

**COMUNE DI BASTIGLIA (MO)**

**PST.2\_INDAGINI GEOELETTRICHE 3D PER LA CARATTERIZZAZIONE  
STRATIGRAFICA DEL CIMITERO DI BASTIGLIA**

INTERVENTO LOCALE

PER LAVORI DI MANUTENZIONE STRAORDINARIA CON RIFACIMENTO  
DELL'IMPIANTO FOGNARIO E RIPARAZIONE DI PORZIONE PREFABBRICATA  
(BLOCCO A) NEL CIMITERO COMUNALE DI BASTIGLIA POSTO IN VIA IV  
NOVEMBRE

**VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA**

*Analisi Storico-Critica  
Elaborati Grafici Strutturali  
Caratterizzazione Meccanica dei Materiali  
Livello di Conoscenza e Fattori di Confidenza*

**METODO DI VERIFICA ELEMENTI STRUTTURALI: STATI LIMITE D.M. 17.01.2018**

COMMITTENTE – PROPRIETA':

**COMUNE DI BASTIGLIA**  
**R.U.P. Geom. Adriana Barbieri**  
Piazza Repubblica n°57  
41030 Bastiglia (Mo)

TECNICO PROGETTISTA  
E DIRETTORE DEI LAVORI  
DELLE OPERE STRUTTURALI:

**Dott. Ing. FABIO GHELFI**  
Via Andrea Doria, 16  
41012 Carpi (Mo)

## **INDAGINI GEOELETTRICHE 3D PER LA CARATTERIZZAZIONE STRATIGRAFICA**

Si rimanda alla relazione tecnica denominata "INDAGINI SPECIALISTICHE SUI TERRENI DEL CIMITERO DI BASTIGLIA", prodotta dal laboratorio specializzato "Life Srl", a timbro e firma dell'ing. Rachele Ferioli, allegata alla presente documentazione.



## Laboratori Ingegneria Ferrara s.r.l.

sede legale: via Palestro 25 - 44121 Ferrara (FE) - Italy  
sede operativa: via Ascoli 6 - 44019 Gualdo di Voghiera (FE) - Italy  
ufficio 0532.818068 – fax +39.0532.473486 - mobile +39.320.6651813  
web: [www.lifelab.it](http://www.lifelab.it) - mail: [info@lifelab.it](mailto:info@lifelab.it) - pecmail: [lifecert@pec.it](mailto:lifecert@pec.it)



Management  
System  
ISO 9001:2008

[www.tuv.com](http://www.tuv.com)  
ID 9105086584

Committente

COMUNE DI BASTIGLIA

Oggetto

INDAGINI SPECIALISTICHE SUI TERRENI DEL CIMITERO DI BASTIGLIA



Titolo

RAPPORTO CONCLUSIVO DI INDAGINE

Emesso:

ing. Rachele Ferioli

Approvato:

LABORATORI INGEGNERIA  
FERRARA s.r.l.  
Ing. Sergio Tralli  
Partita IVA 01904060389

1556-sub1	Doc59 - Rapporto conclusivo	00	Prima emissione	15/01/2019	comm1556-sub1-doc59-rev00-cimitero bastiglia_geo
Commessa	Codice - Documento	Revisione	Motivazione	Data	Nome file





**INDICE**

1. PREMESSA.....	5
2. ELENCO ALLEGATI.....	6



## 1. Premessa

Su incarico della Committenza, **COMUNE DI BASTIGLIA**, sono state eseguite una serie di indagini specialistiche sui terreni del **CIMITERO** sito a Bastiglia (MO), ad opera delle società "**SONGEO s.r.l.**" ed "**ANFIBIA s.r.l.**" per conto dello scrivente Laboratorio.

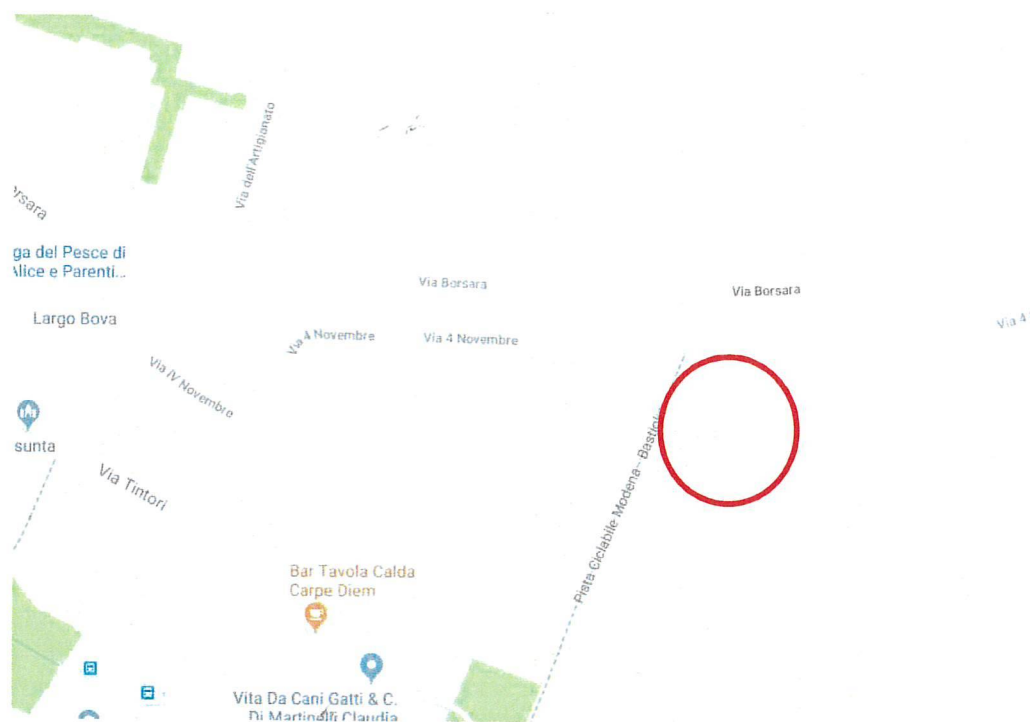


Figura 1: inquadramento cartografico del complesso edilizio in oggetto

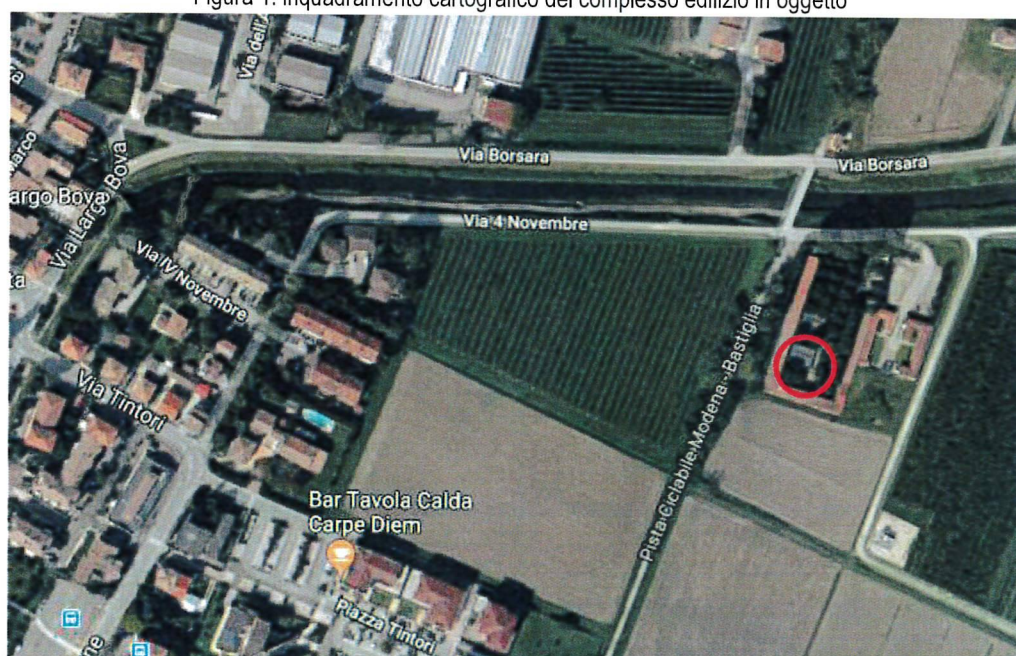


Figura 2: vista aerea con identificazione dell'edificio oggetto di indagine

Le indagini richieste sono volte a fornire gli elementi necessari ai Progettisti per l'analisi e lo studio dei fenomeni di cedimento verificatisi e per la progettazione degli interventi strutturali da eseguire.

