

# COMUNE DI ZERFALIU Provincia di Oristano

LOCALITÀ ZINNIGAS



## Studio di Geologia Tecnica e Ambientale

**Dott. Geol. Giancarlo Carboni**

Via Nazionale 277 09039 Villacidro (SU)

cell. 329 4177709

e-mail: [info@geosardegna.it](mailto:info@geosardegna.it)

[www.geosardegna.it](http://www.geosardegna.it)

## OGGETTO:

Indagini geofisiche mediante prospezione geoelettrica con profili di resistività e polarizzazione indotta con elaborazione tomografica per la definizione della stratigrafia locale di dettaglio.

## IL GEOLOGO INCARICATO

**Dott. Geol. Giancarlo CARBONI**

Ordine dei Geologi della Sardegna n° 497



Dott. Geol. GIANCARLO CARBONI

## Il committente:

**Oristano Inerti Srl**

Loc. Pranu e Cixiri - Tanca Molino

09170 Oristano – Sili

C.F./P.IVA 00634580955

Villacidro, li 25/05/2022



# INDICE

<b>1</b>	<b>Premessa .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Inquadramento geografico e topografico .....</b>	<b>1</b>
2.1	Inquadramento topografico .....	1
<b>3</b>	<b>Inquadramento geologico .....</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Generalità sull'Indagine Geofisica .....</b>	<b>4</b>
4.1	Grandezze geofisiche misurate .....	4
4.1.1	Resistività apparente .....	4
4.1.2	Caricabilità.....	6
<b>5</b>	<b>Indagine con metodo geoelettrico .....</b>	<b>9</b>
5.1	Principi generali.....	9
5.1.1	Dispositivi elettrodi dipolari .....	10
5.2	Modelli di resistività 2D .....	11
5.3	Strumentazione utilizzata .....	12
5.4	Operazioni di campagna .....	14
5.5	Repertorio fotografico indagini geoelettriche .....	15
<b>6</b>	<b>Analisi delle sezioni geoelettriche.....</b>	<b>17</b>
6.1	Sezione TG 1 .....	18
6.2	Sezione TG 2 .....	19
6.3	Sezione TG 3 .....	20





## 1 PREMESSA

Su incarico conferito nel mese di maggio 2022 allo scrivente, Dott. Geol. Giancarlo Carboni, C.F. CRBGCR67M30L924H, con Studio Tecnico in Villacidro, via Nazionale n° 277, iscritto all'Ordine dei Geologi della Sardegna con il n° 497 dalla Soc. Oristano Inerti Srl è stata realizzata una campagna d'indagine geofisica il 18 maggio 2022 con il metodo della prospezione geoelettrica in modalità tomografica, allo scopo di:

- valutare la stratigrafia locale di dettaglio, in particolare distinguere i depositi sabbiosi e ghiaiosi con minore contenuto di argilla nel corpo alluvionale pleistocenico locale;
- evidenziare eventuale circolazione idrica sotterranea.

L'area in studio si sviluppa per una superficie di circa 57.000 m<sup>2</sup>, presenta una morfologia ondulata.

## 2 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E TOPOGRAFICO

L'area di indagine si tra gli abitati di Zerfaliu e Solarussa, ha una quota media di circa 20 m s.l.m.

### 2.1 Inquadramento topografico

Ubicazione area:	Comune di Zerfaliu – loc. Zinnigas		
Cartografia:	I.G.M. 1:50.000 - Foglio n° 529 "Samugheo"		
	I.G.M. 1:25.000 - Tavoleta n° 529 Sez. IV "Solarussa"		
	C.T.R. 1:10.000 - Sezione n° 529 010 "Solarussa".		
Coordinate chilometriche WGS 84:	Limite NO	473 545 m E	4 423 167 m N
	Limite NE	473 933 m E	4 423 282 m N
	Limite SO	473 642 m E	4 423 030 m N
	Limite SE	473 967 m E	4 423 096 m N
Quota m.s.l.m.:	compresa tra 17 m e 23 m s.l.m. circa		



Fig. 1: Inquadramento geografico

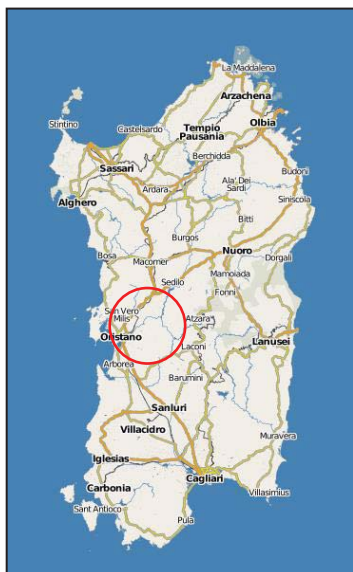


Fig. 2: estratto da cartografia IGM 1:25.000

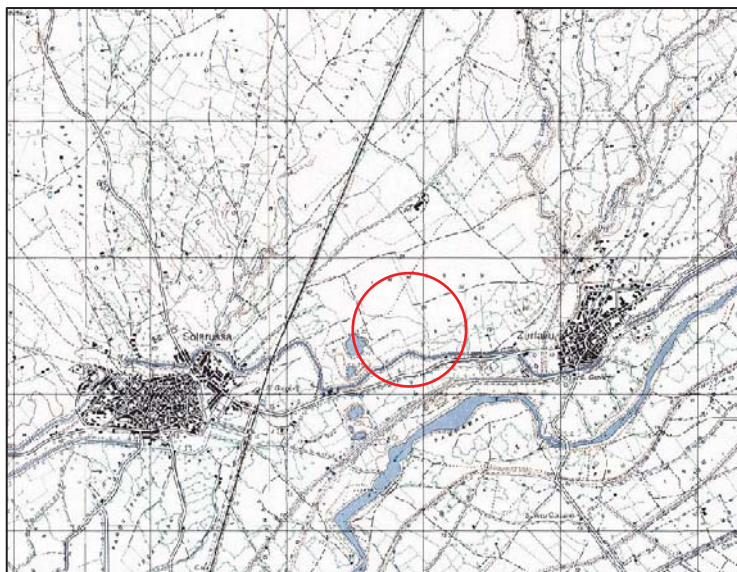


Fig. 3: estratto da CTR numerica 1:10.000

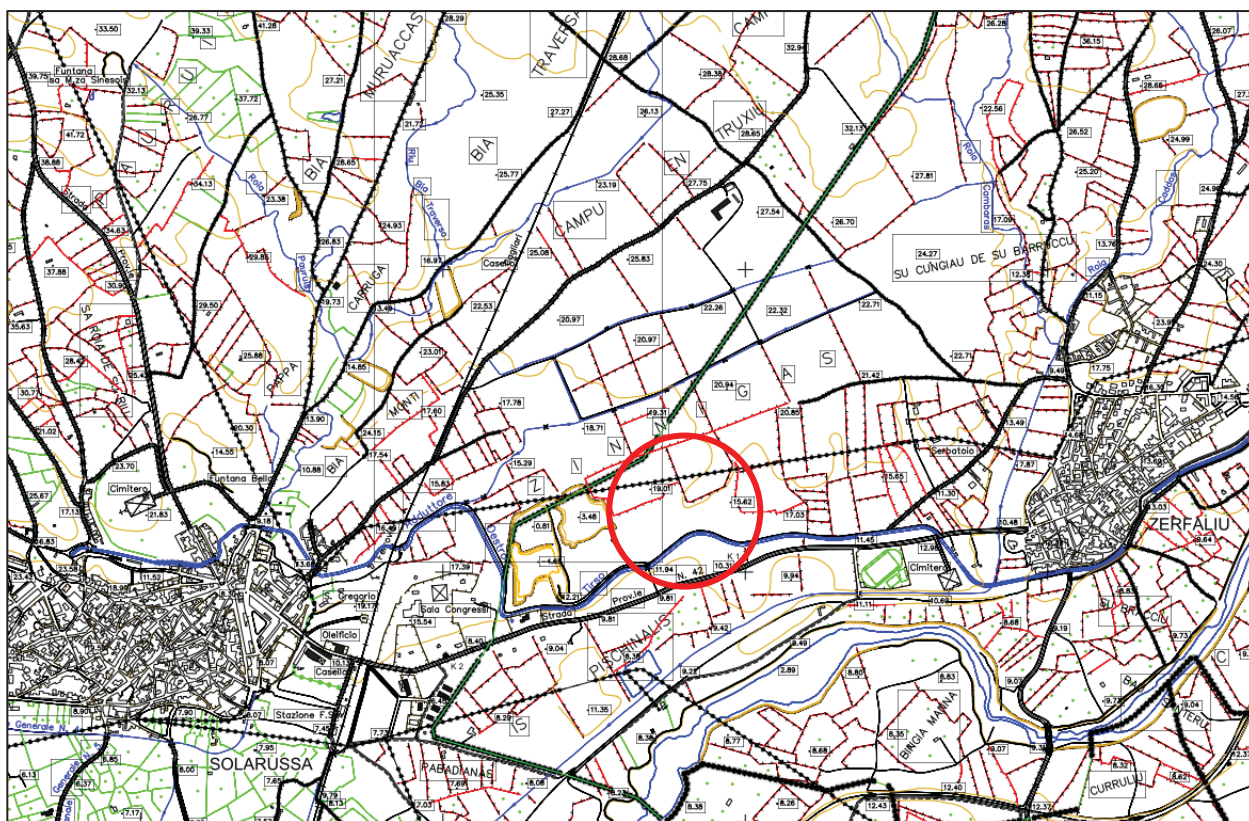






Fig. 4: vista panoramica da nord dell'area studiata



### 3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Il sito è ubicato nella piana del Campidano di Oristano, tra l'abitato di Solarussa e Zerfaliu, in località Zinnigas. La zona presenta un'orografia blandamente ondulata, interessata prevalentemente dalla presenza di seminativi e prati artificiali, e si sviluppa a un'altitudine media di circa 20 m s.l.m.

