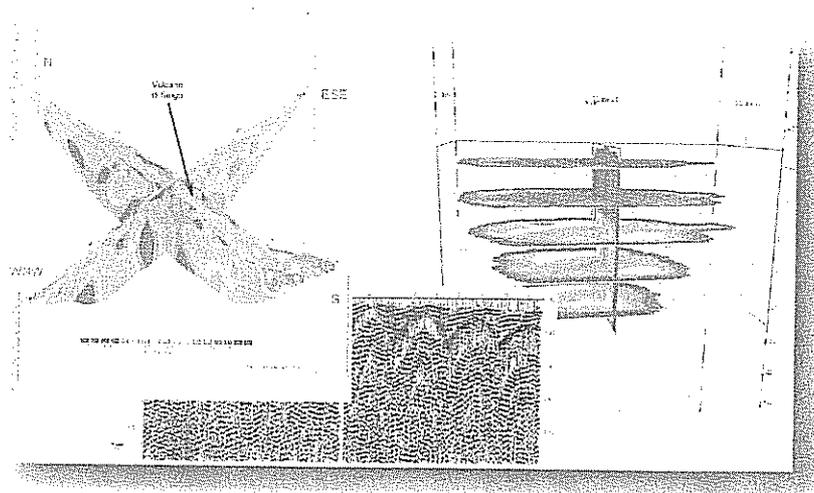
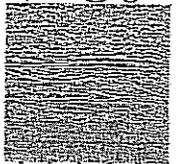


Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale
Dipartimento Geofisica della Litosfera

Gruppi REDAS-GEBA

Relazione progetto DST-RISI 3D

Risultati dei rilievi geofisici in località Sasso Streghe e Nirano.



**REDAS
GEBA**



di Flavio Accaino, U. Tinivella, L. Baradello, A. Bratus



1. INTRODUZIONE

Nell'ambito della convenzione tra il Dipartimento di Scienze della Terra – Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia e l'Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale (OGS) di Trieste sono stati eseguiti dei rilievi geofisici in due aree nel comune di Modena. Lo scopo dell'esperimento geofisico era quello di definire le geometrie sepolte di (i) accumuli carbonatici e (ii) vulcani di fango con l'intento di identificare condotti e fratture lungo cui avvengono fenomeni, o sono avvenuti in passato, di espulsione di fluidi, che li hanno prodotti.

Successivamente ad un sopralluogo nell'area d'indagine, sono state identificate due zone nell'area di interesse in cui le caratteristiche morfologiche del terreno permettono l'esecuzione di rilievi geofisici.

Queste due aree sono la località Sasso Strega (in cui sono presenti accumuli carbonatici Miocenici) e Nirano (in cui sono presenti vulcani di fango attivi). In Fig. 1 sono riportate le mappe e la topografia delle aree investigate.

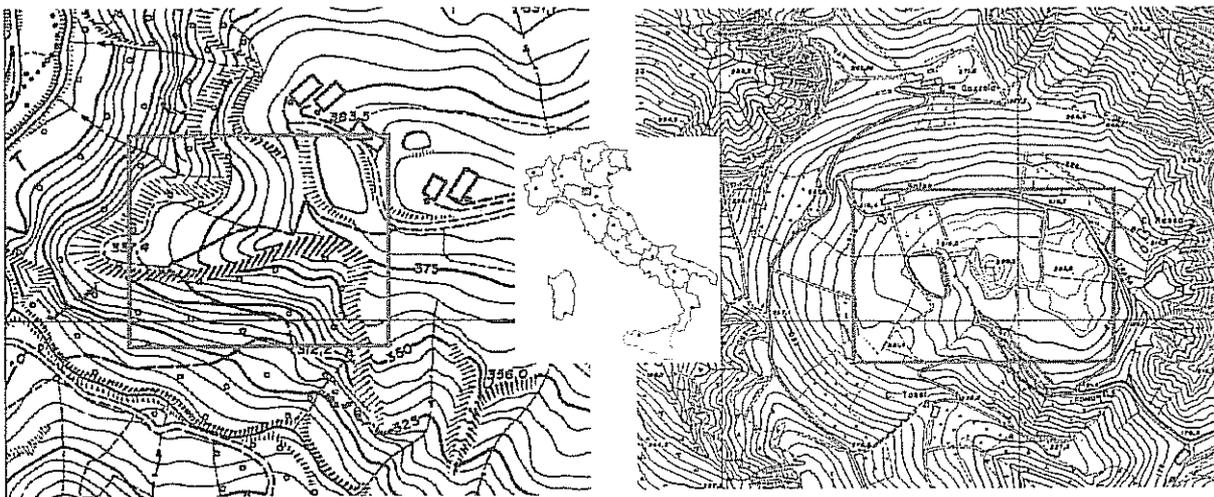


Fig. 1 Ubicazione dei due siti in cui sono stati svolti rilievi. A sinistra Sasso Strega a destra Nirano.

I due siti sono vicino a Sassuolo (MO) e sono tra loro complementari poiché consentono di investigare sia strutture di espulsione di fluidi fossili, formatesi nel Miocene medio-superiore in formazioni marnose di scarpata superiore (Sasso Strega), sia evidenti strutture di espulsione di fango e gas che per un tempo imprecisato nel passato fino all'attuale, hanno costruito dei vulcani di fango per risalita in superficie di fluidi profondi (Nirano).

A Sasso Strega, le strutture a chemio-herme hanno dimensione orizzontale di una decina di metri e dimensione verticale, apprezzabile sul terreno, di qualche decina di metri. E' probabile che

questi corpi carbonatici si estendano ulteriormente in profondità, ma si presume che si esauriscano entro un centinaio di metri dalla superficie del terreno.

A Nirano, il complesso dei vulcani di fango ha un'estensione lineare di circa 500 m. L'estensione in profondità del materiale estruso dai vulcani non è nota, ma si può ipotizzare che la risalita di fluido avvenga attraverso delle faglie.

Nei due siti sono stati eseguiti rilievi sismici 3D, rilievi GPR (Ground Penetrating Radar) e rilievi geoelettrici. Ciò ha consentito di investigare ampiamente le strutture sepolte comprese tra qualche metro e diverse decine di metri e di determinarne le caratteristiche petro-fisiche del sottosuolo. Nei paragrafi successivi verranno descritti i diversi rilievi eseguiti con le tre metodologie e verranno infine evidenziate le strutture e i risultati principali del lavoro.

2. SISMICA

A cura di Flavio Accaino e Umberta Tinivella

2.1 Strumentazione utilizzata

La prima fase della pianificazione dell'acquisizione consiste nel determinare le caratteristiche della strumentazione da utilizzare in base alla risposta del terreno, a eventuali problemi logistici e a problemi legati a danni causati nelle varie fasi operative. Per questo motivo sono stati effettuati dei test per decidere sia la sorgente da utilizzare sia le caratteristiche dei geofoni. In base alla morfologia delle due aree e alla loro conseguente accessibilità, sono stati adottati due diversi dispositivi di generazione dell'energia elastica.

Nella zona più accessibile (Nirano) si è utilizzato il Vibroseis (Fig 2), il cui sistema è costituito da una piastra vibrante che permette di generare sia onde di tipo compressionale che onde di tipo trasversale.



Fig.2. Acquisizione a Nirano utilizzando il Vibroseis

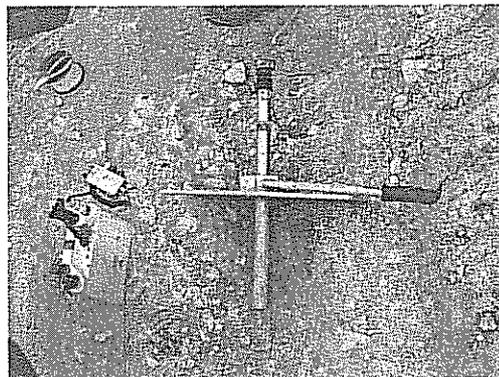


Fig. 3. Sistema di energizzazione Mini-Bang

Nel sito di Sasso Streghe, caratterizzato da una morfologia meno accessibile, è stato utilizzato il MiniBang (Fig. 3) in cui l'energia viene prodotta attraverso lo scoppio di pallottole poste a una profondità di qualche decina di centimetri. Durante la fase di pianificazione del rilievo sismico, sono stati effettuati dei test per definire il campo di frequenze dell'energia immessa nel terreno, per ottenere un'adeguata penetrazione e una buona risoluzione delle strutture. Inoltre nella stessa fase sono stati determinati anche gli altri parametri di acquisizione.

L'acquisizione dell'energia trasmessa nel terreno è stata effettuata utilizzando geofoni verticali di 10Hz nell'area di Sasso Streghe, mentre nell'area di Nirano sono stati utilizzati geofoni a tre componenti a 10 Hz (Fig. 4).

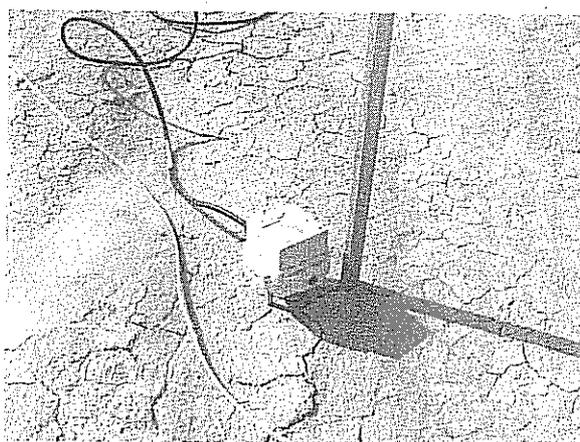


Fig.4. Geofono a 3componenti utilizzato a Nirano

2.2 Rilievo sismico in località Sasso Streghe.

In località Sasso Streghe è stato effettuato un rilievo sismico 3D al fine di identificare la presenza di strutture a chemio-herme sepolte. Poiché queste strutture presentano una larghezza dell'ordine della decina di metri è stato effettuato un reticolo di acquisizione con intertraccia pari a 5 m.

In Fig. 5 è visualizzata la geometria di acquisizione in cui sono evidenziate la posizione dei geofoni (triangoli neri) e la posizione degli scoppi (asterischi rossi) per quanto riguarda l'acquisizione del rilievi 3D. In Fig. 6, invece, è rappresentata la visualizzazione dello stendimento in campagna.

L'acquisizione sismica è costituita da otto linee di geofoni equispaziate ogni 5 m con uno stendimento massimo di 125 m. Sono state effettuate tredici linee degli scoppi perpendicolarmente alle linee dei geofoni, con una spaziatura tra le linee pari a 10 m. In Fig. 7 è rappresentata la copertura del rilievo sismico considerando un bin pari a 2.5x2.5 m. Si può notare la rilevante

copertura ottenuta che garantisce una notevole risoluzione areale delle strutture, anche grazie alla regolare geometria di acquisizione.

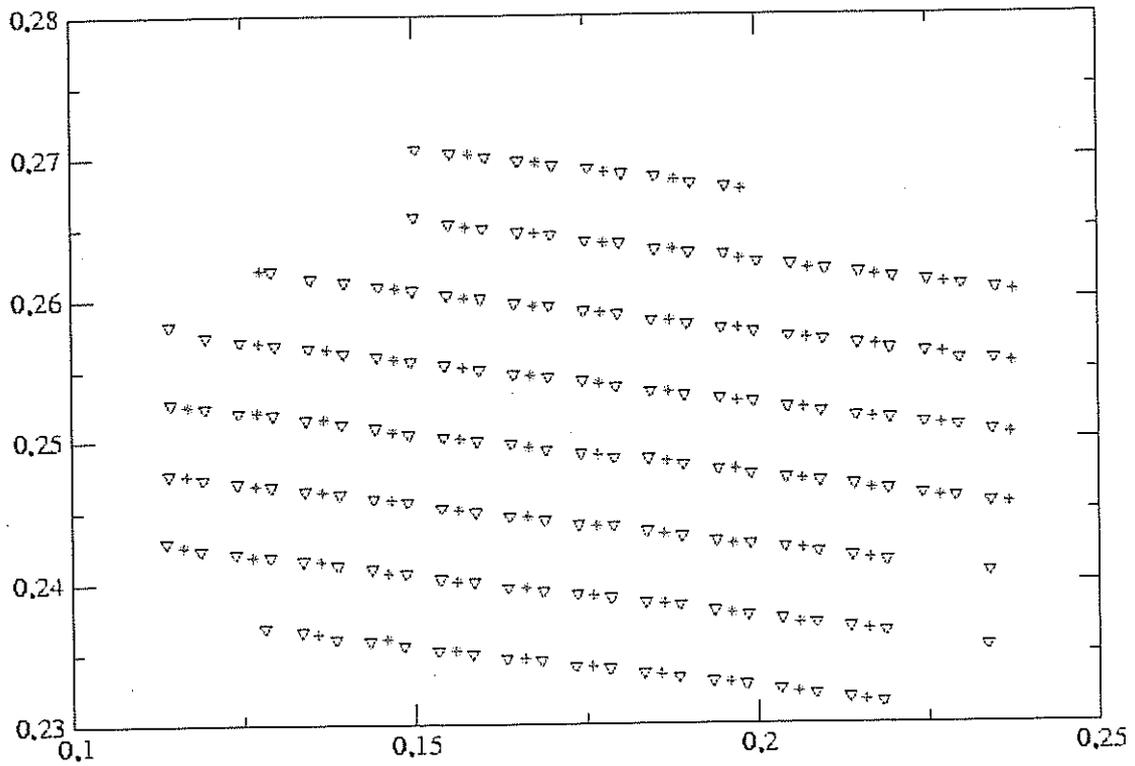


Fig. 5. Schema acquisizione rilievo 3D

2.2.1 Elaborazione ed inversione dei dati sismici.

Successivamente all'acquisizione dei dati è stata applicata la geometria di acquisizione ed è stata eseguito un filtraggio al fine di aumentare il rapporto segnale/disturbo. In Fig. 8 è rappresentato uno scoppio acquisito da tutto il dispositivo di ascolto. In questo esempio, lo scoppio è stato posizionato all'inizio della linea 1 (vedi la posizione in Fig. 7). Si può notare come l'energia sia ben visibile in tutte le otto linee di ascolto.