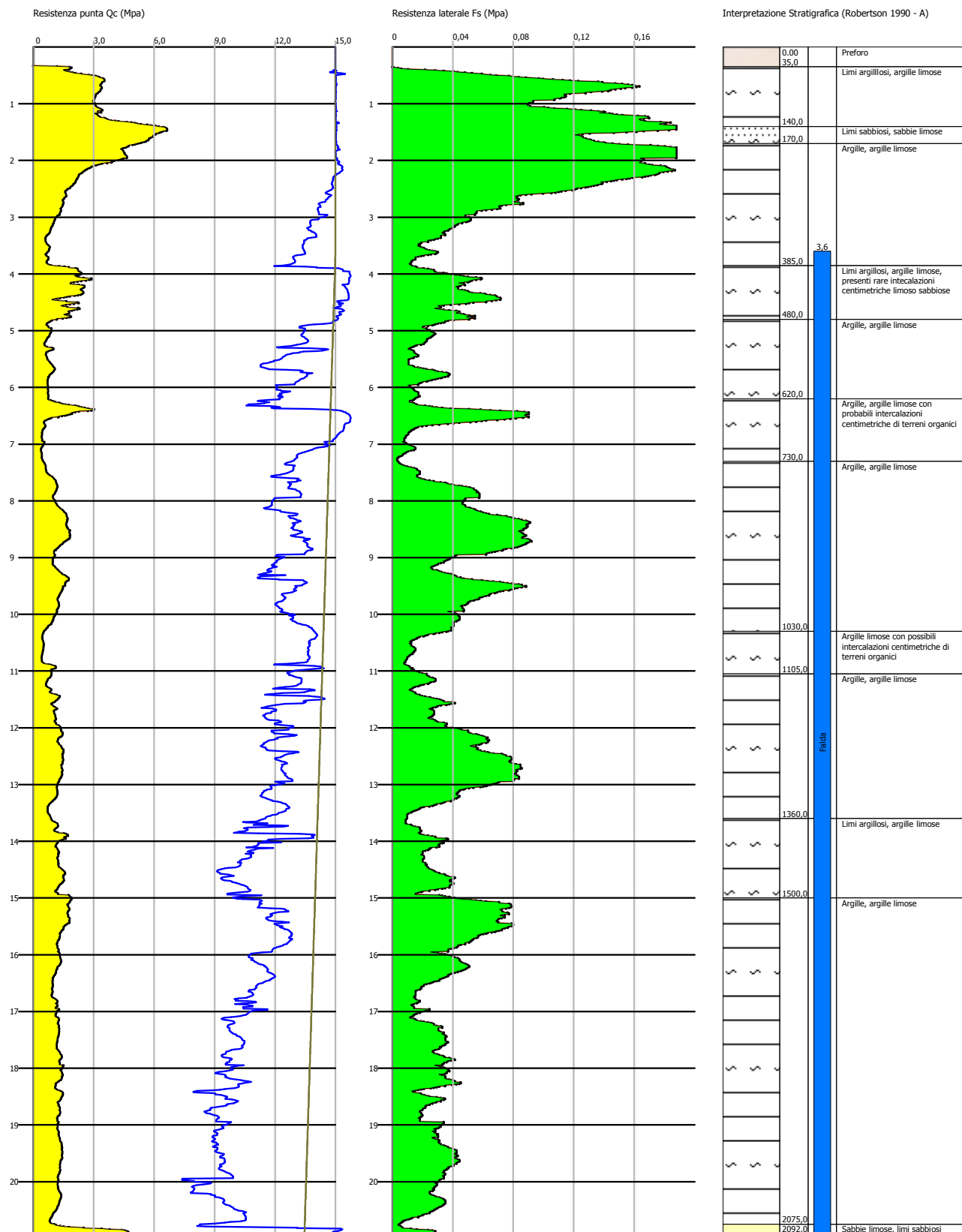
## 2. Elenco allegati

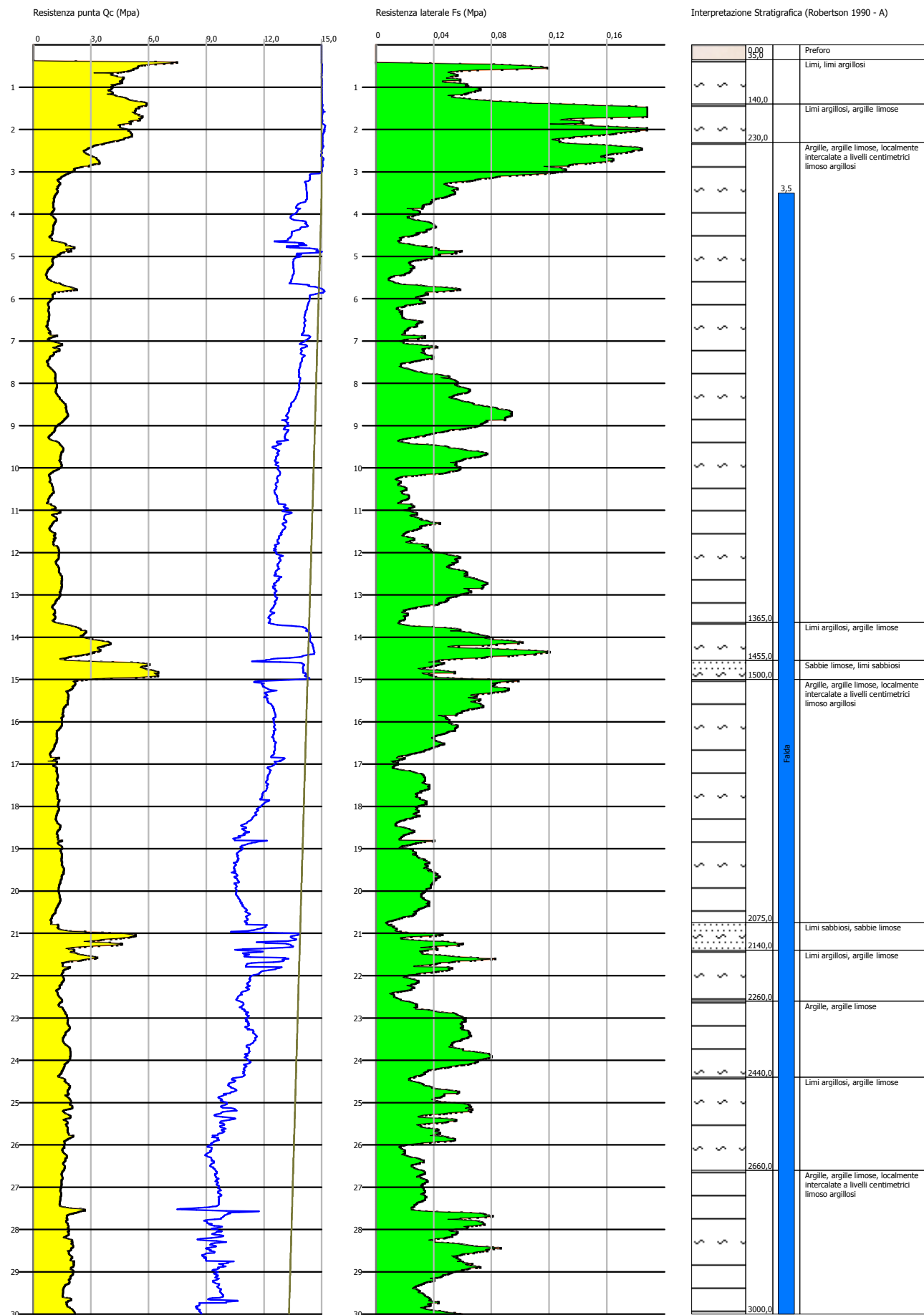
Allegato 1	CPTU e SCPTU
Allegato 2	Indagine geoelettrica 3D

**ALLEGATO 1**  
**CPTU e SCPTU**









## **ALLEGATO 2**

Indagine geoelettrica 3D





## Indagini geoelettriche 3D per la caratterizzazione stratigrafica del Cimitero di Bastiglia (MO)

### Relazione tecnica



codice commessa  
responsabile commessa  
nome documento  
versione  
data

An18167  
Roberta Zambrini  
relazione tecnica  
00  
02 novembre 2018

**anfibia s.r.l.**  
via masello 6 - 44123 ferrara  
p.i.\ cf \ cciaa 01796130381  
roberta zambrini - amministratore

anfibia s.r.l. p.i.\cf\cciaa ferrara 01796130381; rea ferrara 198460; c.s. € 16.000 i.v.  
sede legale: via masello 6 – 44123 ferrara, italia – [www.anfibia.eu](http://www.anfibia.eu) – [info@anfibia.eu](mailto:info@anfibia.eu) – [anfibia@pec.it](mailto:anfibia@pec.it)



sommario

<b>1.</b>	<b>PREMESSA .....</b>	<b>3</b>
<b>2.</b>	<b>RILIEVO GEOELETTRICO 3D .....</b>	<b>4</b>
2.1	PRINCIPI FISICI .....	4
2.2	RILIEVO ERT 3D .....	6
2.3	ELABORAZIONE DEI DATI.....	8
2.4	RISULTATI OTTENUTI .....	13
<b>3.</b>	<b>ALLEGATO A – PLANIMETRIA DEL RILIEVO.....</b>	<b>17</b>
<b>4.</b>	<b>ALLEGATO B – RISULTATI ERT 3D .....</b>	<b>18</b>

## 1. Premessa

La presente relazione è la sintesi finale dell'indagine geoelettrica 3D ERT effettuata allo scopo di caratterizzare i terreni sottostanti al cimitero del Comune di Bastiglia dal punto di vista stratigrafico. In particolare l'indagine è stata richiesta conseguentemente ad un cedimento che ha interessato una porzione del blocco A, come mostrato in rosso nella figura seguente.



Figura 1 Ubicazione dell'area indagata nel Cimitero di Bastiglia

Nello specifico, nella giornata del 11 ottobre 2018, sono stati realizzati n° 2 acquisizioni di tomografia elettrica 3D sullo stesso stendimento rettangolare di dimensione 32x27., con totali n°72 elettrodi, di cui 18 per lato, con spaziatura pari a 1.8m sul lato più lungo e 1.55m sul lato più corto, e profondità medie di esplorazione fino a 7m circa. Le misure di resistività "cross cable" sono state acquisite con configurazione polo-dipolo e dipolo-dipolo.

Nei paragrafi successivi saranno esplicitati i principi teorici su cui si basano i metodi impiegati e negli Allegati A e B la planimetria dei rilievi e i risultati ottenuti per ogni metodologia.

## 2. Rilievo Geoelettrico 3D

### 2.1 Principi fisici

La geoelettrica consiste nella determinazione sperimentale della distribuzione di resistività caratterizzante la struttura elettrica del sottosuolo mediante l'utilizzo di elettrodi a diversa configurazione.

Ogni disomogeneità presente nel sottosuolo (per disomogeneità s'intendono corpi a diversa capacità di conduzione elettrica) viene rilevata poiché essa deflette le linee di corrente e distorce pertanto la normale distribuzione di potenziale elettrico. Inoltre, ad ogni litologia è associata una determinata resistività, proprietà intrinseca dei materiali (Tabella 1), e con le indagini geoelettriche è possibile effettuare vere e proprie ricostruzioni stratigrafiche del sottosuolo ed individuare oggetti sepolti o discontinuità.

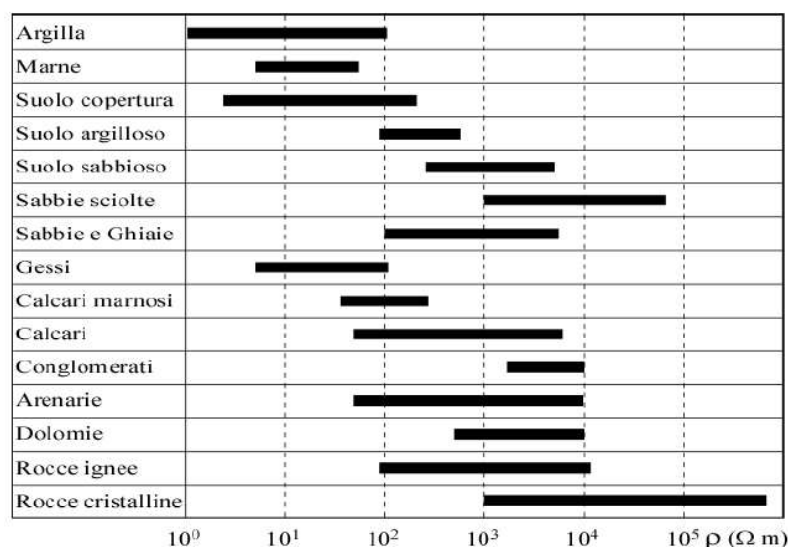


Tabella 1: Resistività tipiche dei terreni (ohm\*m)

Considerando che lo scopo del rilievo era la localizzazione di un'eventuale cisterna interrata che poteva trovarsi anche sotto aree non di proprietà di RE.MA.IND. Srl, è stata proposta questa metodologia d'indagine geofisica alla Committente per la sua elevata risoluzione e possibilità di attraversare i terreni su due estremità, nonché per la sensibilità della tecnica alla presenza di discontinuità all'interno dei terreni.

del sottosuolo, attraverso una serie di misure opportunamente effettuate dalla superficie.

Se agli estremi di un conduttore si applica una differenza di potenziale  $\Delta V$ , in esso passerà una corrente di intensità  $I$  che è legata alla differenza di potenziale dalla legge di Ohm:

$$R = \Delta V / I$$

dove  $R$  è la resistenza elettrica che dipende dalla natura e dalle caratteristiche geometriche del conduttore.

Nel caso specifico, la formulazione della suddetta legge diventa

$$\rho = K (\Delta V / I)$$

in cui  $K$  è il coefficiente geometrico del conduttore, che dipende strettamente dal dimensionamento dello stendimento elettrodico, e  $\rho$  rappresenta una proprietà intrinseca del materiale che indica la resistenza al passaggio della corrente. Questo fattore è noto col nome di resistività, si misura in Ohm\*metro e fornisce elementi utili per l'individuazione della natura dei litotipi investigati.

Il valore di tale parametro dipende dalla composizione mineralogica dei terreni, dalla presenza di eventuali fluidi di saturazione, dalla temperatura, dalla porosità e dal grado di cementazione.

La misura delle resistività del terreno viene effettuata, nella maggior parte dei casi, utilizzando dispositivi 2D riconducibili ad uno schema di configurazione a quadrupolo. Uno strumento, denominato georesistivimetro, immette nel sottosuolo mediante due elettrodi - in genere indicati con A e B - una corrente nota  $I$  e misura, tramite due altri elettrodi - M e N - la differenza di potenziale  $\Delta V$  che tale corrente produce nei punti del terreno nel quale sono stati posti gli elettrodi stessi (Figura 2).

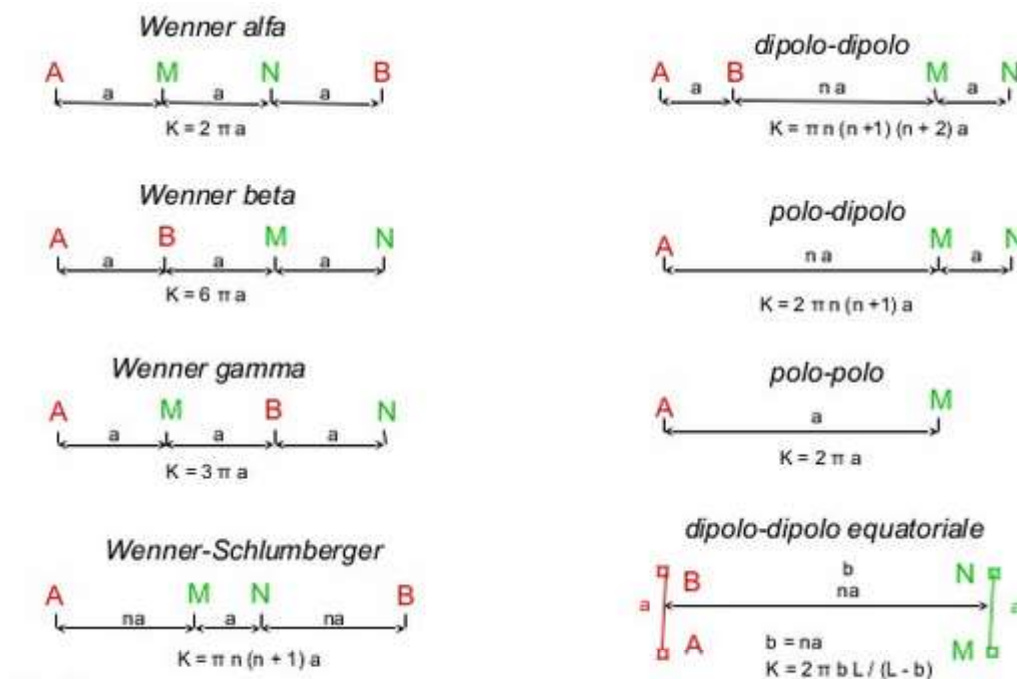


Figura 2: principali configurazione elettrodiche

Per ogni configurazione la prima misura inizia con spaziatura  $1a$  tra elettrodi di potenziale e corrente, poi si varia la distanza di un fattore "n" tra le coppie di elettrodi. La spaziatura tra gli elettrodi di corrente e gli elettrodi di potenziale resta fissa e si incrementa la distanza tra la coppie di elettrodi fino ad un livello di accuratezza in genere pari a 5. Si prosegue incrementando la distanza elettrodica, ed aumentando di conseguenza la profondità di investigazione.

La tecnica ERT può essere applicata anche in 3D con configurazioni elettrodiche più o meno convenzionali; in questo modo si ottengono un notevole volume di dati e informazioni di resistività per ogni punto all'interno del volume stesso.

## 2.2 Rilievo ERT 3D

La configurazione elettrodica utilizzata per le indagini qui descritte, è stata di due tipi: Dipolo-Dipolo e Polo-dipolo entrambe tridimensionali con lo stesso stendimento rettangolare. Questo sistema permette di registrare un elevatissimo numero di quadripoli (oltre 10000) e avere misure “cross cable”, ossia di avere i trasmettitori su un pezzo di cavo e i due elettrodi di potenziale su quello opposto. Sono state eseguite due acquisizioni per due motivi:

- Aumentare la densità dei dati
- Migliorare il rapporto segnale/rumore

In generale l'acquisizione polo-dipolo è meno rumorosa del dipolo-dipolo, ma richiede il posizionamento del polo remoto almeno a 4-5 volte la distanza massima fra A e B, che in questo caso era pari a circa 40m.

