



Ricerca di Sistema elettrico

Caratterizzazione di una zona di faglia nell'area del bacino del Sulcis: Profili elettromagnetici

A. Plaisant, A. Maiu, D. Multineddu
S. Fais, P. Ligas, F. Cuccuru, A. Pala

CARATTERIZZAZIONE DI UNA ZONA DI FAGLIA NELL'AREA DEL BACINO DEL SULCIS: PROFILI ELETTROMAGNETICI

A. Plaisant, A. Maiu, D. Multineddu (Sotacarbo S.p.A.)
S. Fais, P. Ligas, F. Cuccuru, A. Pala (CINIGEO)

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA
Piano Annuale di Realizzazione 2015

Area: B "Generazione di energia elettrica con basse emissioni di carbonio"

Progetto: B.2 "Cattura e sequestro della CO₂ prodotta dall'uso di combustibili fossili"

Obiettivo: "Produzione di energia elettrica da combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂"

Responsabile del Progetto: F.R. Picchia ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Produzione di energia elettrica da combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂"

Responsabile scientifico ENEA: Paolo Deiana

Responsabile scientifico Sotacarbo: Enrico Maggio

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	6
3 ALLEGATO	9

Sommario

Il presente lavoro si inserisce nell'ambito dell'Accordo di Programma MSE-ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico, Piano Annuale di Realizzazione 2015, relativamente al tema di ricerca B.2 "Cattura e sequestro della CO₂ prodotta dall'uso di combustibili fossili" e riguarda le attività c.4 "Caratterizzazione di una zona di faglia nell'area del bacino del Sulcis".

Viene qui descritta la caratterizzazione dell'area di faglia nell'area del bacino del Sulcis mediante indagini geofisiche di tipo elettromagnetico VLF (Very Low Frequency).

Il rilevamento elettromagnetico è stato effettuato nel mese di giugno e sono stati eseguiti 4 profili elettromagnetici finalizzati all'individuazione di eventuali zone conduttive correlabili a discontinuità strutturali e zone di alterazione.

I risultati dell'interpretazione dei profili elettromagnetici, confrontati con le conoscenze geologiche pregresse e profili sismici ad alta risoluzione realizzati ad opera dell'Unità operativa dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Oceanografia (OGS) di Trieste, hanno consentito di ipotizzare la presenza di lineazioni tettoniche e attribuirgli un significato idrogeologico.

Verranno di seguito descritte tutte le attività di campagna e le elaborazioni dei dati raccolti nell'ambito della prospezione elettromagnetica VLF.

1 Introduzione

L'area del Sulcis, e in particolare il settore di Matzaccara, risulta essere idonea per lo studio delle strutture geologiche del Bacino del Sulcis. In particolare, nell'area meridionale, dove sono ubicate le indagini oggetto di questo lavoro, sono poche le conoscenze del sottosuolo, in quanto si sono concentrate nella parte settentrionale oggetto di sfruttamento del giacimento carbonifero.

Le caratteristiche dell'area hanno fatto sì che questo sito venisse scelto per un progetto di stoccaggio geologico dell'anidride carbonica nell'acquifero sottostante ai livelli di carbone. Il lavoro si inquadra nella fase di caratterizzazione geologica, strutturale e geochimica dell'area, che precede l'esecuzione di un test di iniezione per la valutazione della fattibilità del progetto di stoccaggio geologico della CO₂.

Il progetto è diretto e coordinato dalla società SOTACARBO S.p.A. (Società di Tecnologie Avanzate Low Carbon); la società si occupa di sviluppo e miglioramento di tecnologie dedicate alla cattura dell'anidride carbonica prodotta dalla gassificazione di carbone per produzione di energia e biomasse e al successivo stoccaggio geologico controllato.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

La figura 1 riporta la rappresentazione 3D dei risultati dell'indagine e.m. realizzata nell'area di Matzaccara ("pseudosezioni di densità di corrente").

Tutte le pseudosezioni mettono in rilievo diverse zone di anomalia (elevati valori di densità di corrente, evidenziate dal colore blu) con gradienti variabili e talora intensi, causati dal passaggio repentino zone resistive - zone conduttive; tale anomalia è particolarmente intensa nelle pseudosezioni relative ai profili VLF1, VLF2 e VLF3 ed è evidenziata nella figura dalla lettera A. Le zone di anomalia indicherebbero la presenza di corpi conduttivi in giacitura sub-verticale o inclinati, correlabili, in assenza di cause di tipo artificiale, a zone di alterazione della roccia, contatti tra formazioni geologiche con differenti caratteristiche elettriche o con zone di faglia e/o frattura che favoriscono la circolazione dell'acqua nel sottosuolo.

Questa configurazione è correlabile con la presenza di trend strutturali di direzione NNE.

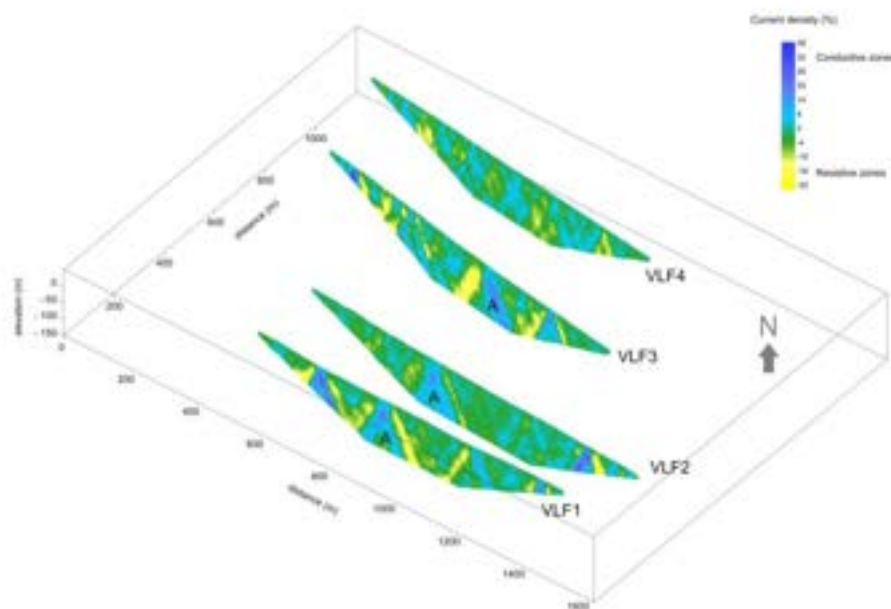


Fig.1 - Visualizzazione 3D delle pseudosezioni di densità di corrente.

L'attribuzione di un significato idrogeologico ai dati VLF è stato fatto sulla base della scelta di un opportuno profilo (VLF3) sul quale i valori di permeabilità sono stati ricavati dalle resistività mediante opportune formule empiriche.

Il confronto dei dati geofisici con quelli stratigrafico-strutturali già disponibili e la calibrazione dei valori su campioni di roccia prelevati in situ, hanno agevolato la formulazione delle ipotesi riguardo concernenti la circolazione idrica sotterranea.

Su queste basi, il profilo scelto evidenzia la presenza di due discontinuità sub-verticali interpretabili come lineazioni tettoniche riferibili a una "zona di faglia" (fig.2).

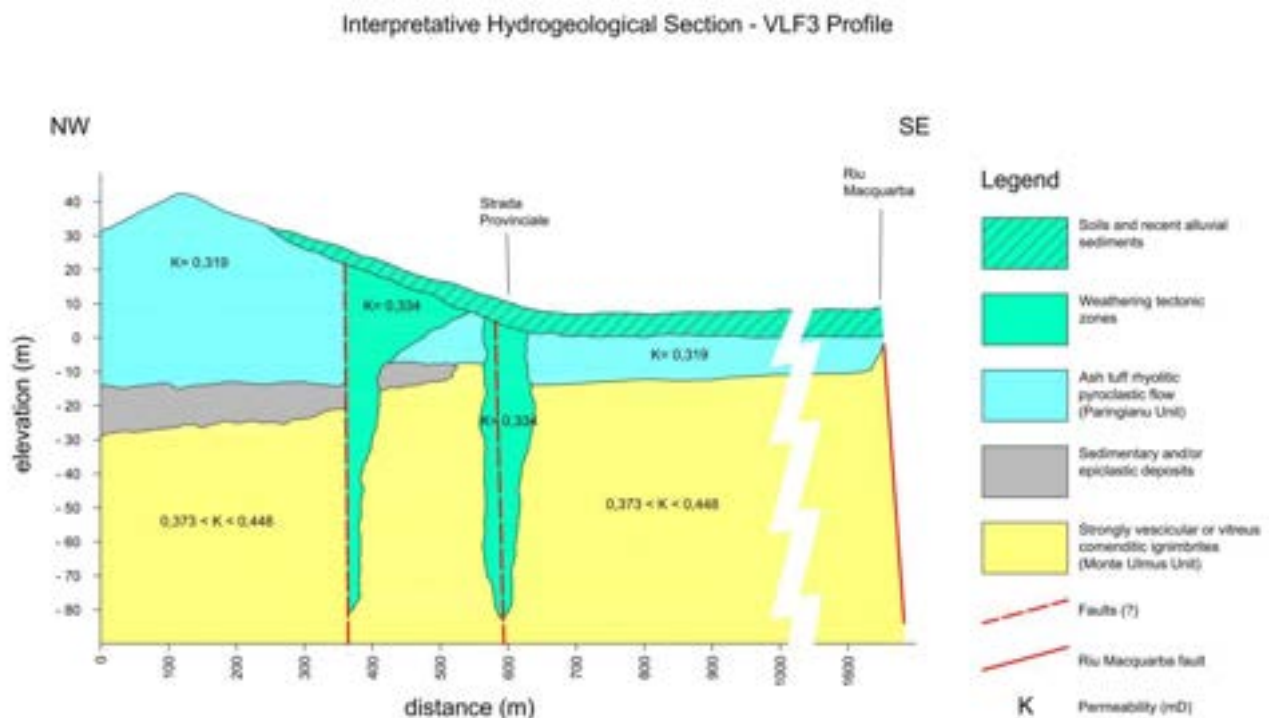


Fig.2 - Sezione geo-idrologica interpretativa in corrispondenza del profilo VLF3.