Sono stati eseguiti in totale 81 scoppi ed è stato effettuato il picking dei primi arrivi. Successivamente al picking, è stata calcolata la velocità apparente di questi tempi di arrivo al fine di definire la bontà di questo passo ed escludere eventuali eventi con velocità apparenti non reali.

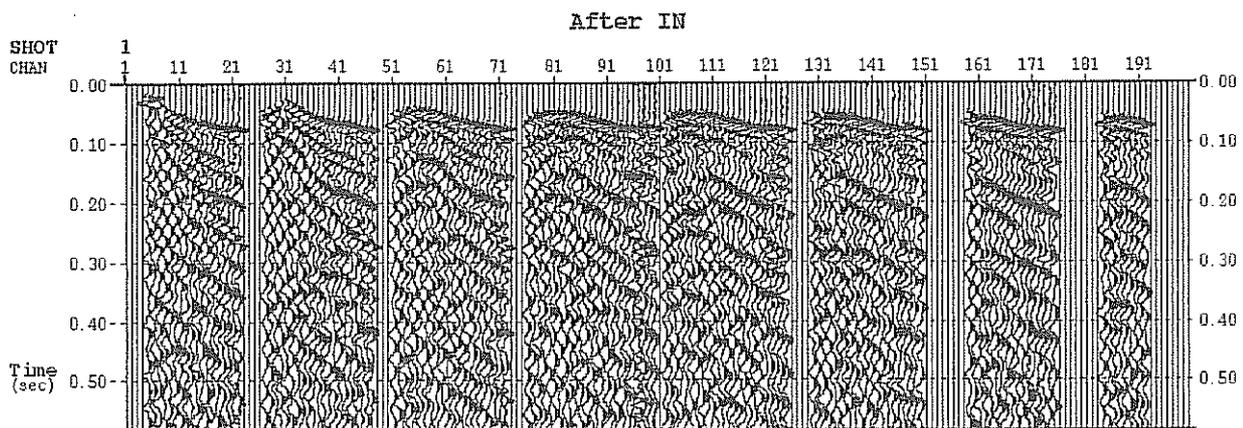


Fig. 8. Esempio di uno scoppio registrato nel sito Sasso Streghe

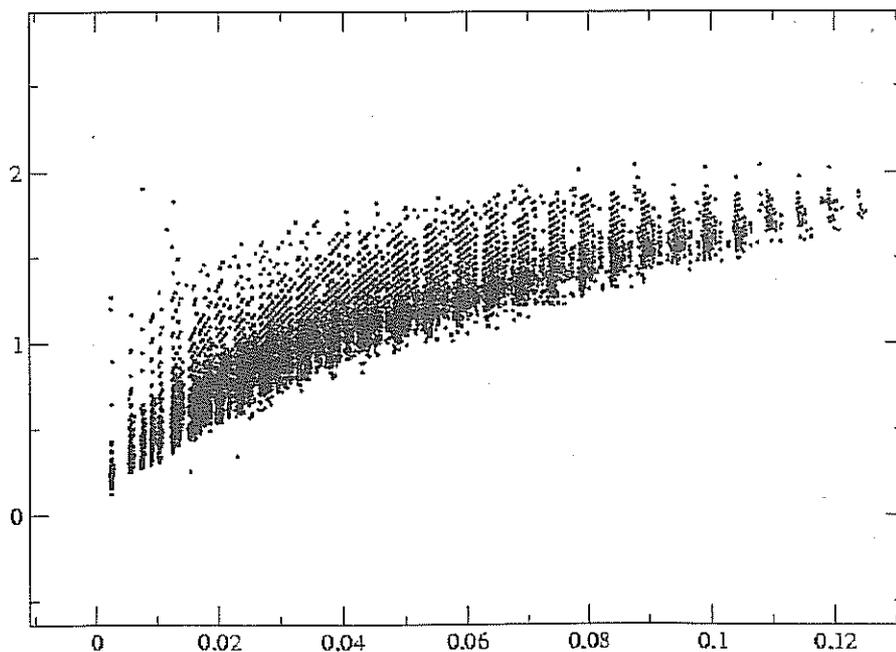


Fig. 9. Grafico delle velocità apparenti dei primi arrivi. In ordinate sono rappresentate le velocità (km/s), mentre in ascissa è indicato l'offset (km).

In Fig. 9 è rappresentato il grafico delle velocità apparenti.

L'inversione dei dati sismici e' stato effettuato utilizzando un pacchetto di inversione 3D; cio' ha permesso di ottenere informazioni sulle velocità e sulle geometrie delle strutture del sottosuolo. Nella figure sottostante (Fig. 10) sono visualizzate alcune sezioni del cubo di velocità ottenuto dall'inversione al fine di evidenziarne le anomalie e le strutture. Le velocità sono caratterizzate da velocità inferiori a 1000 m/s per i primi metri al di sotto la superficie topografica, mentre si evidenziano delle strutture ad alta velocità nel settore Nord-Est dell'area investigata. Queste strutture, che presentano un andamento pseudo verticale, possono essere associate a strutture a chemio-herme sepolte, con una radice posta a circa 30-40 m sotto il piano campagna.

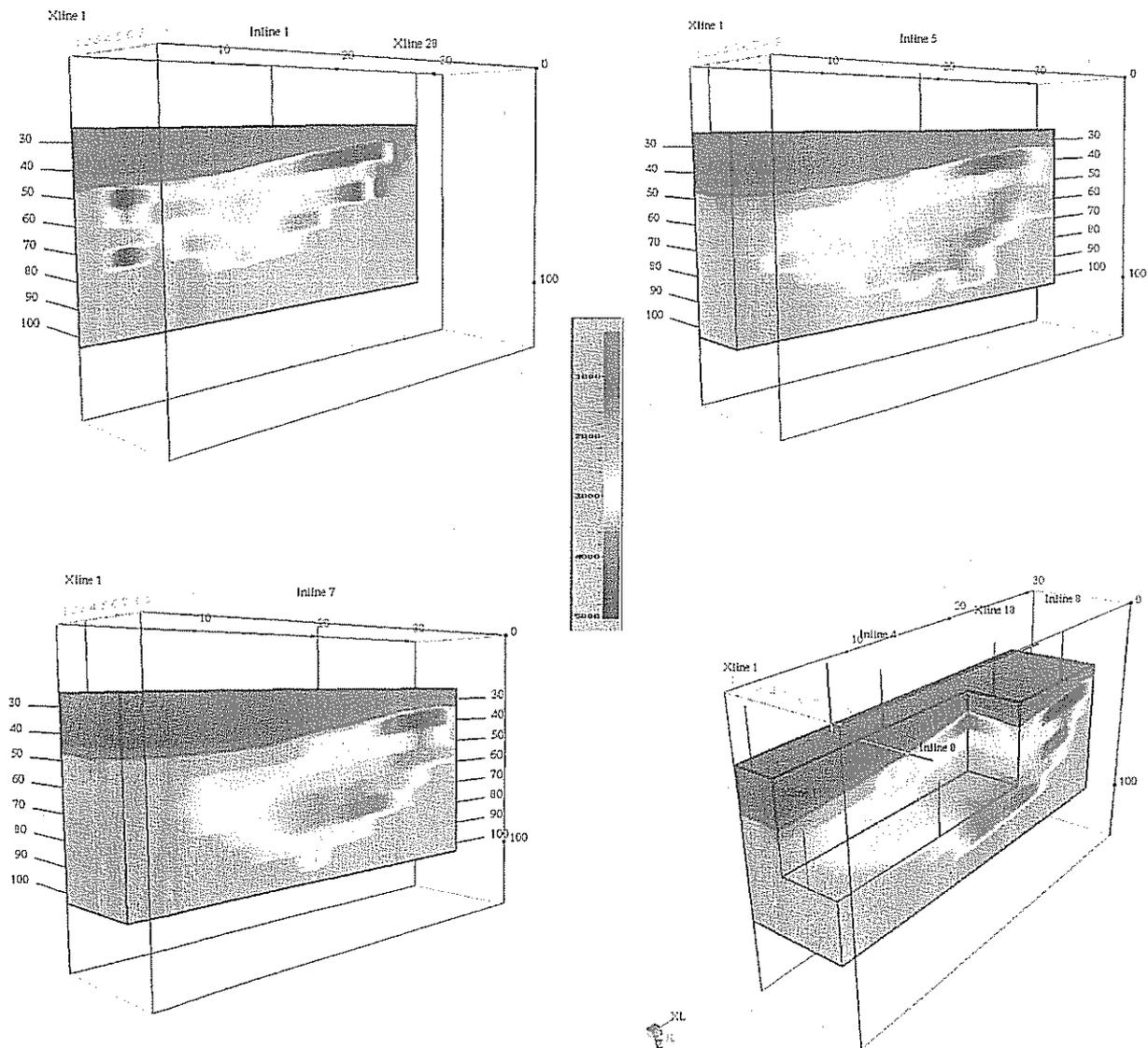


Fig. 10. Sezioni del cubo di velocità ottenuto dall' inversione dei primi arrivi

2.3 Rilievo sismico in località Nirano.

In località Nirano, all'interno del parco delle Salse di Nirano è stato acquisito un rilievo sismico 3D. Per minimizzare l'impatto e per poter usufruire di un sistema di energizzazione che generi anche onde di taglio è stato utilizzato il MinVib. Attorno ad uno dei maggiori vulcani di fango del parco, sono stati posti 85 geofoni a tre componenti (una componente verticale e due componenti orizzontali tra loro perpendicolari). In Fig 11 è schematizzato il sistema di acquisizione, in cui i triangoli neri rappresentano la posizione dei geofoni, mentre gli asterischi rossi rappresentano i punti di energizzazione. La bocca del vulcano di fango investigato si trova tra le due linee di geofoni centrali, nella zona in cui, per evitare danni, non sono state effettuate energizzazioni. Come si può facilmente intuire dalla geometria di acquisizione, la copertura areale dell'area investigata è notevole.