La sequenza di misura, che viene creata appositamente durante la pianificazione pre-acquisizione, in funzione del possibile posizionamento degli elettrodi e limitando il K per cercare di avere dati di buona qualità senza sprecare tempo di acquisizione, inizia con spaziatura 1a tra elettrodi di potenziale e corrente, poi varia la distanza di un fattore “n” tra le coppie di elettrodi. La spaziatura tra gli elettrodi di corrente e gli elettrodi di potenziale resta fissa e si incrementa la distanza tra la coppie di elettrodi fino ad un livello di accuratezza in genere pari a 5. Si prosegue incrementando la distanza elettrodica, ed aumentando di conseguenza la profondità di investigazione.

Per la realizzazione del modello tridimensionale di resistività, lo strumento impiegato è il georesistivimetro SYSCAL PRO SWITCH 48 a 10 canali della IRIS Instruments che di base gestisce 48 canali elettrodici; per la realizzazione dell'acquisizione 3D è stata impiegata l'estensione a 72 canali elettrodici mediante lo strumento Link box che viene connesso al georesistivimetro.

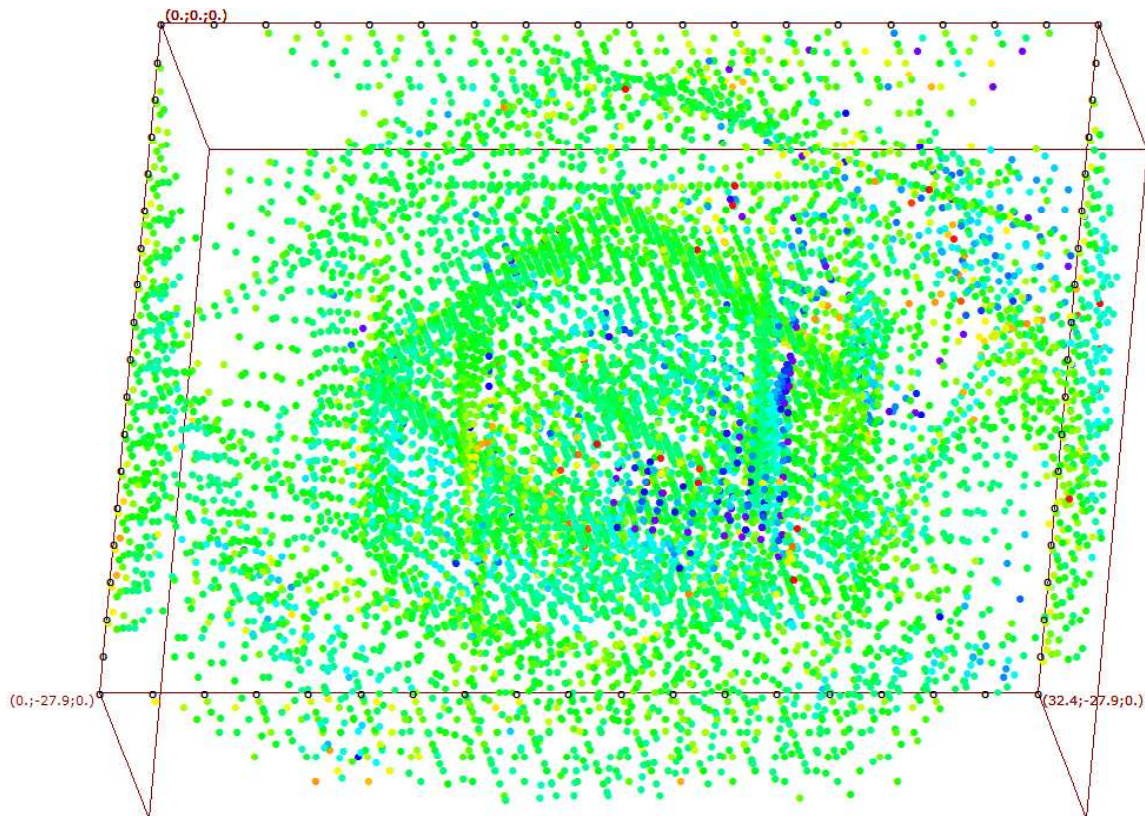
Per ogni acquisizione sono stati impiegati 3 cavi da 24 elettrodi spazati di 1.8 sull'asse X in direzione Sud-Nord, e di 1.55m sull'asse Y in direzione Ovest-Est ; i 72 elettrodi sono stati disposti a rettangolo con 18 elettrodi per lato come mostrato di seguito.



**Figura 3: posizionamento a L degli elettrodi**

Le sequenze di acquisizione, precedentemente caricate nello strumento (Figura 4) hanno permesso la realizzazione di circa 12500 misure per la configurazione Polo- Dipolo e per la Dipolo-Dipolo.





**Figura 4: visualizzazione dei raw data nel software Ertlab della configurazione Polo Dipolo (in blu basso resistivi e in rosso gli alto resistivi)**



**Figura 5: acquisizione ERT 3D intorno ai blocchi A e B**

Per le indagini è stata realizzato un test preliminare per trovare il set-up ideale che garantisca il miglior rapporto segnale/rumore, condizione raggiunta con un periodo di iniezione di 500 msec con tensione massima di 200mV.

### 2.3 Elaborazione dei dati

L'elaborazione consiste in un prefiltraggio dei dati e nel processo di inversione, da resistività apparente a resistività reale.

Se il terreno è disomogeneo, la differenza di potenziale  $\Delta V$  è funzione, oltre che della distanza tra gli elettrodi, anche della distribuzione di resistività nel sottosuolo: di conseguenza il valore di  $\rho$  calcolato mediante le espressioni precedentemente descritte non coincide con il valore di resistività di uno dei mezzi presenti, ma è una funzione della resistività e della posizione dei mezzi stessi nel sottosuolo. Tale valore viene chiamato resistività apparente e può essere pensato come la resistività di un mezzo omogeneo e isotropo che, energizzato con la stessa corrente, dia luogo alla stessa differenza di potenziale tra gli elettrodi. Al variare della posizione degli elettrodi rispetto ai mezzi presenti, la resistività apparente varia, indicando la presenza di tali mezzi: obiettivo della tomografia di resistività elettrica è dunque quello di ricostruire al meglio forma, posizione e resistività dei mezzi a partire da più misure di resistività apparente.

Così al termine dell'elaborazione, non si ha più un profilo di resistività apparente bensì di resistività reale, in cui cioè, il valore di  $\rho$  di ogni cella è libero dagli effetti di disturbo degli strati soprastanti o sottostanti. Tale valore è quello che ci permette di capire la tipologia del terreno o della roccia ed ipotizzare un possibile modello stratigrafico.

ErtLab Solver è in particolare il modulo 3D di inversione di resistività e caricabilità che rappresenta uno strumento innovativo nell'interpretazione delle misure geoelettriche. Il metodo si basa sull'inversione ai minimi quadrati con vincolo di regolarità, definita smoothness constrain; durante l'inversione viene eseguito un ripescaggio iterativo dei valori di varianza attribuita ai dati. Inoltre viene eseguito il controllo completo di tutti i parametri coinvolti nell'inversione: condizioni al contorno, parametri di regolarizzazione, peso delle funzioni e regolarizzazione e stima del rumore. Il software Ertlab ha permesso di analizzare i dati delle due acquisizioni effettuate ed elaborarle sia separatamente che sovrapponendo i dati. Si è effettuato un prefiltraggio veloce eliminando circa 600 valori sui 12500 complessivi, poiché il dato raw presentava già un'ottima qualità, andando ad eliminare valori di potenziale troppo bassi e  $k$  troppo elevati ( $<> 130000$ ). Nelle due immagini seguenti viene mostrata l'analisi statistica sul dato prima e dopo il filtraggio. La resistività media complessiva è di circa 20ohm\*m.

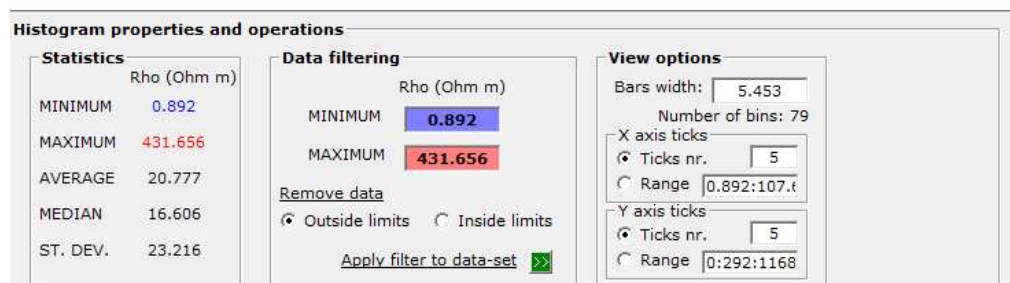
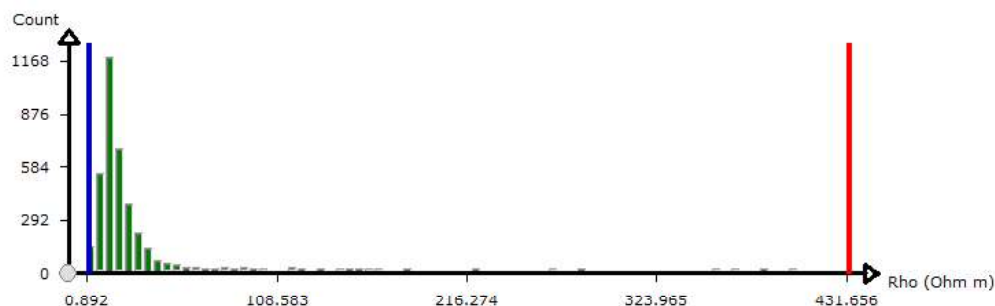
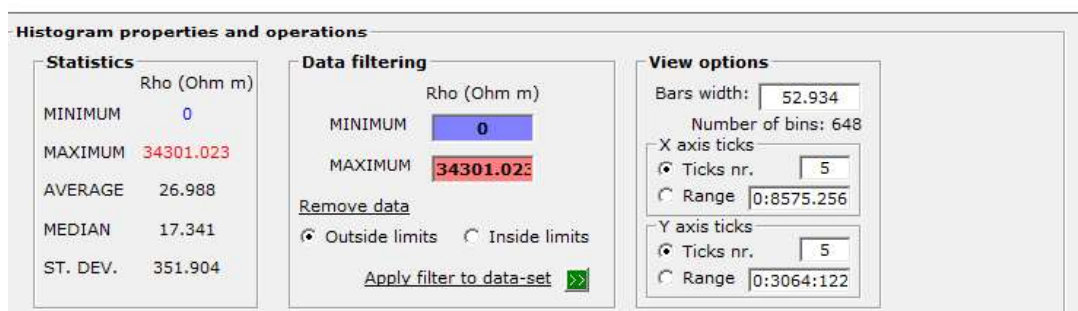
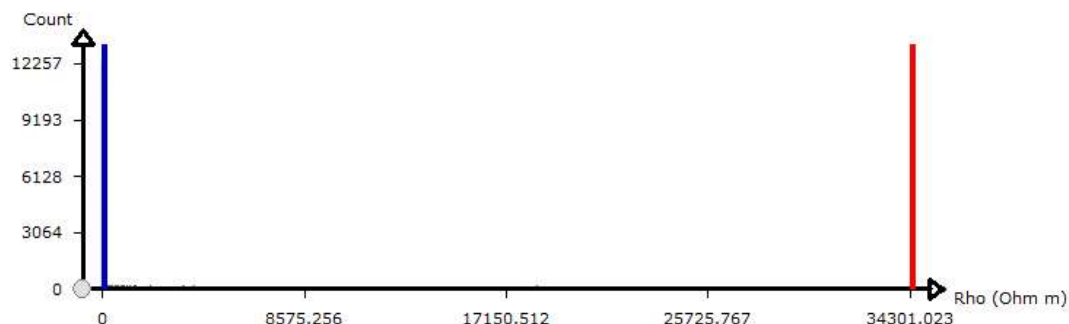


Figura 6: analisi statistica sul dato di resistività prima e dopo il filtraggio sul polo-dipolo

E' stata scelta l'inversione della configurazione polo-dipolo poiché ha fornito il risultato statistico migliore e quello più geologicamente attendibile.