La prospezione elettromagnetica VLF effettuata in prossimità dell'abitato di Matzaccara, ha consentito di ottenere importanti elementi conoscitivi in termini di proprietà elettriche del sottosuolo. Le pseudosezioni di densità di corrente relative ai quattro profili VLF eseguiti nell'area investigata hanno messo in evidenza diverse zone di anomalia (elevati valori di densità di corrente) correlabili a zone di alterazione della roccia, contatti tra formazioni geologiche con differenti caratteristiche elettriche o con zone di faglia e/o frattura che possono favorire la circolazione dell'acqua nel sottosuolo e i processi di alterazione delle rocce con conseguente loro argillificazione.

In particolare, è stato evidenziato un "allineamento ideale" di anomalie, prossimo ad una presunta zona di faglia, la cui presenza è stata ipotizzata sulla base di analisi geochemiche e geologico-strutturali condotte dall'Unità Operativa dell'Università "La Sapienza" di Roma.

E' risultata inoltre una buona concordanza tra risultati ottenuti dalla prospezione elettromagnetica VLF e quelli relativi ad alcune sezioni di tomografia sismica realizzate dall'unità operativa dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Oceanografia Sperimentale (OGS) di Trieste: la discontinuità delle proprietà geofisiche di diversa natura indagate potrebbe essere correlata con una discontinuità tettonica presente nell'area, assimilabile alla presunta zona di faglia sopra menzionata.

Le sezioni di resistività elettrica, interpretate in chiave idrogeologica, hanno consentito di stimare i valori di permeabilità per alcune unità geologiche caratteristiche dell'area investigata.

Le numerose discontinuità laterali di proprietà elettriche, determinate con la prospezione elettromagnetica VLF e la loro interpretazione in chiave idrogeologica, insieme con le informazioni dedotte dalle sezioni di tomografia sismica elaborate da OGS (Trieste), portano ad ipotizzare la presenza di lineazioni tettoniche, tra loro più o meno parallele, ad orientamento NNE, che si ritiene possano appartenere ad una "zona di faglia" piuttosto vasta e articolata.

3 Allegati



Caratterizzazione di una zona di faglia nell'area del Bacino del Sulcis: profili elettromagnetici

RAPPORTO TECNICO-SCIENTIFICO

Agosto 2016



**CONSORZIO INTERUNIVERSITARIO NAZIONALE
PER L'INGEGNERIA DELLE GEORISORSE**

Silvana Fais
Paola Ligas
Francesco Cuccuru
Antonio Pala

INDICE

PREMESSA.....	2
1. INDAGINE ELETTROMAGNETICA VLF.....	2
1.1 Principi del metodo.....	4
1.2 Strumentazione	6
1.3 Trattamento dei dati e rappresentazione dei risultati.....	7
1.4 Analisi dei risultati relativi alla tecnica di filtraggio Karous- Hjelt.....	9
1.5 Inversione dei dati	16
1.6 Correlazione tra dati elettromagnetici e parametri idrogeologici	20
CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	23

1 PREMESSA

L'obiettivo dell'attività descritta nel presente lavoro fa parte del Piano Annuale di Realizzazione (PAR) 2015 per la Ricerca di Sistema Elettrico, sub-attività C4 ed è finalizzato a portare un contributo alla caratterizzazione di una zona di faglia nell'area di Matzaccara - Bacino Carbonifero del Sulcis (Sardegna sud-occidentale), mediante la realizzazione di una prospezione elettromagnetica VLF (Very Low Frequency).

Come è noto, mediante l'analisi dei dati elettromagnetici, è possibile individuare nel sottosuolo, zone conduttive correlabili con zone di alterazione, zone di faglia e/o frattura che possono rappresentare vie preferenziali di drenaggio delle acque. La prospezione di tipo elettromagnetico, effettuata in prossimità dell'abitato di Matzaccara è stata, pertanto, finalizzata all'identificazione di eventuali lineamenti strutturali presenti nell'area e ipotizzati dall'Unità Operativa (U.O.) dell'Università "La Sapienza" di Roma, in seguito ad analisi di tipo geochimico ed osservazioni di tipo geologico-strutturale. I profili elettromagnetici sono stati effettuati in corrispondenza di alcuni profili sismici ad alta risoluzione realizzati ad opera dell'Unità operativa dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Oceanografia Sperimentale (OGS) di Trieste, al fine di poter effettuare l'analisi comparata di dati di diversa natura, riducendo il margine d'incertezza insito nell'interpretazione di dati derivanti da metodologie di tipo indiretto.

1. INDAGINE ELETTROMAGNETICA VLF

La prospezione elettromagnetica (e.m.) VLF (Very Low Frequency) è stata finalizzata all'identificazione di zone conduttive nel sottosuolo che possono essere associate a zone di frattura e/o faglia o a zone di alterazione entro la roccia. I profili elettromagnetici (VLF1-VLF4), orientati in direzione NW-SE, sono stati realizzati secondo lo schema riportato in Figura 1. L'intervallo spaziale di campionatura del segnale e.m., lungo ciascun profilo, pari a 10 m, è stato scelto sulla base degli obiettivi dell'indagine e delle esigenze del successivo trattamento dei dati. Per la prospezione, è stata scelta la stazione emittente (UMS - 17.1 kHz - Mosca, Russia) il cui azimuth coincide con la direzione della struttura ipotizzata.

1.1 Principi del metodo

Il metodo e.m. VLF risulta di grande efficacia laddove si verificano variazioni laterali di conducibilità elettrica. Esso si fonda sull'utilizzo di campi elettromagnetici generati da stazioni trasmettenti militari che operano ad elevate potenze (500-1000Kw) e basse frequenze radio (15-30 kHz) e vengono impiegate per le comunicazioni tra sommergibili. Le predette stazioni sono dotate di antenna verticale entro la quale circola un'intensa corrente alternata che genera un campo elettromagnetico primario (c.m.p.) perpendicolare rispetto alla direzione della stazione emittente, orizzontale e uniforme per una regione abbastanza vasta (Fig.2).

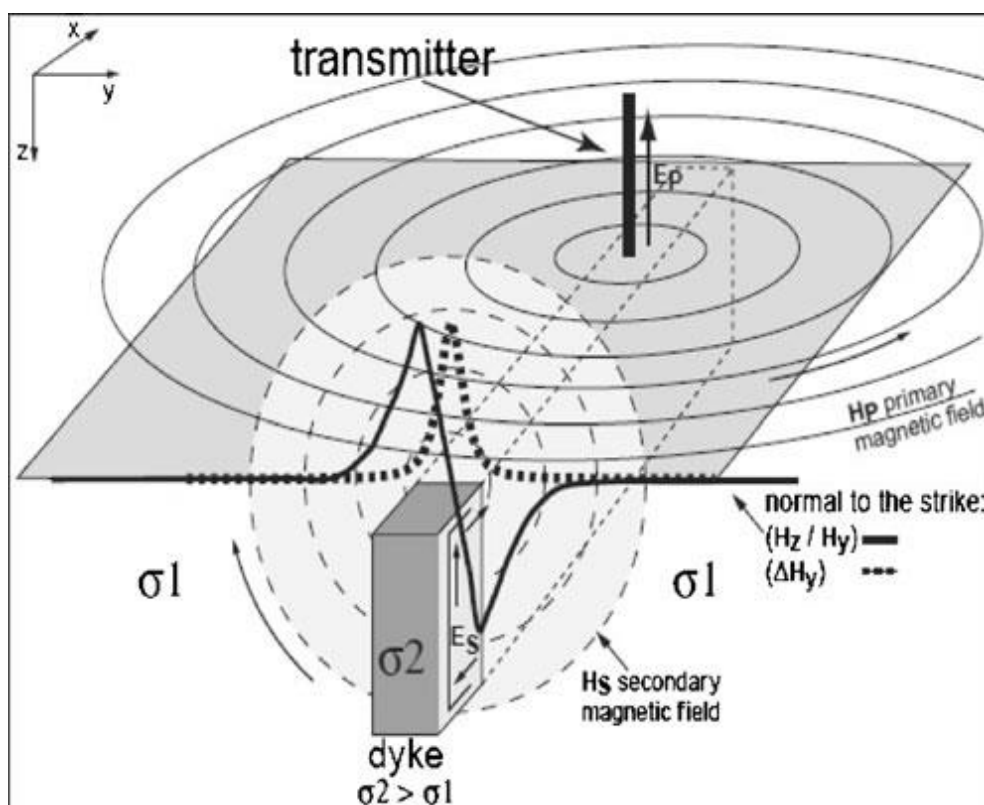


Fig.2 - Distribuzione del campo e.m. nel metodo VLF, in corrispondenza di un corpo conduttore in giacitura verticale. Courtesy from: Bosch and Müller, 2001.

Fig.2 - EM field distribution for the VLF method over a vertical conductive body. Courtesy from: Bosch and Müller, 2001.

