

LABORATORIO MATERIALI DA COSTRUZIONE  
LABORATORIO TERRE E ROCCE  
INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE

**GEOPROVE**  
S.R.L.

# COMUNE DI ROVIANO

PROVINCIA DI ROMA

**COMMITTENTE: ACEA ELABORI S.p.A.**

## INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE DI SUPPORTO AL PROGETTO DEL NUOVO ACQUEDOTTO MARCIO (NUOVO NODO A) - CONTRATTO QUADRO N. 3900005591 -

\*\*\*\*\*

Ruffano, Settembre 2021

IL DIRETTORE TECNICO  
Dott. Geol. Marcello DE DONATIS

Società autorizzata dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti ad effettuare e certificare prove su terre.

Società autorizzata dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti ad effettuare e certificare prove su materiale da costruzione.

Società autorizzata dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti ad effettuare e certificare prove su rocce e prove in sito.



**INDICE**

<i>PREMESSA</i> .....	2
<i>INQUADRAMENTO TERRITORIALE</i> .....	3
<i>PROFILI GEOELETTRICI CON RICOSTRUZIONE TOMOGRAFICA</i> .....	4
<i>STRUMENTAZIONE UTILIZZATA</i> .....	5
<i>IL METODO DELLA RESISTIVITÀ</i> .....	6
<i>ESECUZIONE E ELABORAZIONE DEI PROFILI GEOELETTRICI</i> .....	13
<i>ANALISI DEI DATI OTTENUTI</i> .....	15

## **PREMESSA**

Nel mese di Agosto-Settembre2021 la Geoprove Srl ha eseguito delle indagini di tomografia geoelettrica in un' area interessata dal progetto del Nuovo Acquedotto Marcio (Nuovo Nodo A) nel Comune di Roviano.

Nello specifico sono state eseguite:

- ***n. 7 profili geoelettrici*** con ricostruzione tomografica tridimensionale di tutta l'area.

Delle indagini si riportano:

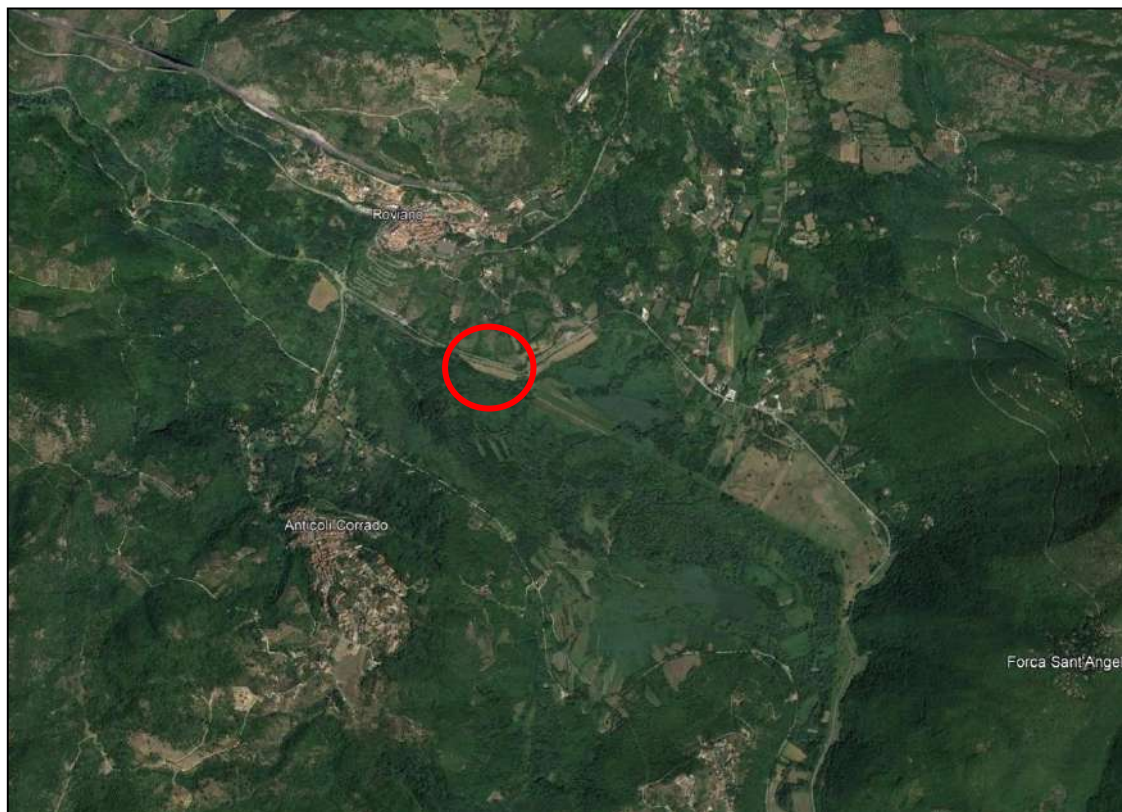
- la descrizione della metodologia utilizzata;
- una planimetria con l'ubicazione delle indagini effettuate;
- il risultati ottenuti: gli elaborati grafici.

## INQUADRAMENTO TERRITORIALE

L'area indagata è individuata dalle seguenti coordinate geografiche:

Latitudine: 42.018268° N

Longitudine: 13.000848° E



*Immagine da Google Earth ®*

## **PROFILI GEOELETTRICI CON RICOSTRUZIONE TOMOGRAFICA**

L'indagine elettrica prevede sempre una fase preliminare al fine di comprendere al meglio le problematiche da affrontare e le peculiarità del sito. Il metodo scelto permette di stimare la resistività del sottosuolo in esame; tale parametro è fondamentale per l'individuazione dei passaggi stratigrafici, cavità ed eventuali sottoservizi presenti.

I valori di resistività vengono rilevati introducendo nel sottosuolo una corrente attraverso due elettrodi di corrente e misurando la differenza di potenziale attraverso altri due elettrodi, detti appunto di misura. L'invio della corrente nel sottosuolo, utilizzando delle sorgenti puntiformi in superficie, determina l'irraggiamento delle linee di corrente attraverso superfici di forma semisferica. In generale il terreno non è elettricamente omogeneo né isotropo, perciò quando viene immessa corrente in esso, una qualsiasi causa di variazione di conducibilità, ne altera il flusso, provocando un'anomala distribuzione del potenziale.

La misura di questo valore prende il nome di "resistività apparente", in quanto dipende dalla disposizione degli elettrodi nel terreno. La raccolta di queste informazioni avviene lungo tutto il tratto percorso dai filetti elettrici e, di conseguenza, da tutta la semisfera prodotta dall'immissione di corrente nel sottosuolo.

