

8. TOMOGRAFIA ELETTRICA DI RESISTIVITÀ (ERT)

8.1- Metodo

Le prospezioni geoelettriche si basano sugli effetti prodotti da una corrente elettrica, di origine naturale o artificiale, rilevabili in superficie attraverso misure di differenza di potenziale. I metodi di investigazione attivi solitamente adottati, consistono in misurazioni della resistività elettrica.

Il metodo geoelettrico in corrente continua, detto di resistività, consiste nella determinazione sperimentale di un set di valori che, in accordo ad una formulazione matematica deducibile direttamente dalle leggi dell'elettromagnetismo per campi stazionari, descrivono una qualsiasi struttura complessa formata da materiali fisicamente diversi in contatto elettrico.

La resistività elettrica, esprime la maggiore o minore predisposizione di un materiale a farsi attraversare dalla corrente e dipende da molteplici fattori, i più importanti dei quali sono la presenza di acque ionizzate e/o di particelle minerali metalliche nella struttura dei pori. Entrambi i fattori, infatti, possono dar luogo a traiettorie interne particolarmente conduttive, in contrasto con situazioni resistive caratterizzate da strutture compatte e/o pori anidri.

In particolare, la tecnica di tomografia elettrica bidimensionale (ERT), consente di ottenere gli andamenti della resistività elettrica nel sottosuolo in termini *bidimensionali* ovvero attraverso pseudo sezioni elettriche.

In fase esecutiva, attraverso gli elettrodi C1 e C2, secondo una sequenza opportunamente predisposta ed automatizzata, si immette una corrente continua nel terreno, misurando la differenza di potenziale che si determina ai capi di altri due elettrodi, indicati con P1 e P2, posti secondo una geometria predefinita rispetto all'allineamento formato con gli altri due elettrodi C1 e C2 (Fig. 8.1).

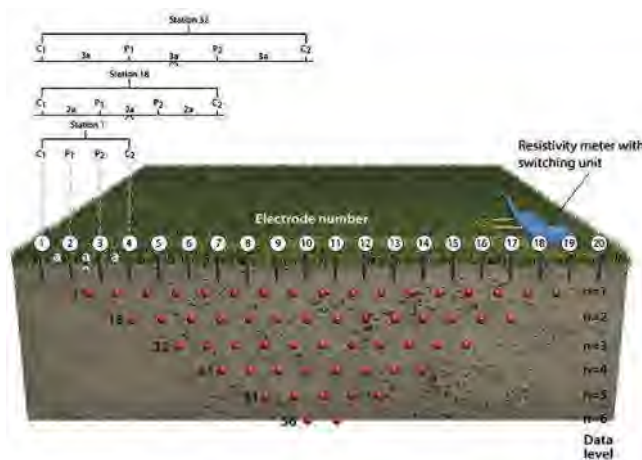


Fig. 8.1 – Schema di acquisizione di indagini geoelettriche multi elettrodo (ERT).

Poiché il sottosuolo non è elettricamente omogeneo ed isotropo, quando si immette corrente, una qualsiasi fonte di variazione della conducibilità ne altera il flusso naturale, provocando un'anomalia nella distribuzione del potenziale, rispetto ad un sottosuolo isotropo e omogeneo.

Di conseguenza, il valore di resistività che si misura nella realtà è “anomalo” rispetto al valore che si misurerebbe rispetto ad una distribuzione uniforme e prende il nome di resistività apparente (ρ_a); la resistività si calcola secondo la relazione di seguito:

$$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I}$$

in cui:

“ ρ_a ” è la resistività apparente;

“ k ” è il coefficiente geometrico, dipendente dal tipo di array multi elettrodo adoperato;

“ ΔV ” è la differenza di potenziale ai capi degli elettrodi di potenziale P1 e P2;

“ I ” rappresenta l'intensità di corrente inviata tramite gli elettrodi di corrente C1 e C2.

8.2- Strumentazione utilizzata

Per l'esecuzione delle indagini tomografiche elettriche, è stata adoperata la strumentazione di cui si descrivono di seguito le caratteristiche principali:

- Georesistivimetro multicanale **MAE X-612 EM 96 Plus**, con precisione della misura di $\pm 0,2 \mu A$, tensione massima in uscita (picco-picco) $\pm 800 V$, potenza massima $250 W$, impedenza di ingresso $150 MOhm$, accuratezza della resistività misurata $\pm 0,5 \%$ e azzeramento automatico dei potenziali spontanei.
- Elettrodi in acciaio impolarizzabili.
- Set di cavi in PUR multipolari ognuno munito di 24 “take out” per il collegamento agli elettrodi.