Il c.m.p. viaggia dalla stazione trasmettente verso il ricevitore sia nella ionosfera sia al di sotto della superficie terrestre. In presenza di terreni omogenei, dal punto di vista della conducibilità elettrica, non sussistono rilevanti differenze tra il campo che si propaga al di sopra della superficie (c.m.p.) e quello che si propaga nel terreno,

piuttosto si riscontra una lieve variazione di ampiezza tra i due campi. Viceversa, laddove sono presenti terreni non omogenei, ad ogni passaggio laterale tra formazioni geologiche caratterizzate da differente conducibilità elettrica, il c.m.p. subisce un'attenuazione, una deviazione ed uno sfasamento generando un campo elettromagnetico secondario (c.m.s.) che risulta caratterizzato dalla stessa frequenza del c.m.p. ma differisce da quest'ultimo per direzione, ampiezza e fase. In superficie, il c.m.s si combina con il c.m.p. generando un campo e.m. risultante che risulta polarizzato ellitticamente. La ricostruzione dell'assetto fisico-geometrico dell'ellisse di polarizzazione permette di ottenere informazioni sul c.m.s. che rappresenta la risposta dei corpi conduttori alla sollecitazione di natura elettromagnetica. In particolare, la tangente dell'angolo di inclinazione (θ) dell'ellisse di polarizzazione (giacente nel piano che contiene la direzione del c.m.p. e la verticale del punto stazione) che l'asse minore dell'ellisse forma con la verticale passante per il punto stazione, permette di determinare la componente reale o in fase sulla verticale del c.m.s., mentre il rapporto tra i semiassi dell'ellisse ovvero l'eccentricità, fornisce una misura della componente immaginaria o in quadratura del c.m.s.. L'angolo di inclinazione (θ) dell'ellisse di polarizzazione viene anche definito angolo di "tilt" del campo risultante (c.m.p. + c.m.s.). Pertanto, la misura delle componenti (in fase e in quadratura) mediante l'impiego di bobine opportunamente orientate nello spazio, consente di ricavare informazioni sul c.m.s., ovvero sui corpi conduttori sepolti (filoni di minerali a conducibilità metallica, zone di circolazione di fluidi quali faglie e/o zone di fratture, vuoti e/o cavità con acqua, corpi di tipo argilloso, ecc.) e più precisamente sulla loro posizione, inclinazione e profondità.

Inoltre, l'assenza di energizzazione e di cavi, l'affidabilità delle misure, la maneggevolezza e il limitato peso ed ingombro della strumentazione sono requisiti che rendono questa tecnica particolarmente idonea ad una ricognizione rapida ed economica anche in aree caratterizzate da scarsa agibilità ad esempio a causa di difficili condizioni operative (morfologia accidentata, folta vegetazione, ecc...).

1.2 Strumentazione

Per l'indagine VLF è stato impiegato il sistema WADI dell'ABEM Instrument (Svezia), un indicatore di campo elettromagnetico a bassa frequenza. Il dispositivo consente di ricostruire l'assetto fisico-geometrico dell'ellisse di polarizzazione e rilevare, automaticamente, la percentuale d'inclinazione ($Re\%$) ossia la componente in fase e l'eccentricità dell'ellisse ($Im\%$) ossia la componente in quadratura. Il WADI è uno strumento, pratico e maneggevole, costituito da tre unità: l'unità di controllo, l'unità di misurazione e l'antenna. Le suddette unità sono inserite in una cintura (Fig. 3) che viene indossata dall'operatore che esegue l'acquisizione dei dati.



Fig.3 - Sistema elettromagnetico WADI - ABEM.

Fig. 3 - Electromagnetic equipment ABEM's - WADI.

L'unità di controllo è dotata di una tastiera (*keyboard*) per la programmazione dello strumento e un display a cristalli liquidi che consente la visualizzazione delle curve misurate in fase di acquisizione del dato. La stessa unità è dotata di un microprocessore ed una memoria per l'immagazzinamento dei dati acquisiti.

L'unità di misurazione, inserita nella parte posteriore della cintura, contiene la radio ricevente, l'amplificatore del segnale, i filtri analogici e altri circuiti elettronici. Questa unità include, inoltre, l'alloggiamento delle batterie per l'alimentazione e il connettore che consente di trasferire i dati acquisiti al computer o alla stampante.

Infine, nell'unità che contiene l'antenna sono alloggiati i sensori di ricognizione.

La sintonizzazione con la stazione emittente può essere effettuata sia automaticamente sia manualmente. Nella prima modalità, il WADI effettua una scansione completa in tutta la banda delle frequenze VLF e si sintonizza automaticamente sul trasmettitore che, al momento della misura, fornisce il segnale più intenso. La seconda modalità (manuale), impiegata per il rilievo VLF oggetto di questa indagine (Fig. 4), consente di selezionare il trasmettitore posizionato in modo ottimale rispetto ai lineamenti strutturali dell'area in studio.



Fig. 4 - Acquisizione dei dati VLF e scelta manuale del trasmettitore.
Fig.4 - VLF data acquisition and manual selection of the optimal transmitter.

1.3 Trattamento dei dati e rappresentazione dei risultati

Al fine di valutare la qualità dei dati, i risultati delle indagini e.m., sono stati analizzati, in via preliminare, predisponendo i grafici nei quali sono state riportate, in ascissa, le distanze tra i punti stazione e, in ordinata, i valori osservati delle due componenti (in fase e in quadratura). A tale proposito, è importante evidenziare che i valori osservati delle due componenti del campo elettromagnetico possono contenere anomalie dovute ad una sovrapposizione di più cause, non tutte riferibili ad una stessa profondità. In un profilo elettromagnetico VLF, la presenza di una discontinuità di caratteristiche elettriche, dovuta ad una qualsiasi causa geologica o di altra natura, è indicata da un punto di flesso che, quindi, costituisce un punto

significativo. Poiché nelle situazioni reali si verificano numerose variazioni laterali di conducibilità elettrica, in un profilo si presentano diversi punti di flesso e, pertanto, la curva da interpretare risulta alquanto complessa. Per facilitare l'interpretazione, si ricorre, quindi, ad operazioni di filtraggio. Pertanto, i dati acquisiti sono stati filtrati utilizzando il software predisposto dal Laboratorio di Geofisica della Terra Solida e Diagnostica (DICAAR – Università di Cagliari) afferente al Settore Geofisica del CINIGEO. Considerando gli obiettivi dell'indagine, le suddette operazioni sono state effettuate, esclusivamente, sui valori osservati della componente in fase. Infatti, quest'ultima, rispetto alla componente in quadratura, risente, in minor misura, degli effetti della variazione di conducibilità degli strati più superficiali (suolo). Per questo motivo la componente in fase risulta più adeguata a fornire informazioni sulle caratteristiche elettriche del sottosuolo. Pertanto, i valori della componente in fase sono stati filtrati utilizzando due specifiche tecniche di filtraggio (Fraser, 1969 e Karous-Hjelt, 1983). La prima tecnica, quella di Fraser (1967), è stata applicata per riconoscere, in via preliminare, le zone d'interesse prioritario. L'operatore filtro è dato dalla seguente relazione:

$$f_{2,3} = (M3 + M4) - (M1 + M2)$$

dove: $f_{2,3}$ è il valore filtrato; $M1, M2, \dots, M4$ sono i valori osservati della componente in fase, misurati in corrispondenza dei punti stazione $P1, P2, \dots, P4$ e posti a distanza Δx uno dall'altro.

Il valore filtrato è attribuito ad una posizione intermedia tra le stazioni $M2$ e $M3$.

Successivamente, è stato applicato un operatore filtro (Karous-Hjelt, 1983; Ogilvy and Lee, 1991) che rientra nella categoria dei metodi ad operatore differenziale e che consente di ottenere la distribuzione della densità di corrente nel sottosuolo, a diverse profondità. L'operatore filtro utilizzato per il trattamento dei dati acquisiti nell'area di Matzaccara è il seguente:

$$Mf = -0.205 M1 + 0.323 M2 - 1.446 M3 + 1.446 M4 - 0.323 M5 + 0.205 M6$$

Dove: M_f è il valore filtrato, $M_1, M_2, \dots, M_6$ i valori della componente in fase, misurati in corrispondenza dei punti $P_1, P_2, \dots, P_6$ del profilo e posti a distanza Δx uno dall'altro.

Il valore filtrato è attribuito ad una posizione intermedia tra le stazioni M_3 e M_4 .

L'applicazione di questo filtro, consente di riferire ad una data profondità i dati filtrati, in modo tale da ottenere una "pseudosezione" che rappresenta l'andamento della densità di corrente in profondità. Considerando il principio fisico su cui si fonda il metodo VLF, si ha che ad una data anomalia è associata una corrente elettrica che circola nel sottosuolo, la cui densità è massima in corrispondenza delle zone maggiormente conduttive e minima in quelle meno conduttive. Pertanto, la suddetta pseudosezione è una rappresentazione molto simile ad una vera e propria sezione del sottosuolo investigato, nella quale si possono apprezzare posizione, dimensione e forma dei corpi conduttivi quali, ad esempio, zone di faglia e/o frattura. La profondità alla quale vengono riferiti i valori di densità di corrente, calcolati con la predetta tecnica di Karous-Hjelt, varia in funzione dell'intervallo di campionamento spaziale del segnale e della lunghezza dei profili. Per ogni profondità investigata, si verifica la perdita di sei valori, tre per ciascuna estremità della sezione che, pertanto, assume la caratteristica configurazione sub-triangelare. In previsione di tale accorciamento conseguenza della tecnica di filtraggio applicata, risulta opportuno, in fase di progettazione dei rilievi elettromagnetici, definire, con particolare attenzione, la lunghezza dei profili.

