

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).

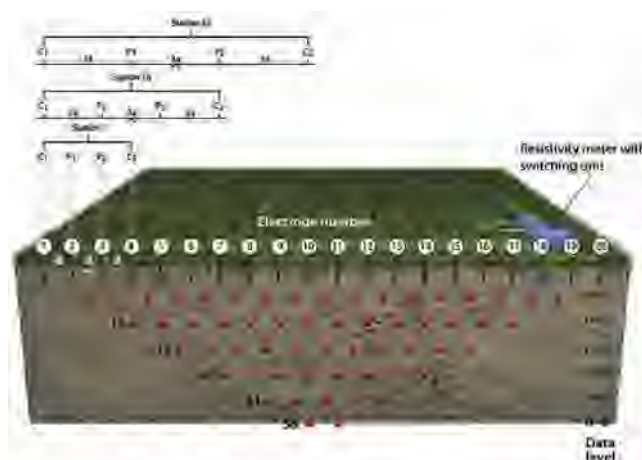


Fig. 8.1 – Schema di acquisizione di indagini geoelettriche multi elettrodo (ERT).

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 elettrodica 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 elettrodiche 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.2 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	Postazione Padule 2	77,5	32	2,5
2	ERT2	Postazione Padule 2	77,5	32	2,5

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 – Postazione Padule 2. Pomarance (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 GX1200.

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 nazionale Gauss-Boaga Fuso Ovest.



Fig. 8.3 – Postazione Padule 2. Pomarance (PI). Foto del profilo geoelettrico ERT1.



Fig. 8.4 – Postazione Padule 2. Pomarance (PI). Foto del profilo geoelettrico ERT2.

N° p.to	Sigla profilo_Id. elettrodo	Sistema di riferimento UTM-WGS84 Fuso 32.		
	(Postazione Padule 2)	Coordinata Est	Coordinata Nord	Quota ortometrica (m s.l.m.)
01	ERT1_ch.01	645346,325	4785189,964	385,81
02	ERT1_ch.02	645347,797	4785192,100	385,83
03	ERT1_ch.03	645349,296	4785194,069	385,86
04	ERT1_ch.04	645350,756	4785196,082	385,72
05	ERT1_ch.05	645352,284	4785198,048	386,03
06	ERT1_ch.06	645353,863	4785200,021	386,12
07	ERT1_ch.07	645355,382	4785201,943	386,15
08	ERT1_ch.08	645356,845	4785203,935	386,13
09	ERT1_ch.09	645358,382	4785205,980	386,18
10	ERT1_ch.10	645359,930	4785207,955	386,24
11	ERT1_ch.11	645361,446	4785209,910	386,26
12	ERT1_ch.12	645362,932	4785211,903	386,26
13	ERT1_ch.13	645364,365	4785213,995	386,22
14	ERT1_ch.14	645365,943	4785215,869	386,21
15	ERT1_ch.15	645367,136	4785217,774	386,15
16	ERT1_ch.16	645368,692	4785219,831	386,24
17	ERT1_ch.17	645370,174	4785221,617	386,17
18	ERT1_ch.18	645371,679	4785223,664	386,28
19	ERT1_ch.19	645372,732	4785225,860	386,63
20	ERT1_ch.20	645373,376	4785226,669	386,73
21	ERT1_ch.21	645375,391	4785228,425	388,83
22	ERT1_ch.22	645376,297	4785229,610	388,88
23	ERT1_ch.23	645377,441	4785230,952	389,70
24	ERT1_ch.24	645379,145	4785233,486	390,33
25	ERT1_ch.25	645380,288	4785235,980	391,23
26	ERT1_ch.26	645381,566	4785237,434	392,36
27	ERT1_ch.27	645384,243	4785238,624	393,01
28	ERT1_ch.28	645384,486	4785241,125	393,92
29	ERT1_ch.29	645385,772	4785243,006	394,67
30	ERT1_ch.30	645387,263	4785244,541	395,16
31	ERT1_ch.31	645388,614	4785246,707	395,78
32	ERT1_ch.32	645390,303	4785248,407	396,58