La sequenza di scansione dei picchetti è stata preliminarmente prefissata, via software, mediante l'elaborazione di una matrice di punti, stabilendo il passo ed il valore dei livelli di approfondimento, i quali vanno a definire la densità spaziale e, conseguentemente, la risoluzione verticale/orizzontale delle misure.

Per ridurre gli effetti indotti dal rumore, sono state eseguite fino a 5 iterazioni da cui è stato calcolato il valore medio e la deviazione standard.

In relazione alla posizione reciproca degli elettrodi di corrente rispetto a quelli di potenziale, è possibile realizzare varie tipologie di configurazione elettrodoica o *array*.

Il dispositivo scelto, per le indagini in oggetto, è quello Wenner - Schlumberger, che prevede una spaziatura tra gli elettrodi di potenziale costante, mentre la distanza tra gli elettrodi di corrente aumenta, secondo multipli interi di tale valore di spaziatura.

Attraverso questa configurazione è possibile ottenere una buona copertura sia orizzontale che verticale del sottosuolo indagato, un buon approfondimento delle indagini e un'intensità del segnale misurato maggiore, rispetto ad altre configurazioni elettrodoiche simili.

8.3- Elaborazione dati

Dalle misurazioni di campo si ottiene una pseudo sezione del dato “misurato”, che fornisce un’ approssimazione della distribuzione di resistività nel sottosuolo dando un primo step per un’ interpretazione quantitativa.

Il passo successivo è la risoluzione del cosiddetto modello diretto mediante il quale si ottiene una pseudo sezione bidimensionale in cui è rappresentata la distribuzione della resistività apparente calcolata, avvalendosi di un ipotetico rilievo compiuto sulla medesima struttura.

L’elaborazione del modello diretto si esegue suddividendo il sottosuolo in un insieme di blocchi regolari, o celle elementari, per ognuno dei quali è determinata la resistività apparente mediante un procedimento iterativo ai minimi - quadrati; successivamente si verifica se il valore calcolato sia in accordo o meno con i valori di resistività misurati durante la fase di campo. In questa fase possono essere poste in input al modello eventuali strutture sepolte, se ipotizzate, quali aree fratturate, corpi sepolti, etc.

La suddetta procedura consente di ottenere la pseudo sezione “calcolata”.

Verificata la congruenza tra la pseudo sezione misurata e la pseudo sezione calcolata, si deve procedere alla modellazione di un sottosuolo le cui caratteristiche elettriche siano proprio definite dai valori di resistività misurati in superficie.

Tuttavia, affinché si possa risalire ad un modello di sottosuolo che sia in accordo con i dati misurati, è essenziale avvalersi dei cosiddetti metodi d’inversione. La procedura d’inversione comporta che i parametri del modello siano costituiti da valori di resistività assegnati all’insieme di blocchi regolari costituenti il sottosuolo che sono posti successivamente a confronto con i valori misurati di resistività apparente.

Siccome è noto che per lo stesso insieme di dati esiste un’ ampia gamma di modelli i cui valori calcolati di resistività apparente collimano con il dataset misurato, il metodo d’inversione cerca di minimizzare la differenza tra i valori di resistività apparente misurata e calcolata (problema di equivalenza). La variazione riscontrata è espressa in termini di scarto quadratico medio. L’ iterazione che consente di ottenere un accordo tra i dati con il minore RMS possibile fornisce, quindi, il modello di sottosuolo che viene analizzato in fase interpretativa.

Per l’elaborazione dei dati di resistività, è stato utilizzato l’ algoritmo di Loke e Barker (1996) ed in particolare il **software RES2DINV™** della **Geotomo Int..**

Le pseudo sezioni bidimensionali ottenute, sono state rappresentate mediante software di contouring come **Surfer®** della **Golden Software Inc..**

8.4- Attività di campo

Come detto in premessa, sono stati eseguiti **n.4 stendimenti di tomografia geoelettrica**, di cui si riporta il dettaglio relativo alle lunghezze, al numero di elettrodi utilizzati e alla distanza interelettrodo.