1.4 Analisi dei risultati relativi alla tecnica di filtraggio Karous-Hjelt

Pseudosezioni di densità di corrente

Le figure 5-7 rappresentano i risultati dell'indagine e.m. realizzata nell'area di Matzaccara dove è stata eseguita anche un'indagine sismica a riflessione ad alta risoluzione (HR) ad opera dell'Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale (OGS) di Trieste.

La configurazione delle pseudosezioni di densità di corrente relative ai diversi profili e ottenute applicando il filtro di Karous-Hjelt ai dati della componente in fase, mette in evidenza la presenza di diversi contrasti laterali di conducibilità elettrica, come si evince dalle figure 5, 6 e 7. In particolare, la figura 5 mostra la visualizzazione 2D

delle pseudosezioni di densità di corrente relative ai profili VLF1, VLF2, VLF3 e VLF4, la cui localizzazione è riportata nella figura 1. La figura 6 si riferisce alla visualizzazione 3D delle pseudosezioni di densità di corrente ottenute applicando il filtro di Karous-Hjelt direttamente ai valori osservati della componente in fase. In figura 7, è riportata la visualizzazione 3D delle pseudosezioni di densità di corrente ottenute applicando il filtro di Karous-Hjelt ai dati della componente in fase, preliminarmente filtrati con tecniche atte ad ottimizzare il rapporto segnale/disturbo. Quest'ultima operazione è stata attuata considerando la presenza, nell'area investigata, di disturbi di origine antropica (linee elettriche, recinzioni, ecc....).

In tutte le pseudosezioni sono presenti diverse zone di anomalia (elevati valori di densità di corrente) con gradienti variabili e talora intensi (Figg. 5 e 6), causati dal passaggio repentino zone resistive - zone conduttive. Le zone di anomalia, evidenziate con il colore blu nelle pseudosezioni, indicherebbero la presenza di corpi conduttivi in giacitura sub-verticale o inclinati. Le predette zone di anomalia, in assenza di cause di tipo artificiale, possono essere correlate con zone di alterazione della roccia, contatti tra formazioni geologiche con differenti caratteristiche elettriche o con zone di faglia e/o frattura che favoriscono la circolazione dell'acqua nel sottosuolo. Tuttavia, è da considerare che le zone di faglia possono risultare conduttive anche per la presenza di materiali argillosi al loro interno, piuttosto che per la presenza d'acqua.

La pseudosezione VLF1, la più meridionale tra quelle realizzate nell'area d'interesse (Fig.1), risulta quella in cui è presente il maggior numero di anomalie caratterizzate da discreti contrasti laterali di densità di corrente. In particolare, risulta significativa l'anomalia localizzata, approssimativamente, tra 350m-450m dall'origine NW del profilo, indicata con la lettera A in figura 6. Tale zona di anomalia sembrerebbe trovare riscontro anche nelle pseudosezioni VLF2 e VLF3 dove anomalie con caratteristiche analoghe, indicate con A (Fig. 6), sembrerebbero posizionarsi lungo un "allineamento ideale" che potrebbe essere correlato con un *trend* strutturale presente nell'area investigata. Un eventuale prolungamento dell'anomalia A sino alla pseudosezione VLF4 risulta di difficile individuazione a causa dell'assenza di elevati gradienti che delimitino chiaramente le zone conduttive.

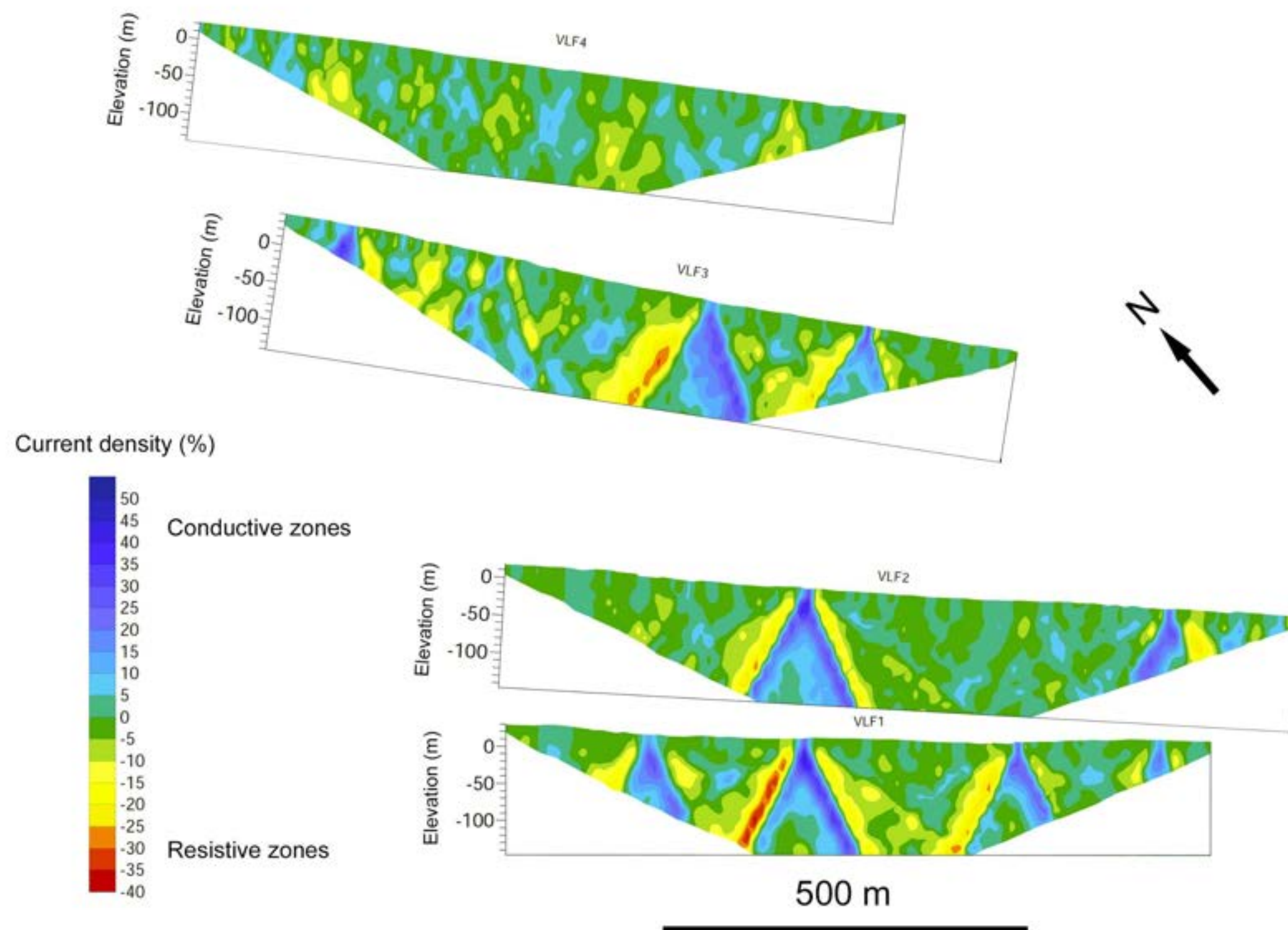


Fig.5.

Pseudosezioni di densità di corrente ottenute applicando il filtro Karous-Hjelt ai valori osservati della componente in fase.

Fig.5. Current density pseudosections carried out applying the Karous-Hjelt filter on the in-phase component raw data.

L'analisi della configurazione delle pseudosezioni di densità di corrente ottenute applicando la tecnica di Karous-Hjelt ai dati della componente in fase, preliminarmente filtrati per l'ottimizzazione del rapporto segnale/disturbo (Fig. 7), conferma, sostanzialmente, quanto osservato in precedenza. Anche in quest'ultima rappresentazione, è evidente l'intensa anomalia indicata con A, presente nelle pseudosezioni VLF1, VLF2 e VLF3, per quanto, rispetto alla rappresentazione precedente (Fig. 6), si noti una diminuzione dei gradienti a causa dei preliminari processi di filtraggio dei dati. Anche in questo caso, nella pseudosezione VLF4, dove sono presenti zone di anomalia di minore intensità rispetto a quelle riscontrate nelle pseudosezioni più meridionali, non è facilmente individuabile un'anomalia che potrebbe considerarsi quale eventuale prolungamento dell'anomalia indicata con A.

Mappa della distribuzione di densità di corrente alla profondità di 40 m dal piano campagna

Al fine di acquisire ulteriori elementi conoscitivi, utili all'interpretazione dei dati, dalle pseudosezioni di densità di corrente riportate in figura 7, si sono estratti i dati relativi alla profondità di 40m dal piano campagna (p.c.). Tali dati sono stati, successivamente, interpolati al fine di ricavare una rappresentazione bidimensionale della distribuzione della densità di corrente alla suddetta profondità (Fig. 8). L'analisi di quest'ultima oltre a mettere in evidenza un'intensa eterogeneità delle caratteristiche elettriche dei materiali, consente di confermare, come già osservato nell'analisi delle pseudosezioni (Fig. 6 e 7), la presenza di un "allineamento ideale" di alcune zone conduttive, evidenziate in blu, correlabile con l'eventuale presenza di un trend strutturale di direzione NNE, indicato con linea a tratteggio rosso nella figura 8.