N° p.to	Sigla profilo_Id. elettrodo	Sistema di riferimento UTM-WGS84 Fuso 32.		
	(Postazione Padule 2)	Coordinata Est	Coordinata Nord	Quota ortometrica (m s.l.m.)
01	ERT2_ch.01	645404,328	4785231,638	397,54
02	ERT2_ch.02	645402,753	4785229,928	396,57
03	ERT2_ch.03	645401,138	4785228,406	395,09
04	ERT2_ch.04	645399,419	4785226,997	393,83
05	ERT2_ch.05	645397,612	4785225,355	393,07
06	ERT2_ch.06	645395,717	4785223,808	392,97
07	ERT2_ch.07	645394,029	4785222,330	391,81
08	ERT2_ch.08	645392,676	4785220,570	390,77
09	ERT2_ch.09	645391,220	4785218,535	390,02
10	ERT2_ch.10	645390,074	4785216,898	389,07
11	ERT2_ch.11	645388,823	4785215,243	388,04
12	ERT2_ch.12	645386,828	4785213,459	386,13
13	ERT2_ch.13	645385,108	4785211,617	386,44
14	ERT2_ch.14	645383,452	4785209,925	386,30
15	ERT2_ch.15	645381,580	4785208,386	386,30
16	ERT2_ch.16	645379,972	4785206,367	386,31
17	ERT2_ch.17	645377,848	4785204,631	386,33
18	ERT2_ch.18	645376,265	4785203,033	386,41
19	ERT2_ch.19	645374,529	4785201,295	386,43
20	ERT2_ch.20	645372,796	4785199,387	386,41
21	ERT2_ch.21	645370,950	4785197,746	386,34
22	ERT2_ch.22	645369,241	4785195,864	386,37
23	ERT2_ch.23	645367,438	4785194,132	386,29
24	ERT2_ch.24	645365,707	4785192,370	386,30
25	ERT2_ch.25	645363,902	4785190,651	386,23
26	ERT2_ch.26	645362,149	4785188,901	386,19
27	ERT2_ch.27	645360,450	4785187,083	386,14
28	ERT2_ch.28	645358,694	4785184,985	386,09
29	ERT2_ch.29	645356,734	4785183,420	386,17
30	ERT2_ch.30	645355,087	4785181,787	386,25
31	ERT2_ch.31	645353,283	4785179,940	386,31
32	ERT2_ch.32	645351,956	4785178,018	386,38

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 (*Fig. 8.5*).



Fig. 8.5 – Pseudo sezione tomografica 2D di resistività. Scala colorimetrica di rappresentazione.

Dall'analisi delle pseudo sezioni tomografiche di resistività relative al profilo ERT1, è emersa una differenziazione tra la parte superficiale della sezione, fino alla quota di circa 382,5 m s.l.m., caratterizzata da valori di velocità mediamente più alti e in genere superiori a $10 \Omega \cdot m$, fino a circa $30-40 \Omega \cdot m$, e la parte inferiore della sezione, caratterizzata invece da valori medio-bassi, in genere inferiori ai $10 \Omega \cdot m$.

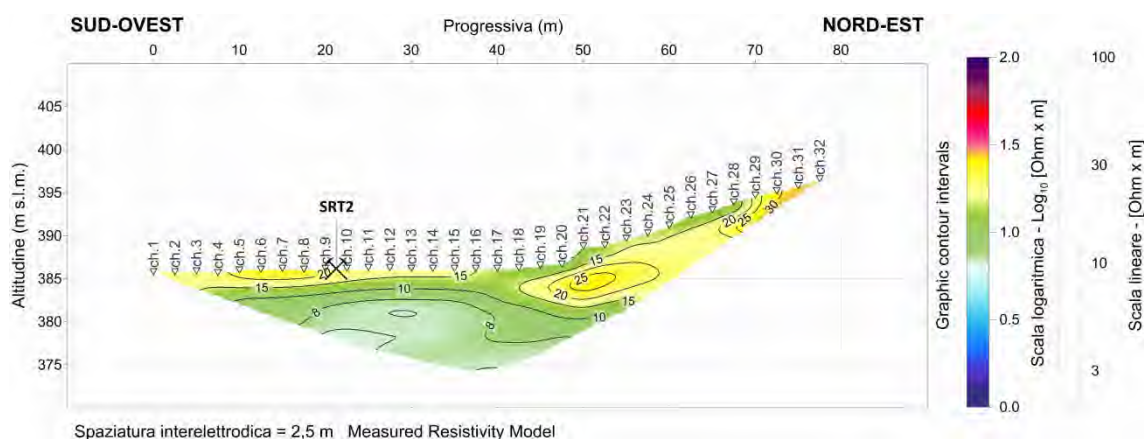


Fig. 8.6 – Postazione Padule 2. Pomarance (PI). Pseudo sezione tomografica 2D di resistività (modello misurato).

Profilo ERT1.