La tomografia elettrica di superficie (TES) si basa su un elevato numero di misure elettriche (metodologia multielettrodo) disposti sul terreno lungo i profili scelti. La restituzione dei risultati (ricostruzione tomografica) viene realizzata approssimando il terreno (sottosuolo) in maglie o celle ("elementi finiti") e riportando in un'apposita sezione gli elementi finiti con resistività omogenea.

## **STRUMENTAZIONE UTILIZZATA**

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

La strumentazione utilizzata nelle indagini è quindi costituita da:

- Un georesistivimetro Syscal Pro della Iris Instruments;
- elettrodi (picchetti di acciaio) da collegare ai canali del georesistivimetro, più due elettrodi remoti per il dispositivo polo-polo;
- cavi multicanale per collegare gli elettrodi al georesistivimetro;
- cavetti per collegare gli elettrodi alle boccole dei cavi;
- batterie da 12V per alimentare il georesistivimetro.

Per l'elaborazione dati è stato utilizzato il programma ERTLlab della Geostudi Astier S.r.l per le elaborazioni tridimensionali dell'area delle Sorgenti del Peschiera e il programma RES2DINV per le elaborazioni dei dati dell'area in località Salisano.

## IL METODO DELLA RESISTIVITÀ

Lo scopo di un'indagine geoelettrica in una certa area è quello di determinare la distribuzione del parametro fisico *resistività elettrica* nel sottosuolo.

La resistività di un materiale è una misura di quanto esso si oppone al passaggio di corrente elettrica, ed è l'inverso della conducibilità (o conduttività). Essa dipende dai fattori chimico-fisici che hanno influenzato la struttura delle rocce e da quelli che ne determinano le modifiche nel tempo.

Le rocce possono essere considerate, nella maggioranza dei casi, degli elettroliti solidi. In essi la conduzione avviene per processi che interessano gli ioni legati a formare le strutture cristalline; in generale la forza esercitata sugli ioni da parte di un campo elettrico, è minore delle forze che legano tali ioni e pertanto gli elettroliti solidi possono considerarsi *isolanti*.

Le rocce naturali, però, sono in genere permeate da una certa quantità di acqua interstiziale ricca in sali e pertanto acquistano una conduttività ionica che dipende dalla quantità di spazi nella roccia (pori, microfessure, fratture) che sono saturati dall'acqua. In generale si ha dunque che quanto più porosa e fessurata è una roccia, tanto più è elevato il suo contenuto in acqua e tanto più, quindi, è alta la sua conduttività (e ovviamente bassa la sua resistività).

In generale, la *resistività* delle rocce porose, sottosature di acqua, si può ottenere dalla *relazione empirica di Archie*:  $\rho = \rho_w a \Phi^{-m} S^{-n}$

dove  $\rho_w$  è la resistività dell'acqua di imbibizione;  $\Phi$  è la porosità (rapporto tra il volume dei pori e quello della roccia);  $S$  è il grado di saturazione (o imbibizione - rapporto tra il volume dei pori riempiti d'acqua e quello complessivo dei pori) della roccia (variabile tra 0.1 e 1);  $a$ ,

$m$ ,  $n$ , sono fattori numerici ed in particolare:  $m$  è il fattore di cementazione (varia da 1.3 a 2.5) ed  $a$  è il coefficiente di tessitura. Per quanto riguarda  $n$ , tale parametro assume generalmente un valore pari a 2. La *tessitura* esprime la disposizione, forma e dimensione dei granuli che compongono la roccia, nonché la rete di canalicoli irregolari e tortuosi riempiti di elettrolita (Norinelli, 1982).

Un altro fattore che influenza la resistività è la *temperatura*: un aumento di quest'ultima, infatti, causa un incremento della mobilità degli ioni presenti nella soluzione elettrolitica e quindi della conduttività.

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

Valori di resistività dei terreni più comuni (Leucci, 2015; Leucci, 2019)

Dai valori noti di corrente erogata, dalla configurazione geometrica degli elettrodi e dalla differenza di potenziale misurata si calcola analiticamente la *resistività apparente* dei terreni indagati.

In particolare, la resistività di un terreno omogeneo e isotropo è data dalla seguente relazione:

$$\rho = (\Delta V/I) *K \quad (3.2)$$



dove  $K$  è il coefficiente geometrico che dipende dalla disposizione degli elettrodi sulla superficie,  $\Delta V$  è la differenza di potenziale misurata e  $I$  l'intensità di corrente.

Tuttavia, il sottosuolo non è elettricamente omogeneo e isotropo pertanto, quando in esso si immette corrente, una qualsiasi causa di variazione di conducibilità, ne altera il flusso provocando, di conseguenza, una anomala distribuzione del potenziale rispetto a quella che si avrebbe per un sottosuolo omogeneo.

In conclusione, il valore di resistività che si misura in realtà è una *resistività apparente* e va considerata come un'anomalia rispetto a quella misurabile per una distribuzione teorica del potenziale in un sottosuolo omogeneo ed isotropo di resistività pari a quella propria dell'elettrostatato più superficiale (Rapolla, Carrara, Roberti, 1992).

I profili geoelettrici acquisiti con il sistema multielettrodo permettono di effettuare un'elaborazione tomografica che restituisce la distribuzione bidimensionale o tridimensionale di resistività dei materiali indagati ottenuta da un apposito programma di inversione.

In particolare, si parla di **tomografia bidimensionale (2D)** se il sottosuolo è indagato lungo una sezione piana verticale e gli elettrodi, disposti sulla superficie del terreno, sono allineati ed equidistanti (Fig. a); invece, nella **tomografia tridimensionale (3D)** si analizza un intero volume di sottosuolo e gli elettrodi sono posti nei nodi di una griglia sulla superficie del terreno stesso (Fig.b).

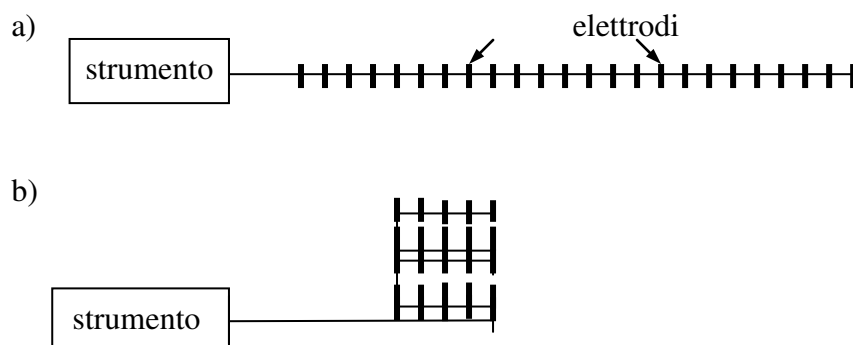


Illustrazione di due disposizioni elettrodeiche bidimensionale a) e tridimensionale b)

Nei profili tomografici, gli elettrodi, in genere picchetti di ferro o di rame sono distribuiti lungo un profilo a distanza fissa (dell'ordine del metro). La scelta della distanza dipende dalla risoluzione e dalla profondità d'indagine richiesta. Gli elettrodi vengono collegati mediante un cavo multicanale allo strumento di misura e ad un computer. Il software gestisce l'emissione di corrente e la misura della differenza di potenziale utilizzando i diversi elettrodi disponibili.