#	Id. profilo	Id. sito	Lunghezza (m.l.)	N° canali	Spaziatura (m)
1	ERT1	Frana vapordotto S. Paolo	77,5	32	2,5
2	ERT2	Frana vapordotto S. Paolo	77,5	32	2,5
3	ERT3	Frana vapordotto S. Paolo	62,0	32	2,0
4	ERT4	Frana vapordotto S. Paolo	62,0	32	2,0

L'ubicazione delle indagini, fornita dalla Committente, è stata talora rimodulata nel rispetto delle indicazioni di progetto in modo da fornire una posizione in grado di coprire in maniera omogenea, in base alla logistica, le aree oggetto di indagine.



Fig. 8.2 – Frana vapordotto San Paolo. Larderello (PI). Ubicazione della prospezione geoelettriche (in arancione il punto iniziale, in celeste il punto finale del profilo geoelettrico).

Terminate le attività di acquisizione, anche nel caso degli stendimenti geoelettrici si è proceduto al rilievo topografico di precisione degli elettrodi, con opportuni sistemi di georeferenziazione GPS Leica Geosystems GX 1200.

A seguire, vengono riportate alcune foto eseguite durante le fasi di acquisizione in campo e l'elenco coordinate dei punti rilevati, nel sistema di riferimento UTM-WGS84.



Fig. 8.3 – Frana vapordotto San Paolo. Larderello (PI). Foto del profilo geoelettrico ERT1.



Fig. 8.4 – Frana vapordotto San Paolo. Larderello (PI). Foto del profilo geoelettrico ERT2.



Fig. 8.5 – Frana vapordotto San Paolo. Larderello (PI). Foto del profilo geoelettrico ERT3.



Fig. 8.6 – Frana vapordotto San Paolo. Larderello (PI). Foto del profilo geoelettrico ERT4.

N° p.to	Sigla profilo_Id. elettrodo (vapordotto S. Paolo)	Sistema di riferimento UTM-WGS84 Fuso 32.		
		Coordinata Est	Coordinata Nord	Quota ortometrica (m s.l.m.)
01	ERT1_ch.01	654260,794	4789084,957	504,16
02	ERT1_ch.02	654262,609	4789083,242	504,37
03	ERT1_ch.03	654264,596	4789081,619	504,49
04	ERT1_ch.04	654266,439	4789079,947	504,58
05	ERT1_ch.05	654268,348	4789078,478	504,81
06	ERT1_ch.06	654270,248	4789076,811	504,83
07	ERT1_ch.07	654272,181	4789075,128	504,78
08	ERT1_ch.08	654273,961	4789073,669	504,86
09	ERT1_ch.09	654275,849	4789071,828	504,88
10	ERT1_ch.10	654277,478	4789070,319	505,01
11	ERT1_ch.11	654279,204	4789068,806	506,77
12	ERT1_ch.12	654281,325	4789067,128	507,13
13	ERT1_ch.13	654283,291	4789065,658	507,28
14	ERT1_ch.14	654285,185	4789064,182	508,26
15	ERT1_ch.15	654287,09	4789063,097	509,30
16	ERT1_ch.16	654288,951	4789061,388	510,45
17	ERT1_ch.17	654290,284	4789059,806	511,30
18	ERT1_ch.18	654292,462	4789058,414	511,89
19	ERT1_ch.19	654294,076	4789057,116	512,20
20	ERT1_ch.20	654295,906	4789055,77	512,71
21	ERT1_ch.21	654298,274	4789053,543	513,35
22	ERT1_ch.22	654299,934	4789052,546	513,79
23	ERT1_ch.23	654302,170	4789051,223	514,50
24	ERT1_ch.24	654304,013	4789049,819	515,29
25	ERT1_ch.25	654305,959	4789048,426	515,56
26	ERT1_ch.26	654307,788	4789046,873	516,60
27	ERT1_ch.27	654309,133	4789045,538	517,04
28	ERT1_ch.28	654311,253	4789043,836	517,92
29	ERT1_ch.29	654312,896	4789042,657	518,13
30	ERT1_ch.30	654314,549	4789041,228	519,08
31	ERT1_ch.31	654316,137	4789040,004	520,70
32	ERT1_ch.32	654317,879	4789038,518	521,69