La piana è il risultato dell'accumulo fluvio-deltizio delle alluvioni del Fiume Tirso e dei corsi d'acqua provenienti dai rilievi vulcanici del massiccio del Montiferru; questi ultimi formano delle conoidi di deiezione in corrispondenza dei rilievi di bordura a est della piana. La parte superiore di tale formazione, dominata da clasti di scisti silicizzati o metamorfici, quarzo, granito, porfidi e altre rocce paleozoiche, passa con ogni probabilità al Quaternario antico, che è notoriamente rappresentato nel Campidano da coltri alluvionali ciottolose (Alluvioni antiche terrazzate, Montaldo, 1959), per potenze considerevoli di oltre 200 metri nella zona dello Stagno di Santa Giusta (CAS.MEZ., 1996).



## 4 GENERALITÀ SULL'INDAGINE GEOFISICA

La prospezione geofisica è una tecnica di indagine non distruttiva del sottosuolo, che consiste nella misurazione tramite apparecchi di alcune proprietà fisiche del terreno che possono rivelarne la struttura, così come la presenza di oggetti sepolti. È utilizzata in applicazioni archeologiche, forensi, ambientali, minerarie e petrolifere, geotecniche, di ingegneria civile e di Ingegneria per l'ambiente e il territorio.

La caratterizzazione stratigrafica dei terreni può risultare alquanto complessa, soprattutto se le aree da investigare sono piuttosto estese e/o difficilmente praticabili con i tradizionali mezzi di indagine geognostica. I metodi geofisici sono in grado di fornire una rappresentazione globale dei volumi sepolti in termini di distribuzione verticale e laterale dei parametri fisici che caratterizzano le aree da investigare. In tal modo il numero delle indagini geognostiche può essere notevolmente ridotto e concentrato in aree indicate dall'indagine geofisica o laddove è necessario acquisire informazioni di maggior dettaglio.

### 4.1 Grandezze geofisiche misurate

È necessario introdurre ora le grandezze geofisiche utilizzate nella presente prospezione geofisica, ciò faciliterà la lettura della restante parte della relazione, dove si illustrano i risultati ottenuti dalle prospezioni geofisiche.

Le metodologie richieste nel piano di indagine fanno riferimento alle proprietà elettriche dei materiali: conducibilità, resistività e caricabilità.

#### 4.1.1 Resistività apparente

Definiamo ora un concetto d'importanza fondamentale nella prospezione elettrica del sottosuolo, ovvero il concetto di "resistività apparente".

Nel caso di un semispazio omogeneo ed isotropo di resistività  $\rho$ , abbiamo precedentemente visto come, mediante misure di intensità di corrente fluente nel sottosuolo dall'elettrodo A a quello B, e misure di differenza di potenziale ai capi degli elettrodi M e N, è possibile determinare la resistività del sottosuolo con la seguente formula:

$$\rho = K_g \frac{\Delta U_{MN}}{I}$$

essendo  $K_g$  il fattore geometrico del dispositivo utilizzato.

La possibilità di operare su un semispazio omogeneo è piuttosto rara. Nella realtà il sottosuolo è caratterizzato dalla presenza di superfici di discontinuità lungo le quali si hanno brusche variazioni della resistività.





Se effettuiamo misure di distanze fra gli elettrodi, di corrente  $I$  e di differenza di potenziale  $V$  allo stesso modo in cui le effettuiamo nel caso del sottosuolo omogeneo, il risultato che otterremo sarà un valore di “*resistività fittizia*” definita anche “*pseudoresistività*”.

In generale tale valore dipenderà dalle resistività reali appena citate, e dalle distanze interelettrodiche. Il valore di resistività fittizia che si ottiene non deve essere considerato né una media aritmetica, né ponderata delle tre resistività vere presenti nel sottosuolo, dato che può accadere che essa assuma un valore addirittura maggiore o minore di tutte e tre le resistività reali.

La resistività fittizia  $\rho_a$ , ottenuta applicando ad un sottosuolo eterogeneo l'espressione corrispondente al semispazio omogeneo, è detta “*resistività apparente*”. Essa è usualmente definita, per un semispazio disomogeneo, come la resistività di un ipotetico sottosuolo omogeneo ed isotropo sulla cui superficie, a parità di dispositivo elettrodico e d'intensità di corrente, si misura una differenza di potenziale uguale a quella del mezzo disomogeneo.

La resistività è un parametro indipendente dalle caratteristiche geometriche della formazione litologica a cui si riferisce ed è definita come la resistenza elettrica per unità di volume.

Ogni litotipo presenta un ampio campo di variabilità dei propri valori di resistività che dipendono dal grado di omogeneità, dai livelli di alterazione e dal grado di fratturazione per rocce litoidi. Nel caso di terreni sciolti, quali i depositi alluvionali recenti, la resistività dipende dalla granulometria, dai fluidi in essi contenuti e dalla quantità di sali disciolti. A questa regola generale fanno eccezione le argille che, anche se compatte, hanno sempre valori di resistività estremamente bassi; questo fenomeno è dovuto principalmente alle caratteristiche del reticolo cristallino dei minerali che le compongono ed al loro grado di saturazione.

La maggior parte delle rocce presenta così dei caratteri di conducibilità di tipo elettrolitico dato che, con le eccezioni di alcuni minerali metallici, quasi tutti i minerali sono isolanti. La conducibilità è dovuta quindi essenzialmente all'acqua interstiziale ed è in larga misura funzione della porosità, del contenuto d'acqua e della quantità di sali disciolti nell'acqua. La presenza di fluidi nel sottosuolo fa sì che rocce e terreni, attraversati dalla corrente, si comportino relativamente come dei buoni conduttori di elettricità; al contrario le strutture con scarso contenuto di fluidi, come rocce asciutte non fratturate e cavità naturali o di natura antropica si comportano come dei cattivi conduttori di calore, se non addirittura come degli isolanti. Pertanto le geometrie sepolte rispondono al flusso di corrente artificiale, immessa con diverse modalità, in funzione del parametro fisico che regola tale comportamento: la resistività elettrica ( $Ohm \cdot m$ ).

La resistività è pertanto una proprietà assai variabile, anche all'interno della stessa formazione: ciò è particolarmente vero per i materiali poco consolidati prossimi alla superficie, come detriti e regolite.

Nell'analisi delle sezioni geoelettriche, per facilitare il confronto delle diverse sezioni di resistività si è utilizzato lo stesso range di rappresentazione dei valori, secondo lo schema seguente:



**Tabella 1: scala dei valori di resistività utilizzati ( $\Omega \cdot m$ ) e relativa tabella cromatica**

15	18.6	23	28.6	35.5	44	54.5	67.6	83.8	104	129	160	198	246	305	378	>378

**Tabella 2: di tipici valori di resistività e conducibilità**

MATERIALE	RESISTIVITA ( $\Omega \cdot m$ )	CONDUTTIVITA' (S/m)
<b>ROCCE IGNEE E METAMORFICHE</b>		
Granito	$5 \times 10^3 - 10^6$	$2 \times 10^{-4} - 10^{-6}$
Basalto	$10^3 - 10^6$	$10^{-6} - 10^{-3}$
Slate	$6 \times 10^2 - 4 \times 10^7$	$2.5 \times 10^{-8} - 1.7 \times 10^{-3}$
Marmo	$10^2 - 2.5 \times 10^8$	$4 \times 10^{-9} - 10^{-2}$
Quarzite	$10^2 - 2 \times 10^8$	$5 \times 10^{-9} - 10^{-2}$
<b>ROCCE SEDIMENTARIE</b>		
Arenaria	$8 - 4 \times 10^3$	$2.5 \times 10^{-4} - 0.125$
Argilla	$20 - 2 \times 10^3$	$5 \times 10^{-4} - 0.05$
Calcere	$50 - 4 \times 10^2$	$2.5 \times 10^{-3} - 0.02$
<b>SUOLI ED ACQUA</b>		
Argilla	1 - 100	0.01 - 1
Alluvioni	10 - 800	$1.25 \times 10^{-3} - 0.1$
Acqua di falda	10 - 100	0.01 - 0.1
Acqua marina	0.25	4
<b>ALTRI MATERIALI</b>		
Ferro	$9.074 \times 10^{-8}$	$1.10^2 \times 10^7$
KCl 0,01M	0.708	1.413
NaCl 0,01M	0.843	1.185
Acido acetico 0,01 M	6.13	0.163
Xylene	$6.998 \times 10^{16}$	$1.429 \times 10^{-17}$