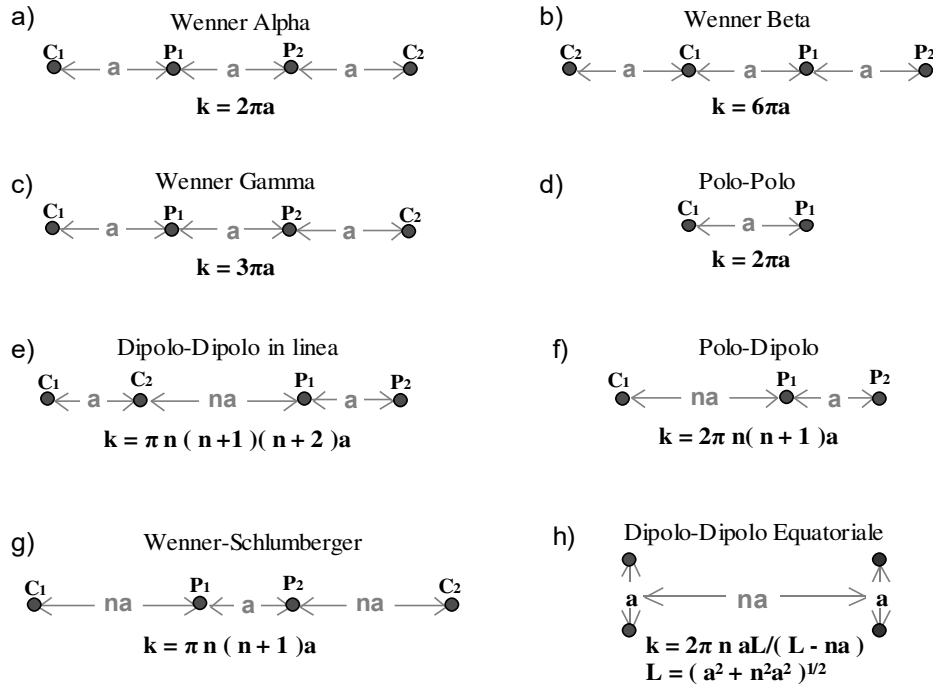
Per le prospezioni tomografiche vengono utilizzate diverse configurazioni di elettrodi di corrente e potenziale, quali ad esempio Schlumberger, Wenner, dipolo-dipolo, polo-dipolo, ecc. (Loke, 2001); la loro scelta dipende dagli scopi dell'indagine, dalle caratteristiche della regione interessata dalla misura, dal tempo a disposizione e dalla quantità di memoria disponibile sul computer.

Sono normalmente utilizzate correnti elettriche a bassa frequenza per minimizzare l'entità dei disturbi causati da servizi sotterranei e/o in superficie tipicamente presenti all'interno dei complessi industriali.

La tomografia elettrica multielettrodica aumenta di molto le prestazioni dell'indagine poiché consente di individuare le interfacce di resistività sia verticali sia orizzontali, che sono legate alla geologia stratigrafica, all'idrogeologia, alla geotecnica, ai problemi ambientali, ecc.;

la sezione di resistività completata con la sezione morfologica, restituisce una visione complessa e realistica del terreno in oggetto di studio.

In Fig. 2 sono rappresentati i vari tipi di dispositivi elettrodi. Indicheremo sempre con C1 e C2 i due elettrodi di corrente e con P1 e P2 i due elettrodi di potenziale.



**Fig. 2: Dispositivi elettrodi e corrispondenti fattori geometrici (Loke, 2001).**

Essendo, nella realtà, il sottosuolo da investigare disomogeneo, la tomografia elettrica multielettrodiica bidimensionale permette solo di ricostruire una sezione di resistività apparente, detta *pseudosezione* in funzione della lunghezza dello stendimento e della posizione degli elettrodi sullo stendimento stesso.

Il nome *pseudosezione* è giustificato dal fatto che la distanza interelettrodica, usata come variabile indipendente, determina la profondità, ma non coincide con essa.

I risultati rappresentati sotto forma di pseudosezioni di resistività apparente possono essere presentati come linee isoresistive o con colori convenzionali, che permettono di distinguere aree a bassa resistività da aree a resistività relativamente maggiore. Inoltre la forma a trapezio del disegno dipende dalla graduale diminuzione del numero dei dati ottenuti aumentando la distanza degli elettrodi.

La pseudosezione dà dunque un'immagine molto approssimativa della reale distribuzione di resistività del mezzo analizzato che, dunque, appare con forme e contorni distorti rispetto a quelli reali.

A causa delle difficoltà riscontrate nell'interpretazione dei dati, bisogna trasformare mediante algoritmo d'inversione i valori di resistività apparente, graficati in forma di pseudosezione, in sezione di resistività reale; il risultato dell'indagine multielettrodica è dunque una mappatura in termini di resistività 2D o una distribuzione volumetrica di resistività 3D, dalle quali si deducono le caratteristiche litologiche del sottosuolo.

L'algoritmo di inversione, sulla base di un modello iniziale di distribuzione di resistività, calcola, tramite un procedimento agli elementi finiti, i valori di resistività apparente nei punti in cui la resistività stessa è stata misurata.

La tecnica è essenzialmente un'ottimizzazione del metodo dei minimi quadrati in cui un modello di partenza viene iterativamente modificato finché la differenza tra questo e la pseudosezione sperimentale risulta ridotta al minimo. L'assunto di base della tecnica per la costruzione del modello è che nel sottosuolo ci sono tanti strati quanti sono i valori di resistività sulla curva sperimentale di  $\rho_a$ .

La profondità media di ogni strato è uguale alla spaziatura elettrodica utilizzata per la misura di resistività moltiplicata per una costante il cui valore deve essere tale da ridurre al minimo la differenza tra la curva teorica (ricavata dal modello) e la curva sperimentale. Questa costante viene determinata utilizzando l'algoritmo del *trial and error*, ovvero calcolando la percentuale di scarto *root mean squared* (*r.m.s.*, *radice quadrata media*) tra i valori di  $\rho_a$  osservati ed i valori  $\rho_a$  calcolati nei punti considerati.