N° p.to	Sigla profilo_Id. elettrodo (vapordotto S. Paolo)	Sistema di riferimento UTM-WGS84 Fuso 32		
		Coordinata Est	Coordinata Nord	Quota ortometrica (m s.l.m.)
01	ERT2_ch.01	654302,060	4789021,849	500,94
02	ERT2_ch.02	654300,461	4789023,122	501,88
03	ERT2_ch.03	654298,518	4789024,475	502,94
04	ERT2_ch.04	654296,594	4789025,854	503,08
05	ERT2_ch.05	654294,864	4789027,364	503,4
06	ERT2_ch.06	654292,947	4789028,548	503,78
07	ERT2_ch.07	654290,923	4789029,735	503,68
08	ERT2_ch.08	654289,185	4789030,990	504,23
09	ERT2_ch.09	654287,238	4789032,508	505,59
10	ERT2_ch.10	654285,319	4789034,093	506,04
11	ERT2_ch.11	654283,174	4789035,336	506,45
12	ERT2_ch.12	654282,294	4789037,113	506,96
13	ERT2_ch.13	654280,278	4789039,081	507,26
14	ERT2_ch.14	654277,759	4789040,103	507,53
15	ERT2_ch.15	654275,615	4789041,376	508,29
16	ERT2_ch.16	654273,864	4789042,708	509,12
17	ERT2_ch.17	654272,110	4789044,283	510,09
18	ERT2_ch.18	654270,346	4789045,535	510,87
19	ERT2_ch.19	654268,448	4789046,725	511,08
20	ERT2_ch.20	654266,405	4789048,815	510,94
21	ERT2_ch.21	654264,479	4789050,429	513,02
22	ERT2_ch.22	654262,489	4789051,669	512,56
23	ERT2_ch.23	654260,536	4789053,419	513,49
24	ERT2_ch.24	654258,653	4789054,823	513,86
25	ERT2_ch.25	654257,180	4789056,172	514,16
26	ERT2_ch.26	654255,271	4789058,055	514,79
27	ERT2_ch.27	654253,158	4789059,502	516,02
28	ERT2_ch.28	654251,754	4789060,372	517,22
29	ERT2_ch.29	654249,401	4789062,729	518,21
30	ERT2_ch.30	654247,597	4789064,487	518,74
31	ERT2_ch.31	654245,892	4789065,946	519,62
32	ERT2_ch.32	654244,101	4789067,410	520,95

N° p.to	Sigla profilo_Id. elettrodo (vapordotto S. Paolo)	Sistema di riferimento UTM-WGS84 Fuso 32		
		Coordinata Est	Coordinata Nord	Quota ortometrica (m s.l.m.)
01	ERT3_ch.01	654293,311	4789033,824	515,39
02	ERT3_ch.02	654294,647	4789035,218	515,48
03	ERT3_ch.03	654295,793	4789036,879	515,57
04	ERT3_ch.04	654297,095	4789038,525	515,62
05	ERT3_ch.05	654298,351	4789039,917	515,60
06	ERT3_ch.06	654299,659	4789041,434	515,61
07	ERT3_ch.07	654300,950	4789042,970	515,59
08	ERT3_ch.08	654302,136	4789044,542	515,60
09	ERT3_ch.09	654303,374	4789046,010	515,55
10	ERT3_ch.10	654304,776	4789047,653	515,45
11	ERT3_ch.11	654305,970	4789049,074	515,57
12	ERT3_ch.12	654307,351	4789050,684	515,60
13	ERT3_ch.13	654308,679	4789052,315	515,64
14	ERT3_ch.14	654309,862	4789053,737	515,86
15	ERT3_ch.15	654311,209	4789055,424	516,05
16	ERT3_ch.16	654312,505	4789056,894	516,63
17	ERT3_ch.17	654313,576	4789058,425	517,06
18	ERT3_ch.18	654314,777	4789059,678	517,39
19	ERT3_ch.19	654316,036	4789061,094	517,79
20	ERT3_ch.20	654317,258	4789062,574	518,27
21	ERT3_ch.21	654318,499	4789064,062	518,88
22	ERT3_ch.22	654320,021	4789065,407	519,24
23	ERT3_ch.23	654321,075	4789067,063	519,73
24	ERT3_ch.24	654322,153	4789068,311	520,11
25	ERT3_ch.25	654323,448	4789069,839	520,52
26	ERT3_ch.26	654324,568	4789071,453	520,73
27	ERT3_ch.27	654325,611	4789073,138	521,22
28	ERT3_ch.28	654326,800	4789074,715	521,53
29	ERT3_ch.29	654327,991	4789076,012	521,92
30	ERT3_ch.30	654329,194	4789077,718	522,25
31	ERT3_ch.31	654330,491	4789079,281	522,56
32	ERT3_ch.32	654331,660	4789080,820	522,95