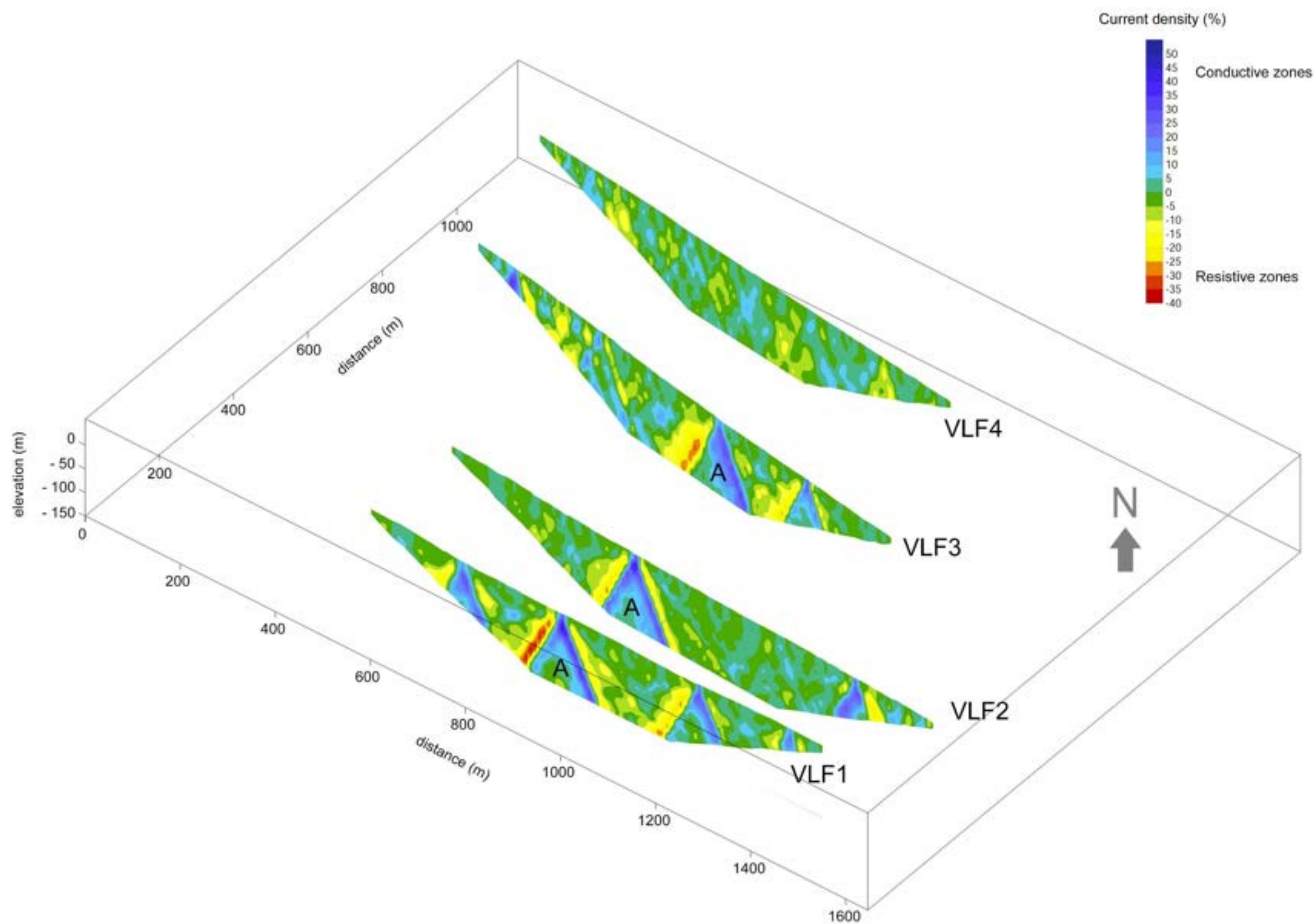


Fig.6 - Visualizzazione 3D delle pseudosezioni di densità di corrente ottenute applicando il filtro Karous-Hjelt ai valori della componente in fase non filtrati preliminarmente.

Fig.6 - 3D visualization of the current density pseudosections carried out applying the Karous-Hjelt filter on the in-phase component raw data.

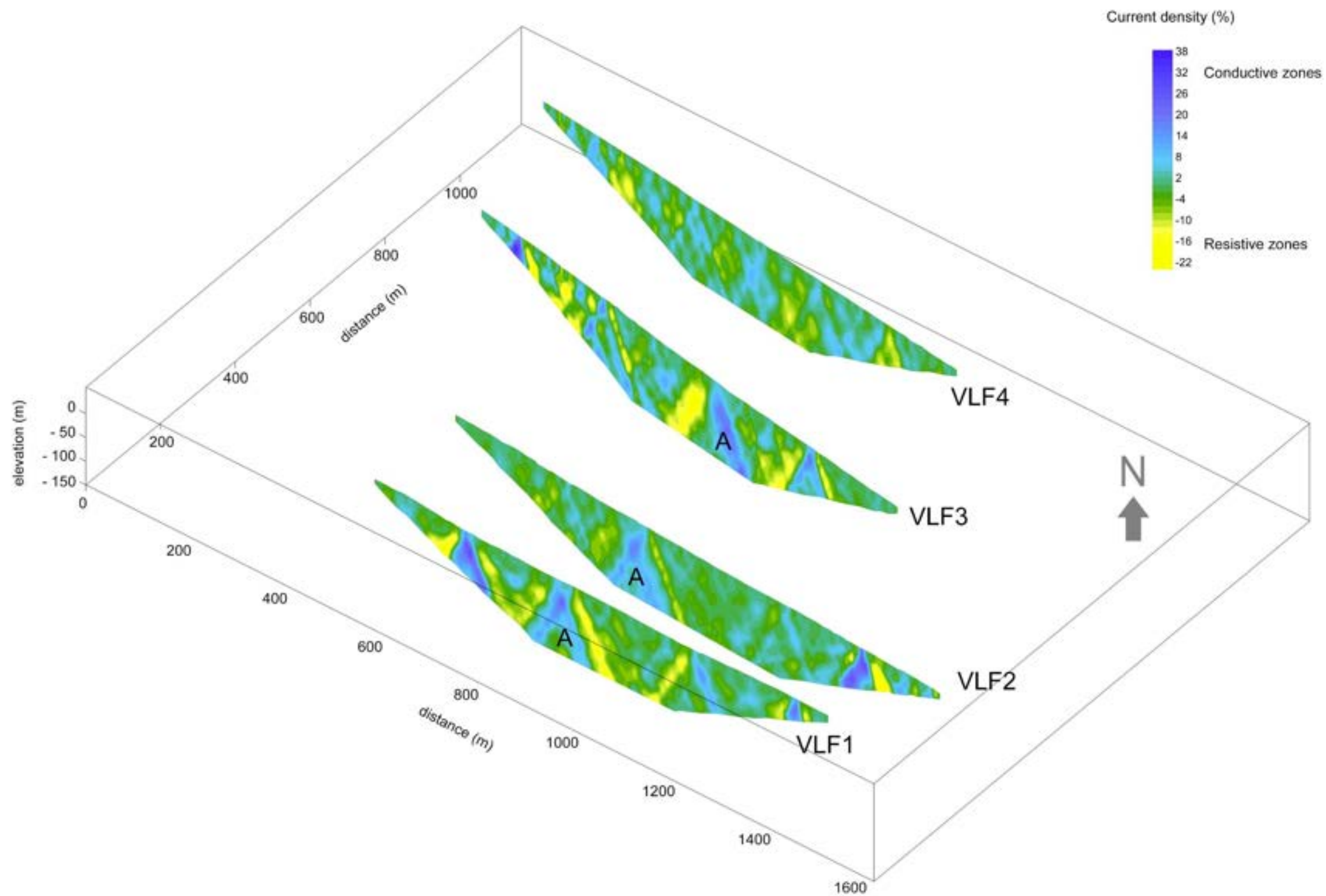


Fig.7 - Visualizzazione 3D delle pseudosezioni di densità di corrente ottenute applicando il filtro Karous-Hjelt ai valori della componente in fase preliminarmente filtrati.

Fig.7 - 3D visualization of the current density pseudosections carried out applying the Karous-Hjelt filter on the preliminarily filtered in-phase data.

