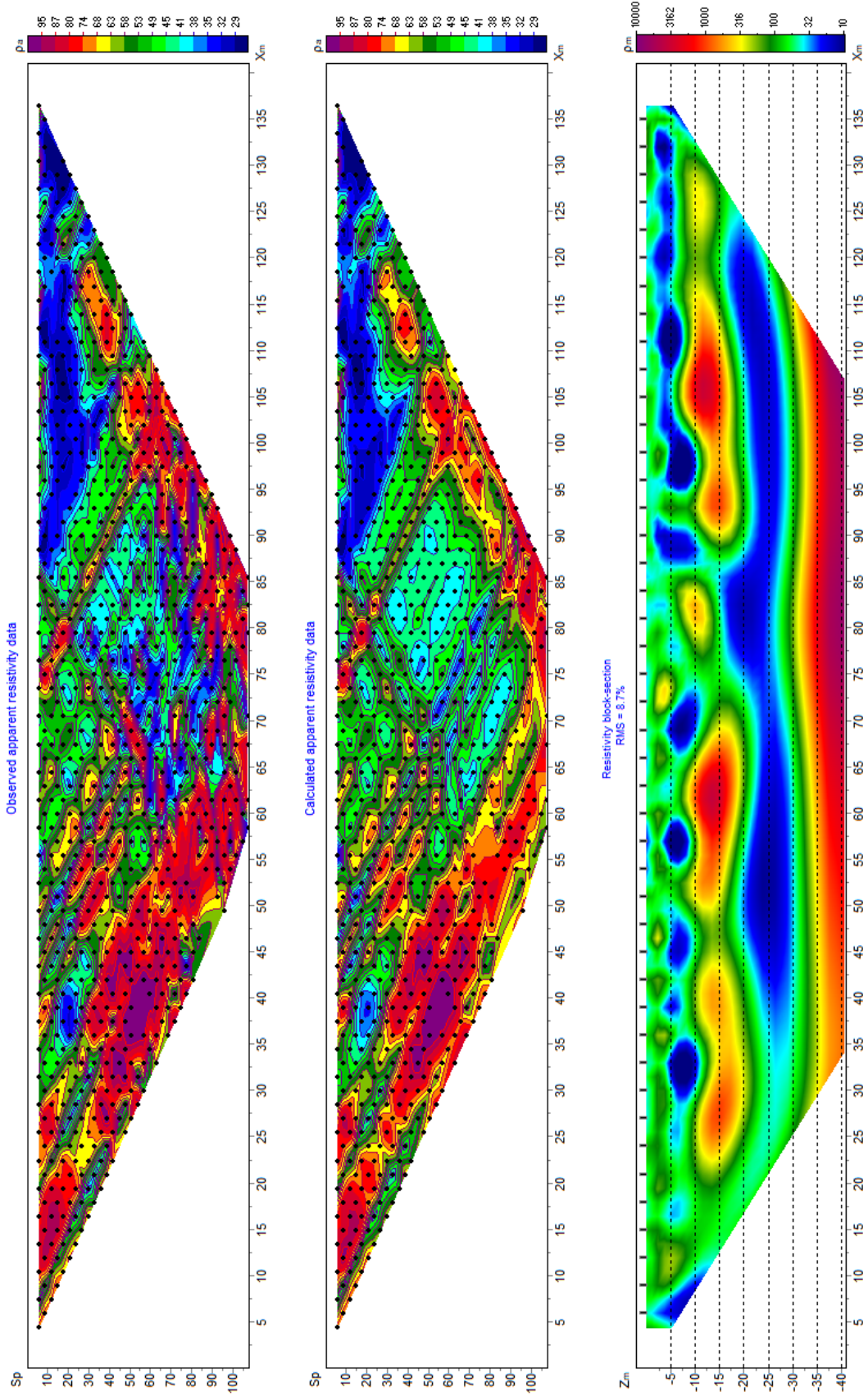
**ERT 3:** il sondaggio, acquisito lungo la linea di costa, in gran parte su roccia affiorante, ha consentito di raggiungere una profondità di indagine di circa 40 m. La sezione presenta alti valori di resistività sin dalla superficie (colore rosso-viola) che sono rappresentativi del substrato calcareo brecciato che si presenta compatto e massivo da una profondità di circa 10 m. Le zone conduttive sono imputabili ad aree di ingressione di acqua marina in corrispondenza delle porzioni di roccia maggiormente fratturata.