E' da sottolineare, tuttavia, il fatto che non sempre, al più basso valore *r.m.s.* possibile, corrisponde il modello geologico di sottosuolo più vicino alla realtà, a volte, infatti, si possono ottenere variazioni poco realistiche nei valori di resistività del modello. Pertanto, l'approccio più corretto è quello di scegliere il modello di sottosuolo corrispondente all'iterazione dopo la quale l'errore *r.m.s.* non cambia significativamente. Generalmente ciò accade tra la terza e la quarta iterazione.

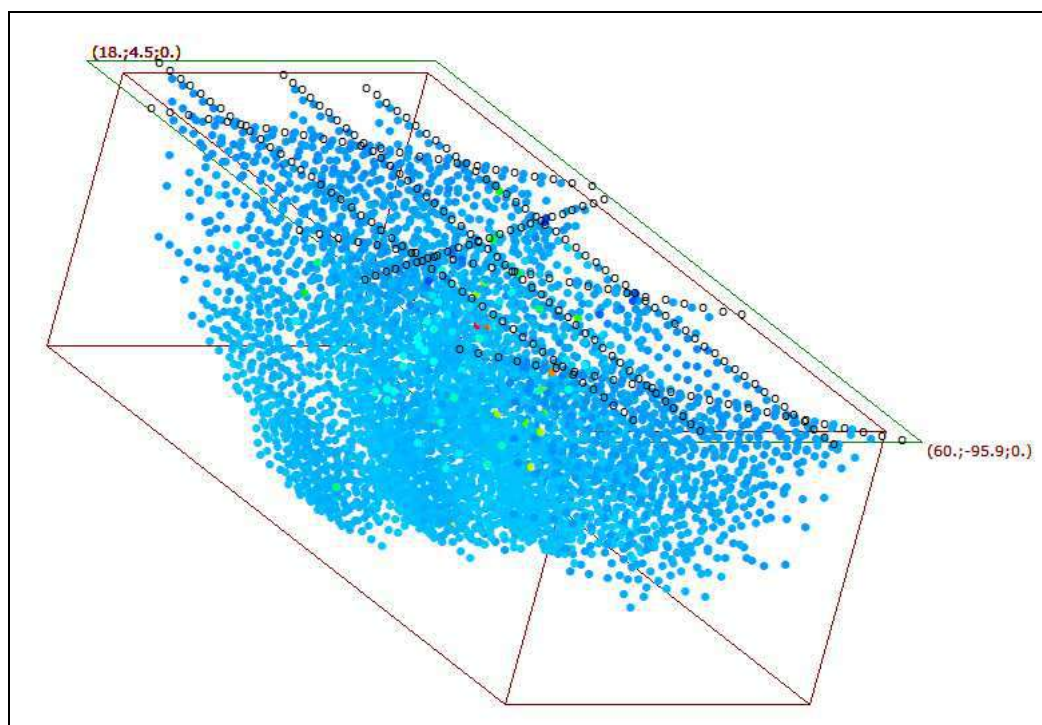
L'algoritmo associa, infine ad ogni maglia della griglia 2D o 3D, in cui viene suddiviso il corpo da ricostruire, un valore di resistività reale, imponendo a maglie vicine di non poter assumere valori di resistività reale arbitrariamente diversi. Questo tipo di limitazione deve infatti compensare il fatto che per ottenere un modello dettagliato e sufficientemente esteso da coprire l'intero volume del corpo investigato con tutte le misure, il numero di maglie è molto superiore al numero di dati sperimentali di resistività apparente.

## ESECUZIONE E ELABORAZIONE DEI PROFILI GEOELETTRICI

Nel giorno 31/08/2021, nell'area indagata sono stati eseguiti 7 profili geoelettrici così come riportato nella planimetria "Ubicazione profili geoelettrici".

Nei primi 3 profili sono stati utilizzati 48 canali per ciascun profilo con equidistanza elettrodica di 2.0 metri; nei profili n. 4,5,6 e 7 sono stati utilizzati, invece 24 canali con la medesima equidistanza elettrodica.

Per quanto riguarda il metodo di acquisizione è stata utilizzata la configurazione Dipolo-dipolo, molto utile per determinare le variazioni latero-verticali delle resistività elettrica del sottosuolo; sono stati ottenuti in totale 5025 punti di misura come si evince nella seguente figura.



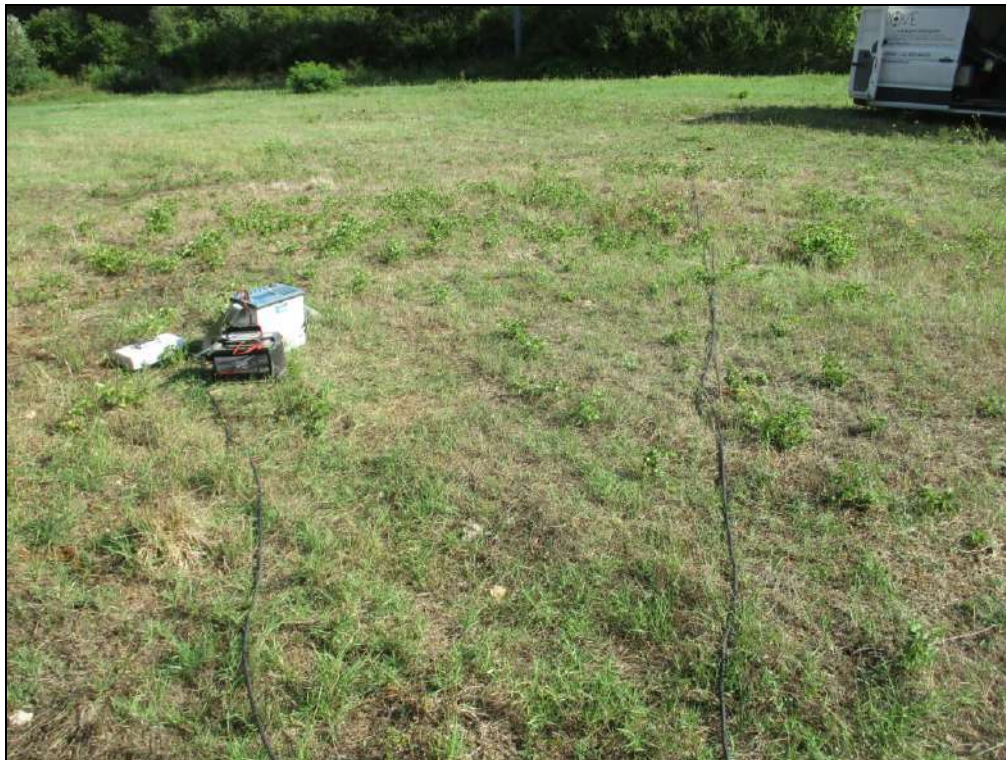
*Punti di acquisizione dei profili geoelettrici – Configurazione Dipolo-dipolo*



---●●● Profilò geoelettrico

Scala 1:1000

Ubicazione dei profili geoelettrici



*Fase di acquisizione dei dati geoelettrici*



## **ANALISI DEI DATI OTTENUTI**

Per l'elaborazione dei dati è stato utilizzato il programma ERTLlab della Geostudi Astier S.r.l..