#### 4.1.2 Caricabilità

Si può dire che la caricabilità o Polarizzazione Indotta (detta anche effetto capacitivo) rappresenta l'attitudine di un determinato materiale ad accumulare cariche elettriche di polarità opposta (cioè a "caricarsi" come un condensatore elettrico) lungo la superficie di discontinuità tra mezzi a resistività diversa, durante l'invio di corrente nel sottosuolo, ed a permettere la "scarica" negli istanti immediatamente successivi all'interruzione della corrente. In termini pratici i terreni che presentano i maggiori effetti capacitivi, cioè una elevata caricabilità, sono quelli in cui si ha la contemporanea presenza di parti molto conduttive, affiancate ad altre molto resistenti, senza che si verifichi una marcata continuità delle prime. La polarizzazione indotta è un fenomeno generato dalla stimolazione di una corrente elettrica, che viene osservata dopo l'applicazione di una tensione nel terreno. Il metodo consiste nell'osservazione della curva di decadimento del potenziale, susseguentemente all'interruzione della corrente immessa, cioè dalla misura della "Caricabilità residua" trattenuta dal terreno sottoposto ad indagine.

La Polarizzazione Indotta (PI) è un fenomeno elettrico che si manifesta all'interno di mezzi materiali sia nel dominio del tempo, con tensioni di rilassamento all'interruzione di un flusso di corrente elettrica energizzante a gradino, sia nel dominio della frequenza, con una precisa legge di dispersione della resistività elettrica al variare della frequenza di un flusso di corrente alternata energizzante. Una sorgente



di PI è connessa ai processi ossido-riduttivi lungo l'interfaccia tra grani metallici e fluidi interstiziali (polarizzazione di elettrodo). Un'altra cospicua sorgente di PI si riferisce invece ad accumuli ionici in elettroliti in movimento a seguito di variazioni di mobilità lungo il percorso (polarizzazione elettrocinetica).

L'acqua interstiziale può comportarsi come un elettrolita favorendo la manifestazione del fenomeno, ciò aiuta a discriminare la sua presenza nel sottosuolo.

La durata di questo fenomeno è variabile e può raggiungere a volte parecchi secondi: si tratta pertanto di un fenomeno elettrico relativamente lento e temporaneo. Quello che si misura è l'area sottesa dalla curva di decadimento del potenziale  $V(t)$ , per un intervallo di tempo  $\Delta t = t_2 - t_1$ , in rapporto con il potenziale registrato prima dell'inizio del processo di scarica  $V_0$ :

$$M = \frac{\int_{t_1}^{t_2} V(t) dt}{V_0}$$

La grandezza  $M$  è detta caricabilità ed è generalmente misurata in millisecondi.

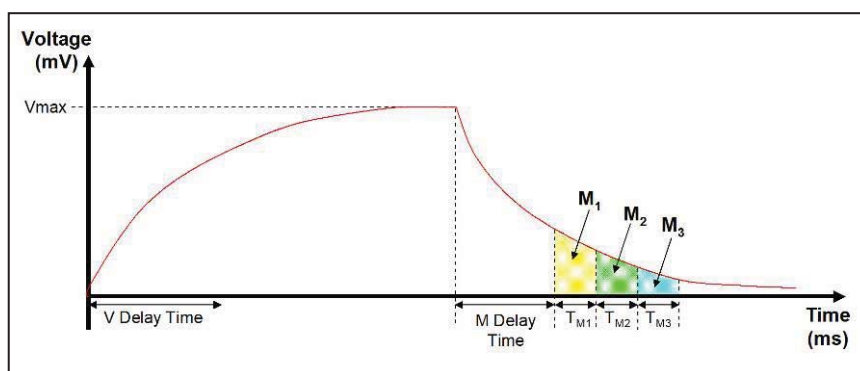


Fig. 5 - Il processo di carica e di scarica in funzione del tempo

Il processo di acquisizione di misure di caricabilità è estremamente delicato: in condizioni ideali bisognerebbe utilizzare sonde non polarizzabili, tuttavia con i più moderni georesistivimetri è possibile acquisire con i normali elettrodi metallici (nella fattispecie acciaio inox). Infatti, il problema dei potenziali spontanei dovuti alla polarizzazione degli elettrodi metallici viene gestito automaticamente dal georesistivimetro, grazie agli elevati rapporti segnale/disturbo e ad opportuni sistemi di filtraggio elettronico del segnale registrato agli MN.



**Tabella 3: con alcuni valori tipici di caricabilità di alcuni terreni, rocce e minerali (da Telford 1990 e Keller 1966).**

Materiali e Minerali	Caricabilità (msec)
Arenarie e Siltiti	100-500
Tufi	300-800
Marne e Argilliti	50-100
Calcari e Dolomie	10-20
Rocce vulcaniche compatte	100-500
Graniti	10-50
Acque sotterranee	0
Materiale alluvionale	1-4
Ghiaia	3-9

La caricabilità misurata è funzione oltre che alla configurazione elettrolica utilizzata, anche della potenza di energizzazione del terreno e del tempo di energizzazione. Pertanto i valori indicati in tabella hanno un valore puramente qualitativo, atti ad indicare la maggiore o minore attitudine dei materiali descritti a subire il fenomeno della polarizzazione indotta.

Nell'analisi delle sezioni geoelettriche, per facilitare il confronto delle diverse sezioni di resistività si è utilizzato lo stesso range di rappresentazione dei valori, secondo lo schema seguente:

**Tabella 4: scala dei valori di caricabilità utilizzati (ms) e relativa tabella cromatica**

0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	>30



## 5 INDAGINE CON METODO GEOELETRICO

La geoelettrica si basa sul principio che le rocce sono conduttrici di elettricità, e tale capacità di condurre corrente varia a seconda del tipo di roccia, delle sue condizioni (alterazione, fessurazione, porosità, ecc.), del suo contenuto d'acqua, del contenuto di minerali come solfuri e ossidi, dal grado di salinità dell'acqua contenuta nei pori. Poiché l'indagine geoelettrica permette di ricostruire un modello interpretativo del sottosuolo, si può avere attraverso un utilizzo mirato della stessa una stima della stratigrafia a piccola, media e grande profondità e per la ricerca di accumuli idrici sotterranei.

Nell'ambito delle metodologie geofisiche correntemente utilizzate per l'esplorazione del sottosuolo, un notevole contributo è dato dalle prospezioni di tipo geoelettrico. La prospezione geoelettrica consiste nella determinazione sperimentale del parametro della resistività apparente, attraverso misure congiunte di intensità di corrente elettrica inviata nel sottosuolo mediante una coppia di elettrodi infissi nel terreno, e di tensione ai capi di una seconda coppia di elettrodi, anch'essi in contatto diretto col suolo.

L'analisi del comportamento della resistività apparente, al mutare della dimensione e posizione del dispositivo elettrodico di misura, permette di evidenziare efficacemente i contrasti di resistività esistenti nel sottosuolo, nell'ambito dei volumi investigati, fornendo così informazioni sulla presenza di discontinuità strutturali (faglie, superfici di scorrimento, etc.), sulla presenza ed andamento nel sottosuolo delle falde acquifere e sull'individuazione di fenomeni di inquinamento delle falde e dei suoli.

Il metodo geoelettrico risulta, infatti, tra i più idonei per l'individuazione e la definizione di volumi contaminati eventualmente presenti in suoli e falde, in quanto le caratteristiche elettriche del sottosuolo sono fortemente influenzate dalla presenza di sostanze inquinanti, sia di natura inorganica che organica. Di conseguenza si possono ottenere informazioni di dettaglio sui percorsi d'infiltrazione degli inquinanti, spesso molto articolati, e sull'evoluzione nel tempo del processo di inquinamento, qualora l'indagine geoelettrica venga ripetuta periodicamente.

### 5.1 Principi generali

In questo lavoro si presenta una tipologia d'approccio utilizzata per l'analisi dei dati ottenuti con il metodo geoelettrico. Di fatto esso rappresenta una metodologia di ricognizione capace di individuare la distribuzione più probabile di anomalie di resistività, visualizzando la geometria dei corpi sepolti all'interno del volume del sottosuolo esplorato.

Tale approccio si differenzia da quelli adottati nei metodi classici d'inversione, i quali, basandosi sul procedimento della deconvoluzione dei minimi quadrati, operano un confronto tra il modello del sottosuolo ottenuto sperimentalmente ed un modello teorico, attraverso test di bontà del confronto. Ciò





implica, però, l'assegnazione a priori di alcuni parametri da parte dello sperimentatore, per interpretare il problema geofisico.

Il metodo d'inversione tomografica qui utilizzato si svincola da questa procedura, utilizzando un algoritmo che è completamente indipendente dai parametri introdotti a priori.