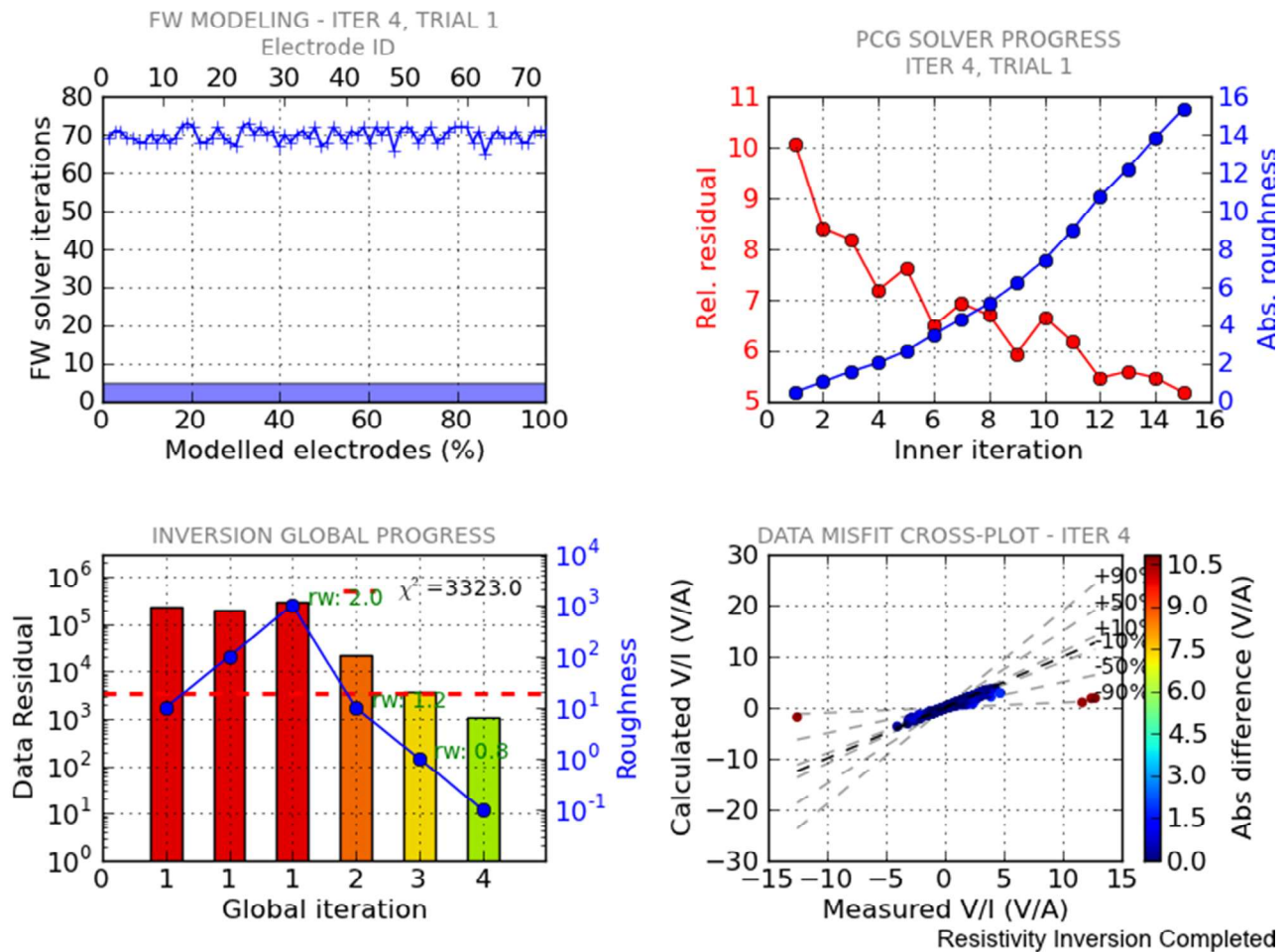


Figura 7: iterazioni di inversione della configurazione polo-dipolo con ErtLab ed errore statistico

I risultati dell'inversione vengono visualizzati all'interno di un volume, dal quale si possono estrarre le informazioni lungo sezioni verticali (sezioni-slices, Figura 10) e orizzontali (mappe, Figura 8) nelle direzioni XY in funzione delle diverse profondità Z.

Inoltre possono essere estratti dei volumi in range specifici di resistività e volumi in determinati range di  $\rho$ .

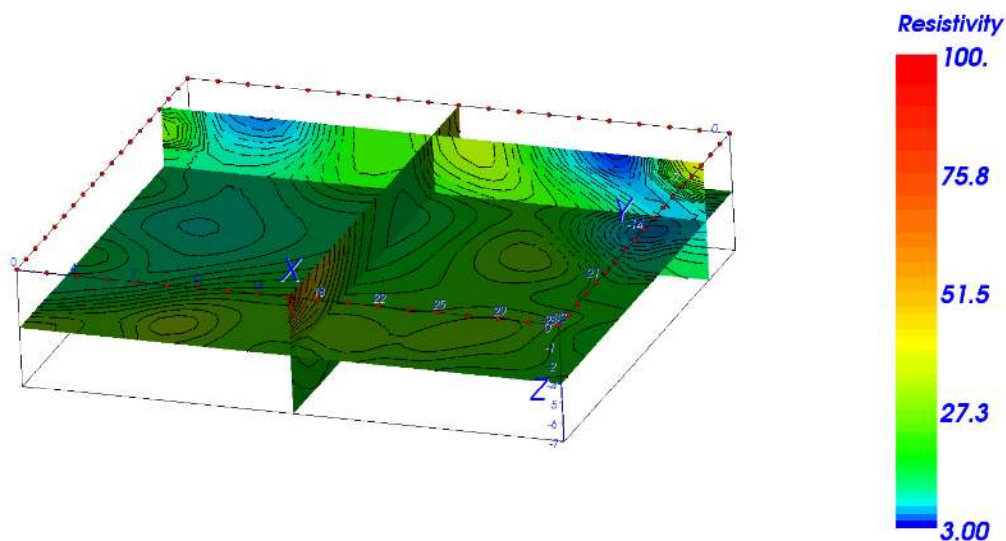


Figura 8: Esempio di visualizzazione grafica 3D e creazione di mappe in ErtLab

Il risultato dell'elaborazione è quindi un modello 3D della porzione di terreno indagata dal quale sono state estratte le mappe bidimensionali XY di resistività per ogni metro di profondità (0--7m), che vengono rappresentate in Allegato B e di cui se ne propongono un paio nel paragrafo successivo sovrapposte all'ortofoto fornita dalla Committenza (). Vengono rappresentate inoltre le sezioni bidimensionali XZ e YZ ogni 4m (Y 0-32m, X 0-28m).

Il range di  $\rho$  risultante dall'inversione è fra 3 e 100ohm\*m. Per evidenziare meglio le anomalie, tutte le mappe presentano la scala di resistività logaritmica, e gli elaborati hanno le progressive metriche sull'asse delle ascisse e delle ordinate, e la profondità di riferimento in metri riferita al piano campagna.

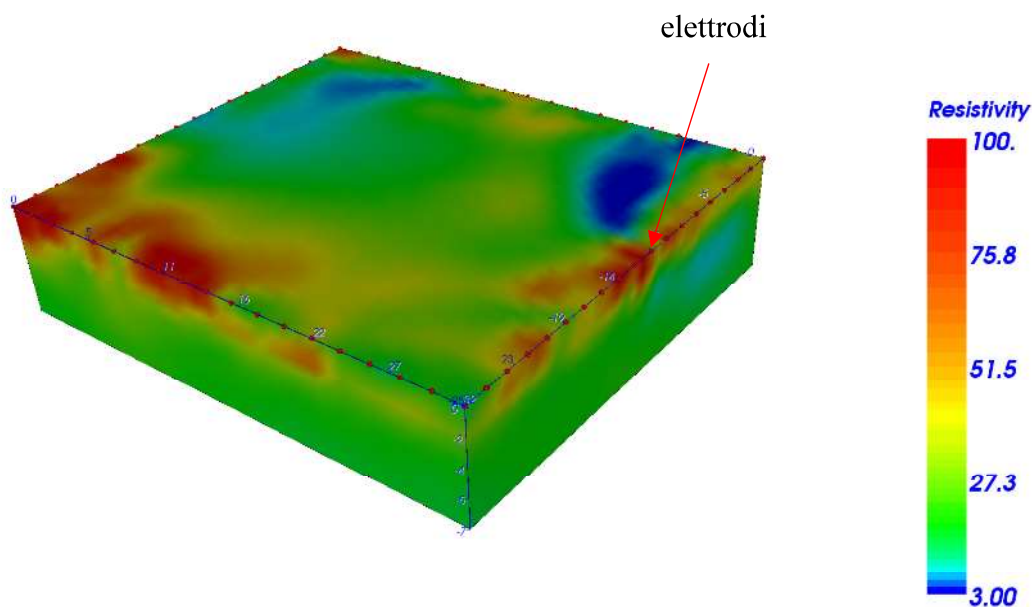


Figura 9: modello di resistività 3D



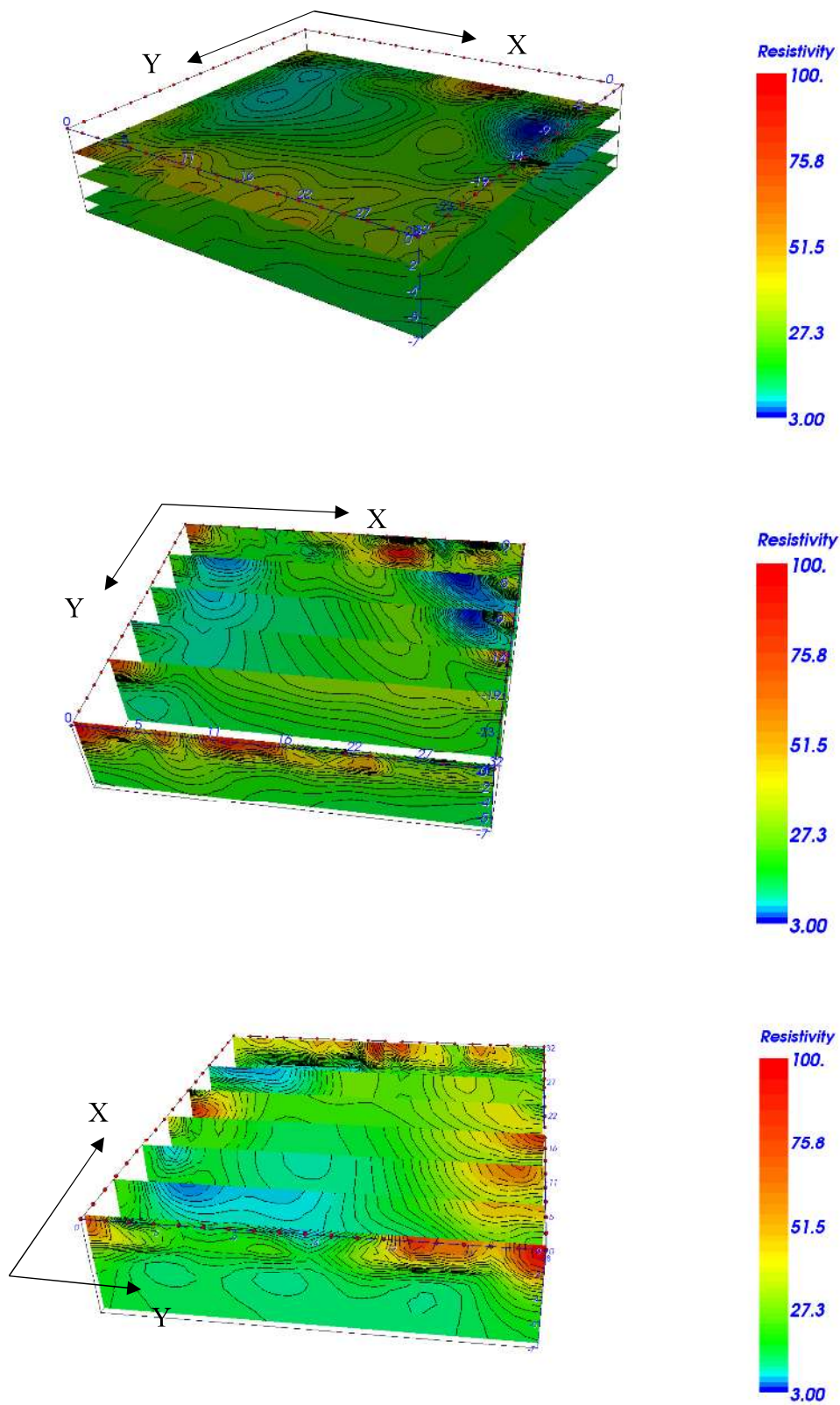


Figura 10: mappe e sezioni estratte dal modello 3D

## 2.4 Risultati ottenuti

Lo scopo dell'indagine era quello di identificare anomalie e discontinuità nel sottosuolo associabili ad alterazioni degli strati litologici non piano paralleli, pertanto si è cercato di trovare qualche correlazione fra litologia dei materiali e resistività.

La Committenza ci ha fornito due stratigrafie determinate da CPTU che hanno evidenziato l'alternanza di terreni limosi e argillosi: vi è un primo strato di spessore di circa 1.4m che corrisponde a limo e limo argilloso, sovrapposto ad un livello di circa 1m di materiale più consistente. Oltre i 2.3m c'è uno spesso strato di argilla e argilla limosa con livelli limoso argillosi che prosegue fino a oltre 13m, quindi ben oltre il limite raggiunto dalla geoelettrica. La profondità della falda è sui 3.5m circa.

Sovrapponendo la stratigrafia della CPTU1 che si trova alle progressive ERT X -17m e Y 17m quindi quasi al centro del poligono geoelettrico come mostrato in rosa nell'immagine seguente, è stata estratta una correlazione fra resistività e materiale (Figura 13) anche utilizzando materiale bibliografico che indica i valori più bassi ( $<10\text{ohm}\cdot\text{m}$ ) sempre associati ai materiali più fini argillosi e più elevati a limi sabbiosi e sabbie ( $>100\text{ohm}\cdot\text{m}$ ). Si suppone che la falda sia in acqua dolce quindi caratterizzata da  $\rho$  variabili fra 20 e 25  $\text{ohm}\cdot\text{m}$ , valori infatti rappresentativi della maggior parte delle misure effettuate.