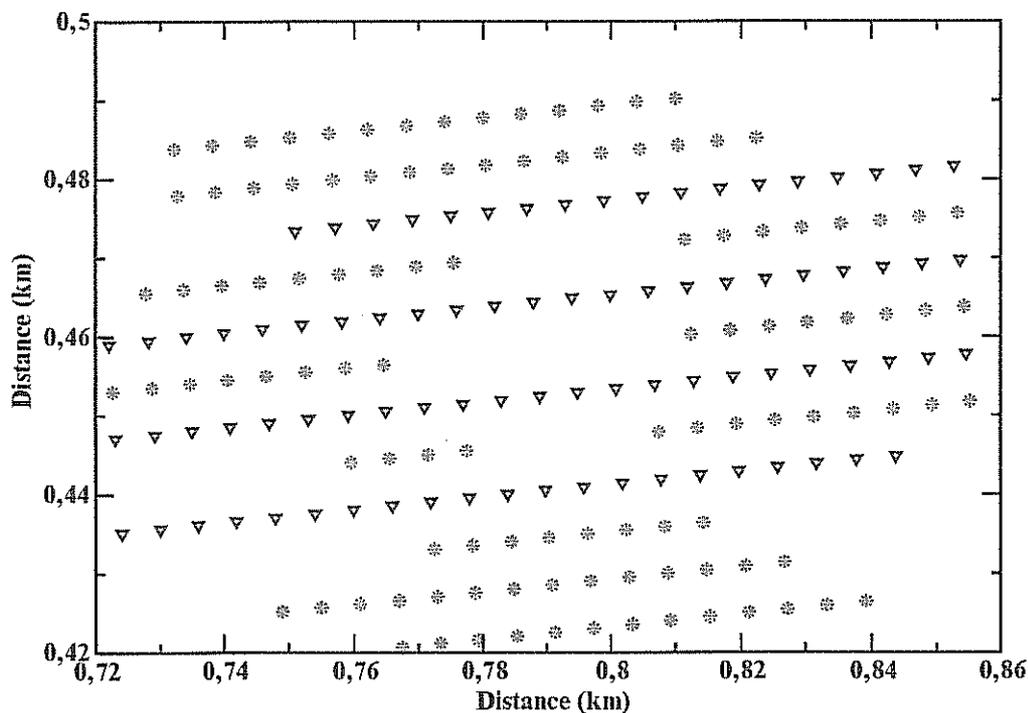


Fig. 11 Schema dell'acquisizione dei dati sismici a Nirano. Gli asterischi rossi indicano i punti di energizzazione mentre i triangoli neri indicano la posizione dei geofoni.

Nella Fig. 12, invece, è rappresentata una fase dell'acquisizione del dato sismico; in ogni picchetto in legno è stato posizionato un geofono a tre componenti, con spaziatura inter-geofonica *in-line* pari a 6 metri e spaziatura tra le *cross-line* di 12 metri.



Fig. 12. *Stendimento sismico in campagna (Nirano)*

2.3.1 Elaborazione ed inversione dei dati sismici

Successivamente alla fase di acquisizione, è stata inserita la loro geometria di acquisizione all'interno del file segy ed effettuata l'elaborazione dei dati acquisiti. Per questa tipologia di acquisizione è stato scelto un bin quadrato con lato pari a 6 m. Le due componenti orizzontali sono state ruotate in modo da ottenere per ogni coppia ricevitore-scoppio (1) la componente lungo la direzione scoppio-ricevitore e (2) la componente lungo la direzione normale alla direzione scoppio-ricevitore. Nelle Figure 13 e 14 sono rappresentati alcuni scoppi sia delle registrazioni delle componenti verticali che della componente orizzontale.

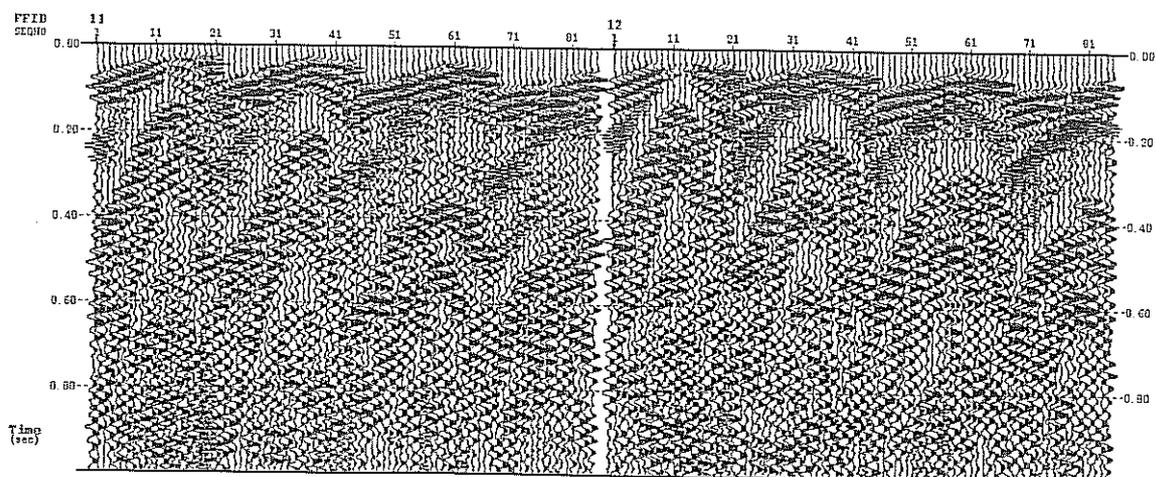


Fig. 13 *Esempio di due scoppi registrati dalle componenti verticali dei geofoni.*

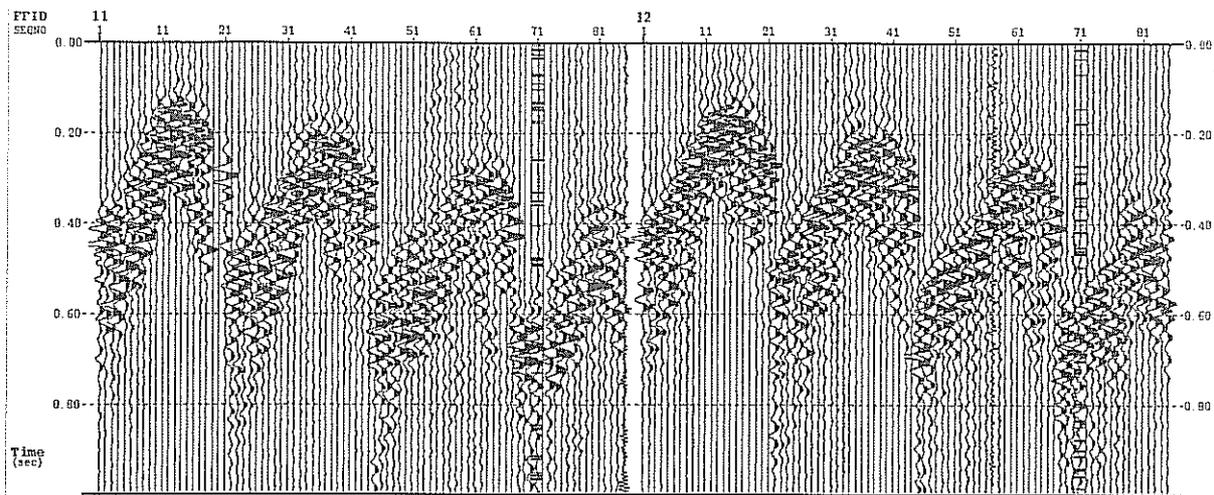


Fig. 14 Esempio di due scoppi registrati con una componente orizzontale.

Nelle due Figure precedenti si può notare la differenza della risposta sismica per quel che riguarda la componente compressionale (o verticale, Fig. 13) e quella di taglio (o orizzontale, Fig. 14). Ciò è dovuto alla presenza dei fluidi nel sottosuolo, nei quali le onde di taglio non si propagano. Questo non ha consentito un picking adeguato dei primi arrivi per quel che riguarda la componente orizzontale, non consentendo di ottenere un campo affidabile delle velocità delle onde di taglio.

Per quanto riguarda invece le onde compressionali è stato eseguito il picking dei primi arrivi e attraverso l'analisi delle velocità apparenti è stato effettuato un controllo di qualità. In Figura 15 è rappresentato il grafico delle velocità apparenti dei primi arrivi delle onde compressionali.

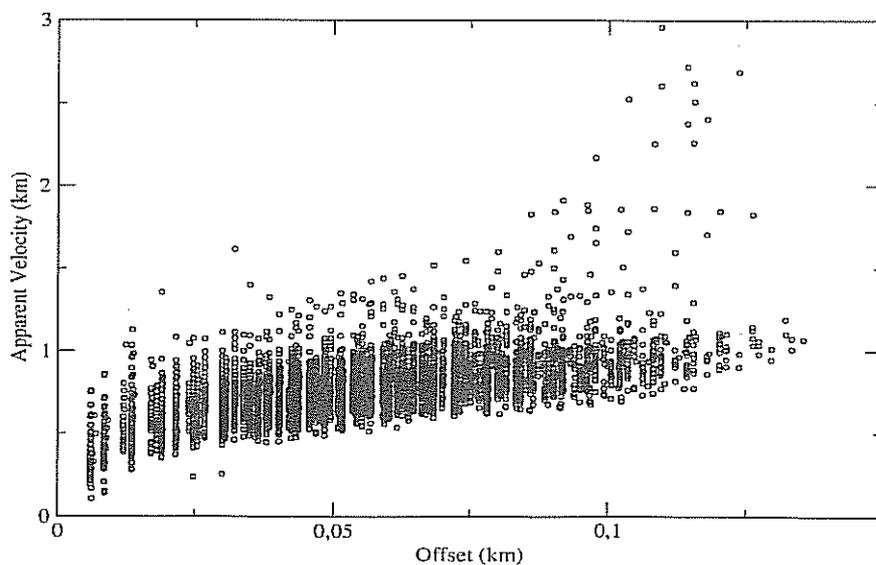


Fig. 15. Grafico delle velocità apparenti dei primi arrivi delle onde di compressione

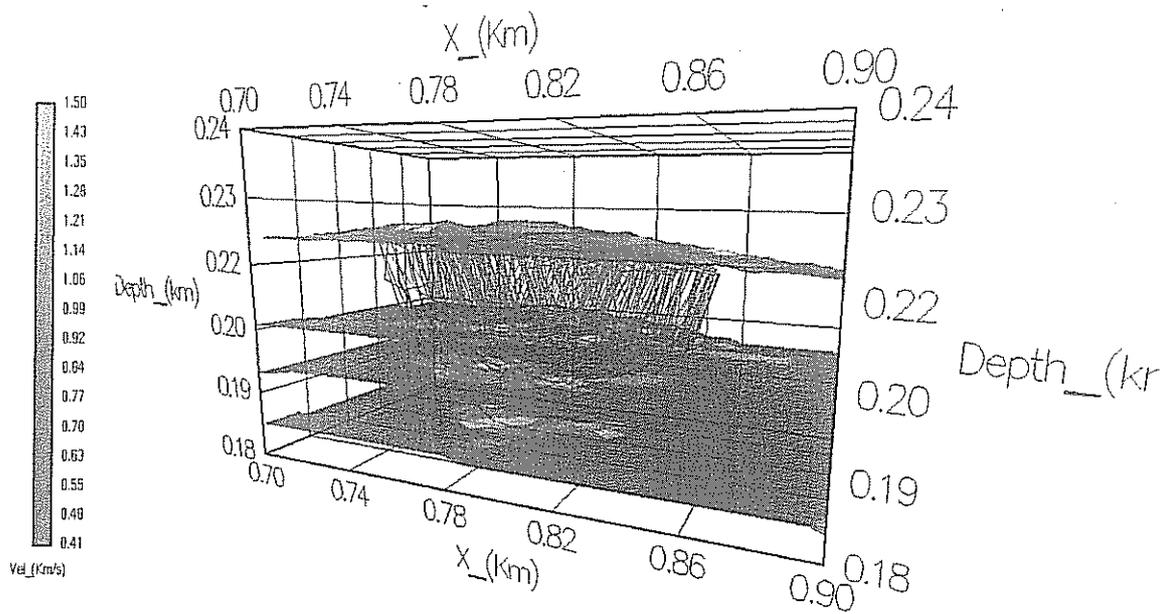


Fig. 16. Visualizzazione del ray-tracing dei primi arrivi.

Successivamente al picking dei primi arrivi, è stata effettuata l'inversione tomografica utilizzando il software di inversione tomografica CAT3D. In Figura 16 è visualizzato il ray-tracing finale dell'inversione tomografica, in cui sono stati visualizzati solo 1 raggio ogni 10 per poter meglio rappresentarne il percorso. Dalla Figura si può notare come la profondità raggiunta nell'investigazione, utilizzando i primi arrivi, è di circa 40-50 m.

Il risultato dell'inversione tomografica è illustrato nelle Figure successive (Fig. 17 e 18) in cui sono particolarmente evidenti le seguenti caratteristiche:

- la presenza di un camino sub-verticale;
- una diffusa bassa velocità, relazionabile alla presenza di fluidi attorno ai 30- 40 m rispetto alla sommità del vulcano investigato.

Le velocità rinvenute nell'area sono interessate da velocità piuttosto basse per i primi 15-20 m (rispetto alla sommità del vulcano), mentre la parte sottostante è caratterizzata da velocità comprese tra 1500 e 2500 m/s che circondano l'area del condotto e del serbatoio vulcanico. In Figura 19 invece sono rappresentate alcune sezioni lungo le linee dei geofoni che evidenziano come il serbatoio sia presente solo nell'area del vulcano e non nelle aree immediatamente circostanti.