Il lavoro di ricerca realizzato in questo lavoro si sviluppa nel seguente modo:

1. Pianificazione delle operazioni di campagna effettuate nella discarica, definendo le tecniche di acquisizione dati di resistività apparente lungo i profili scelti, e le tecniche utilizzate per l'abbattimento del rumore sul segnale utile.
2. Presentazione del risultato dell'analisi dei dati sottoposti ad una valutazione comparativa attraverso il tracciamento di una famiglia di isolinee di resistività apparente. Tale rappresentazione di fatto viene definita come una pseudosezione di resistività del sottosuolo lungo il profilo scelto.
3. Il metodo d'interpretazione sopra citato viene applicato ai dati ottenuti nella discarica, con l'intento di individuare e definire i volumi contaminati eventualmente presenti nel terreno, e per verificare la tenuta dell'invaso.

#### **5.1.1 Dispositivi elettrodi dipolari**

I dispositivi elettrodi *dipolari* costituiscono una famiglia di dispositivi molto importante, caratterizzata dal fatto che in essi gli elettrodi di corrente A e B, sono fra loro molto ravvicinati rispetto alla distanza alla quale si valutano i loro effetti, tanto da potersi considerare come un dipolo. La valutazione degli effetti del dipolo di corrente AB viene effettuata tramite un secondo dipolo MN, detto di tensione.

La tecnica della geoelettrica *dipolare di superficie* consiste nella realizzazione di un'immagine 2D di estremo dettaglio del comportamento areale della resistività elettrica lungo il piano della sezione verticale passante per i profili scelti per la prospezione.

La notevole risoluzione fornita da tale tecnica permette di discriminare molto più efficacemente i contrasti di resistività esistenti nel sottosuolo. In particolar modo, il metodo geoelettrico risulta tra i più idonei per l'individuazione e la definizione delle acque eventualmente presenti nei suoli e nelle falde, in quanto le caratteristiche elettriche del sottosuolo sono fortemente influenzate dalla sua presenza.

Il procedimento di campagna per la realizzazione d'una pseudo-sezione con la tecnica dipolare assiale è mostrato schematicamente nella figura:



Attraverso i due elettrodi di corrente A e B si immette una corrente elettrica di intensità nota nel sottosuolo. La misura di tensione, creata dal flusso di corrente, è effettuata mediante il dipolo di tensione M e N.

La procedura tomografica di campagna consiste nell'eseguire vari transetti lungo il tracciato, ciascuno dei quali corrisponde ad un'assegnata posizione di uno dei due dipoli lungo il profilo, che viene mantenuto fisso, mentre l'altro dipolo si allontana progressivamente da questo lungo il medesimo profilo, assegnando valori crescenti ad  $n$  (1, 2, .....N ).

Le resistività apparenti, distribuite nei punti della griglia che si viene a formare come conseguenza delle diverse disposizioni mutue dei due dipoli, vengono successivamente sottoposte ad una valutazione comparativa, che si concretizza nel tracciamento di una famiglia di isolinee di resistività apparente. Il quadro d'insieme che ne deriva, ulteriormente rifinito con l'uso di una scala di colori o di grigi o con altri mezzi di contrasto tra settori contigui, rappresenta di fatto una *pseudo-sezione* del sottosuolo lungo il profilo scelto.

## 5.2 Modelli di resistività 2D

Un sondaggio elettrico 2D è un'indagine bidimensionale che permette lo studio delle variazioni di resistività sia lungo la direzione verticale che lungo una direzione orizzontale. Con le configurazioni dell'array precedentemente descritte è possibile compiere misure di resistività apparente dalle quali, attraverso un processo di inversione, si deduce una sezione di resistività 2D (tomografia elettrica) del sottosuolo.

Oltre a permettere lo studio di strutture geometricamente complesse ed articolate, questo tipo di indagine può essere applicato anche in presenza di irregolari morfologie del terreno; ovviamente l'attendibilità del risultato dipende anche dalla conoscenza dell'andamento topografico della zona indagata.

Per l'inversione dei dati geoelettrici acquisiti in campagna è stato utilizzato il software Res2Dinv (Geotomo Software). Il processo di inversione ha la prerogativa di cercare di individuare un modello geometrico del sottosuolo che sia compatibile con le misure raccolte. Il software Res2Dinv utilizza un metodo di inversione basato sui minimi quadrati che permette di determinare un modello bidimensionale di resistività del sottosuolo (pseudosezione).

Il punto di partenza per il processo di inversione sono i dati acquisiti in campagna ed opportunamente formattati per essere letti dal software (.dat). In base alle condizioni ambientali in cui si è svolta la fase di acquisizione, è possibile un'attenta calibrazione del modello teorico attraverso la configurazione di diversi parametri. Il software attraverso una serie di iterazioni successive mira a ridurre la differenza tra i valori di resistività apparente misurati e quelli calcolati dal modello teorico.



Il modello di riferimento utilizzato dal software è basato su una suddivisione a blocchi in cui la dimensione e la posizione delle celle è fissa. I parametri del modello sono i valori delle celle, mentre i dati sono i valori di resistività misurati. Nell'inversione ad ogni cella viene assegnato un valore di resistività (calcolato) ottenuto invertendo i valori di resistività misurati.

I risultati ottenuti dalle inversioni sono delle tomografie elettriche che rappresentano modelli di resistività del sottosuolo ad alta risoluzione, il cui errore, rispetto alle misure compiute, è segnalato dal parametro RMS (Root Mean Square error).

### 5.3 Strumentazione utilizzata

Per l'esecuzione delle misure geoelettriche di cui si discute è stato utilizzato un georesistivometro monocanale realizzato dalla ditta GF Instruments mod. ARES G4, alimentato con batteria al piombo ricaricabile. Questo strumento è stato progettato per effettuare una serie completa di stendimenti geoelettrici: sondaggi elettrici verticali, profili di resistività, misure multi-elettrodo per tomografie elettriche 2D e 3D, misure di polarizzazione indotta e di potenziali spontanei.

Esso è costituito dall'apparato di energizzazione (immette corrente nel terreno attraverso gli elettrodi A e B), e dall'apparato di ricezione (misura la differenza di potenziale tra gli elettrodi di tensione M e N); racchiude, infatti, tre unità principali: *trasmettitore*, *ricevitore* e *microprocessore*.

Il *trasmettitore*, isolato elettricamente, è costituito da un generatore di tensione in continua, provvisto di commutatore automatico della polarità, per l'invio nel sottosuolo, tramite gli elettrodi del dipolo energizzante, di un flusso di corrente continua la cui intensità può variare fino a raggiungere un'intensità massima di 2.0 A ed un voltaggio compreso tra 10 e 550 V con una potenza massima di 300 W.

L'Ares G4 viene collegato ad un commutatore con cui è possibile programmare la gestione automatica degli elettrodi dello stendimento, ottenendo un elevato numero di combinazioni tra gli elettrodi nonché un notevole risparmio di tempo.

Al cavo multielettrodico del georesistivometro sono collegati contemporaneamente tutti gli elettrodi attraverso appositi connettori. In base all'array prescelto, l'unità switch (commutatore) seleziona le coppie di elettrodi da energizzare.

La durata della fase di energizzazione, ossia di immissione di corrente nel terreno, è stata determinata nel corso della misura in base al rapporto segnale-rumore caratteristico del sito. Il *ricevitore* è costituito da un millivoltmetro digitale collegato a un *microprocessore*, che memorizza i valori di tensione ai capi degli elettrodi del dipolo di misura con un passo di campionamento regolare e tale da rientrare un numero intero di volte nel ciclo completo di un'onda di corrente. Alla fine di ogni ciclo, inoltre, un software di esercizio fornisce il valore della resistenza (visualizzato su un display digitale in Ohm-m)



come rapporto tra la media di tutte le stime della tensione di picco, riferite ai cicli di corrente via via susseguirsi, e l'intensità della corrente preselezionata.

È opportuno qui evidenziare che la procedura computerizzata appena descritta, detta *stacking* mira ad isolare il segnale utile di tensione, ovvero il segnale direttamente collegato alla corrente di energizzazione, mediante il processo di rimozione immediata del fattore di disturbo stazionario (generato da fenomeni di polarizzazione spontanea), e di abbattimento progressivo di quello casuale (provocato da sorgenti naturali e/o artificiali spurie di vario genere).

Il primo obiettivo si raggiunge facilmente grazie all'inversione della polarità del flusso di corrente continua nel sottosuolo, cioè mediante l'invio di onde quadre di corrente.

Il secondo obiettivo, invece, viene raggiunto tramite quella proprietà dei processi stocastici che afferma che la somma di  $m$  elementi di un rumore casuale comunque selezionati ne attenua la portata rispetto ad un segnale coerente di un fattore pari alla radice quadrata di  $m$ . La scelta del numero di cicli da utilizzare è legata all'entità del disturbo: quanto più esso è forte tanto maggiore deve essere il numero di cicli. Lo strumento utilizzato è dotato di un software interno che regola automaticamente il numero il numero di cicli di misura sulla base delle impostazioni dell'operatore, finché non viene raggiunto un segnale ottimale.