Si è ricavato un modello 3D dato dall'elaborazione contemporanea di tutti i dati dei 7 stendimenti geoelettrici; il modello di forma parallelepipedo presenta una lunghezza di 101 metri, una larghezza di 43 metri e una profondità di 15 metri dal p.c..

Dal modello sono state ricavate varie sezioni verticali e orizzontali, inoltre sono stati isolati dei volumi del sottosuolo con un range di resistività elettrica. In allegato si riportano le tavole con le sezioni e i modelli ricavati dalla elaborazione.

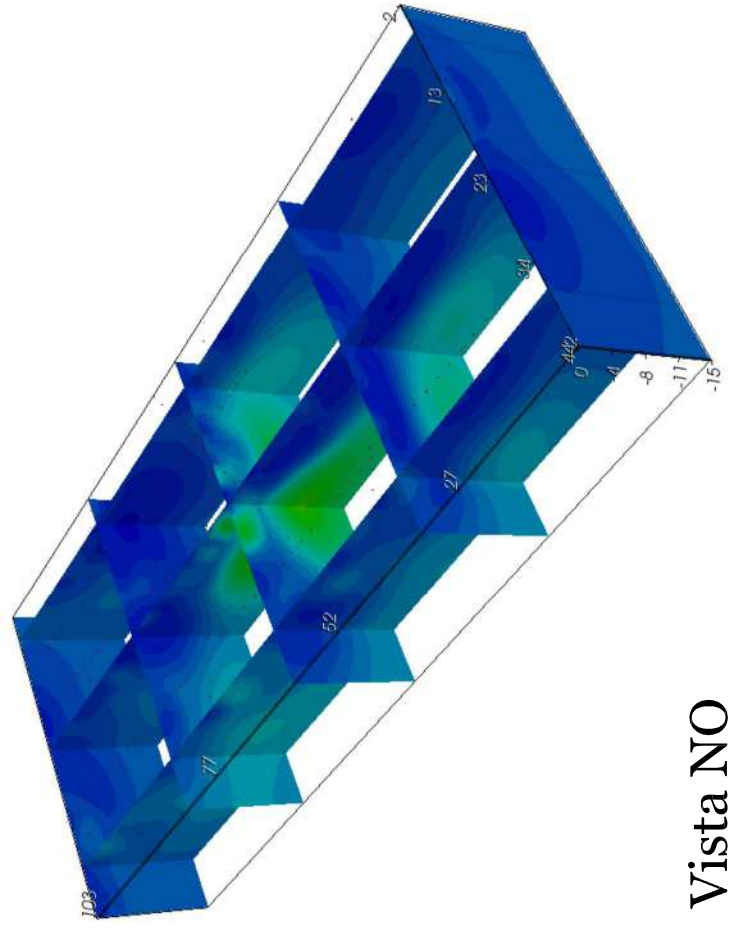
Dai risultati ottenuti si può dedurre che il sottosuolo è caratterizzato da valori di resistività variabili da 1 a 226  $\Omega \cdot m$ , in particolare i valori alto-resistivi sono limitati solo in alcune piccole zone, pertanto il sottosuolo risulta costituito principalmente da terreni molto conduttivi con presenza d'acqua. Solo nella parte centrale del modello i valori si innalzano fino a raggiungere in una piccola zona i 200  $\Omega \cdot m$ .