N° p.to	Sigla profilo_Id. elettrodo (vapordotto S. Paolo)	Sistema di riferimento UTM-WGS84 Fuso 32		
		Coordinata Est	Coordinata Nord	Quota ortometrica (m s.l.m.)
01	ERT4_ch.01	654266,978	4789028,447	508,69
02	ERT4_ch.02	654267,496	4789029,667	508,82
03	ERT4_ch.03	654268,618	4789031,389	509,27
04	ERT4_ch.04	654269,579	4789032,698	509,40
05	ERT4_ch.05	654270,923	4789034,118	509,36
06	ERT4_ch.06	654272,113	4789035,531	509,71
07	ERT4_ch.07	654273,260	4789037,213	510,16
08	ERT4_ch.08	654274,663	4789038,712	510,64
09	ERT4_ch.09	654275,982	4789040,169	510,85
10	ERT4_ch.10	654277,236	4789041,694	510,90
11	ERT4_ch.11	654278,380	4789043,146	510,85
12	ERT4_ch.12	654279,470	4789044,851	510,70
13	ERT4_ch.13	654280,622	4789046,558	510,54
14	ERT4_ch.14	654281,908	4789048,135	510,41
15	ERT4_ch.15	654283,177	4789049,751	510,42
16	ERT4_ch.16	654284,499	4789051,331	510,56
17	ERT4_ch.17	654285,695	4789052,776	510,78
18	ERT4_ch.18	654286,964	4789054,377	510,76
19	ERT4_ch.19	654288,218	4789055,973	511,02
20	ERT4_ch.20	654289,366	4789057,426	511,35
21	ERT4_ch.21	654290,664	4789058,961	511,59
22	ERT4_ch.22	654292,069	4789060,321	511,55
23	ERT4_ch.23	654293,471	4789061,856	511,51
24	ERT4_ch.24	654295,021	4789063,200	511,62
25	ERT4_ch.25	654296,200	4789064,749	511,68
26	ERT4_ch.26	654297,328	4789066,203	512,08
27	ERT4_ch.27	654298,597	4789067,866	512,49
28	ERT4_ch.28	654299,510	4789069,485	513,24
29	ERT4_ch.29	654300,848	4789070,761	513,28
30	ERT4_ch.30	654302,018	4789072,295	513,79
31	ERT4_ch.31	654304,120	4789074,201	512,49
32	ERT4_ch.32	654305,156	4789075,623	513,35

8.5- Risultati tomografia elettrica di resistività

Di seguito, si riportano alcune considerazioni scaturite dall'analisi delle risultanze delle prospezioni geoelettriche.

Per ciascuna linea è stata rappresentata sia la pseudo sezione relativa ai valori misurati in campo (in alto), sia il modello risultante dal processo di inversione tomografica (in basso).

Si rammenta che la scala colorimetrica è di tipo logaritmico; questo consente di apprezzare variazioni, anche di piccola entità, nei valori di resistività.

Tuttavia, per maggior chiarezza, accanto alla scala logaritmica, sono stati riportati i valori equivalenti, espressi secondo una scala lineare ($\Omega \cdot m$), come riportato nella figura che segue (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).



Fig. 8.7 – Pseudo sezione tomografica 2D di resistività. Scala colorimetrica di rappresentazione.

In primo luogo, i valori di resistività misurati per la sezione ERT1, risultano raccolti intorno ad una distribuzione piuttosto ristretta compresa tra valori poco al di sopra dei 10 Ohm*m, fino ad un massimo superiore agli 80 Ω *m.

Dall'analisi delle pseudo sezioni tomografiche di resistività, è emersa una differenziazione tra la parte iniziale (fino alla progressiva di 25 metri) e il resto della sezione, contraddistinta la prima da valori di resistività più bassi mentre il resto della sezione presenta resistività mediamente più alta, ad eccezione di una porzione piuttosto superficiale, compresa tra le progressive di 40 e 60 m.