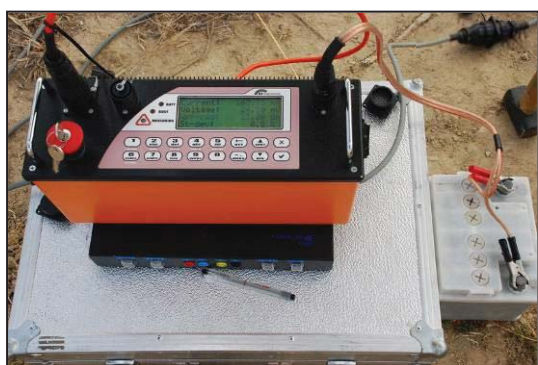


Foto 1: Strumento di misura Ares G4

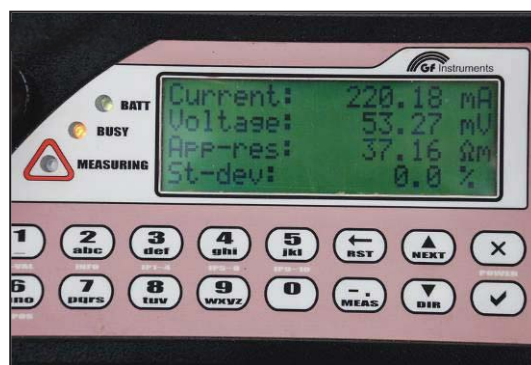


Foto 2: Particolare del display



Foto 3: Connessione tra cavi multipolari ed elettrodi



Foto 4: Connessione tra le sezioni di cavi multipolari





## 5.4 Operazioni di campagna

L'indagine geoelettrica eseguita ha riguardato l'esecuzione di n° 2 tomografie geoelettriche eseguite con metodologia dipolare distribuiti in modo da poter fornire delle prime indicazioni stratigrafiche e valutare l'estensione dei depositi alluvionali a composizione prevalentemente sabbiosa.

Le due sezioni geoelettriche hanno una lunghezza di 192.5 e 235.0 m e hanno rispettivamente raggiunto una profondità di indagine di circa 40 e 45 m.

Fig. 6: mappa delle sezioni geoelettriche eseguite.







**Tabella 5: ubicazione vertici stendimenti in coordinate chilometriche WGS 84 e lunghezze stendimenti**

Sigla	inizio	fine	Lunghezza stendimento
TG1	476 679 m E 4 423 046 m N	476 561 m E 4 423 474 m N	176.0 m
TG2	476 388 m E 4 423 200 m N	476 630 m E 4 423 130 m N	258.5 m
TG3	476 905 m E 4 423 131 m N	476 918 m E 4 423 257 m N	126.5 m

I profili geoelettrici sono stati correttamente ubicati con l'uso di un GPS da carteggio, che ha consentito un errore massimo dell'ordine metrico. Le misure di resistività sono state effettuate mediante l'infissione nel terreno di elettrodi in acciaio inox a forma di fioretto con sezione circolare con  $\Phi$  di 12 mm e lunghezza di circa 40 cm.

## 5.5 Repertorio fotografico indagini geoelettriche

**Foto 5, 6, 7: esecuzione profilo TG1**







**Foto 8, 9, 10, 11: esecuzione profilo TG2**



**Foto 12, 13, 14: esecuzione profilo TG3**







## 6 ANALISI DELLE SEZIONI GEOELETTRICHE

Nel presente capitolo vengono presentati i risultati ottenuti dalle tomografie geoelettriche eseguite il 18 maggio 2022, e successivamente elaborate con i relativi dettagli tecnici e l'interpretazione stratigrafica e geologica. Per ottenere una chiave interpretativa omogenea e funzionale si ha la necessità di utilizzare una rappresentazione grafica delle tomografie che permetta una immediata comprensione dei livelli di interesse.

Facendo riferimento alle misure di resistività è importante considerare le proprietà degli spessori investigati determinanti per la risposta geoelettrica. Allo stesso tempo è cruciale valutare i processi geologici che influiscono direttamente sulla resistività propria degli spessori. Questi processi, tranne rare eccezioni, tendono generalmente ad abbassare i valori di resistività.

Il contesto geologico obbliga inoltre ad inserire all'interno del quadro di analisi l'eventuale alterazione delle rocce incassanti che generalmente fa diminuire i valori di resistività di ordini di grandezza. La presenza di acquiferi e di livelli argillosi determinano un abbattimento dei valori di resistività. Ci si attende inoltre l'influenza dell'alterazione per idrolisi dei minerali primari che determina una sensibile diminuzione dei valori di resistività. L'insieme di questi fattori è da tenere in considerazione nell'interpretazione dei rilievi geofisici.

Sono state rappresentate le interpretazioni dei profili ottenuti con la configurazione dipolare, alla misura di resistività è stata abbinata anche quella di caricabilità.

Sia nella misura di resistività che di caricabilità si studia l'andamento di un campo elettrico in superficie, con la differenza che, nel caso della resistività, si studia il campo generato dalla circolazione della corrente nel sottosuolo, durante i periodi di invio della corrente stessa; per le misure di polarizzazione indotta (PI), invece, si studia la variazione del campo elettrico dopo l'interruzione di corrente o in seguito a variazioni delle caratteristiche del segnale elettrico inviato.

Per quanto riguarda l'effetto capacitivo o di caricabilità, si può dire che esso rappresenta l'attitudine di un determinato materiale ad accumulare cariche elettriche di polarità opposta (cioè a "caricarsi" come un condensatore elettrico) lungo la superficie di discontinuità tra mezzi a resistività diversa, durante l'invio di corrente nel sottosuolo, ed a permettere la "scarica" negli istanti immediatamente successivi all'interruzione della corrente. In termini pratici i terreni che presentano i maggiori effetti capacitivi, cioè una elevata "caricabilità", sono quelli in cui si ha la contemporanea presenza di parti molto conduttive, affiancate ad altre molto resistive, senza che si verifichi una marcata continuità delle prime. In questo caso, il visto il contesto geologico in cui si è operato, la maggiore caricabilità riscontrata in certi settori può essere giustificato con la presenza di acque sotterranee, le quali indicano un effetto "capacitivo" rispetto al campo elettrico generato durante le operazioni di misura.



Per quanto riguarda l'individuazione di acque sotterranee, poiché l'acqua di falda praticamente non è soggetta a fenomeni di polarizzazione indotta, e gli acquiferi costituiti da materiale più o meno grossolano hanno una caricabilità bassissima, quasi nulla, i settori potenzialmente sede di acquiferi sono stati individuati nei settori a caricabilità nulla-molto bassa.

Ai fini di una efficace verifica dell'indagine geoelettrica è consigliabile eseguire delle indagini dirette in punti ritenuti particolarmente significativi, in particolare quelli più resistivi che dovrebbero indicare la presenza di materiale più grossolano, di contro quelli più conduttivi dovrebbero indicare la presenza di sabbie-argille. Pertanto, se i punti meno promettenti dovessero avere delle caratteristiche complessivamente soddisfacenti, di conseguenza i settori con resistività intermedia sarebbero comunque adatti ad essere coltivati.

Nelle sezioni geoelettriche sono stati pertanto indicati dei punti che si ritiene possa essere utile esplorare con indagini dirette con carotaggi, oppure con scavi e trincee.

## 6.1 Sezione TG 1

Il profilo ha una lunghezza di 176 m, con orientamento sud-est – nord-ovest, è riuscito ad investigare fino ad una profondità di circa 35 m dal piano di campagna.

Dall'elaborazione dei dati ottenuti si è potuto constatare la presenza di una copertura alluvionale caratterizzata da valori di resistività compresi tra un minimo di circa 35  $\Omega$ m e valori massimi di circa 85  $\Omega$ m, attribuibili a terreni prevalentemente sabbiosi estesi per la gran parte della lunghezza del profilo, con spessore variabile tra qualche metro fino a circa 5 m di spessore.

Si nota la presenza di una lente di materiale con valori di resistività compresi tra un minimo di circa 130  $\Omega$ m e valori massimi di circa 200  $\Omega$ m che indicano la presenza all'inizio del profilo di materiale grossolano, praticamente superficiale, ma che tende ad approfondirsi dopo circa 30 m dall'inizio del profilo, con uno spessore compreso tra circa 5 m fino a circa 10 m.

In particolare, si riscontra un settore particolarmente resistivo (200  $\Omega$ m) a circa 132 m dall'inizio del profilo, a circa 10 m di profondità, che individua una probabile presenza di materiale grossolano (ghiaie e ciottoli).