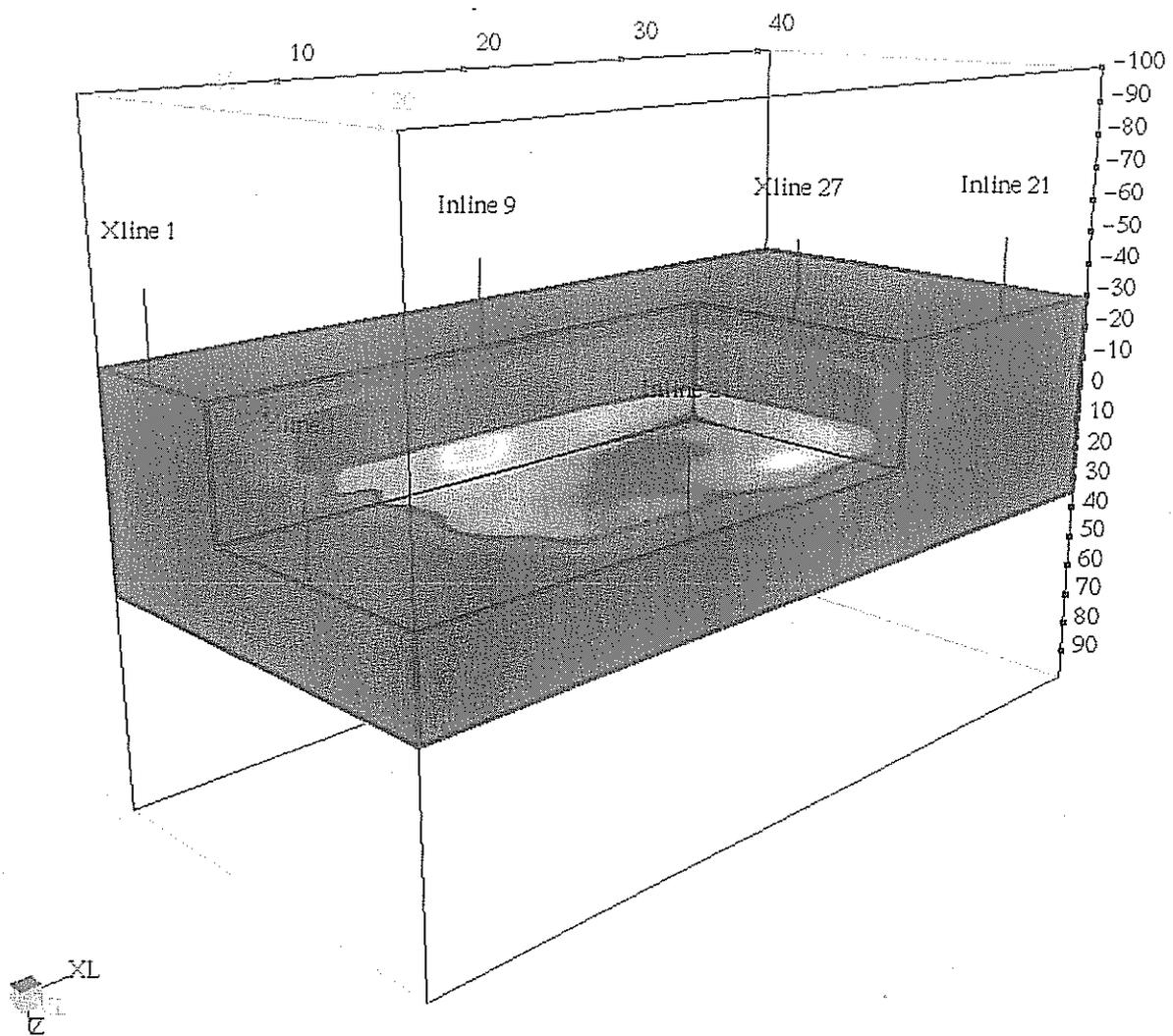


Fig. 17. Spaccato del cubo di velocità ottenuto dall' inversione tomografica.

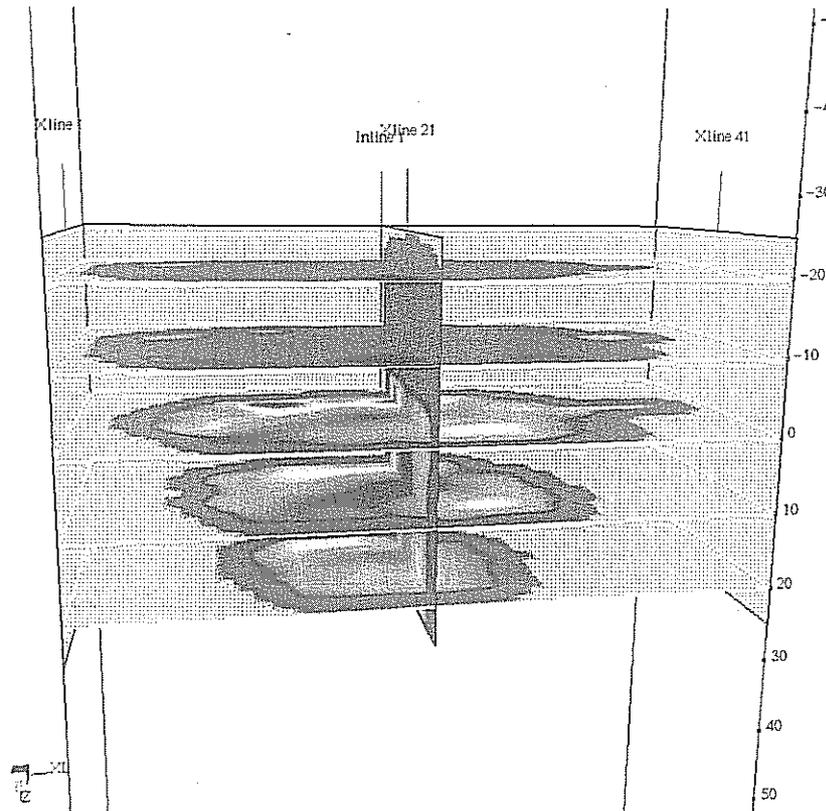


Fig. 18. Sezioni piano-parallele del cubo di velocità ottenuto dall'inversione tomografica, in cui è evidente la presenza di un serbatoio di fluidi attorno a 30-40 metri di profondità e la natura sub-verticale del camino.

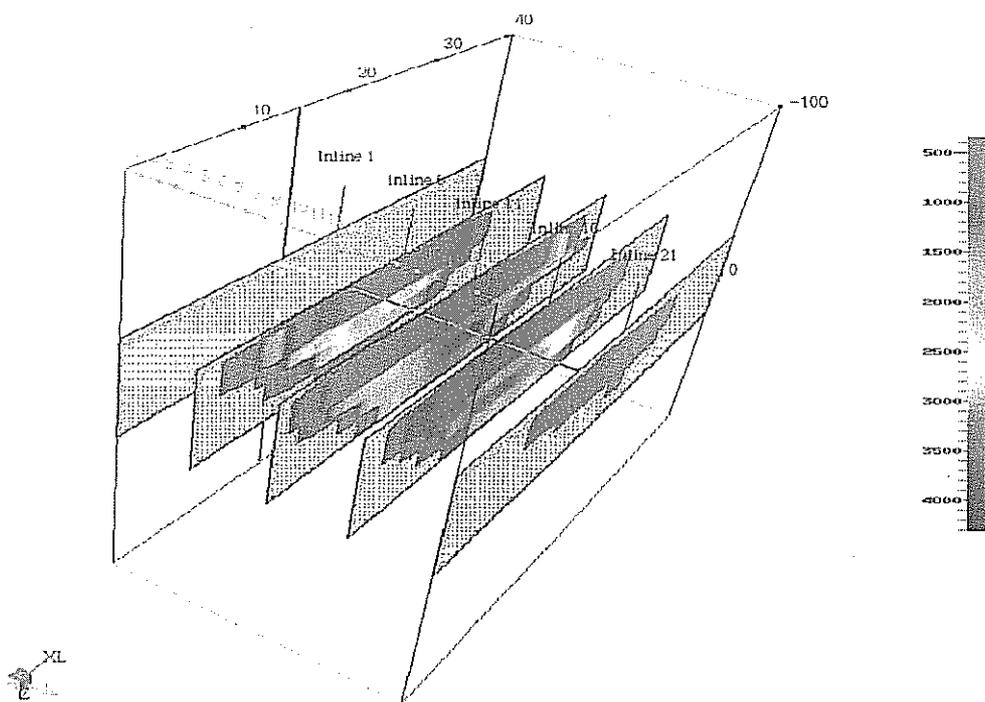


Fig. 19. Sezioni del campo di velocità lungo le linee dei geofoni. Da osservare l'anomalia centrale con bassa velocità, che corrisponde al serbatoio di fluido.

3. Prospezione geoelettrica.

A cura di Antonio Bratus

3.1 Proprietà elettriche del suolo

La prospezione geoelettrica utilizza misure di resistività a corrente continua per ottenere informazioni sul parametro “resistività apparente”. Questa è legata alla resistività propria delle diverse situazioni litologiche presenti nel sottosuolo che è controllata principalmente dai seguenti fattori:

- o tipo litologico
- o grado di saturazione dei pori
- o porosità
- o salinità del fluido presente nei pori
- o temperatura
- o presenza di sostanze organiche (idrocarburi, solventi, ecc.)
- o presenza di argilla
- o fratturazione
- o presenza di cavità

I contrasti di resistività consentono quindi di fornire interessanti ed utili informazioni sulla situazione del sottosuolo del sito indagato.

Il metodo consiste nell'immissione di una corrente nel terreno per mezzo di due o più elettrodi definiti “elettrodi di corrente” e nel misurare in vari punti del terreno, con almeno due “elettrodi di potenziale”, la differenza di potenziale (ddp) indotta dalla circolazione della corrente immessa.

La distribuzione del potenziale elettrico sul piano di campagna ottenuta dalle misure di ddp, permette lo studio della distribuzione geometrica della corrente nel sottosuolo e quindi della distribuzione geometrica delle varie strutture a differente resistività elettrica.

La maggior parte delle prospezioni geoelettriche vengono eseguite utilizzando uno stendimento (cioè l'insieme degli elettrodi sul terreno) quadripolare, con due elettrodi di corrente (denominati A e B oppure nella letteratura in lingua inglese C_1 e C_2) e due elettrodi di potenziale (M ed N oppure in inglese P_1 e P_2).

Da un punto di vista fisico, la resistività apparente può essere definita come una media pesata di tutti i valori di resistività elettrica dei tipi litologici presenti nel sottosuolo. Il peso che ciascun termine ha nella media è determinato in modo non semplice da vari parametri, come l'estensione del tipo litologico, la sua forma geometrica e posizione rispetto agli elettrodi, la sua profondità e la densità di corrente che lo attraversa.

Nella pratica la misura della resistività apparente (RA), che diventerà resistività reale dopo l'inversione tomografica (vedi paragrafo 3.1) viene calcolata dalla misura dell'intensità di corrente (I) che viene immessa nel terreno e dalla ddp (ΔV) misurata tra i due elettrodi di potenziale per mezzo della legge di Ohm:

$$RA = k \Delta V / I$$

dove k è il fattore geometrico, funzione della geometria d'acquisizione e dalle distanze reciproche tra i diversi elettrodi.

La resistività viene misurata in Ohm*m, il potenziale in V (Volt) o mV, la corrente in A (Ampere) o mA, mentre k è espresso in m. In caso di saturazione da fluidi la resistività del sottosuolo è regolata dalla relazione empirica proposta da Archie :

$$\rho_s = \rho_f a \Phi^{-n} S^{-m}$$

dove:

- ρ_s : resistività ($\Omega \cdot m$) del suolo parzialmente saturo di fluido,
- ρ_f : resistività ($\Omega \cdot m$) del fluido presente nei pori,
- S: frazione del volume di pori occupata dal fluido,
- m: coefficiente di saturazione (solitamente assunto essere pari a 2),
- a: costante empirica, detta di Winsaur (tipico per sabbia: 0.62)
- n: coefficiente empirico, detto di "tortuosità" (tipico per sabbia :2.15),
- Φ : porosità del suolo è valida per suoli aventi scarsa componente argillosa (sabbie, ghiaie).

La resistività di un fluido (nel nostro caso l'acqua), ρ_f è calcolabile qualora si conoscano le concentrazioni di ioni in soluzione (ad es. Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , ecc.) attraverso la formula:

$$\rho_f = 0.0123 + 10^{(3.562 - 0.955 \log_{10} C)}$$

dove C è la somma delle concentrazioni (pesate da opportuni coefficienti ricavati sperimentalmente per ciascun ione) di tutti gli ioni presenti.