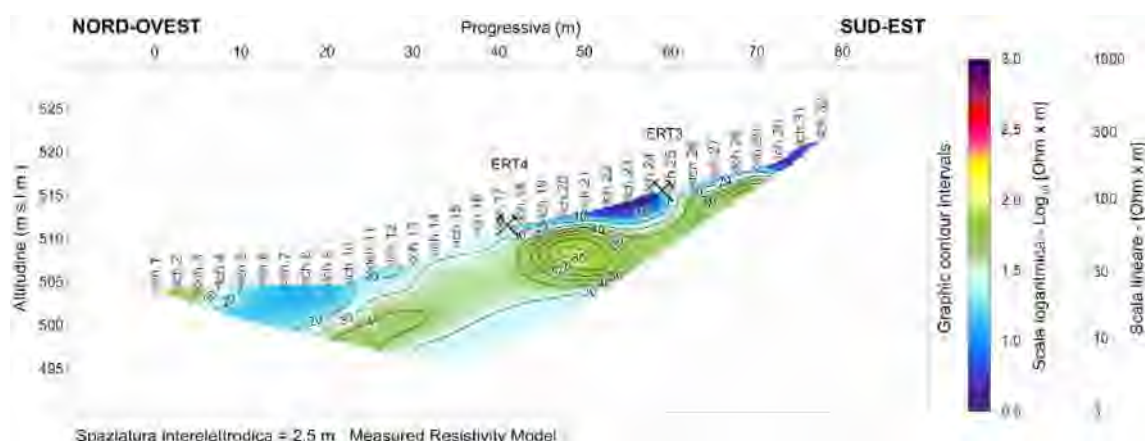


Fig. 8.8 – Frana vapordotto San Paolo. Larderello (PI). Pseudo sezione tomografica 2D di resistività (modello misurato).

Profilo ERT1.

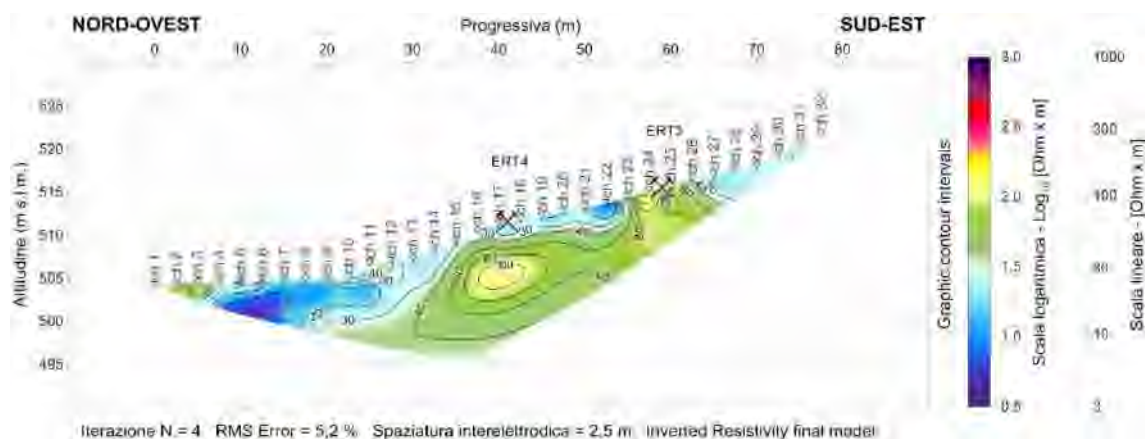


Fig. 8.9 – Frana vapordotto San Paolo. Larderello (PI). Pseudo sezione tomografica 2D di resistività (inversione tomografica).

Profilo ERT1.

Dall'analisi della pseudo sezione ERT2, eseguita parallelamente alla precedente, ma spostata più verso sud-ovest, emerge una sostanziale congruenza, anche se i valori misurati risultano raccolti in un range medio basso di resistività e raramente risultano superiori ai $30 \Omega \cdot m$.

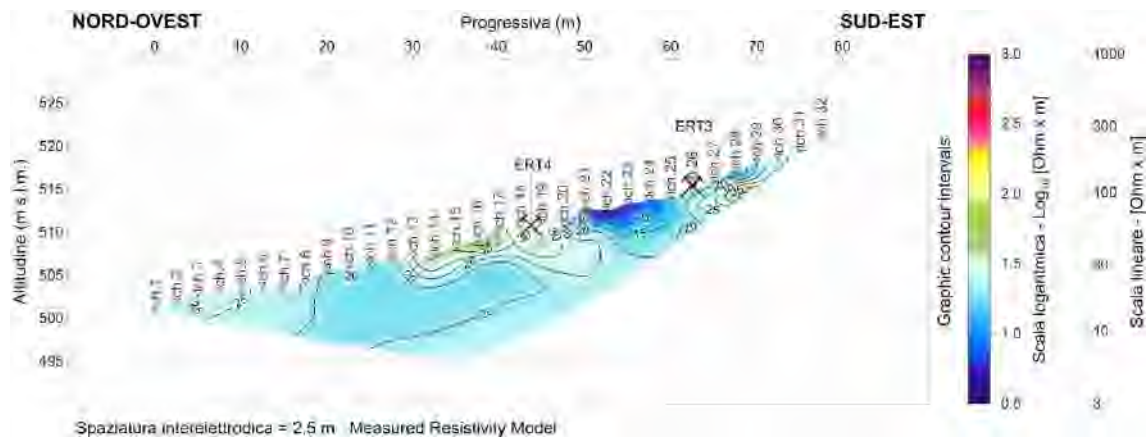


Fig. 8.10 – Frana vapordotto San Paolo. Larderello (PI). Pseudo sezione tomografica 2D di resistività (modello misurato). Profilo ERT2.