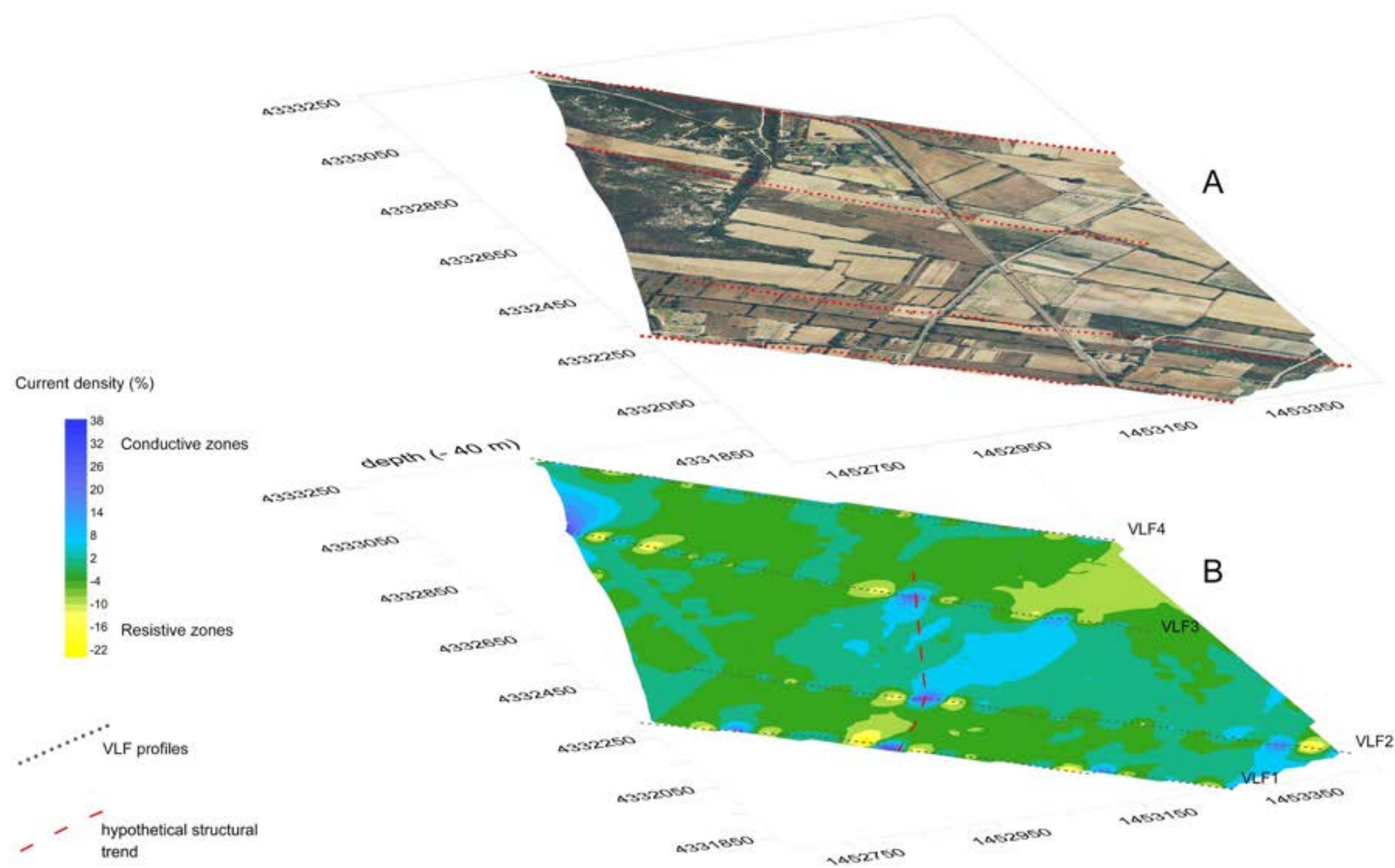


Fig.8 - Localizzazione dei profili VLF nella ortofoto della carta tecnica regionale (CTR) (A) e mappa di distribuzione della densità di corrente alla profondità di 40m dal piano campagna (p.c.) (B)

Fig.8 - Location of the VLF profiles on the orthophoto of the regional technical map (A) and current density distribution map at a depth of 40m from ground level (g.l.) (B)

1.5 Inversione dei dati

Per quanto vi siano forti correlazioni tra i valori della densità di corrente, ottenuti con il filtro di Karous-Hjelt e la distribuzione della conducibilità nel sottosuolo, è da considerare che tale tecnica di filtraggio non fornisce informazioni quantitative su due importanti parametri elettrici: la conducibilità e la resistività che, a loro volta, possono essere più facilmente correlati con alcune proprietà idrogeologiche del sottosuolo. Pertanto, ai fini del completamento dell'indagine elettromagnetica e considerando gli obiettivi dello studio, si è ritenuto opportuno effettuare l'inversione dei dati VLF sulla base delle tecniche proposte da diversi Autori (Beamish, 2000; Monteiro Santos et al., 2006; Sasaki, 2001) al fine di ottenere, in corrispondenza di ciascun profilo, delle sezioni di resistività. In pratica, l'inversione 2D dei dati VLF avviene secondo una sequenza metodologica che prevede diversi "step", a partire da un modello iniziale in cui viene ipotizzato un valore di resistività caratteristico del contesto in cui si svolgono le indagini. Nel presente studio, per l'attribuzione del valore di resistività necessario al calcolo del modello iniziale, si è partiti da considerazioni legate all'analisi geologica/idrogeologica delle formazioni in affioramento e da dati di resistività misurati in laboratorio su campioni prelevati, nel corso di studi pregressi (Fais et al., 2015), da sondaggi non molto distanti dall'area investigata. La scelta del valore iniziale di resistività è di fondamentale importanza al fine di rendere efficace il processo d'inversione dei dati. A partire da tali considerazioni, si sono, pertanto, effettuati numerosi test entro un *range* di resistività che si è ritenuto il più probabile per il contesto geologico dell'area. Partendo dal modello iniziale che si è ritenuto il più adeguato alla situazione in analisi, si è effettuata l'inversione dei dati VLF al fine di ottenere dei modelli "finali" che rappresentassero, nel modo più realistico possibile, la distribuzione di resistività nel sottosuolo.

I modelli, rappresentati come sezioni bidimensionali di distribuzione della resistività nel sottosuolo, consentono di identificare l'esatta posizione delle zone conduttive (bassa resistività). L'analisi comparata delle pseudosezioni di densità di corrente ottenute con il filtro Karous-Hjelt, con i modelli ottenuti mediante l'inversione dei dati, mette in evidenza l'efficacia di entrambi i metodi nell'identificare la posizione dei corpi anomali. In figura 9 sono mostrati, a titolo esemplificativo, la pseudosezione di densità di corrente ed il modello 2D ottenuto con l'inversione dei dati, per il profilo

VLF1. E' evidente la buona coincidenza della posizione delle zone anomale, pur trattandosi di risultati ottenuti mediante tecniche differenti di trattamento dei dati. Si osservi, ad esempio, la coincidenza della posizione dell'anomalia (A) in entrambe le rappresentazioni.

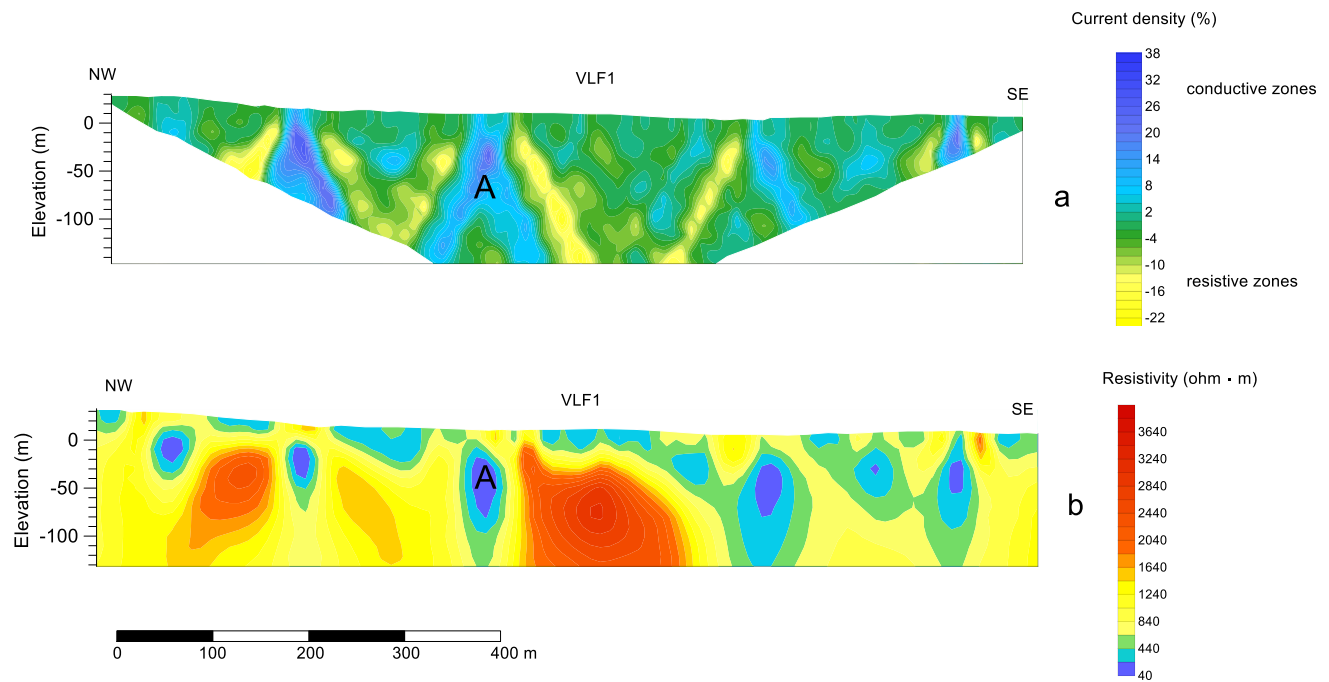


Fig. 9 - Pseudosezione di densita' di corrente (a) e sezione di resistivita' (b), ottenuta mediante l'inversione dei dati, per il profilo VLF1.

Fig. 9 - Current density pseudosection (a) and 2D resistivity cross section (b), resulting from the VLF1 data inversion.

Il risultato dell'inversione dei dati realizzata su tutti i profili VLF è rappresentato, mediante una visualizzazione 3D, in figura 10. Come già messo in evidenza dalle pseudosezioni di densità di corrente (Figg. 5, 6 e 7), anche nei modelli è possibile osservare l' "allineamento ideale" delle anomalie indicate con A. Tuttavia, a differenza di quanto osservabile nelle pseudosezioni di densità di corrente, si nota che nel modello VLF4 è presente un'anomalia (A?) che, per posizione, potrebbe essere correlata con le anomalie (A) identificate nelle pseudosezioni VLF1, VLF2 e VLF3. Tuttavia, nel caso del modello VLF4, tale anomalia sarebbe associata ad una zona a minore conducibilità rispetto a quella riscontrata nelle altre sezioni.

Tale difformità potrebbe essere attribuita a varie cause (es. scarsa circolazione d'acqua e/o riduzione del contenuto in argilla, nel caso tale anomalia fosse associata

ad una discontinuità tettonica o, eventualmente, in quest'ultima ipotesi, interruzione del trend strutturale verso nord).

.