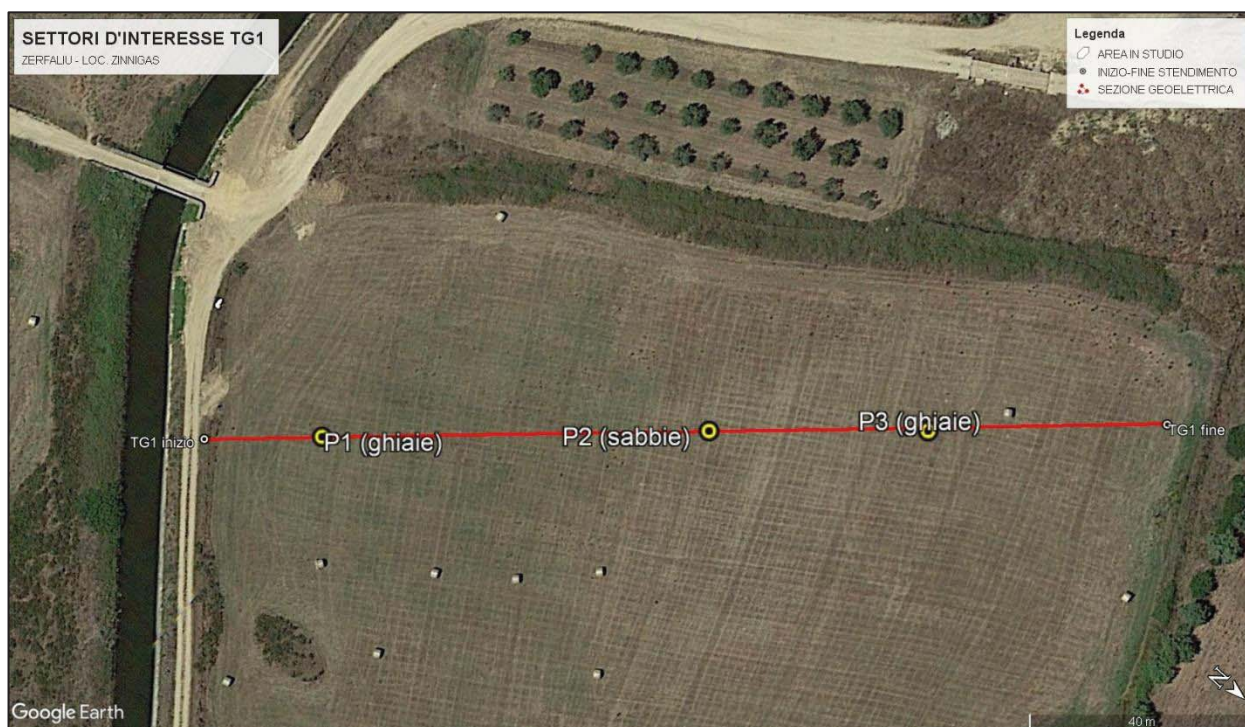
Ad una profondità di circa 10 – 15 m i valori di resistività misurati si riducono a circa 15-35  $\Omega$ m, individuando una possibile di sabbie, la falda dovrebbe attestarsi a non meno di 25 m di profondità.



**Tabella 6: punti di interesse in TG1 indicati in coordinate chilometriche WGS 84**

Sigla	Coordinate	Materiale presunto
P1	473 664 m E 4 423 062 m N	GHIAIE
P2	473 616 m E 4 423 114 m N	SABBIE
P3	473 590 m E 4 423 143 m N	GHIAIE

**Fig. 7: mappa della sezione geoelettrica TG1**



## 6.2 Sezione TG 2

Il profilo ha una lunghezza di 258.5 m, con orientamento grosso modo ovest-est, è riuscito ad investigare fino ad una profondità di circa 60 m dal piano di campagna.

Dall'elaborazione dei dati ottenuti in campagna, si è potuto constatare nella parte iniziale del profilo fino a circa 70 m, la presenza di una copertura di terreni costituiti da sabbie ghiaiose, piuttosto sottile, al massimo di qualche metro di spessore, con valori di resistività misurati medi di circa 20  $\Omega$ m.

Praticamente per tutta l'estensione della sezione i valori di resistività misurati tendono a diminuire individuando un livello che si estende praticamente per tutta la lunghezza del profilo con valori di resistività sostanzialmente omogenei compresi tra circa 8  $\Omega$ m e 15  $\Omega$ m.

La caricabilità si riduce fortemente a circa 25-30 m di profondità, individuando un settore che potrebbe ospitare degli acquiferi.

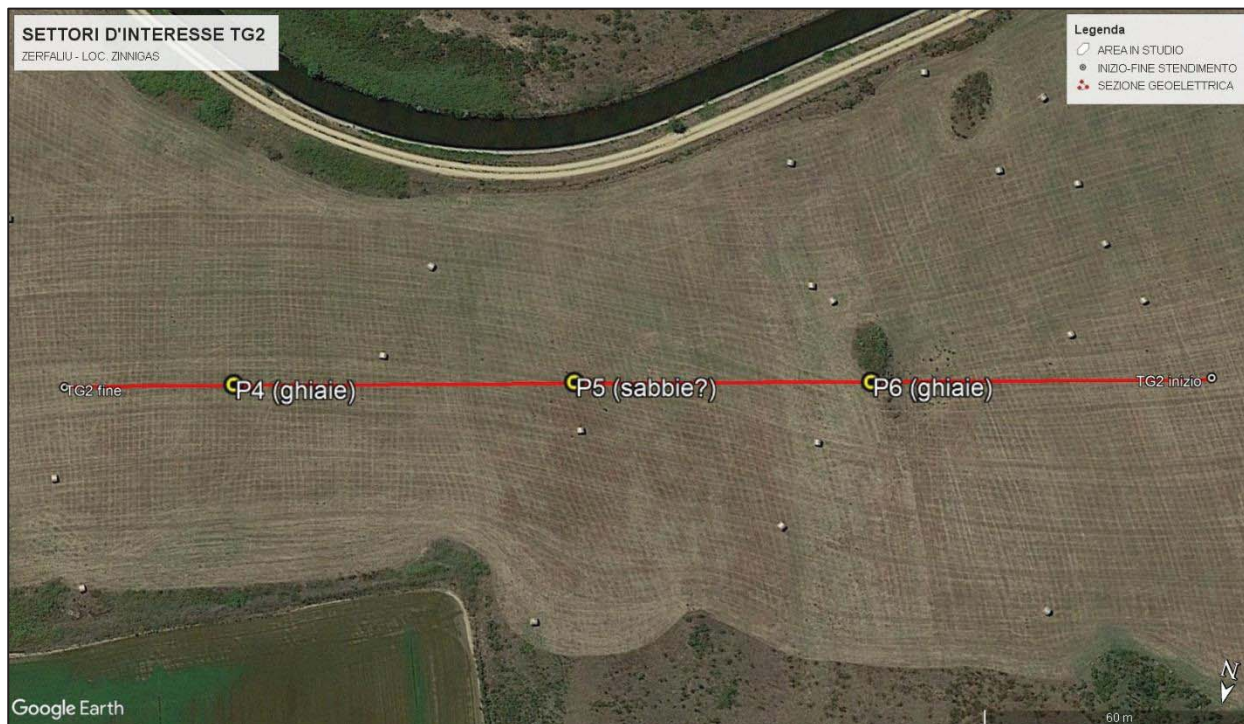




**Tabella 7: punti di interesse in TG2 indicati in coordinate chilometriche WGS 84**

Sigla	Coordinate	Materiale presunto
P4	473 842 m E 4 423 189 m N	GHIAIE
P5	473 768 m E 4 423 168 m N	SABBIE ?
P6	473 703 m E 4 423 150 m N	GHIAIE

**Fig. 8: mappa della sezione geoelettrica TG2**



### 6.3 Sezione TG 3

Il profilo ha una lunghezza di 126.5 m, con orientamento circa sud-nord, è riuscito ad investigare fino ad una profondità di circa 30 m dal piano di campagna.

Dall'elaborazione dei dati ottenuti si è potuto constatare la presenza di una copertura di terreni prevalentemente sabbiosi, piuttosto spessi nella parte iniziale del profilo, fino a circa 44 m, per poi assottigliarsi fino a circa 5 m di spessore, con valori di resistività misurati compresi tra un minimo di circa 50  $\Omega$ m e valori massimi di circa 100  $\Omega$ m, variabili in funzione del tenore di umidità e dell'abbondanza del materiale grossolano. In superficie sono stati misurati in generale bassi valori di resistività e caricabilità, indicando la presenza di sabbie con probabili bassi tenori di argilla.