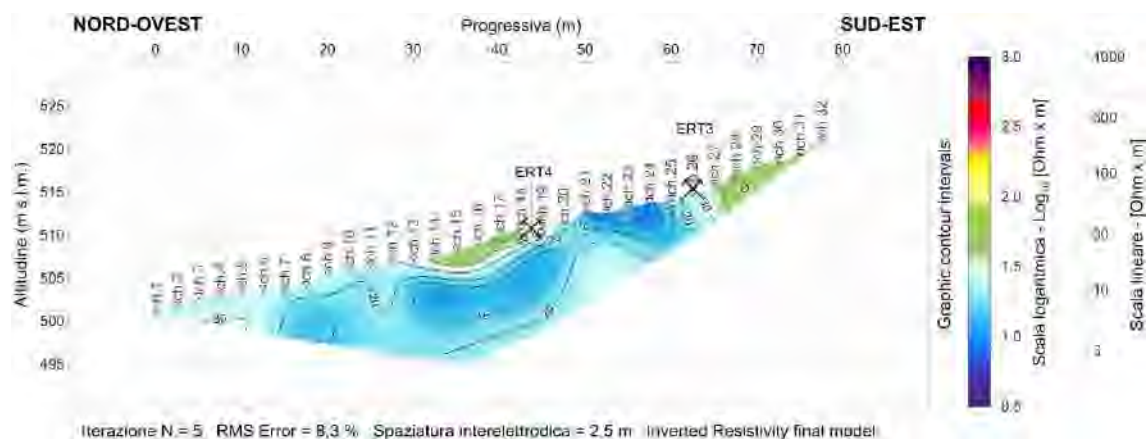


Fig. 8.11 – Frana vapordotto San Paolo. Larderello (PI). Pseudo sezione tomografica 2D di resistività (inversione tomografica). Profilo ERT2.

Per le sezioni relative al profilo ERT₃, eseguito ortogonalmente alle precedenti, invece, i valori di resistività risultano mediamente più alti e raramente inferiori ai 30 Ohm*metro.

Generalmente i valori più bassi si registrano in profondità e lungo gli estremi della sezione.



Fig. 8.12 – Frana vapordotto San Paolo. Larderello (PI). Pseudo sezione tomografica 2D di resistività (modello misurato).
Profilo ERT₃.

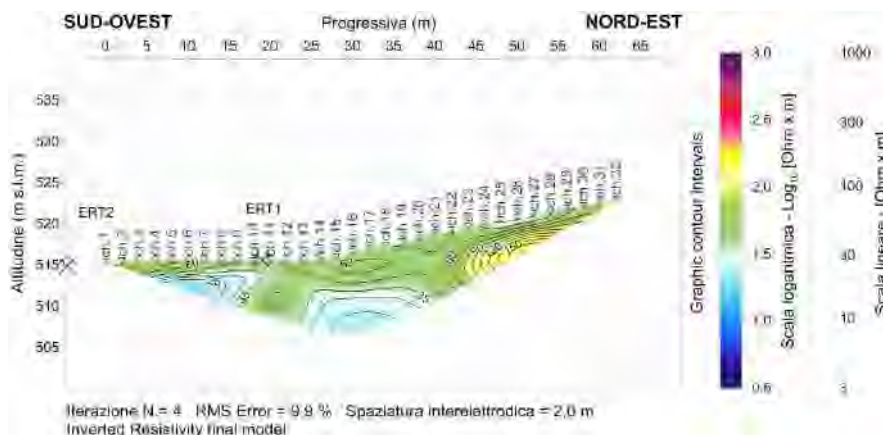


Fig. 8.13 – Frana vapordotto San Paolo. Larderello (PI). Pseudo sezione tomografica 2D di resistività (inversione tomografica). Profilo ERT₃.

Infine, nella sezione ERT₄, parallela alla precedente ma eseguita a valle della ERT₃, prevalgono i valori medio bassi di resistività.