Ruffano, settembre 2021

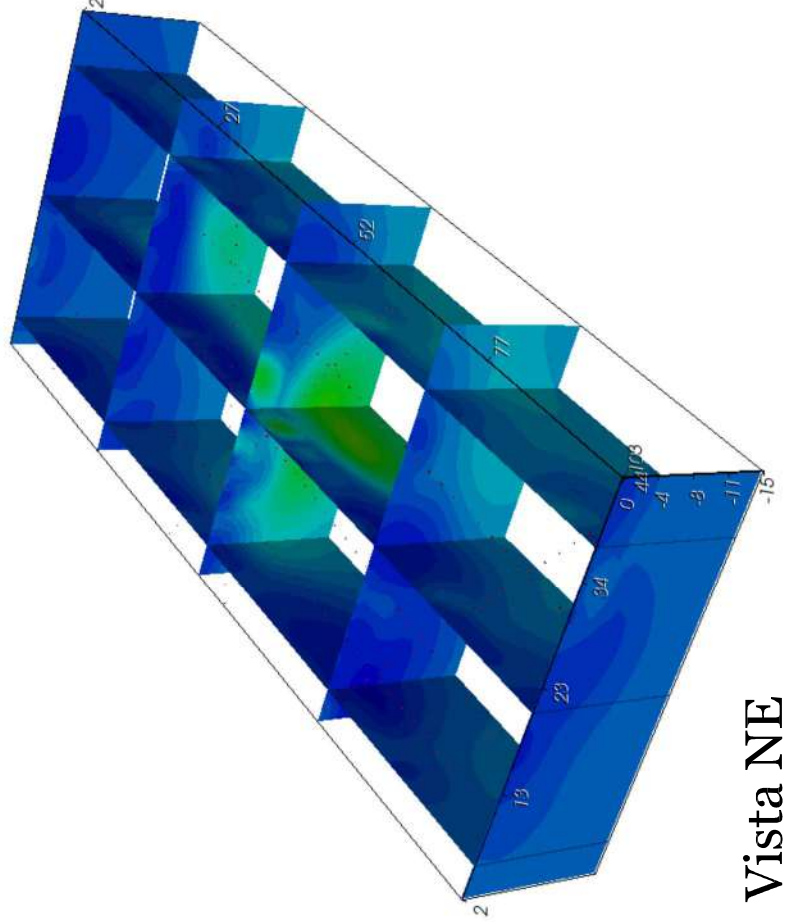
**IL DIRETTORE TECNICO**

Dott. Geol. Marcello DE DONATIS

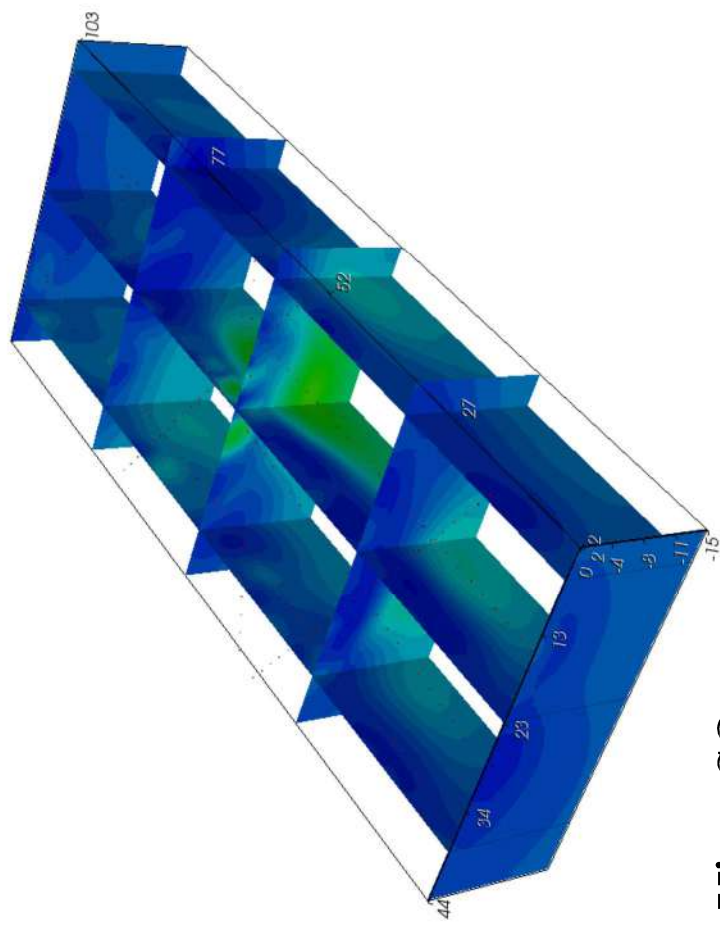
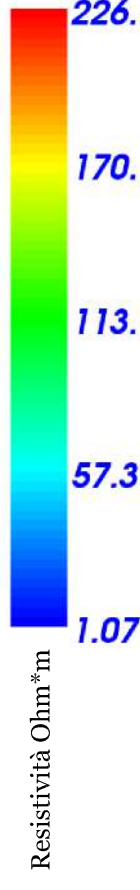
Rappresentazioni delle sezioni verticali



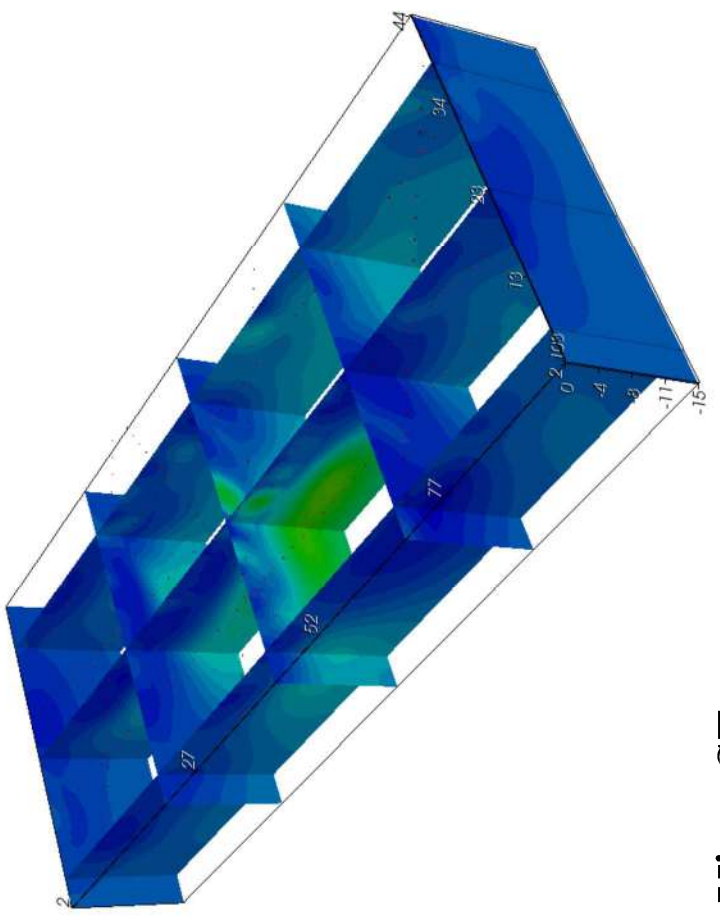
Vista NO



Vista NE



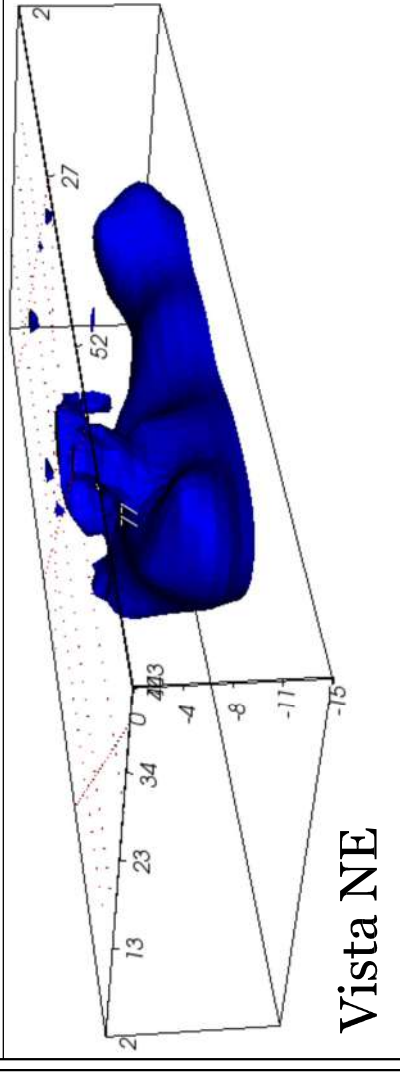
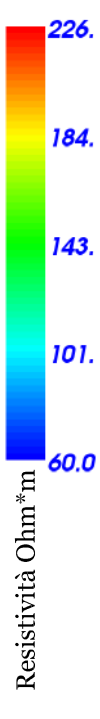
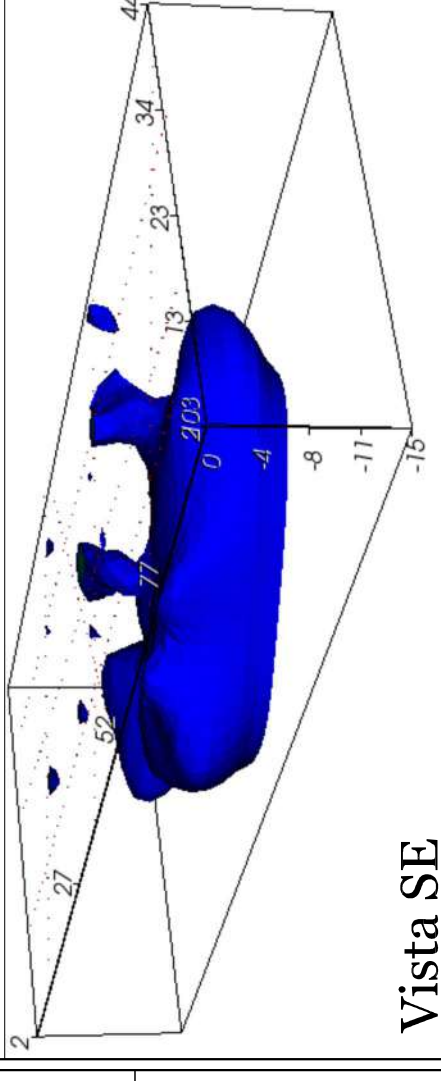
Vista SO