Figura 11: in rosso lo stendimento elettrodico, in rosa l'ubicazione delle prove penetrometriche e del cedimento

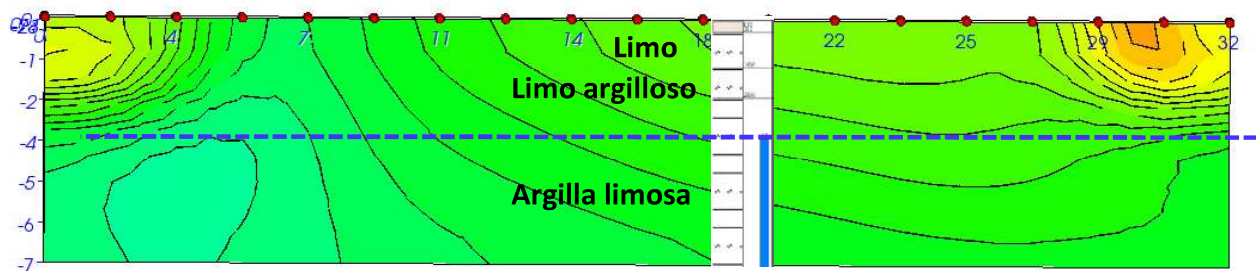


Figura 12: associazione della stratigrafia della CPTU1 che interseca la sezione di resistività alle progressive xy (17m,-11m); in blu le progressive metriche, e la linea tratteggiata bianca indica il livello medio della falda

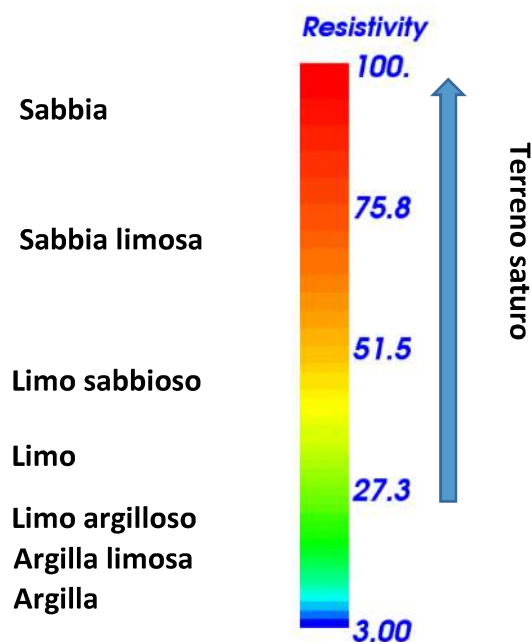


Figura 13: associazione fra scala di resistività in ohm\*m e litologie

Il modello di resistività 3D ha evidenziato subito 2 zone basso resistive abbastanza localizzate in superficie entro i 5m circa in corrispondenza dei due blocchi A e B. Si è cercato riscontro sul dato grezzo di campagna ed in realtà oltre a quelle due zone basso resistive localizzate associabili a materiale argilloso, è emersa una zona più centrale vicina al cedimento e laterale alla CPTU1 che nel modello invertito non compare, probabilmente frutto dello “smooth” degli algoritmi e della vicinanza di dati più resistivi nella zona più orientale. Non si esclude pertanto la presenza di una lente argillosa anche in quella zona.

Il risultato importante di questa indagine è la verifica della presenza di forti disomogeneità degli strati superficiali, e l’alternanza di livelli più fini con livelli leggermente più grossolani con diversa consistenza.

Si noti come la zona omogenea con strati piano paralleli appaia nella sezione XY alla progressiva -24m e nella mappa XZ a 6m dal p.c. (Figura 8).



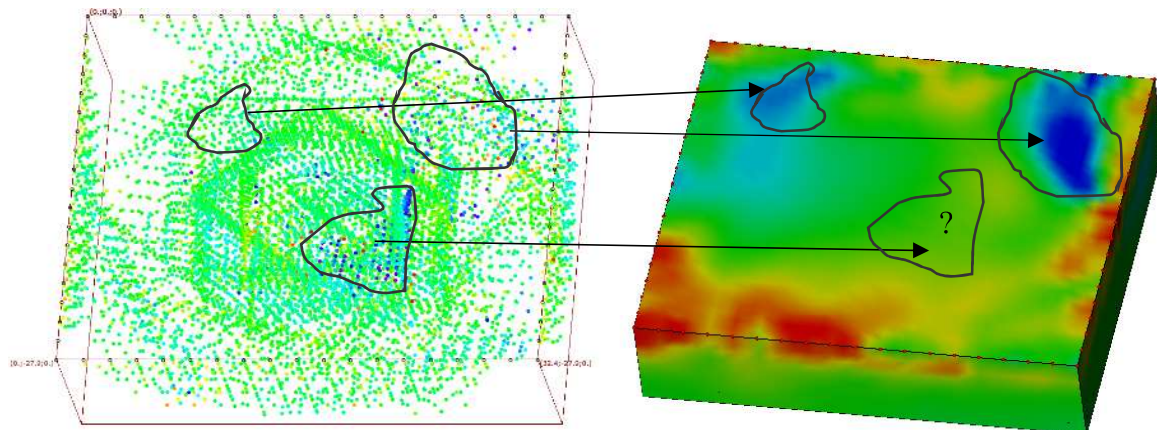


Figura 14: zone anomale a bassa resistività sui raw data e sul modello invertito

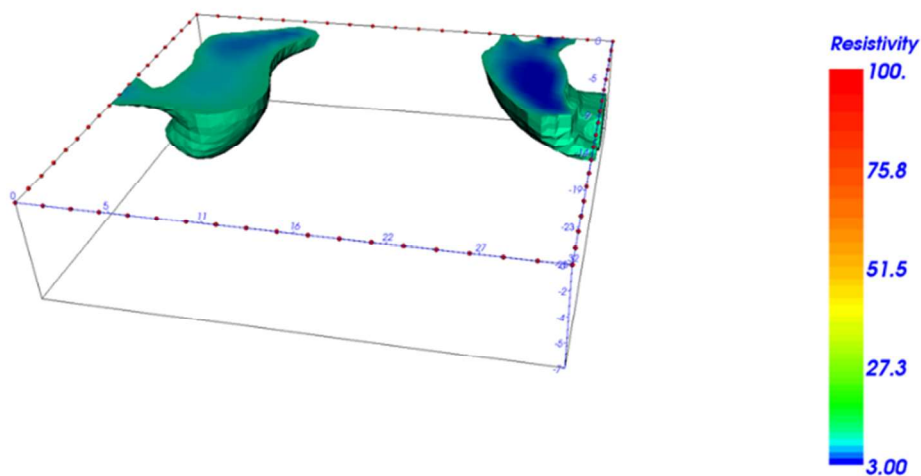


Figura 15: vista 3D del volume di terreno argilloso con  $0 < \rho < 10 \text{ ohm}\cdot\text{m}$

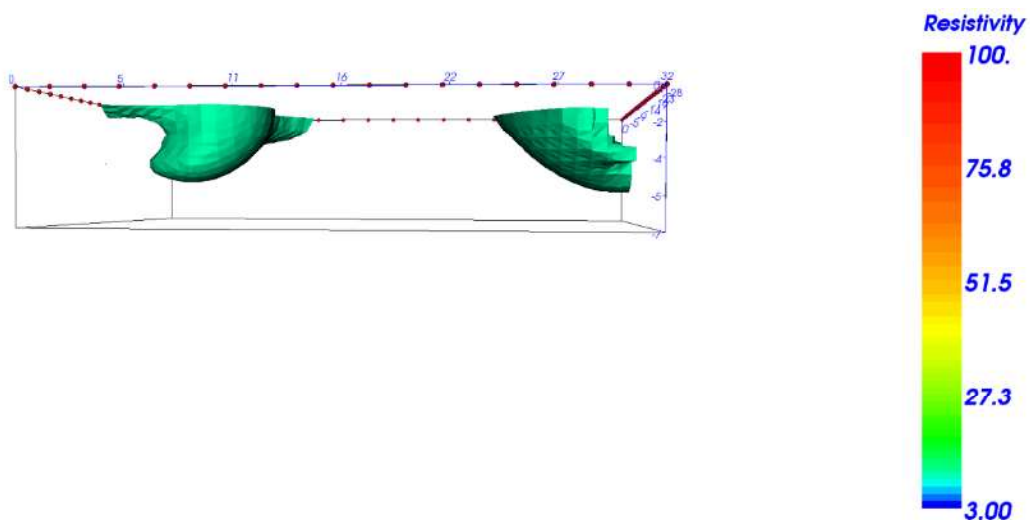


Figura 16: proiezione xz del volume di terreno argilloso con  $0 < \rho < 10 \text{ ohm}\cdot\text{m}$



**Figura 17:** mappa di resistività orientata a Nord a 0.5m dal p.c. dove sono evidenti le due anomalie in blu e azzurro relative a materiali argillosi, in nero la pianta degli edifici, in rosa l'ubicazione delle prove penetrometriche e del cedimento



**Figura 18:** mappa di resistività orientata a Nord a 6m dal p.c. dove gli strati cominciano ad essere omogenei, in nero la pianta degli edifici, in rosa l'ubicazione delle prove penetrometriche e del cedimento



### 3. ALLEGATO A – Planimetria del rilievo

Di seguito in rosso è riportata l'ubicazione del rilievo geoelettrico 3D orientato a Nord. In giallo sono indicati gli elettrodi disposti a rettangolo di lato 32x27.9m, con la numerazione progressiva nei 4 vertici.