Ad esempio, se il fluido è costituito da acqua di falda, si possono ottenere i seguenti valori:

H₂O con : 100 mg/l di Cl⁻ : $\rho_f = 13 \Omega \cdot m$
 1000 mg/l di Cl⁻ : $\rho_f = 2.75 \Omega \cdot m$
 10000 mg/l di Cl⁻ : $\rho_f = 0.3 \Omega \cdot m$.

Una normale ghiaia fine, avente porosità pari a 0.35 e satura d'acqua (S=1), presenterebbe, nei tre casi precedenti, rispettivamente le seguenti ρ_s : 75, 16 e 1.8 $\Omega \cdot m$.

Di conseguenza la presenza di fluidi altamente salini, come ad esempio acque di falda interessate dall'interazione con acque marine, possono rendere molto conduttivi terreni naturalmente resistivi come sabbie e limi.

I cationi adsorbiti sulla superficie delle particelle di argilla offrono inoltre percorsi favorevoli per la corrente elettrica e quindi aumentano la conducibilità dei sedimenti, i valori di resistività per le argille oscillano normalmente tra i 20 e i 10 $\Omega \cdot m$, mentre casi particolari di forti anomalie di conducibilità (inferiori ai 3 $\Omega \cdot m$) possono essere ricondotti, ad esempio, a risalite di acque salate.

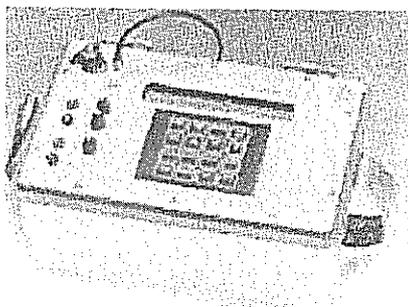
E' questo il caso delle Salse di Nirano, dove la presenza congiunta di depositi argillosi e risalite di acque salate determinano dei valori di resistività molto bassi (nell'ordine di 1 $\Omega \cdot m$). L'elevata conducibilità dei materiali richiede quindi una particolare attenzione nell'acquisizione dei dati elettrici: in questo caso è necessario disporre di una sorgente molto debole, pena la saturazione dei valori delle differenze di potenziale e la conseguente inattendibilità del dato.

3.2 Strumentazione

La strumentazione in dotazione consente un'acquisizione multielettroica dei dati. Concettualmente la strumentazione di base necessaria per questa prospezione consiste in un generatore di corrente continua, un milliamperometro, un millivoltmetro, una serie di picchetti (elettrodi da conficcare nel terreno) in acciaio inossidabile ed una serie di cavi di collegamento. L'avvento dell'elettronica e lo sviluppo di nuove tecnologie ha raffinato notevolmente questa strumentazione, consentendo l'acquisizione più rapida ed accurata dei valori di resistività e di caricabilità del terreno. Il sistema utilizzato è costituito da un resistivimetro Syscal R2 della Iris Instruments cui è collegata un'unità RCM che comanda i box del sistema Multinode per la gestione dei singoli nodi intelligenti. Gli

elettrodi sono collegati ai box, che gestiscono 16 elettrodi ciascuno, da un cavo multipolare a 16 conduttori, con take out spazati ogni 5 m.

L'immissione di corrente è controllata da un regolatore di tensione alimentato da un generatore con motore a scoppio ed uscita a 220 V.



Immissione max.: 800V - 2,5A; potenza d'uscita: 1200W con alimentazione 220V.

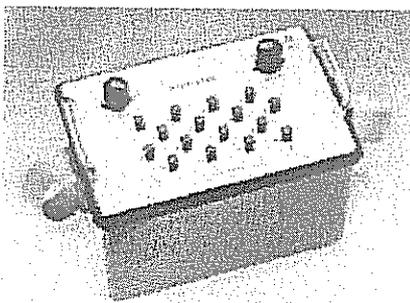


Figura 3.2.1 Resistivimetro Syscal R2 (sopra). Box del sistema multinode (sotto).

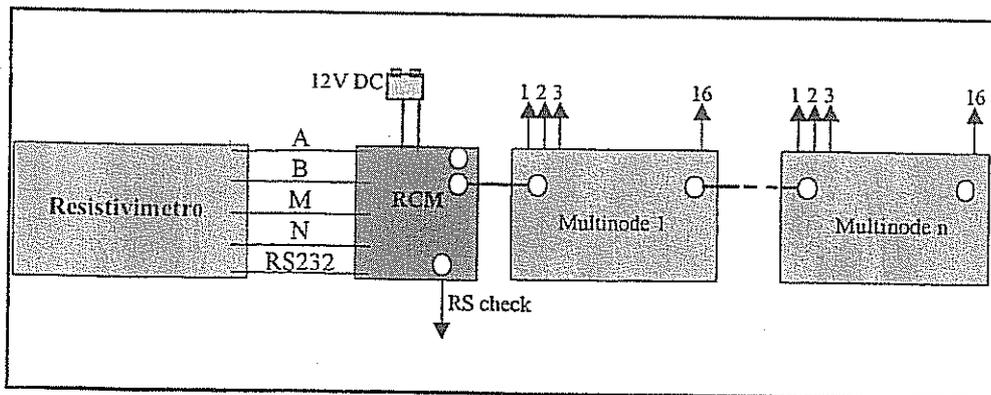


Figura 3.2.2 Schema della strumentazione in campagna.

In Figura 3.2.3 è riportato uno schema della sequenza di acquisizione dati per l'esecuzione di una prospezione geoelettrica in 2D con la disposizione elettrodica di Wenner. Con C_1 e C_2 sono indicati gli elettrodi di corrente, mentre P_1 e P_2 sono gli elettrodi di potenziale. Le stazioni 1, 18 e 32 rappresentano tre diversi punti di misura del sottosuolo ottenuti con diverse combinazioni di elettrodi (ad esempio nella stazione 32: C_1 =elettrodo 1, C_2 =elettrodo 10, P_1 =elettrodo 4, P_2 =elettrodo 7). Ogni elettrodo può quindi trovarsi in cinque diverse condizioni (neutro, C_1 , C_2 , P_1 , P_2). Tale condizione viene impostata precedentemente da una sequenza di misure, gestita da un software appositamente dedicato; le sequenze vengono trasferite dal PC al resistivimetro prima dell'inizio dell'acquisizione.

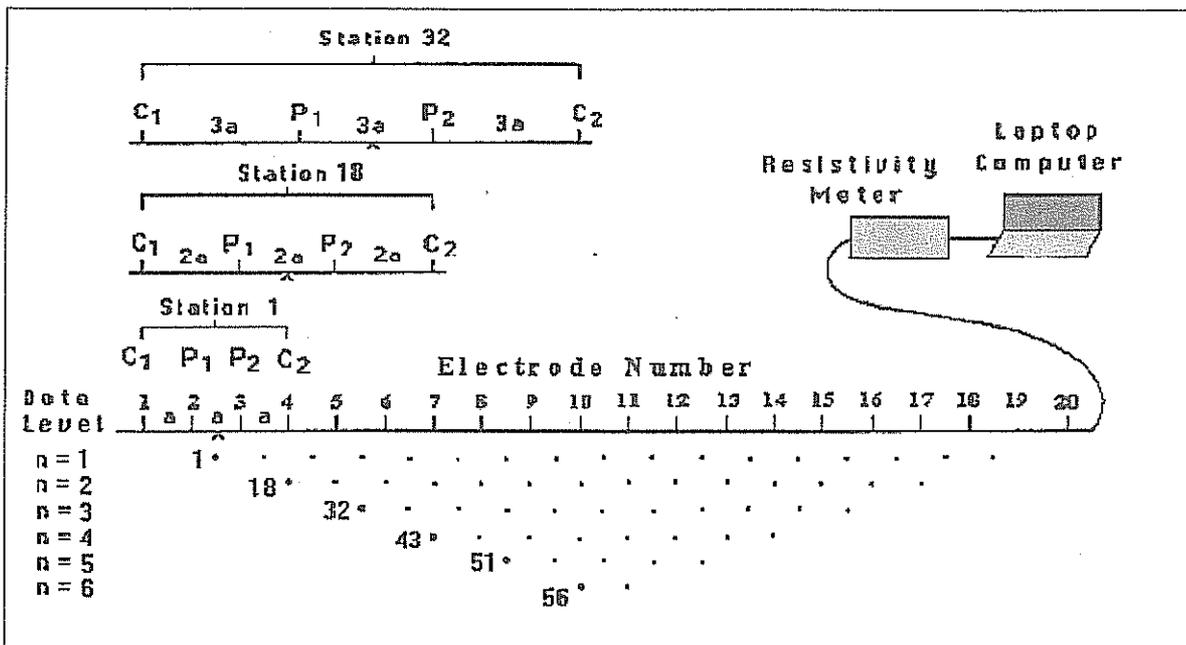


Figura 3.2.3 Schema del sistema di acquisizione dati in tomografia elettrica.

3.3 Il software per l'elaborazione

I dati di campagna immagazzinati nella memoria del resistivimetro sono trasferiti ad un PC per la loro elaborazione.

La trasformazione in formato *.dat* o *.txt* è effettuata utilizzando il software Electre per la gestione del resistivimetro, fornito dalla Iris-Instruments, che consente anche di realizzare le sequenze di misura.

Per l'inversione tomografica del dato sia di resistività, sia di caricabilità, è stata acquisito il software commerciale RES2DINV, che determina automaticamente un modello bidimensionale della resistività partendo dai dati ottenuti dalla prospezione geoelettrica (Griffiths and Barker 1993).

La modellizzazione bidimensionale usata dal programma d'inversione, consiste in un numero di blocchi rettangolari.

La disposizione dei blocchi è legata strettamente alla distribuzione dei punti di misura nelle pseudosezioni.

Per una sequenza di acquisizione standard, la distribuzione e la dimensione dei blocchi viene determinata automaticamente dal programma (3.3.1)

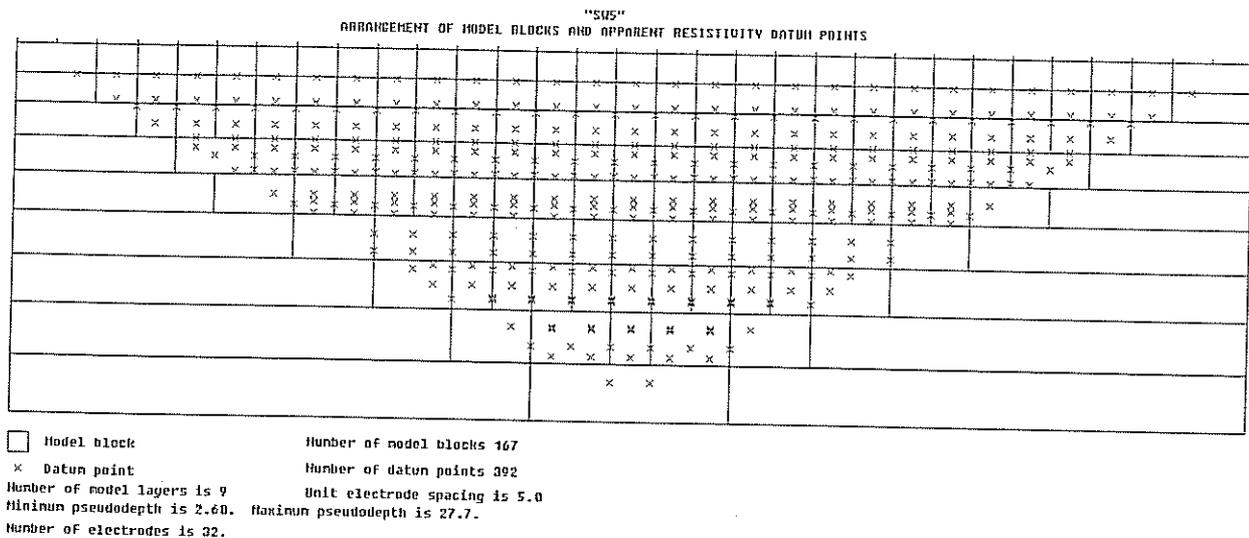


Figura 3.3.1 Disposizione dei blocchi e dei punti di misura ottenuti utilizzando una sequenza di acquisizione Wenner-Schlumberger completa.

La profondità della linea di base è posta approssimativamente alla profondità equivalente d'indagine (Edwards 1977) dei punti di misura con la maggior apertura elettroica.

Tramite la modellizzazione diretta sono calcolati i valori della resistività apparente e della caricabilità e successivamente si realizza l'inversione dei dati secondo il metodo smoothness-constrained least-squares (deGroot-Hedlin and Constable 1990, Sasaki 1992) implementato con un'ottimizzazione quasi-newtoniana (Loke and Barker 1996). Il metodo d'ottimizzazione tendenzialmente mira a ridurre le differenze tra la resistività misurata e quella calcolata, aggiustando le resistività dei singoli blocchi.