Vista SE

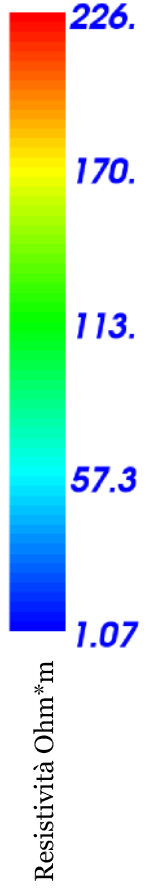
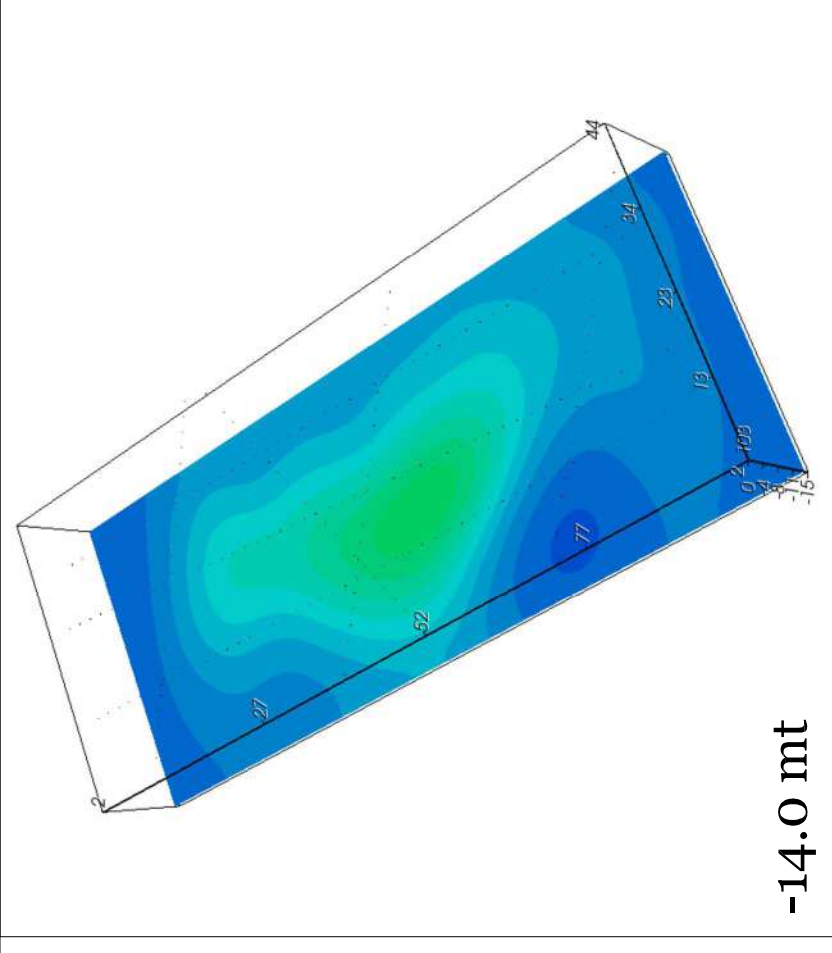
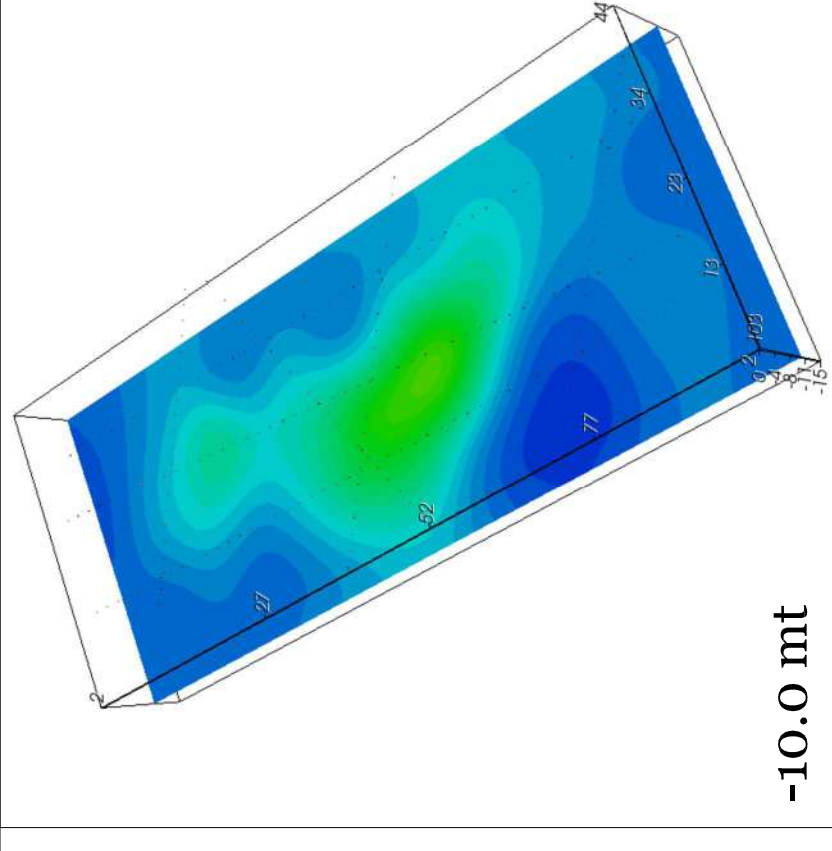
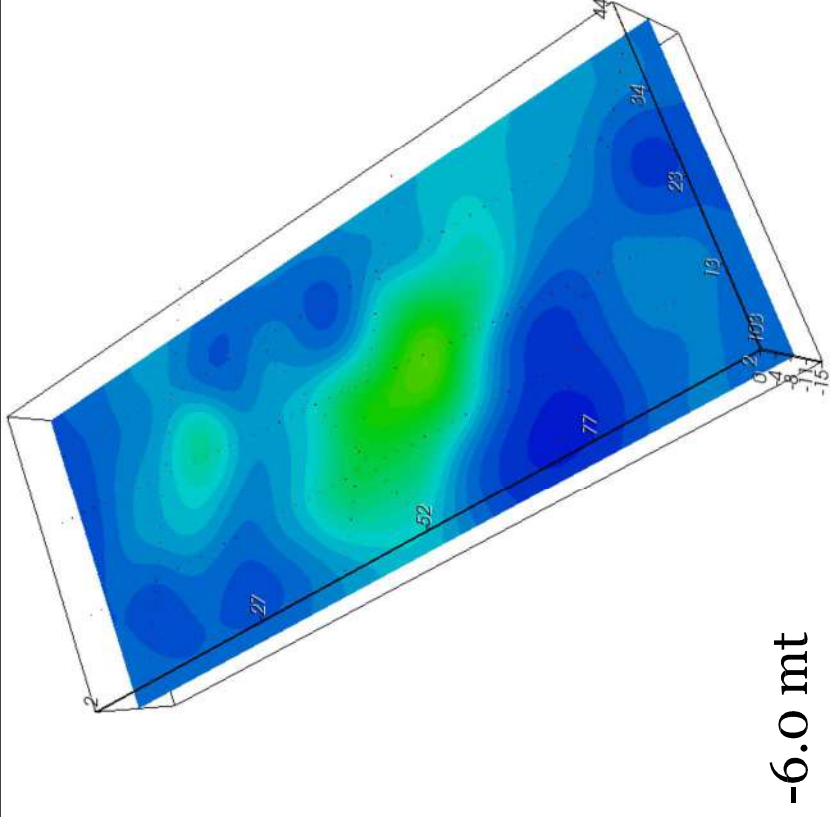
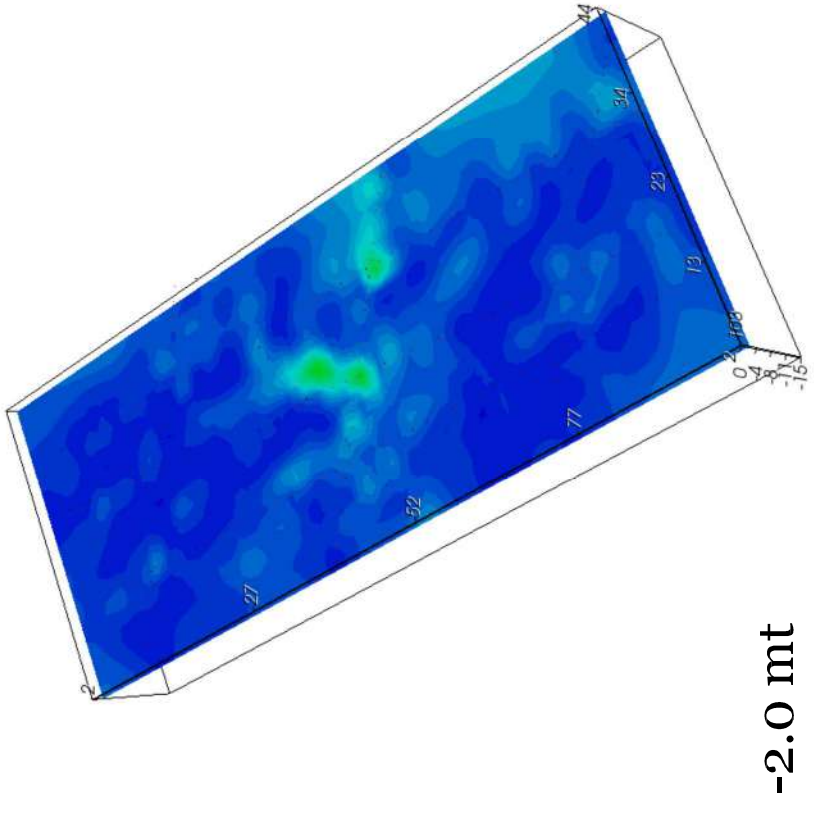
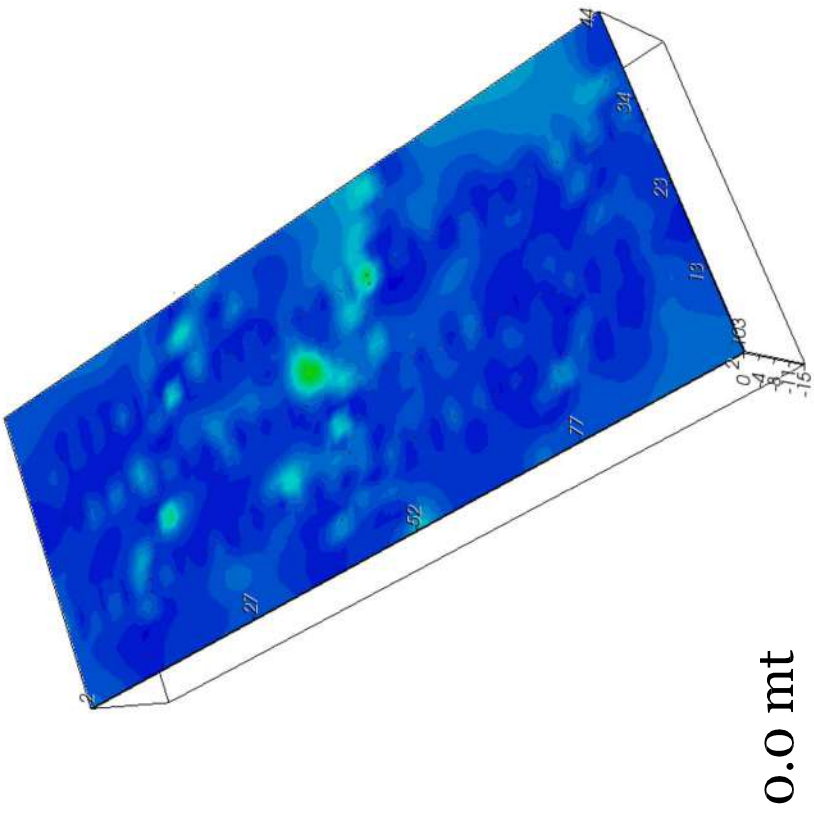


Rappresentazioni dei volumi con resistività 60-226 Ohm\*m



TOMOGRAFIA GEOELETTRICA 3D

Rappresentazioni delle sezioni piane riferite al p.c. (Vista SE)



Area sottesa dal modello geoelettrico 3D  
 Scala 1:1000  
 Planimetria dell'area indagata

TOMOGRAFIA GEOELETTRICA 3D