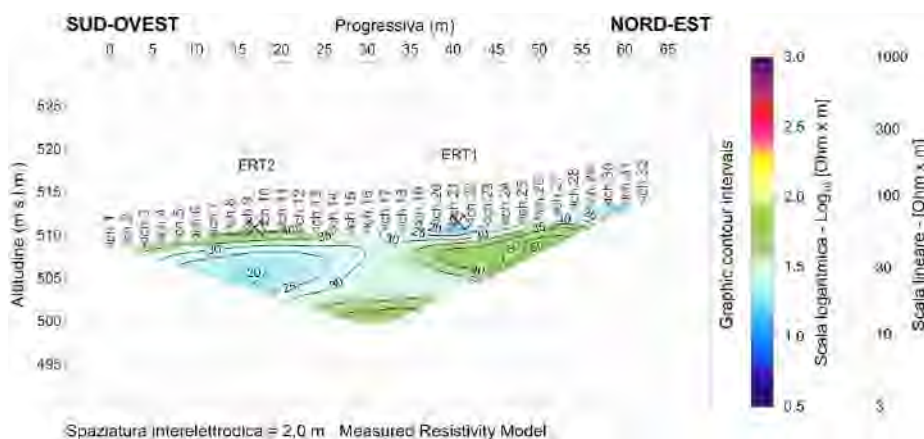


Fig. 8.14 – Frana vapordotto San Paolo. Larderello (PI). Pseudo sezione tomografica 2D di resistività (modello misurato).
Profilo ERT3.



Fig. 8.15 – Frana vapordotto San Paolo. Larderello (PI). Pseudo sezione tomografica 2D di resistività (inversione tomografica). Profilo ERT3.

I risultati ottenuti dalle misurazioni di resistività in campo, sono stati rappresentati attraverso un modello pseudo 3D da cui si evince la distribuzione delle proprietà elettriche dei terreni nello spazio tridimensionale.

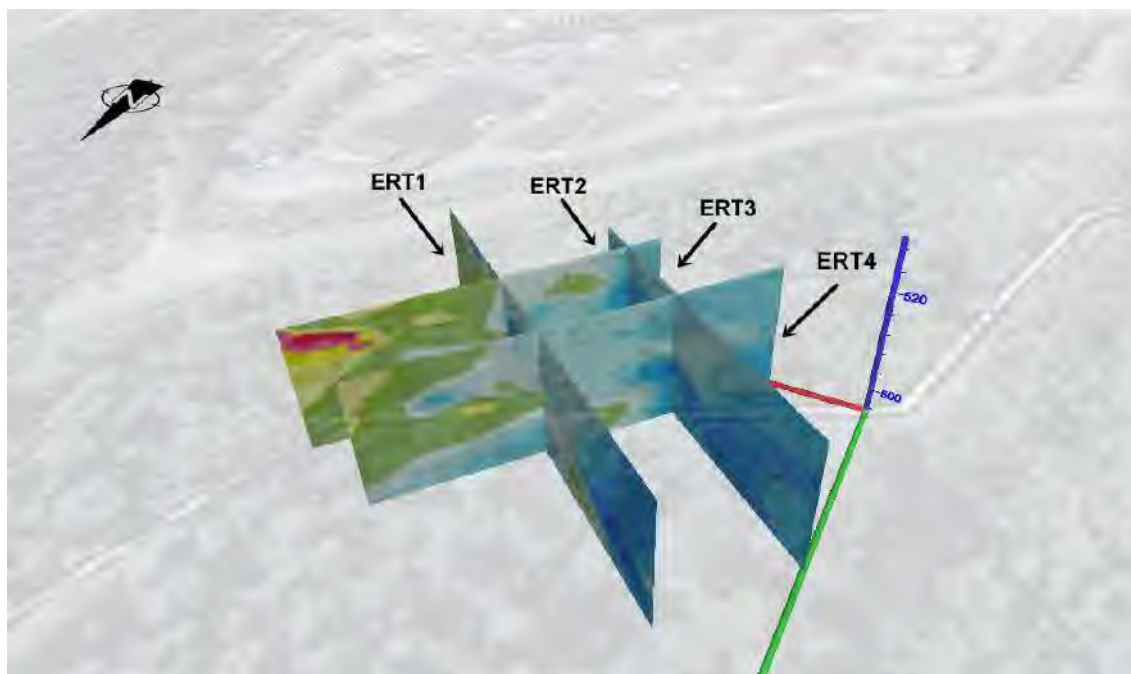


Fig. 8.16 – Frana vapordotto San Paolo. Larderello (PI). Pseudo 3D di resistività.