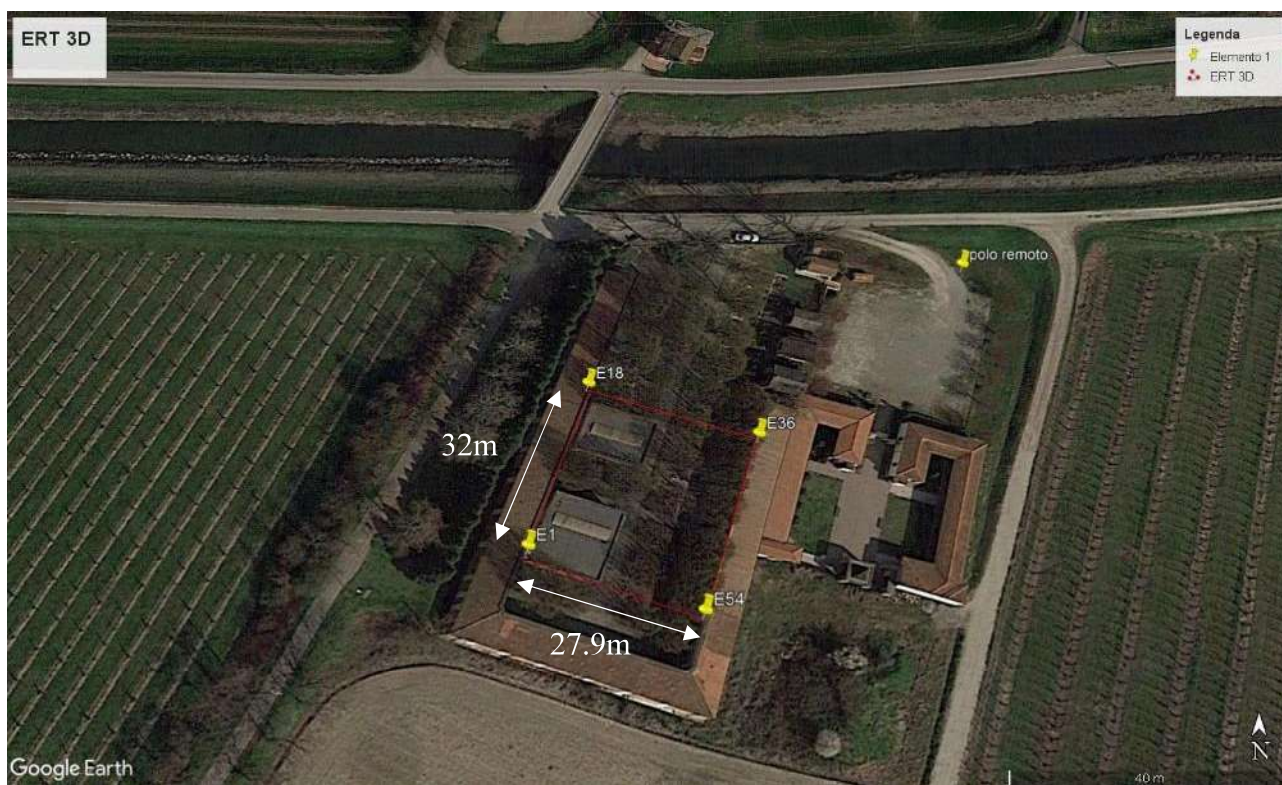


Figura 19: Planimetria dei rilievi 3D ERT

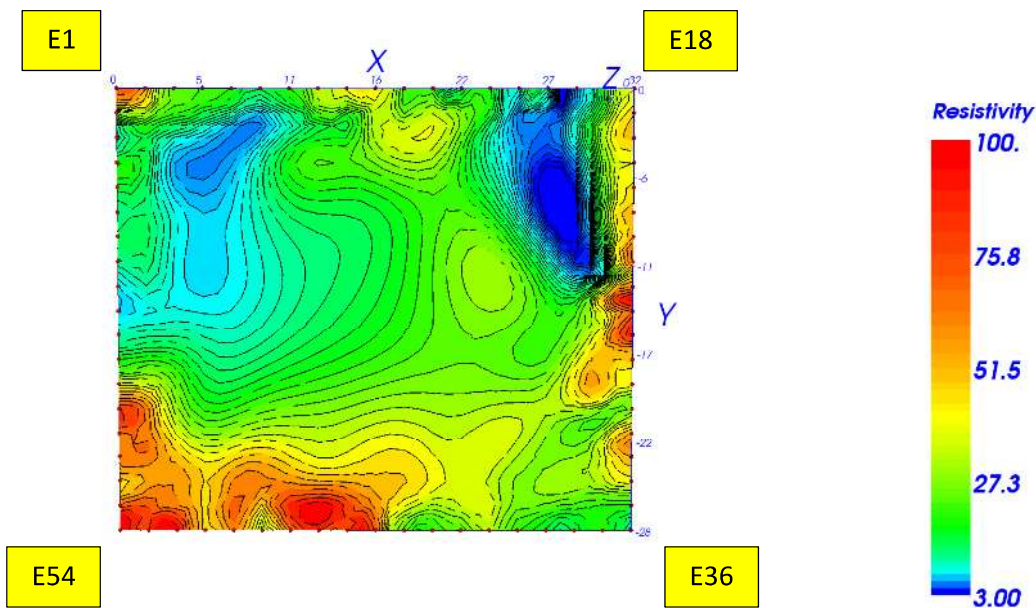


#### 4. ALLEGATO B – Risultati ERT 3D

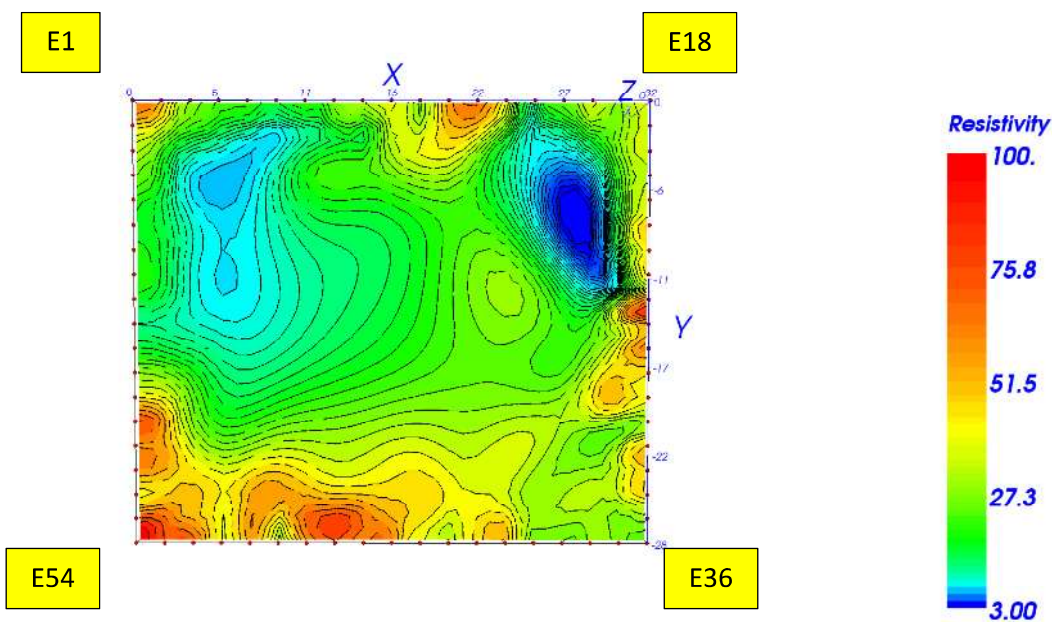
In questo allegato sono mostrate le mappe di resistività XY ogni metro di profondità fino a 7m dal p.c. estratte dal modello 3D invertito, e le sezioni XZ e YZ ogni 2m di progressiva metrica rispettivamente fino a 32m sull'asse x e -27.9m sull'asse y. La scala di rho è la medesima e va da 3 a 100ohm\*m.