La misura delle differenze è espressa dal valore RMS (root-mean-square) (Loke 2000).

L'eventuale presenza di un rilievo topografico di dettaglio consente di introdurre un fattore correttivo per il modello in funzione della morfologia della linea, ottenendo una modellizzazione dei blocchi secondo il metodo di inversione di Schwartz-Christoffel (3.3.2) (Loke 2000)

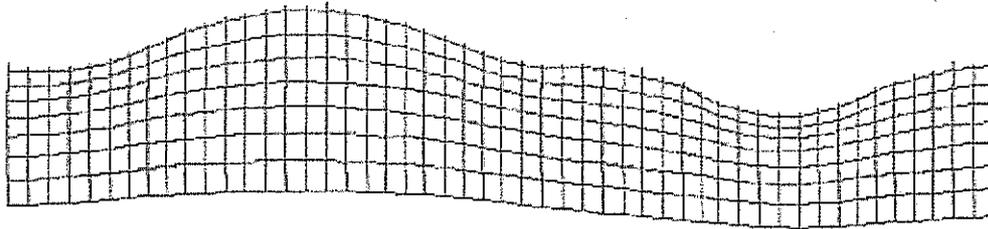


Figura 3.3.2 Modellizzazione dei blocchi in presenza di correzione topografica, secondo il metodo di Schwartz-Christoffel.

Per ogni elaborazione il programma fornisce la pseudosezione reale, la pseudosezione calcolata ed il modello (3.3.3), che è il punto di partenza per l'interpretazione finale.

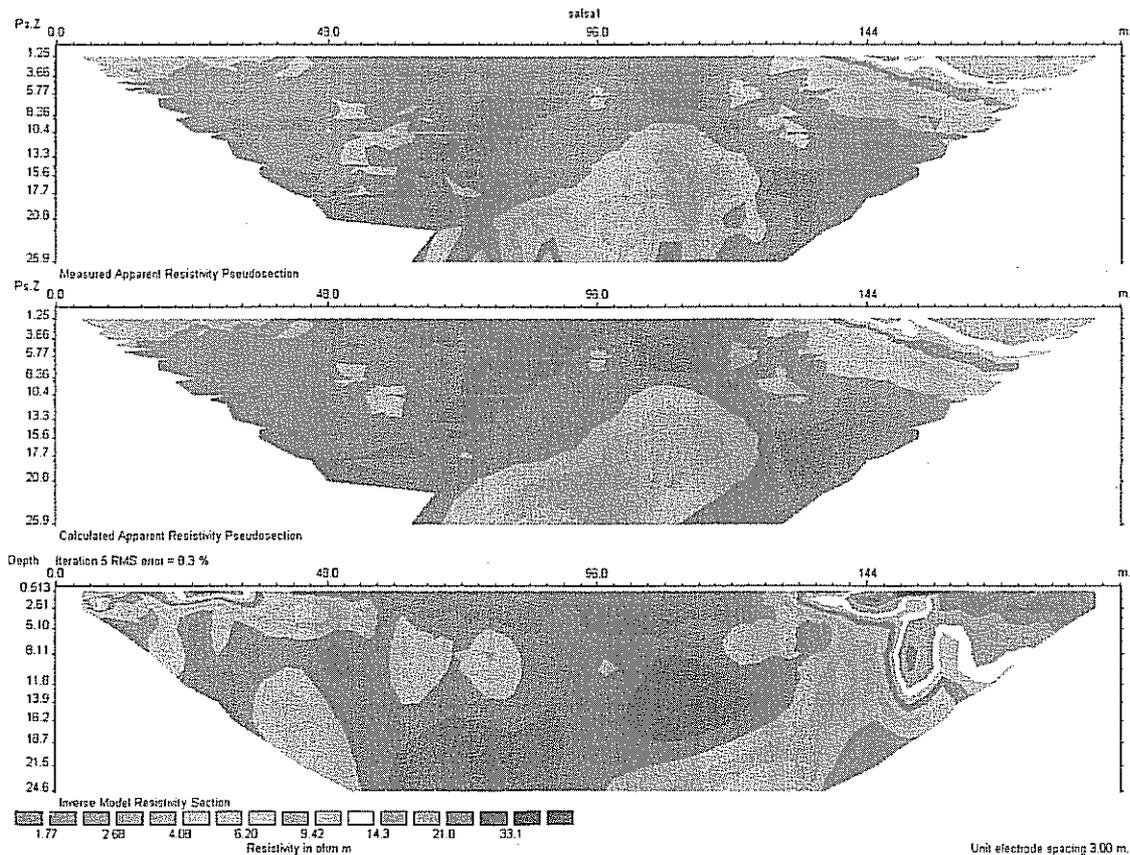


Figura 3.3.3 Esempio del risultato finale del software, sono rappresentati la pseudosezione reale, apparente, ed il modello di resistività.

3.4 I parametri di acquisizione.

3.4.1 La scelta della migliore geometria elettrodica

La particolarità della risalita delle acque salse determina nel sottosuolo la ricerca di strutture prevalentemente verticali. Per questo motivo la geometria di acquisizione più adatta per questa ricerca è il dipolo-dipolo. Tuttavia questa geometria è piuttosto sensibile ai rumori; l'acquisizione in un ambiente "particolare" e "delicato" quale quello delle salse avrebbe potuto costituire un problema per quel che riguarda la qualità e l'attendibilità dei dati. Per questo motivo, prima di procedere all'acquisizione è stato condotto un test preliminare per verificare la risposta delle geometrie dipolo-dipolo (Figura 3.4.1) e Wenner-Schlumberger (Figura 3.4.2), quest'ultima caratterizzata da un'intensità di segnale maggiore ma da una minore risoluzione laterale. I dati sono stati acquisiti lungo la stessa linea in moda da verificare:

- o la possibilità di acquisire i dati con la geometria dipolo-dipolo e quindi ottenere delle buone informazioni sulle anomalie verticali nonostante gli ipotizzati disturbi;
- o la capacità, da parte della geometria Wenner-Schlumberger, di risolvere le strutture verticali legate alle risalite di acqua salsa.

Per entrambe le geometrie è stato utilizzato un valore massimo del parametro n pari a 6 (Figura 3.4.1, Figura 3.4.2)

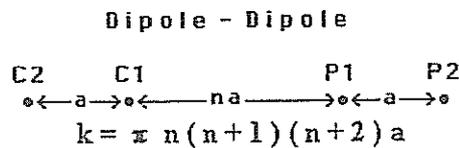


Figura 3.4.1 Schema di acquisizione secondo la geometria dipolo-dipolo, con C1 e C2 sono rappresentati gli elettrodi di corrente, mentre con P1 e P2 sono rappresentati gli elettrodi di potenziale. Questo tipo di misura ha una buona risoluzione laterale, ma il segnale è più debole rispetto alle altre geometrie di acquisizione.

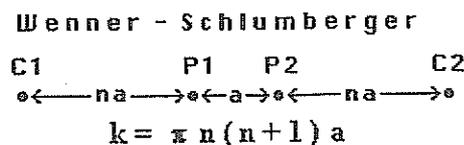


Figura 3.4.2 Schema di acquisizione secondo la geometria Wenner-Schlumberger, con C1 e C2 sono rappresentati gli elettrodi di corrente, mentre con P1 e P2 sono rappresentati gli elettrodi di

potenziale. Questo tipo di misura consente di ottenere buoni risultati in aree con disturbi notevoli, ma non ha una buona risoluzione laterale.

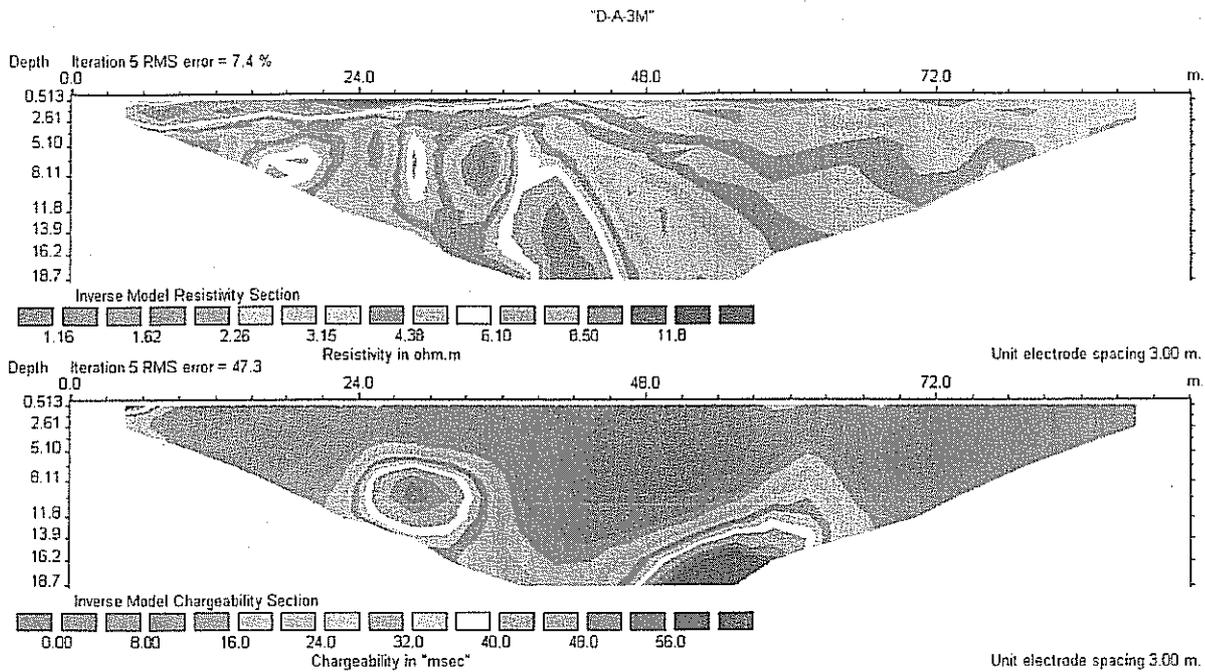


Figura 3.4.3 Modelli di resistività (in alto) e di caricabilità (in basso) della linea test, acquisiti con la geometria dipolo-dipolo.

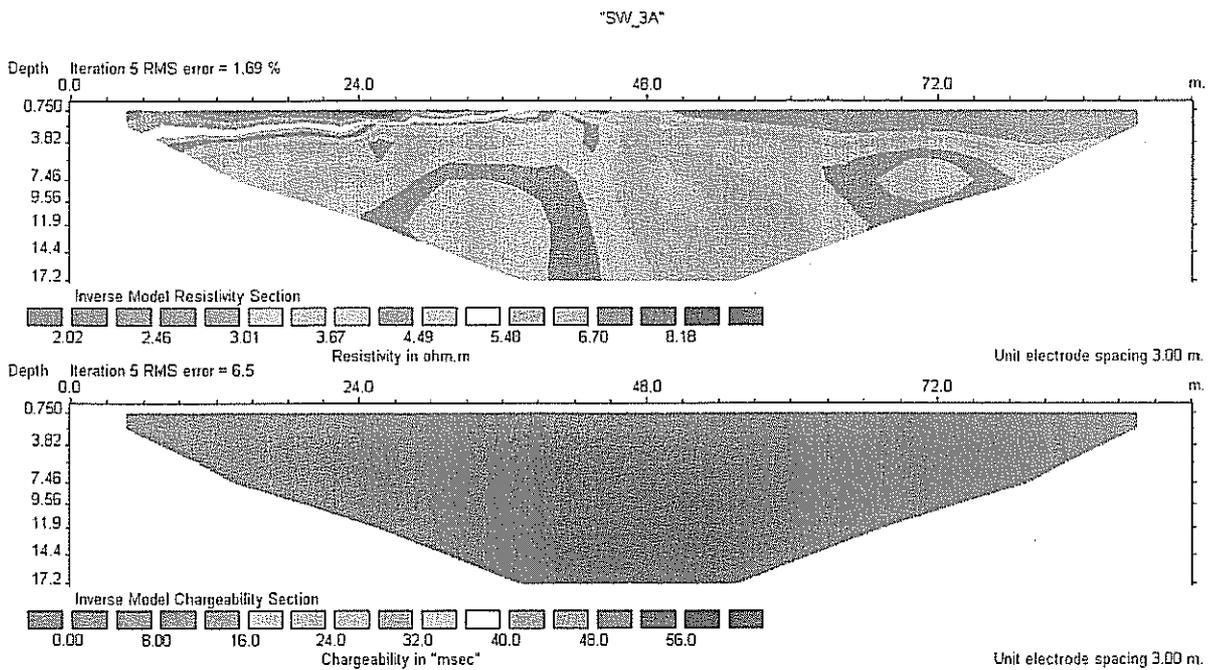


Figura 3.4.4 Modelli di resistività (in alto) e di caricabilità (in basso) della linea test, acquisiti con la geometria Wenner-Schlumberger.