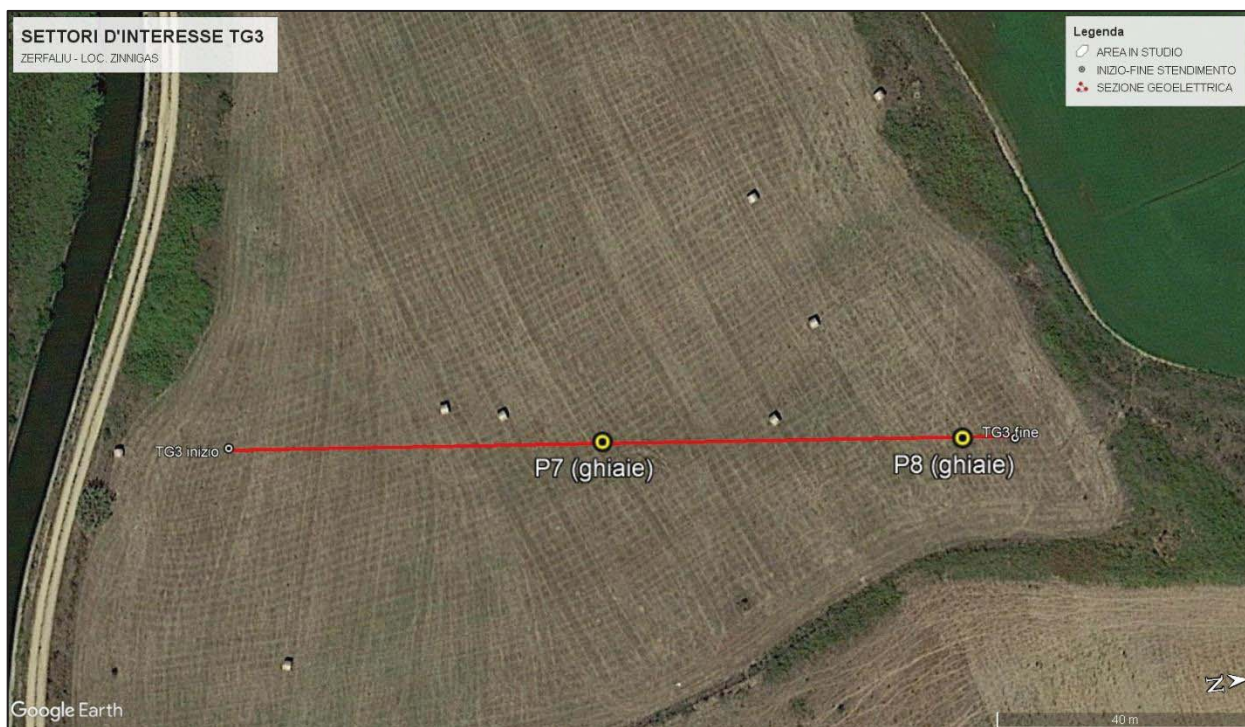
Il settore con maggiore resistività, quindi con più probabile presenza di materiale grossolano è distribuito lungo una lente ghiaiosa, spessa circa 5-10 m, che si estende a partire da circa 44 m dall'inizio del profilo, fino alla sua fine.

Ad una profondità di circa 10 – 15 m i valori di resistività misurati si riducono a circa 15-35  $\Omega$ m, con una caricabilità bassa ma sempre evidente, non si hanno pertanto evidenze per la presenza di acquiferi nella sezione.

**Tabella 8: punti di interesse in TG3 indicati in coordinate chilometriche WGS 84**

Sigla	Coordinate	Materiale presunto
P7	473 911 m E 4 423 192 m N	GHIAIE
P8	473 917 m E 4 423 249 m N	GHIAIE

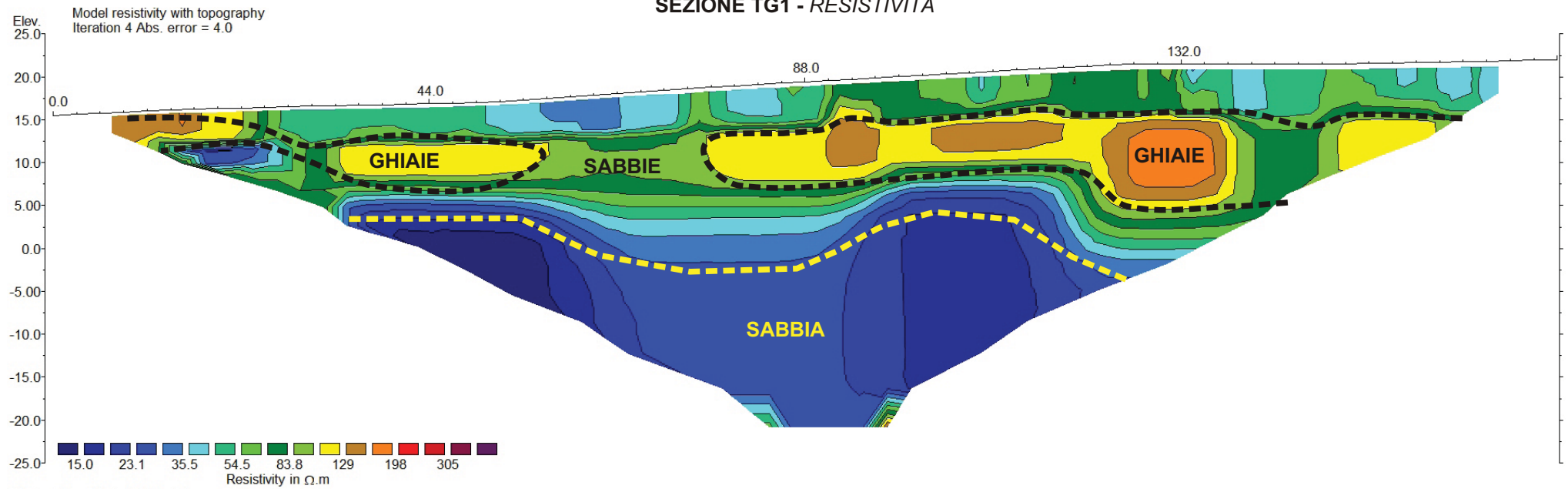
**Fig. 9: mappa della sezione geoelettrica TG2**