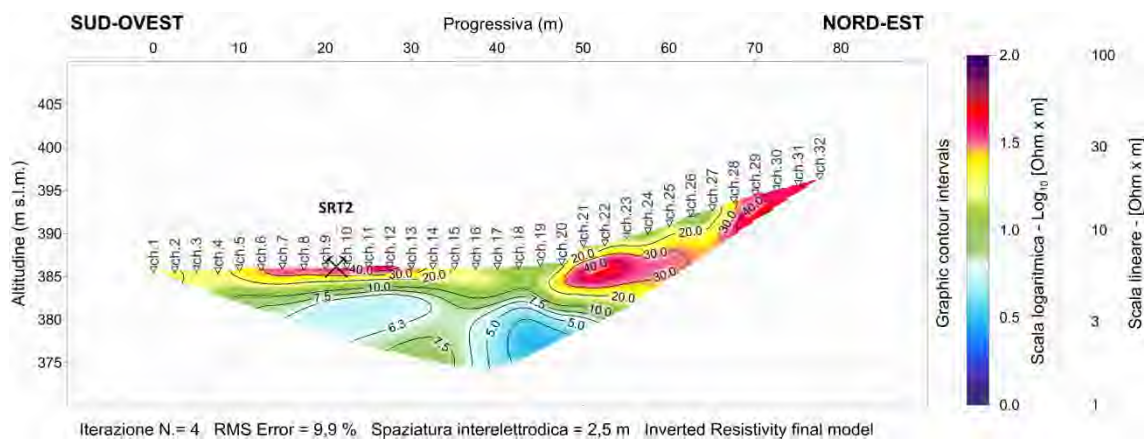


Fig. 8.7 – Postazione Padule 2. Pomarance (PI). Pseudo sezione tomografica 2D di resistività (inversione tomografica).

Profilo ERT1.

Dall'analisi delle pseudo sezioni tomografiche di resistività relative all'adiacente sezione ERT₂, è emersa una situazione molto simile alla precedente, con una porzione superficiale della sezione a più alta resistività, sovrapposto ad una a più bassa resistività. La sezione in oggetto si diversifica leggermente dalla precedente per un più elevato valore della resistività elettrica sia misurata che calcolata.

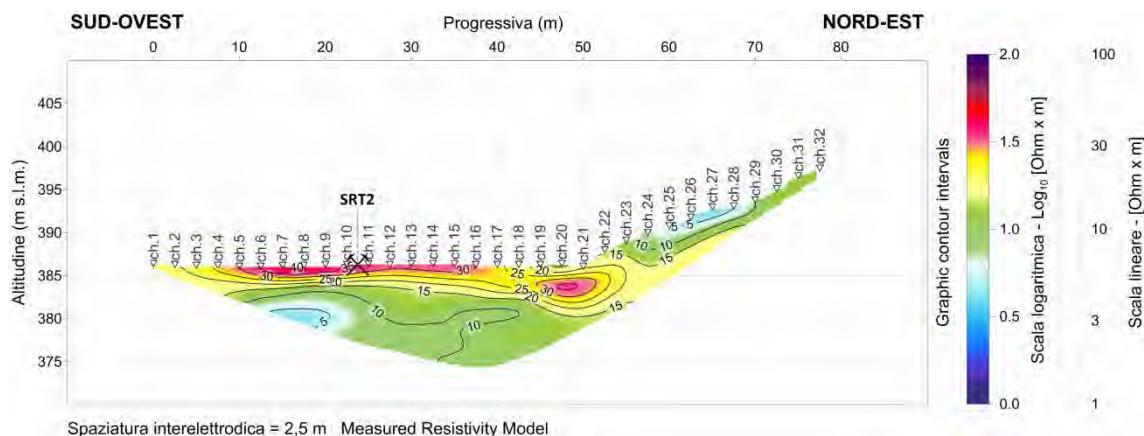


Fig. 8.8 – Postazione Padule 2. Pomarance (PI). Pseudo sezione tomografica 2D di resistività (modello misurato).

Profilo ERT₂.

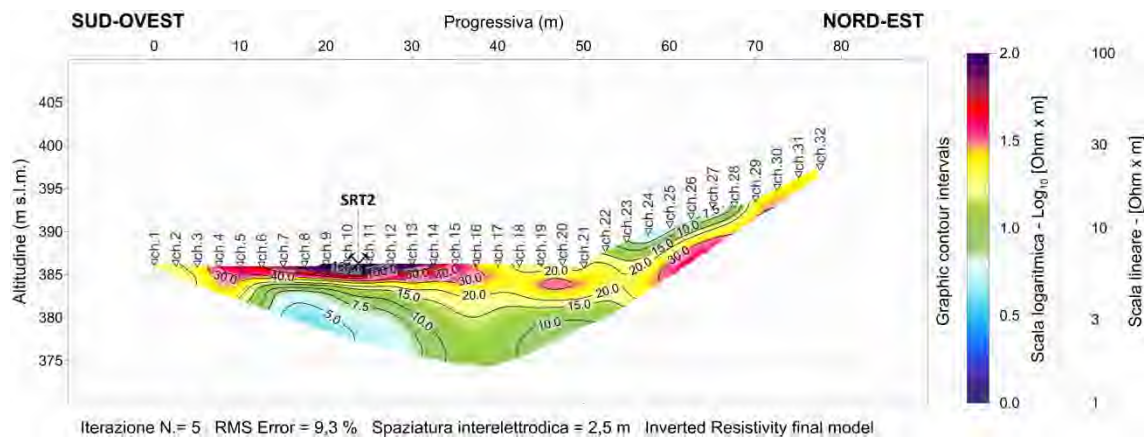


Fig. 8.9 – Postazione Padule 2. Pomarance (PI). Pseudo sezione tomografica 2D di resistività (inversione tomografica).

Profilo ERT₂.