I risultati del test, sono stati positivi, in quanti i valori misurati con la geometria dipolo-dipolo non sono di cattiva qualità (Figura 3.4.3), anzi, l'errore RMS, relativo all'inversione tomografica dei valori, è pari al 7.4 %. Tale dato rappresenta un valore basso che indica la buona qualità dei dati. Per comparazione, il valore dell'errore RMS nelle misure con la geometria Wenner-Schlumberger è pari a 1.69 %, a riprova della miglior qualità del segnale con questo tipo di misura.

Il confronto dei modelli di resistività delle due geometrie mette in luce la presenza di elementi peculiari che entrambi i metodi sono in grado di individuare, ma evidenzia il miglior poter risolutivo del dipolo-dipolo che, con una qualità dei dati buona che non pregiudica l'attendibilità del risultato finale, descrive in dettaglio delle strutture prevalentemente verticali, che il Wenner-Schlumberger non riesce ad individuare. Analizzando il modello di caricabilità si evidenzia come il Wenner-Schlumberger (Figura 3.4.4 in basso) non individua particolari anomalie, mentre invece i valori anomali descritti nel modello del dipolo-dipolo (Figura 3.4.3 in basso) sembrano essere dovuti a disturbi piuttosto che a valori reali. Sulla base di questo esperimento è stato scelto di acquisire i dati con la geometria dipolo-dipolo e di focalizzare l'attenzione sull'interpretazione dei modelli di resistività.

3.5 I risultati

3.5.1 Le Salse di Nirano

Alle Salse di Nirano sono state acquisite tre linee da 64 elettrodi con spaziatura elettrodica di 3 m, per un totale di 4143 punti di misura teorici nel sottosuolo.

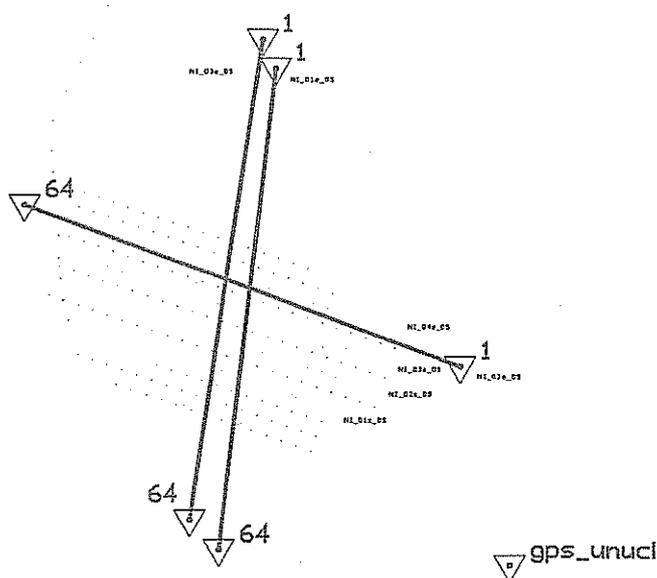


Figura 3.5.1 Posizione delle linee elettriche (linee rosse) nel parco delle Salse di Nirano, i punti rappresentano l'acquisizione sismica.

La zona investigata interessa la salsa intorno alla quale precedentemente era stata compiuta la prospezione sismica.

Gli elettrodi numero 1 delle linee Ni-01e_05 e Ni_03e_05 sono posti nelle vicinanze del laghetto, mentre l'elettrodo 1 della linea Ni_02e_05 è prossima alla strada che conduce al centro visite. La profondità massima investigata è di circa 30 m.

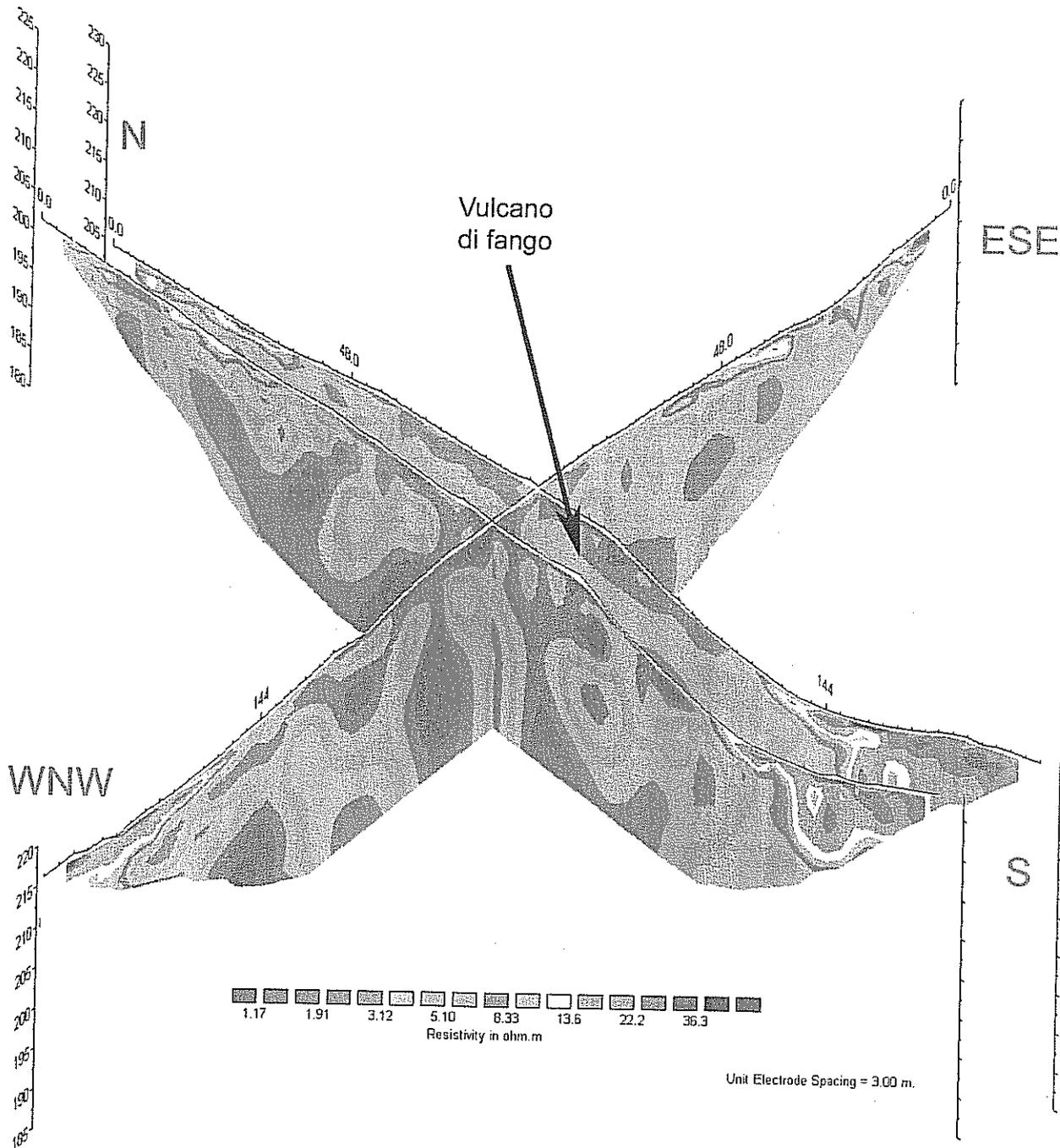


Figura 3.5.2 Ricostruzione tridimensionale dei modelli di resistività acquisiti intorno al vulcano di fango

L'obiettivo dell'indagine è quello di individuare le vie di risalita preferenziali delle acque salate. Come atteso, i valori di resistività misurati sono generalmente molto bassi, i valori più alti, colore rosso nei modelli di resistività, e valori intorno a $40 \Omega \cdot m$ si riferiscono alle aree non interessate dalla risalita delle acque salate. Molto interessanti sono le strutture verticali descritte dalle linee Ni_02e05 e Ni_03e_05 (le forme di colore verde nei modelli di resistività reale – valori di circa $10 \Omega \cdot m$) che individuano le zone dove non ci dovrebbero essere risalite di acque salate. Le salse e le loro strutture profonde sono descritte dalle aree di colore blu scuro (valori $< 3 \Omega \cdot m$).

Di seguito vengono descritti in dettaglio i modelli di resistività reali ottenuti dall'inversione tomografica dei valori, in abbinamento viene presentato il modello riportato come diagramma a blocchi per meglio descrivere ed interpretare certe strutture.

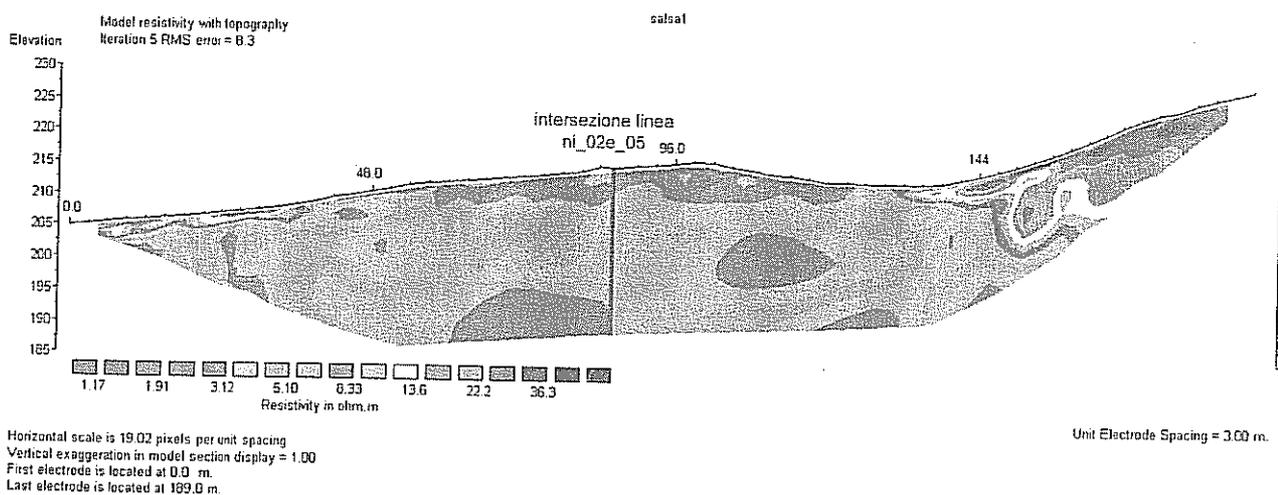


Figura 3.5.3 Modello di resistività della linea Ni_01e_05.

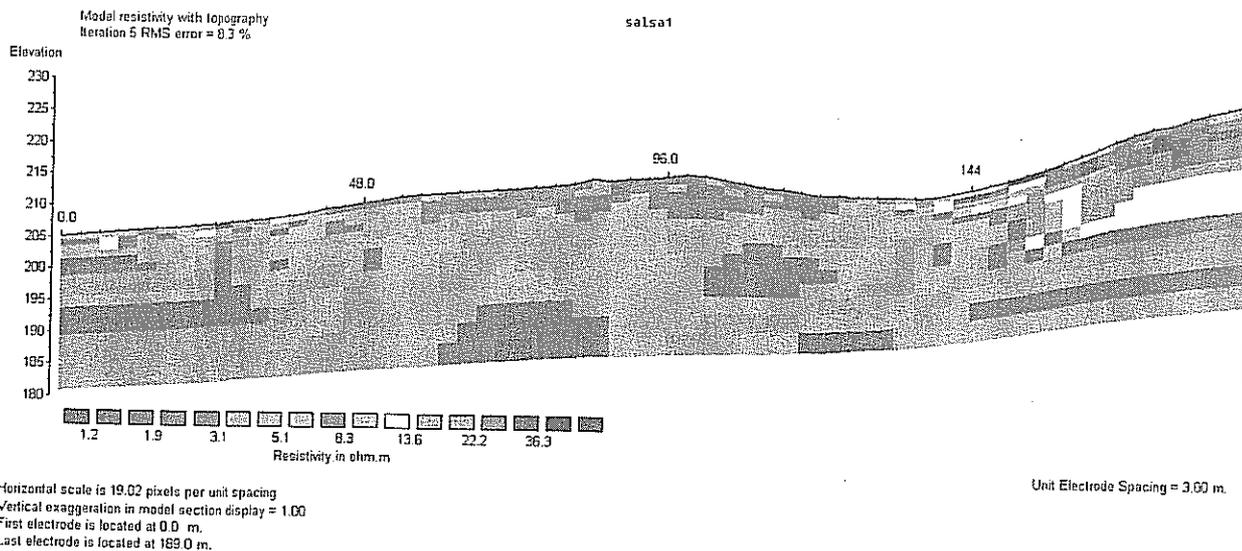


Figura 3.5.4 Modello di resistività della linea Ni_01e_05 con rappresentazione a blocchi.