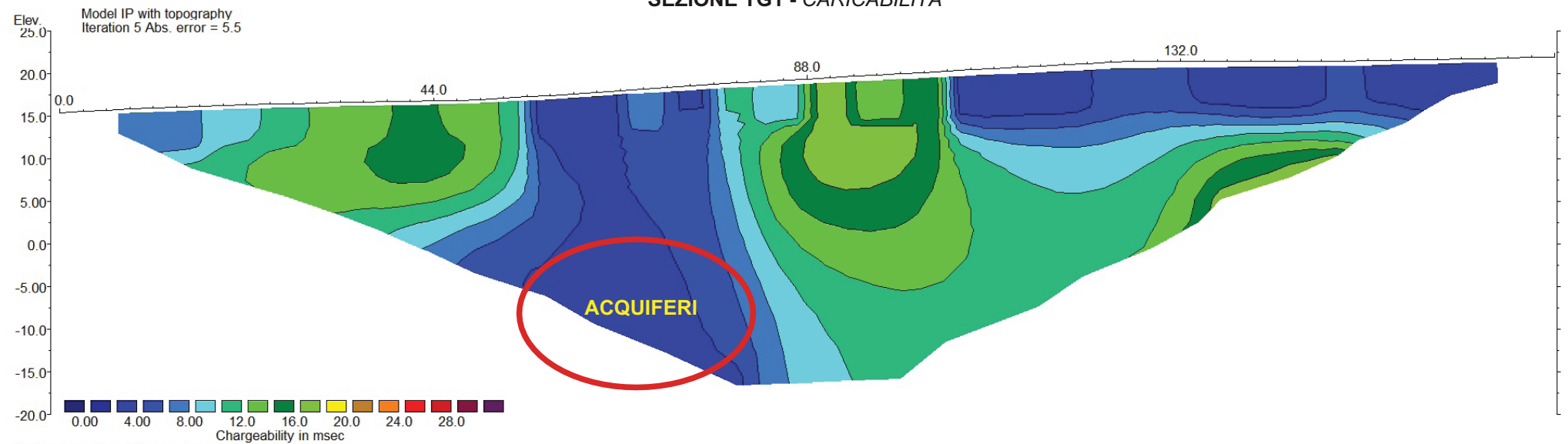
Villacidro 25/05/2022

ORDINE DEI GEOLOGI  
REGIONE SARDEGNA  
N. 407 Dott. Geol. GIANCARLO CARBONI

# SEZIONE TG1 - RESISTIVITÀ



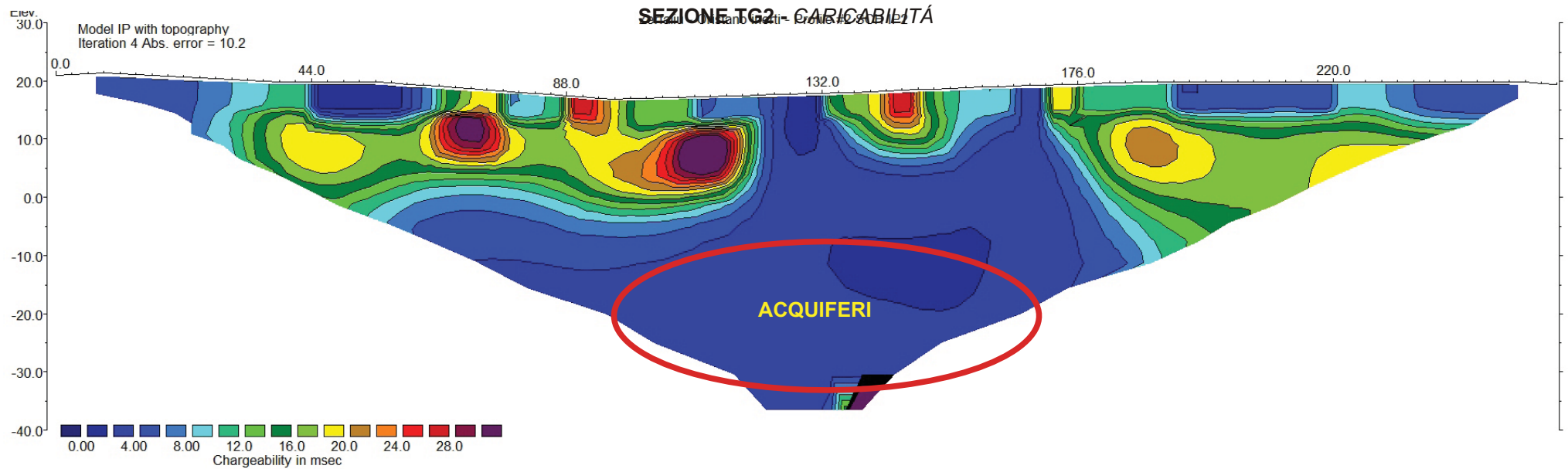
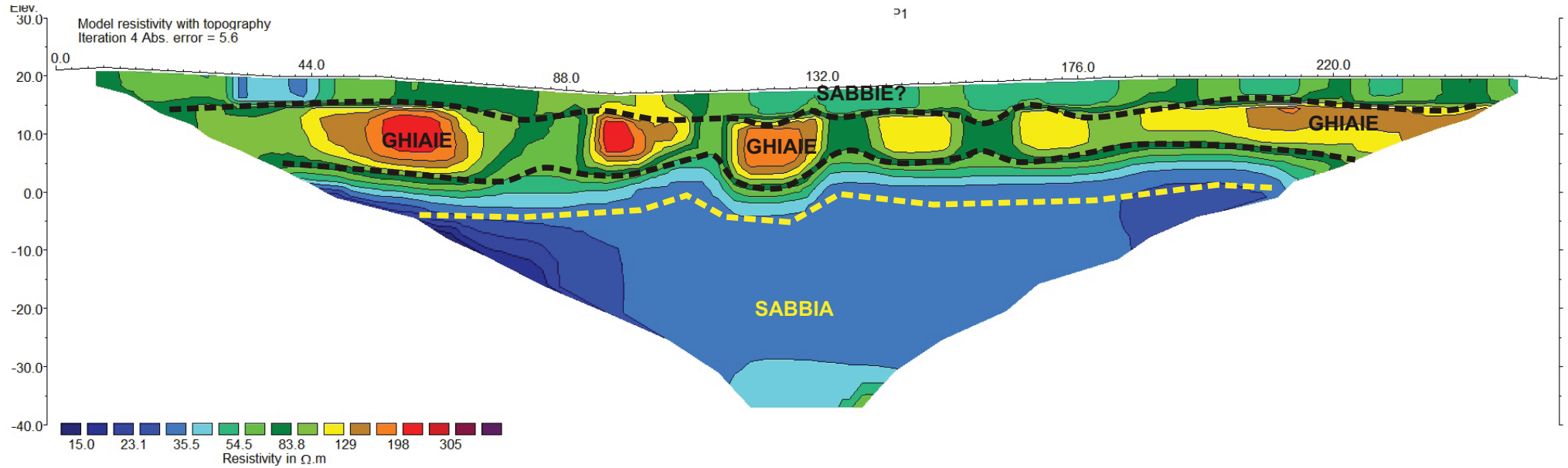
# SEZIONE TG1 - CARICABILITÀ



Horizontal scale is 28.56 pixels per unit spacing  
Vertical exaaggeration in model section display = 1.00  
First electrode is located at 0.0 m.  
Last electrode is located at 176.0 m.

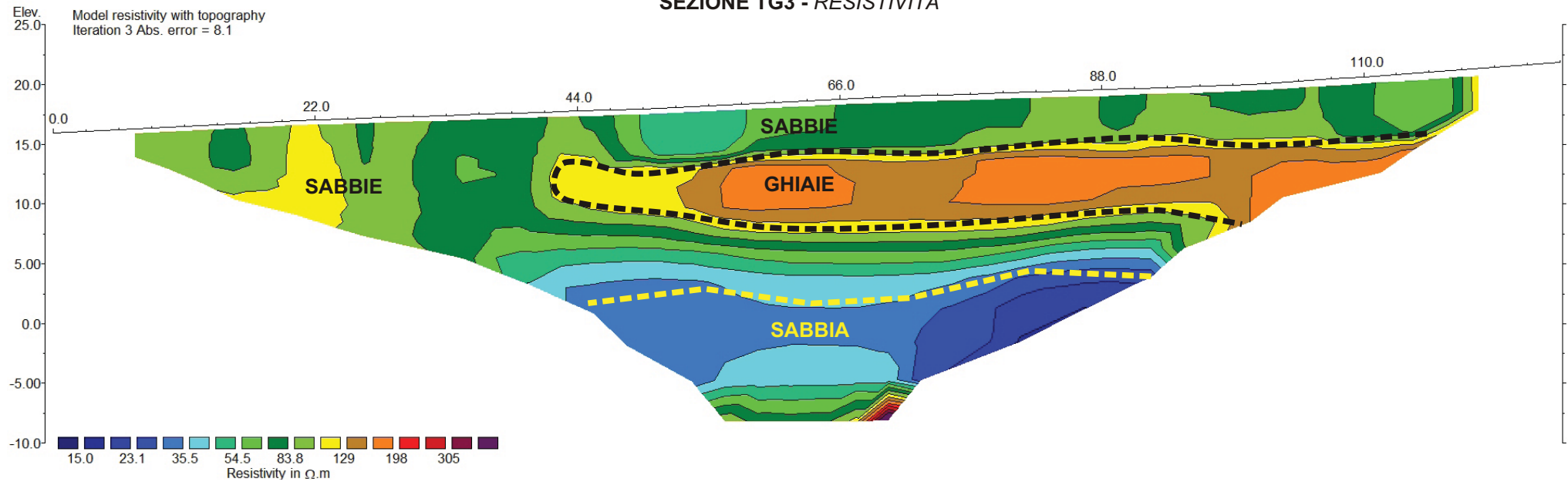


## SEZIONE TG2 - RESISTIVITÀ

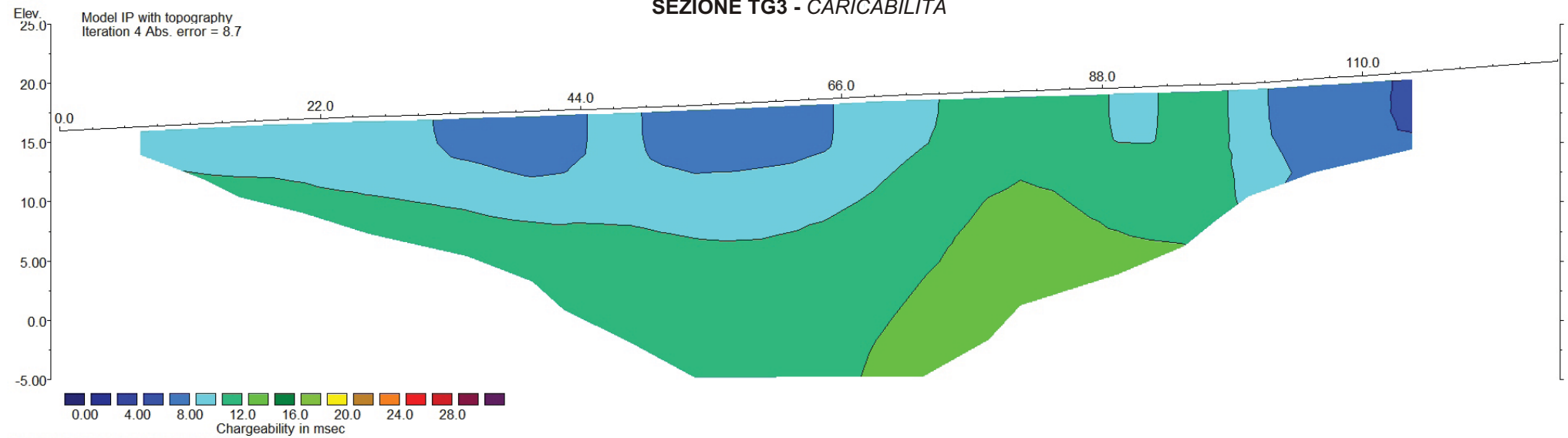


Horizontal scale is 19.45 pixels per unit spacing  
Vertical exaggeration in model section display = 1.00  
First electrode is located at 0.0 m.  
Last electrode is located at 258.5 m.

### SEZIONE TG3 - RESISTIVITÀ



### SEZIONE TG3 - CARICABILITÀ



Horizontal scale is 39.74 pixels per unit spacing  
Vertical exaggeration in model section display = 1.00  
First electrode is located at 0.0 m.  
Last electrode is located at 126.5 m.