Mappe XY

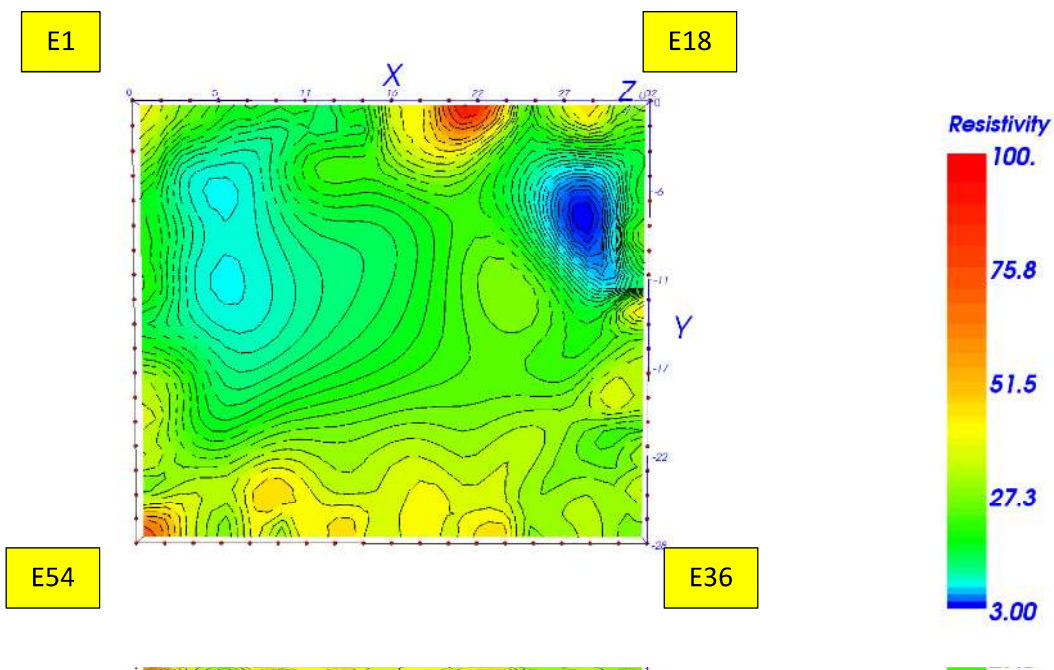
0m



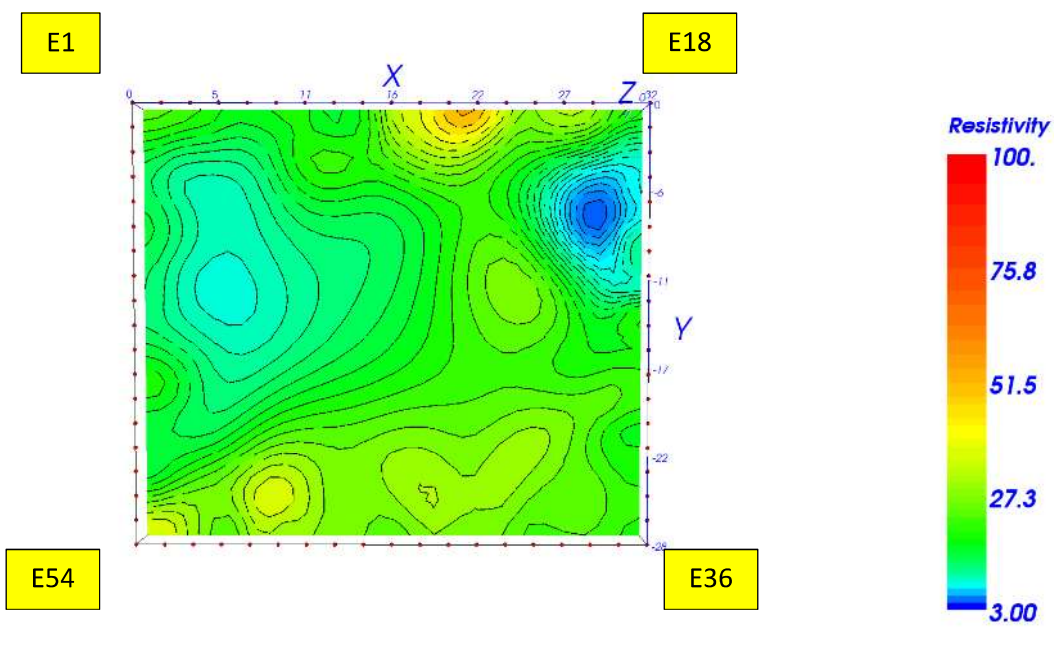
1m



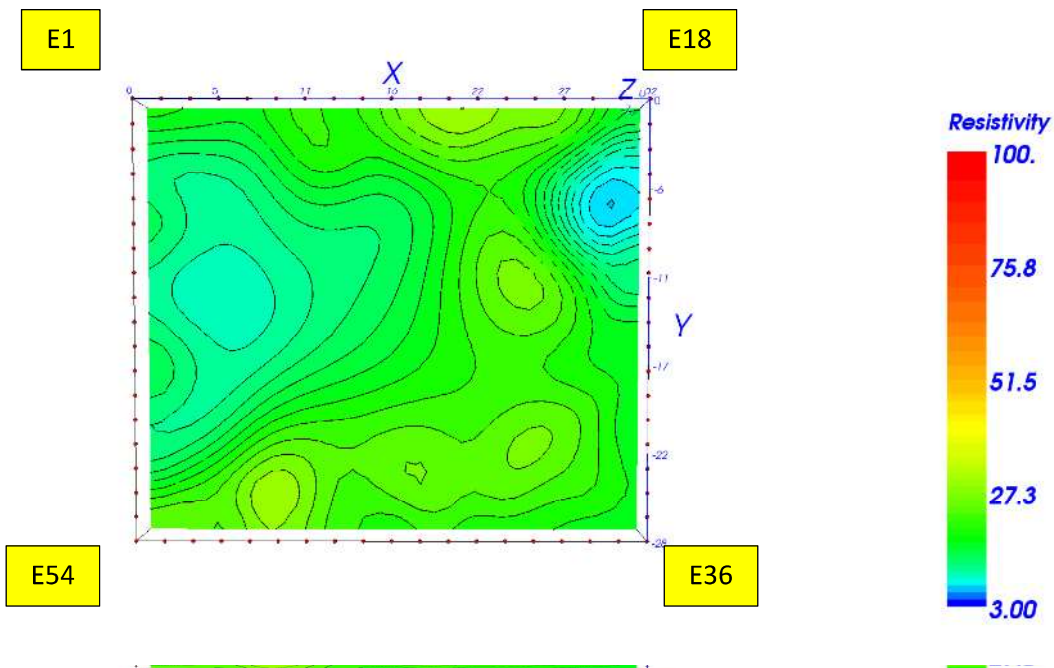
2m



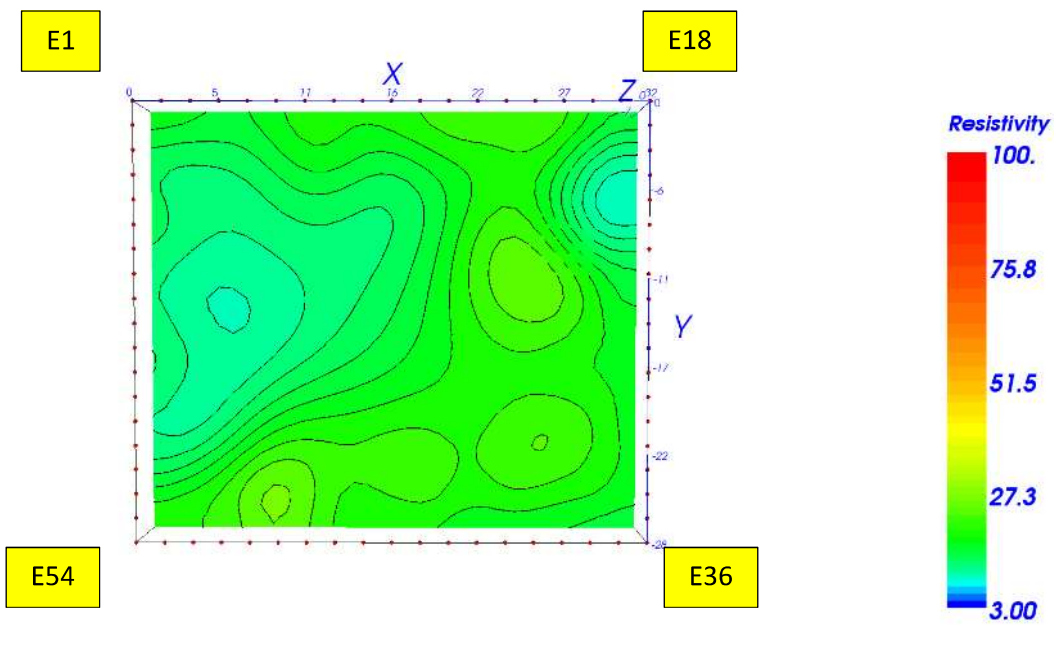
3m



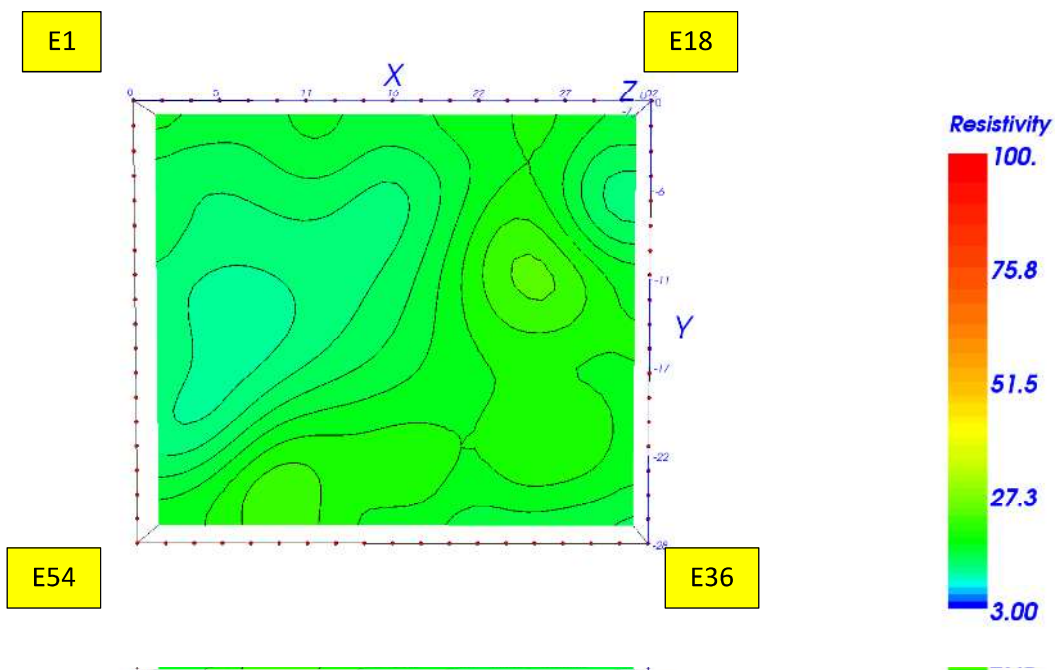
4m



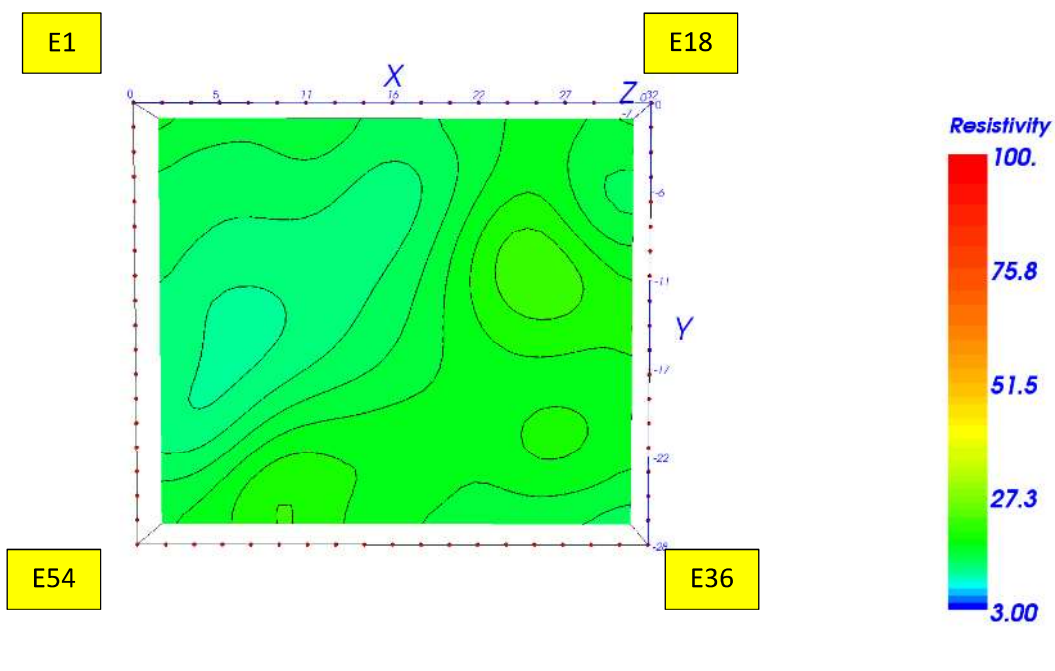
5m



6m



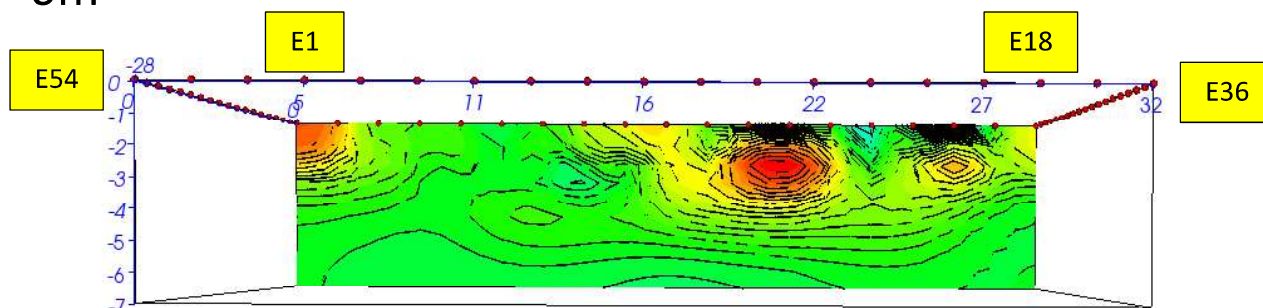
7m



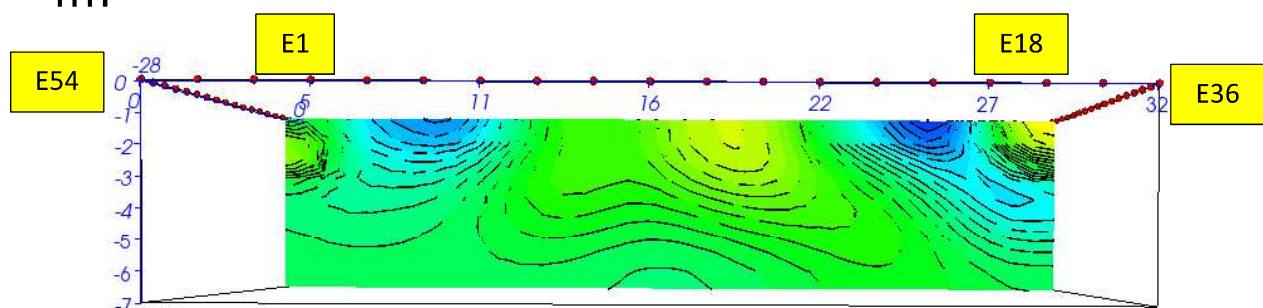


Sezioni XZ

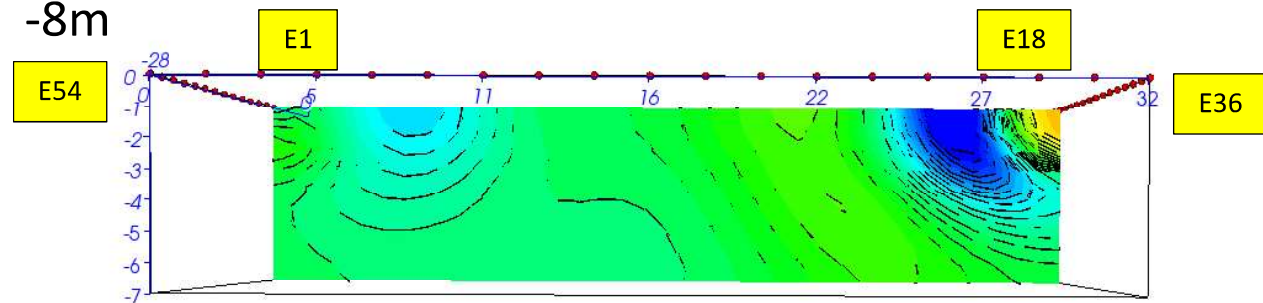
0m



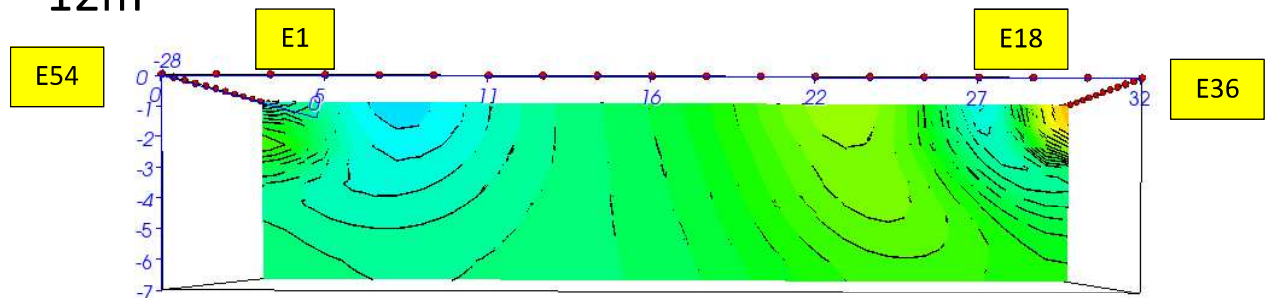
-4m



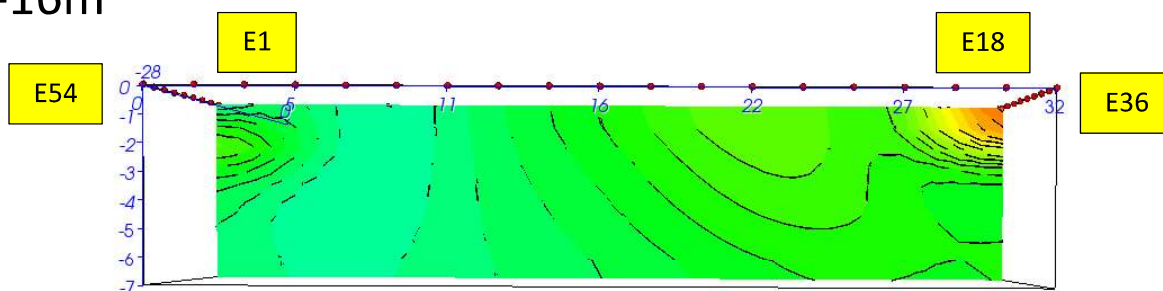