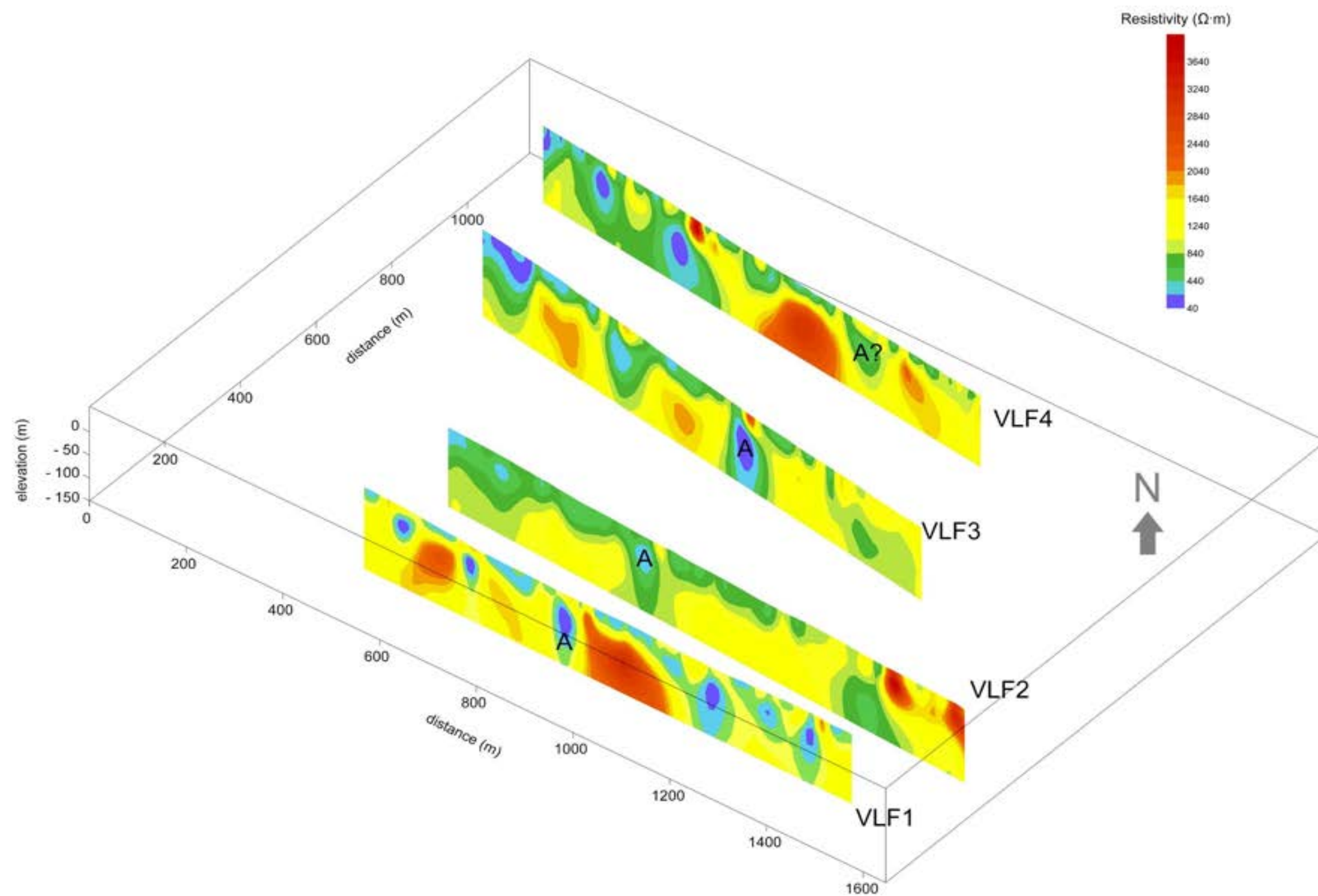


Fig.10 - Visualizzazione 3D delle sezioni di Fig resistività ottenute mediante inversione bidimensionale dei dati VLF relativi ai profili VLF1-VLF4.
 Fig.10 - 3D Visualization of the resistivity cross-sections obtained by 2D inversion of the VLF data for the VLF1-VLF4 profiles.

1.6 Correlazione tra dati elettromagnetici e parametri idrogeologici

Per l'attribuzione di un significato idrogeologico ai dati VLF, si è scelto il profilo VLF3, in quanto posizionato in prossimità degli affioramenti del Flusso Piroclastico Riolitico Cineritico (*Unità di Paringianu*) e di Ignimbrite Comenditica (*Unità di Monte Ulmus*). Rispetto ai profili VLF1 e VLF2, tale profilo ha il vantaggio di essere ubicato in un'area che meglio rappresenta le caratteristiche del sito di Monte Ulmus. Come riferimenti litologici e stratigrafici si sono presi in considerazione il sondaggio 37/86, posto a sud-est della località "Arcu sa Tiria", a meridione della faglia di Monte Ulmus che, come descritto in precedenti studi, può essere assunta come limite strutturale tra la Concessione di Sinni e il "Permesso di ricerca Monte Ulmus", e la perforazione SR1, collocata a sud dell'abitato di Matzaccara. Quest'ultimo sondaggio è di notevole interesse in quanto evidenzia che lo spessore delle vulcaniti aumenta verso sud. Infatti, l'SR1, pur avendo raggiunto profondità superiori a 800 metri, non ha attraversato completamente la serie vulcanica.

Per il confronto tra i valori di resistività e quelli di permeabilità del sottosuolo, in corrispondenza del profilo VLF3, si è partiti dalla formula di Archie (1942) che considera la relazione tra le proprietà petrofisiche ed elettriche delle rocce e, per sviluppi successivi, consente di correlare la resistività elettrica con la permeabilità. Diverse esperienze sui rapporti che intercorrono tra resistività e permeabilità si basano oltre che sulla classica formula di Archie, su disparate formule empiriche derivate da dati sperimentali. A tale proposito, sono stati osservati meccanismi opposti tra la conduttività elettronica nei campioni asciutti e la conduttività ionica nelle formazioni rocciose sature.

L'interpretazione e la successiva conversione del profilo elettromagnetico VLF3 in profilo geoidrologico è riportata in Fig. 11. I valori di resistività, dedotti dal modello 2D del profilo VLF3, sono stati associati alle principali litologie presenti, sulla base delle conoscenze geologiche dell'area e delle stratigrafie dei sondaggi sopra menzionati (37/87 e SR1). Partendo dai valori di resistività, mediante la predetta formula di Archie, si sono stimati i valori di permeabilità, espressi in millidarcy (mD):

Flusso piroclastico riolitico cineritico (*Unità di Paringianu*)

$$K = 0,319 \text{ mD}$$

Ignimbrite comenditica intensamente vescicolata (*Unità di M.te Ulmus*)

$$0,373 \text{ mD} < K < 0,448 \text{ mD}$$

Aree di alterazione tettonica e depositi sedimentari

$$K = 0,334 \text{ mD}$$

E' necessario premettere che i fattori che condizionano la resistività delle rocce (porosità efficace, granulometria, forma dei meati, grado di cementazione, contenuto in acqua di imbibizione e relativa salinità) agiscono contemporaneamente; per tale motivo, l'interpretazione dei dati geofisici diventa difficoltosa se non si dispone di numerosi dati di carattere stratigrafico – strutturale e se non si è in grado di formulare delle ipotesi di lavoro sulla circolazione idrica esistente nel sottosuolo. È noto, infatti, che uno stesso tipo di roccia possa presentare resistività differenti e, per contro, differenti tipi di roccia possano avere valori di resistività simili. Per questo motivo, risulta sempre di notevole utilità, poter effettuare una calibrazione dei dati geofisici mediante un sondaggio la cui posizione deve essere accuratamente scelta, sulla base dei risultati delle prospezioni geofisiche.

I profili VLF e le corrispondenti tomografie sismiche realizzate, recentemente (2016), da OGS (Trieste), sono ubicati tra due linee tettoniche, pressoché parallele, ad orientamento circa N-S, cartografate da Carbosulcis S.p.A. (1993) e da Pala & Anardu (2015) nel corso di una recente analisi idrogeologica: una ad ovest dell'abitato di Matzaccara, l'altra, ad est, segue il corso del rio Macquarba, tratto terminale del rio Ulmus. E', tuttavia, da osservare che quest'ultima struttura non è risultata riconoscibile nei profili sismici effettuati da OGS nel 2008 per Carbosulcis S.p.A..

Il profilo in analisi (VLF3), posizionato, come gli altri (VLF1, VLF2 e VLF4), quasi ortogonalmente alle due suddette linee tettoniche, evidenzia, rispettivamente, a circa 350m e a circa 600m dalla sua origine NW, la presenza di due discontinuità in giacitura sub-verticale che, valutando il modello tettonico del territorio, sono interpretabili come lineazioni tettoniche. Infatti, considerata la loro orientazione sul piano orizzontale, tali discontinuità, indicate con linee rosse a tratteggio in Fig. 11, possono essere interpretate come lineazioni, appartenenti ad una "zona di faglia" piuttosto vasta e articolata.