I risultati dell'elaborazione della tomografia elettrica si presentano tramite *pseudosezioni e sezioni di resistività del modello inverso* con indicazione dell'RMS ottenuto durante il processo di inversione.

# ERT 1

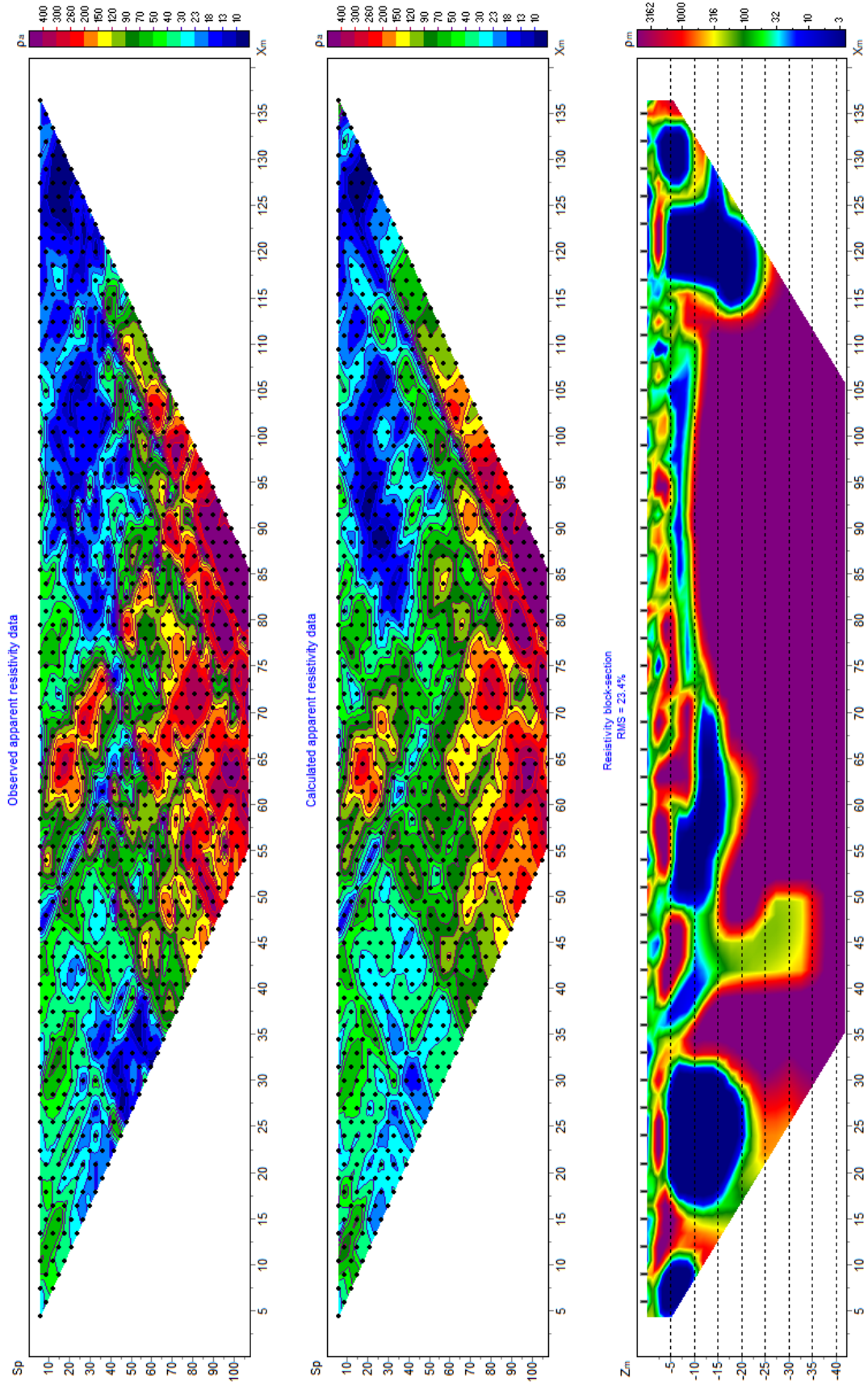


# ERT 2





# ERT 3



**ALLEGATO A: Documentazione fotografica**



ERT 1





ERT 2





ERT 3