-8m



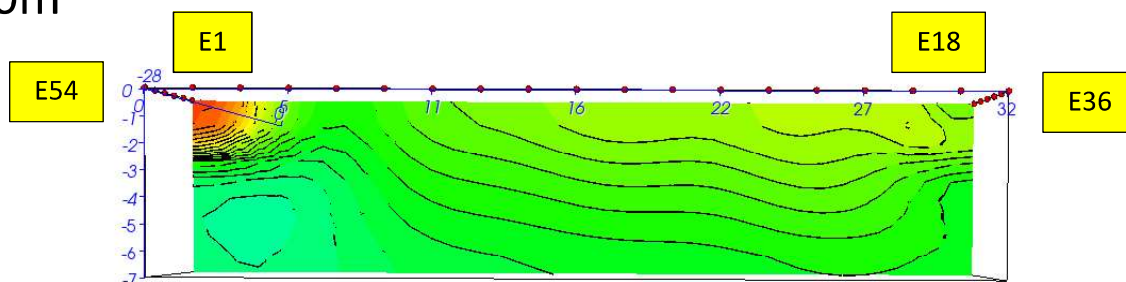
-12m



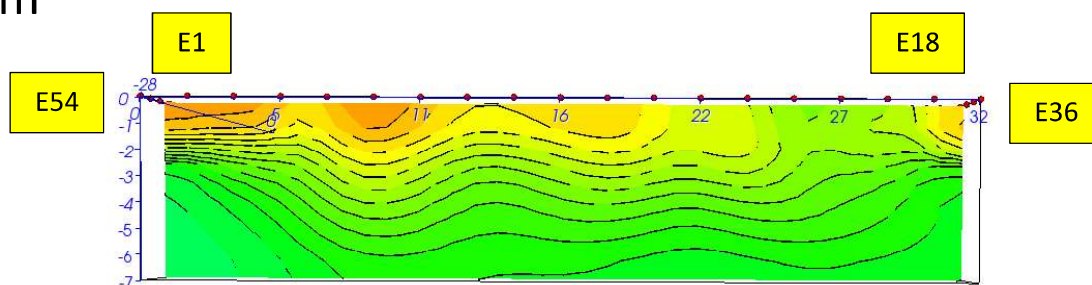
-16m



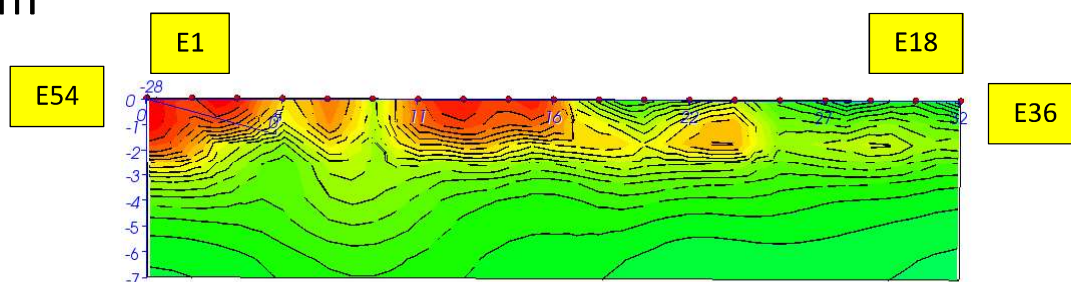
-20m



-24m



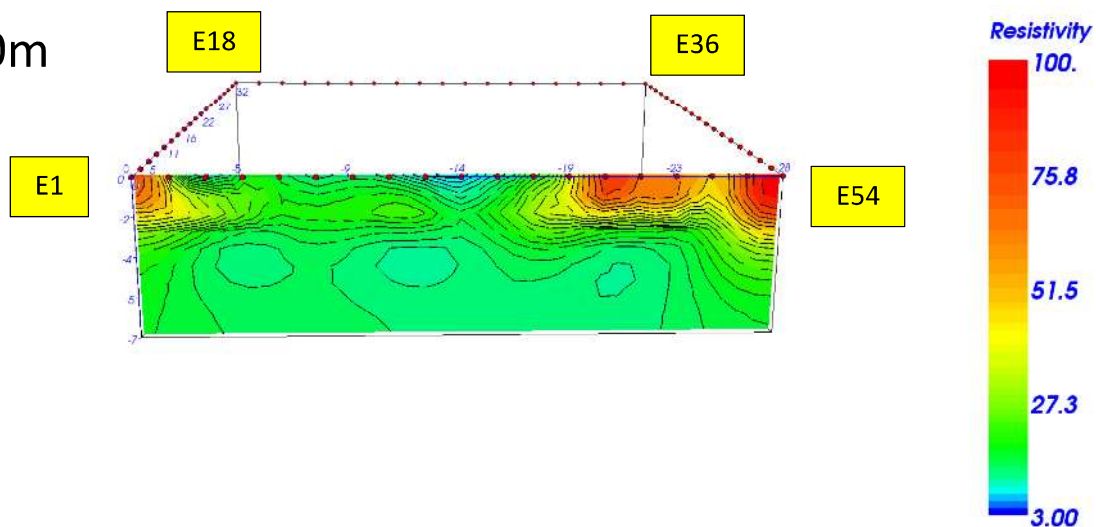
-28m



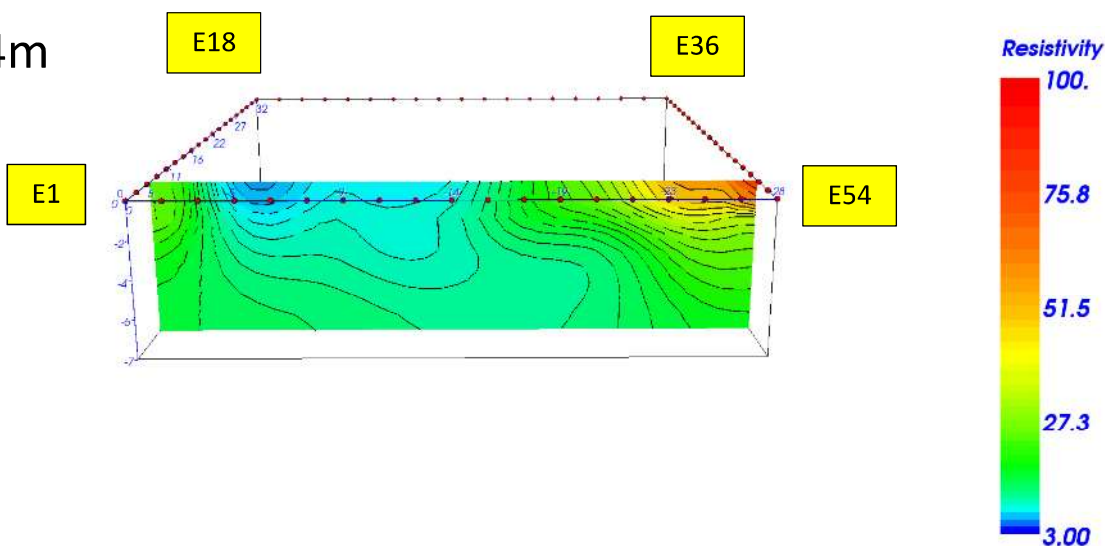


Sezioni YZ

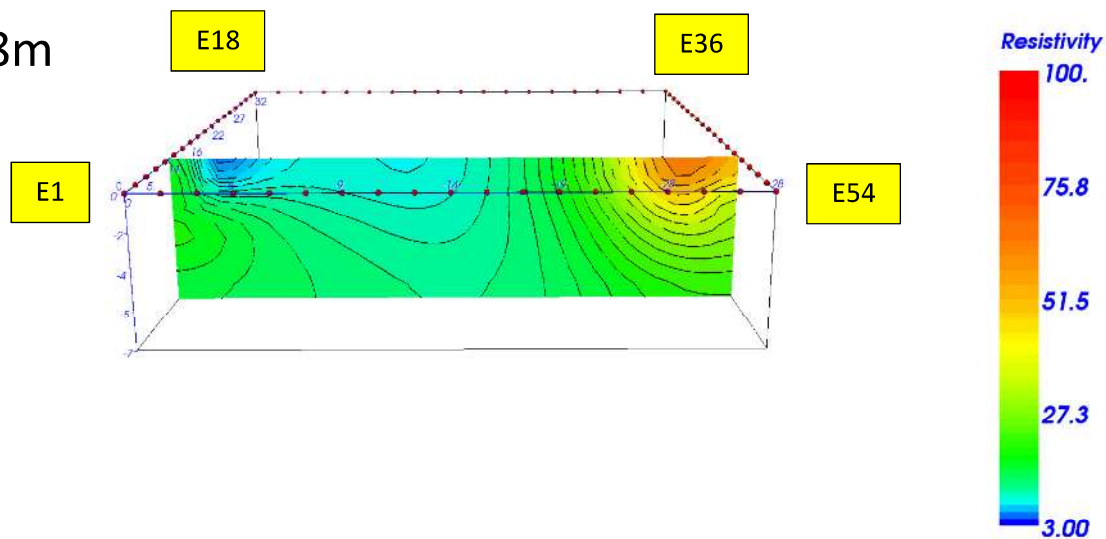
0m



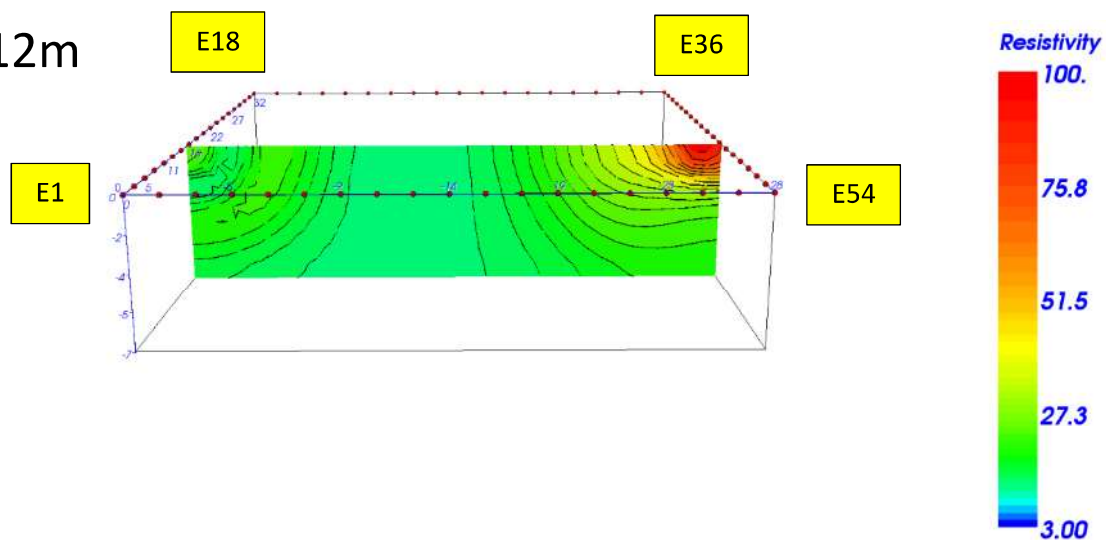
4m



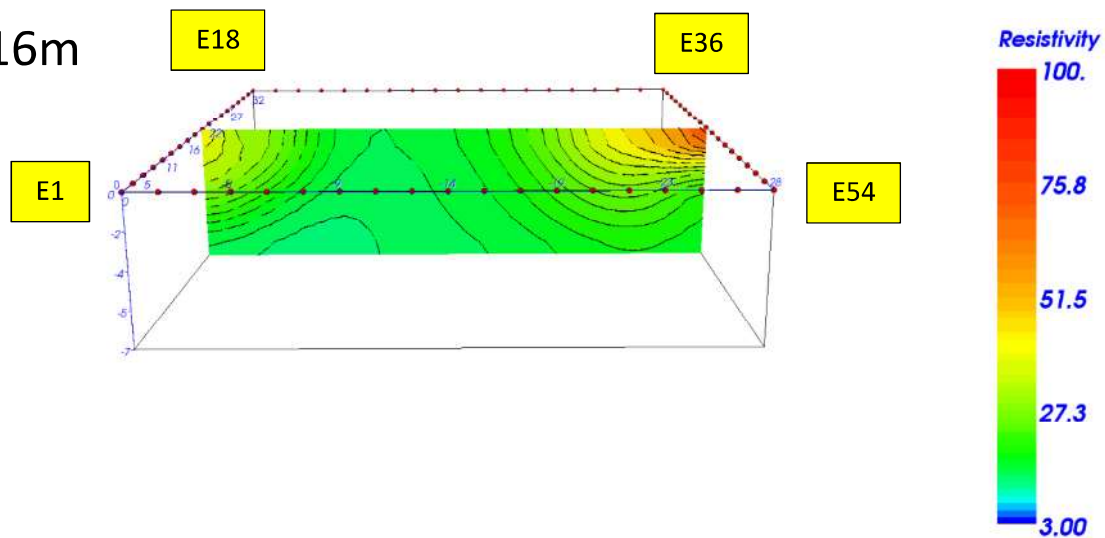
8m



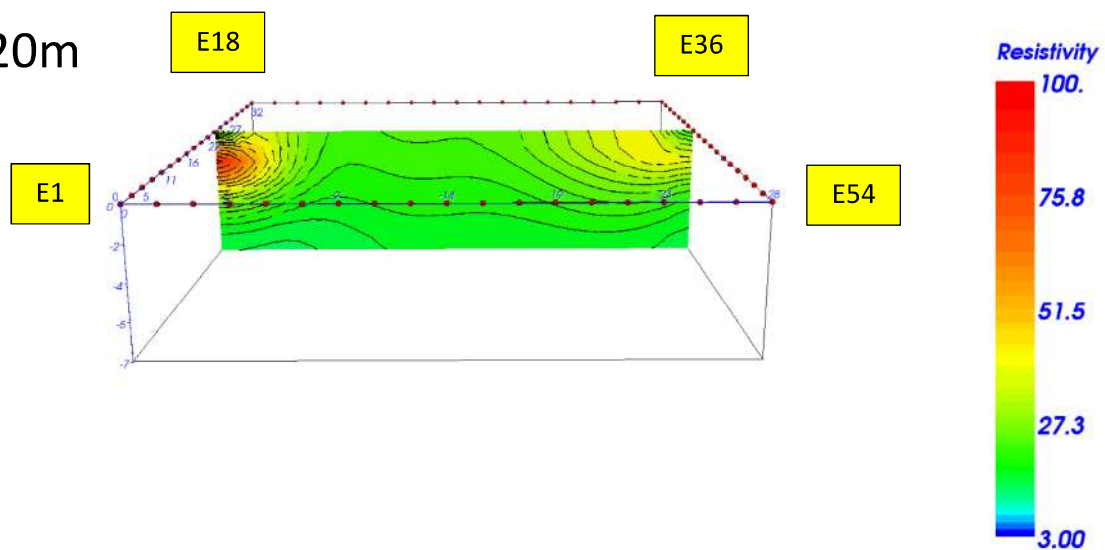
12m



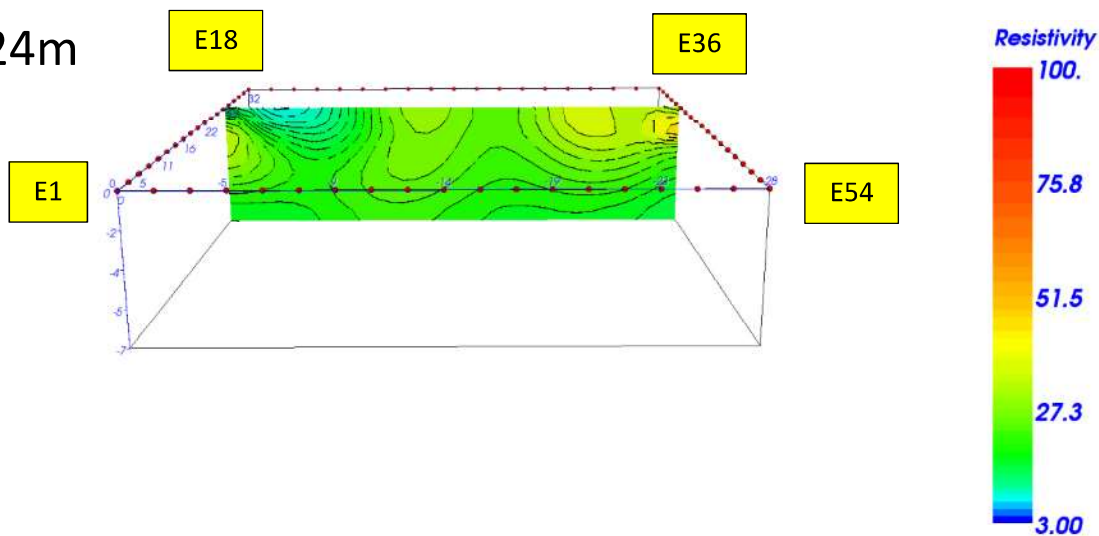
16m



20m



24m



28m