Nella linea Ni_01e_05, ubicata ad E del cratere del vulcano di fango, sono ben identificate le aree non interessate dalla salsa ed in particolare la parte terminale della linea (dalla progressiva 144 in poi) che investiga un tratto della collina presente a sud della salsa. Molto interessante è l'informazione che proviene dalla prima parte della linea, fino alla progressiva 36, che corrisponde sul terreno alla parte vegetata che si estende a sud del laghetto. In questa situazione si osserva come i primi 5 m di sottosuolo non sono interessati dalla salsa, mentre più in profondità si nota una risalita basso resistiva tra le progressive 24 e 27 di colore blu che rappresenta valori di resistività < 3 Ω *m che indica una probabile salsa sepolta. La fuoriuscita principale del vulcano di fango si trova all'incirca in corrispondenza della progressiva 96. E' possibile osservare un livello superficiale potente fino a 10 m con valori di resistività < 3 Ω *m che descrive il corpo orientale del vulcano. Più in profondità è possibile osservare dei volumi isolati di acque salse (le aree di colore blu nel modello) e delle strutture potenti tra 10 e 15 m, poste ad una profondità di circa 10 m tra le progressive 60 ed 81,(colore verde nel modello) che confinano la risalita della salsa.

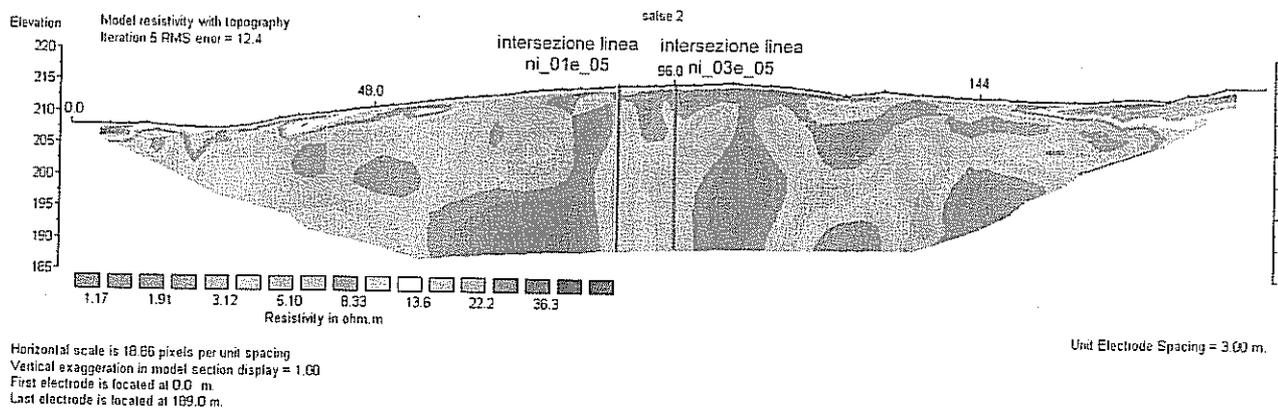


Figura 3.5.5 Modello di resistività della linea Ni_02e_05.

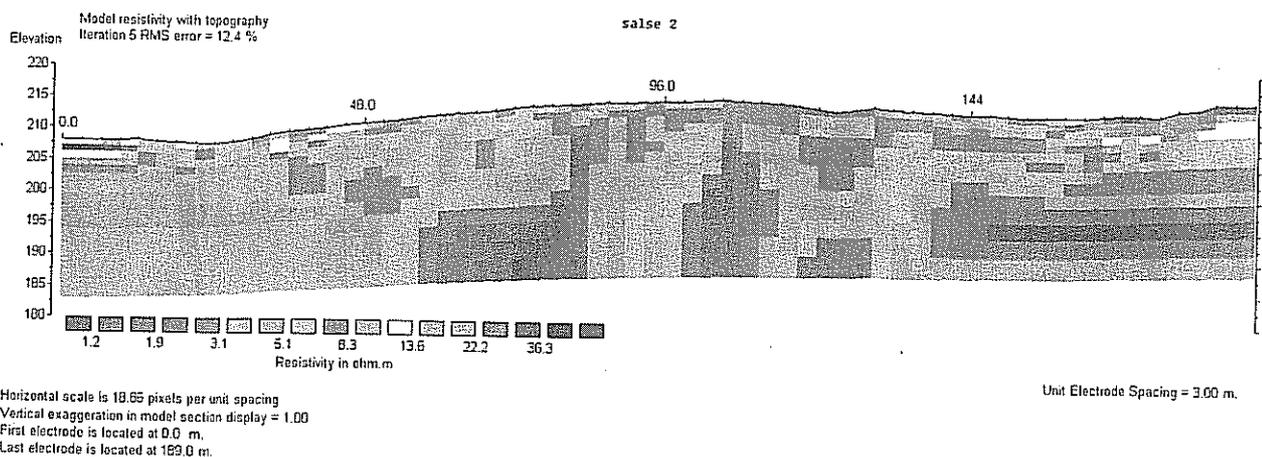


Figura 3.5.6 Modello di resistività della linea Ni_02e_05 con rappresentazione a blocchi.

La linea Ni_02e_05 è orientata ESE-WNW ed interseca le altre due linee nell'area del vulcano di fango. La parte sinistra del modello si trova in prossimità della strada che sale al centro visite, mentre la parte destra termina nella vigna che si trova ad ovest del vulcano. Le due parti terminali della linea non sono interessate dai fenomeni vulcanici, come si può osservare dai valori di resistività di circa $40 \Omega \cdot m$, indicati dal colore rosso nei modelli. E' interessante osservare le strutture verticali di colore blu, resistività $< 3 \Omega \cdot m$, che indicano le risalite delle salse. Le aprti verdi invece, con resistività $> 5 \Omega \cdot m$ dovrebbero indicare in volumi in cui la risalita del fluido è minore. Va sottolineato come le risalite siano concentrate principalmente proprio nella zona del vulcano e nella parte affiorante del vulcano stesso si osservino sempre valori basso resistivi ($< 3 \Omega \cdot m$ rappresentati dal colore blu)

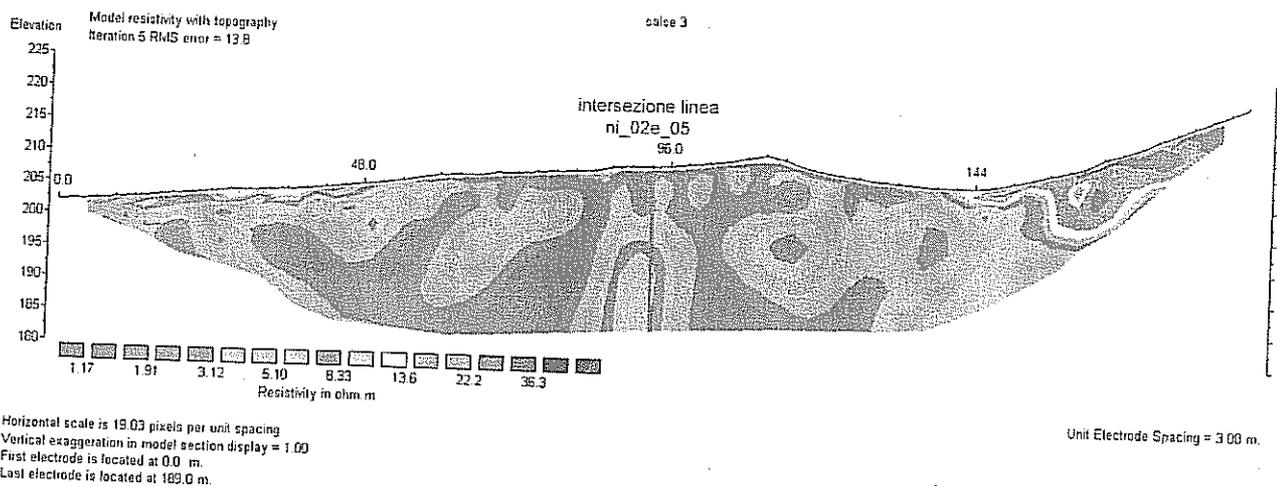


Figura 3.5.7 Modello di resistività della linea Ni_03e_05.

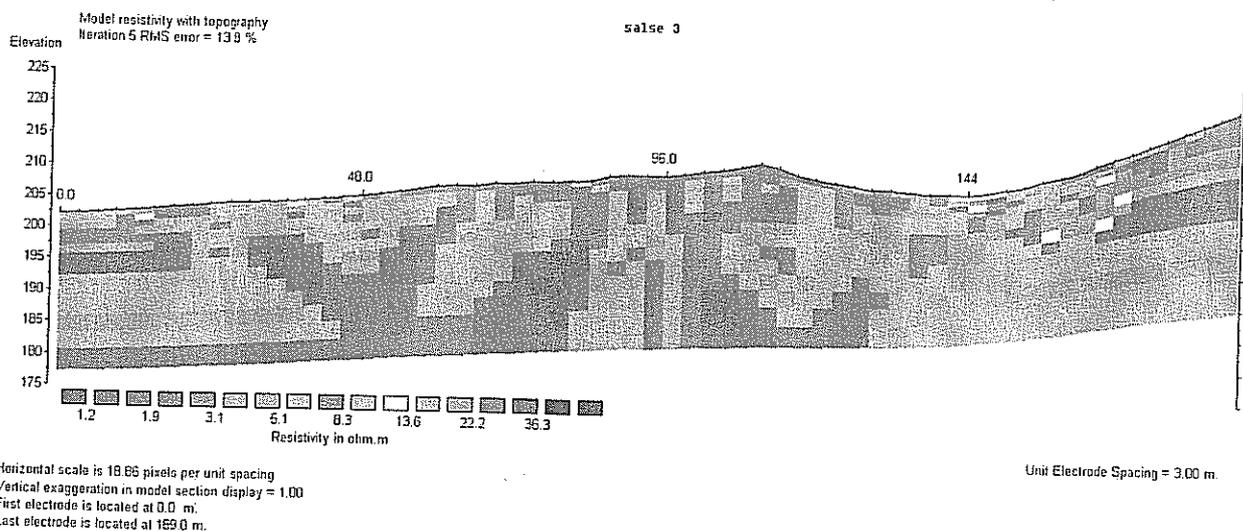


Figura 3.5.8 Modello di resistività della linea Ni_03e_05 con rappresentazione a blocchi.

La linea Ni_03e_05 è parallela alla linea Ni_01e_05 e ne ricalca a grandi linee le principali caratteristiche. Nella zona del vulcano, al centro della linea è possibile osservare una struttura verticale, colore verde nel modello, in cui si ipotizza non si concentrino le risalite di acque salse. Analogamente agli altri modelli, le aree blu indicano la presenza di salse e sono concentrate nella parte superficiale del vulcano e sotto l'area vegetata posta a nord del vulcano.

4. CONCLUSIONI

L'utilizzo di diverse metodologie geofisiche nei due siti ha fornito una adeguata mappatura delle strutture sotterranee per i primi 50-100 m a diverse risoluzioni. I risultati delle diverse investigazioni sono risultate consistenti tra di loro, e in particolare:

- nel sito di Sasso Streghe, il modello di resistività e il campo di velocità delle onde P evidenziano entrambi la presenza di due aree distinte, con proprietà petrofisiche diverse: un'area è caratterizzata da velocità sismiche e resistività superficiali basse, mentre l'altra presenta velocità più alte e resistività variabile, ma mediamente più alte, associate a strutture che sembrano risalire, ben evidenti in entrambi i modelli geofisici. Tali strutture hanno anche evidenze superficiali, come rilevato dai rilievi GPR;
- nel sito di Nirano, sono state identificate dal rilievo sismico e geoelettrico sia l'andamento sub-verticale del camino vulcanico sia la profondità di un primo serbatoio. I dati GPR hanno invece consentito di identificare delle zone di rottura sub-superficiali, che potrebbero essere dei possibili canali di sfogo.

In conclusione, i metodi geofisici integrati hanno fornito degli elementi importanti per effettuare una descrizione dettagliata delle strutture sepolte, che possono essere utili per integrare i dati geologici, al fine di ottenere un modello coerente e completo delle aree investigate.