Interpretative Hydrogeological Section - VLF3 Profile

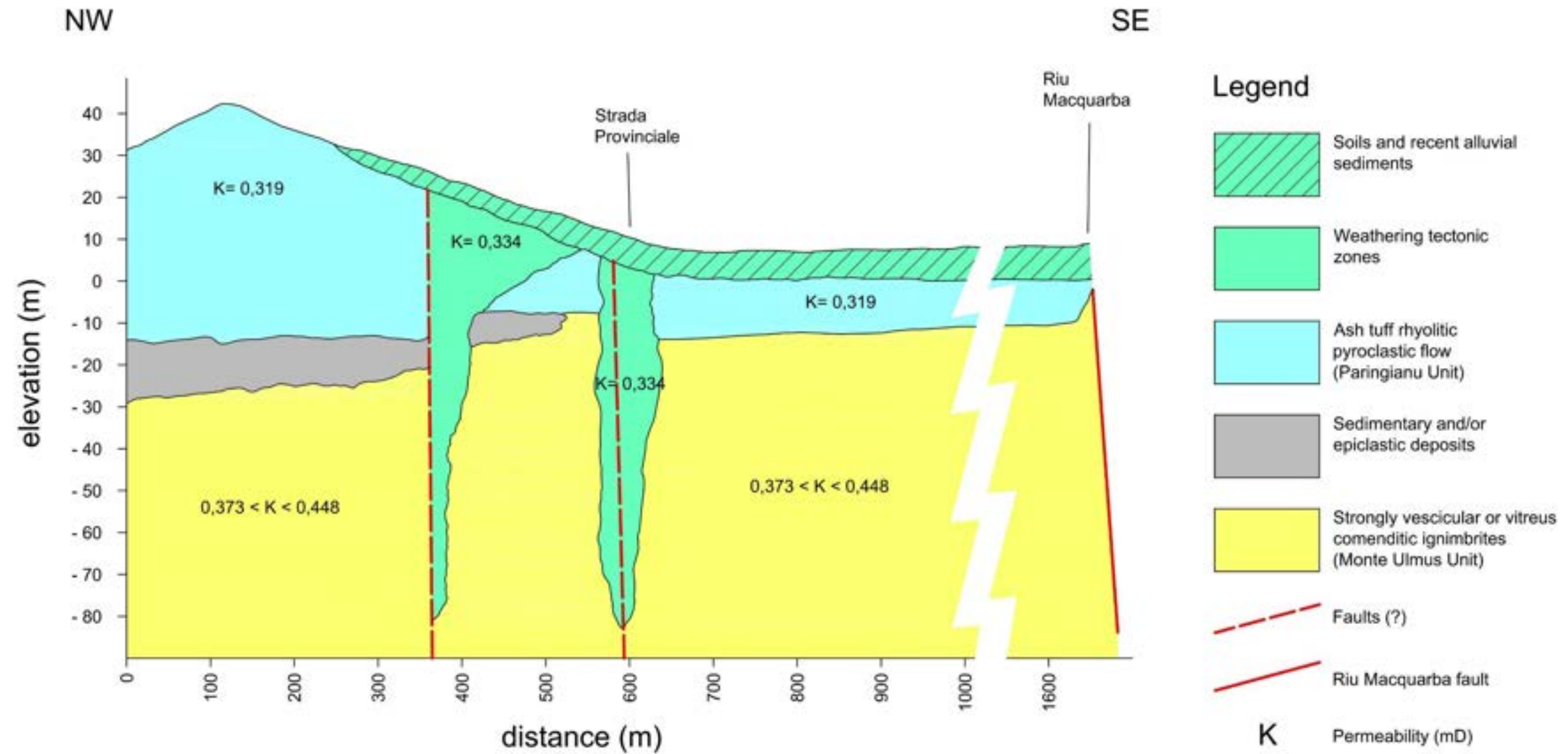


Fig.11 - Sezione geo-idrologica interpretativa in corrispondenza del profilo VLF3.

Fig.11 - Interpretative hydrogeological section for the VLF3 profile.

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

La prospezione elettromagnetica VLF, effettuata in prossimità dell'abitato di Matzaccara, ha consentito di ottenere utili elementi conoscitivi in termini di proprietà elettriche del sottosuolo. Le pseudosezioni di densità di corrente relative ai quattro profili VLF eseguiti nell'area investigata e ottenute applicando il filtro di Karous-Hjelt, hanno messo in evidenza diverse zone di anomalia (elevati valori di densità di corrente) con gradienti variabili e talora intensi. Tali zone di anomalia, indicano la presenza di corpi conduttivi in giacitura sub-verticale o inclinati che, come precedentemente descritto, in assenza di cause di tipo artificiale, potrebbero essere correlati con zone di alterazione della roccia, contatti tra formazioni geologiche con differenti caratteristiche elettriche o con zone di faglia e/o frattura che possono favorire la circolazione dell'acqua nel sottosuolo e i processi di alterazione delle rocce con conseguente loro argillificazione (miloniti).

I modelli 2D relativi ai quattro profili VLF precedentemente menzionati e ottenuti con tecniche d'inversione dei dati, hanno consentito di ottenere sezioni bidimensionali di distribuzione della resistività nel sottosuolo e di identificare l'esatta posizione delle zone conduttive (bassa resistività), confermando quanto già osservato nelle pseudosezioni di densità di corrente.

L'analisi comparata delle suddette rappresentazioni (pseudosezioni di densità di corrente e modelli bidimensionali), ottenute mediante metodi diversi di elaborazione dei dati, ha confermato l'efficacia di entrambi i metodi nell'identificare la posizione dei corpi conduttivi nel sottosuolo. A tale proposito, è da mettere in evidenza un "allineamento ideale" di anomalie, indicate con A nelle tavole precedentemente presentate, che risulterebbe prossimo ad una presunta zona di faglia la cui presenza è stata ipotizzata sulla base di analisi geochimiche e geologico-strutturali condotte dall'unità operativa dell'Università "La Sapienza" di Roma.

Al fine di ridurre il margine d'incertezza insito nell'interpretazione di dati derivanti da metodologie di tipo indiretto, i risultati della prospezione elettromagnetica VLF, sono stati comparati con quelli relativi ad alcune sezioni di tomografia sismica realizzate dall'unità operativa dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Oceanografia Sperimentale (OGS) di Trieste, localizzate in prossimità dei profili elettromagnetici VLF1, VLF2 e VLF3. L'analisi integrata dei risultati relativi ai profili elettromagnetici (pseudosezioni di densità di corrente e modelli 2D) con quelli relativi alle suddette sezioni di

tomografia sismica, mette in evidenza una buona coincidenza tra l'allineamento ideale di anomalie indicate con A nelle figure 5, 6 e 7, corrispondente ad un contrasto laterale di proprietà elettriche, ed un settore in cui è osservabile un contrasto laterale di proprietà elastiche (contatto tra zone ad alta e bassa velocità di propagazione delle onde elastiche). Tale discontinuità di proprietà geofisiche di diversa natura (resistività elettrica e velocità di propagazione delle onde sismiche) potrebbe essere correlata con una discontinuità tettonica presente nell'area, assimilabile alla presunta zona di faglia sopra menzionata.

Le sezioni di resistività elettrica, ottenute mediante le tecniche d'inversione dei dati elettromagnetici, sono state interpretate, in chiave idrogeologica, mediante l'applicazione di efficaci relazioni che consentono di trasformare la resistività elettrica in uno dei principali parametri idrogeologici, la permeabilità. Pertanto, si sono stimati i valori di permeabilità per alcune unità geologiche caratteristiche dell'area investigata.

Le numerose discontinuità laterali di proprietà elettriche, determinate con la prospezione elettromagnetica VLF e la loro interpretazione in chiave idrogeologica, insieme con le informazioni dedotte dalle sezioni di tomografia sismica elaborate da OGS (Trieste), portano ad ipotizzare la presenza di lineazioni tettoniche, tra loro più o meno parallele, ad orientamento NNE, che si ritiene possano appartenere ad una "zona di faglia" piuttosto vasta e articolata.

Bibliografia

AA. VV. CARBOSULCIS (1994). Il bacino carbonifero del Sulcis – Geologia, idrogeologia, miniere. Carbosulcis. Cagliari.

Archie G.E., 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng. Tech. Rept. 1422.

Beamish D (2000). Quantitative 2D VLF data interpretation. J. Appl. Geophys., 45: 33–47.

Bosch FP, Müller I (2001). Continuous gradient VLF measurements: a new possibility for high resolution mapping of Karst structures. First Break 19:343–350, Technical report EAGE.

Fais S, Ligas P, Cuccuru F (2015). Caratterizzazione di dettaglio delle formazioni geologiche del bacino carbonifero del Sulcis che possono svolgere il ruolo di caprock e serbatoio ai fini del confinamento geologico del diossido di carbonio: caratteristiche minero-petrografiche, porosimetria a mercurio, proprietà fisiche delle litologie terrigene clastiche (Formazione del Cixerri) e carbonatiche (Miliolitico e Calcari a Macroforaminiferi) - Area di Nuraxi Figus. Rap. Tecn. CINIGeo, ottobre, 2015, 155 pp..

Karous M, Hjelt SE (1983). Linear filtering of VLF dip-angle measurements. Geophys Prospect 31:782–794.

Monteiro Santos FA, Mateus A, Figueiras J, Gonçalves MA (2006). Mapping groundwater contamination around a landfill facility using the VLF-EM method - A case study. J. Appl. Geophys., 60:115–125.

Ogilvy RD, Lee AC (1991). Interpretation of VLF-EM inphase data using current density pseudosections. Geophys Prospect 39:567–580.

Pala A, Anardu, V (2015). Caratterizzazione di dettaglio delle formazioni geologiche del bacino carbonifero del Sulcis che possono svolgere il ruolo di caprock e serbatoio ai fini del confinamento geologico del diossido di carbonio: caratteri idrogeologici dell'area relativa al permesso di ricerca di Monte Ulmus. Rap. Tecn. CINIGeo, ottobre 2015, 25 pp..

Sasaki Y (2001). Full 3-D inversion of electromagnetic data on PC. J. Appl. Geophys, 46: 45–54.

Cagliari, 31 Agosto 2016