

Indagine sismica a riflessione ad alta risoluzione con sorgente vibratoria Ivi-MiniVib svolta nel comune di Piedimonte Etneo (CT) in località Presa.

A cura di:

*Michele Punzo, Francesco Varriale, Pier Paolo Bruno, Antonio Rovelli, Giuseppe di Giulio.*

**Indice**

<b><u>1. Introduzione .....</u></b>	<b><u>1</u></b>
<b><u>2. Inquadramento geologico.....</u></b>	<b><u>2</u></b>
<b><u>3. Acquisizione dei dati.....</u></b>	<b><u>3</u></b>
<b><u>4. Strumentazione.....</u></b>	<b><u>5</u></b>
<b><u>5. Risultati preliminari.....</u></b>	<b><u>11</u></b>
<b><u>6. Bibliografia.....</u></b>	<b><u>16</u></b>

## **1. INTRODUZIONE**

Il presente lavoro ha avuto come obiettivo lo studio dettagliato della porzione superficiale (0-500 metri di profondità) della faglia Pernicana attraverso l'acquisizione e l'elaborazione di dati sismici a riflessione e rifrazione ad alta risoluzione.

E' stato acquisito un profilo sismico di 715 metri, in località Presa nel comune di Piedimonte Etneo (CT), mediante l'impiego di una sorgente sismica vibratoria ad alta risoluzione. Questo sito è stato scelto in quanto è attraversato dalla rottura superficiale indotta dalla faglia Pernicana (figura 1b).

Il lavoro ha come scopo:

- Investigare l'architettura strutturale dei sedimenti superficiali;
- Definire il comportamento cinematico della zona di faglia.

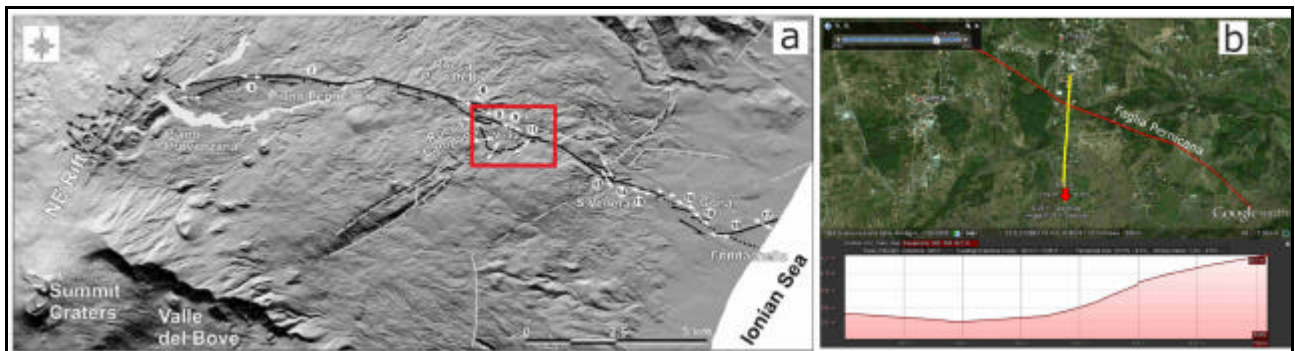
Il gruppo di lavoro è stato composto da:

- Pier Paolo Bruno (INGV–Osservatorio Vesuviano);
- Fabrizio Cara (INGV–Roma);
- Antonio Castiello (INGV–Grottaminarda);
- Rocco Cogliano (INGV–Grottaminarda);
- Dario De Rosa (INGV–Grottaminarda);
- Giuseppe Di Giulio (INGV–Roma);
- Stefania Pucillo (INGV–Grottaminarda);
- Michele Punzo (AMRA S.C.aR.L. - INGV–Grottaminarda);
- Antonio Rovelli (INGV–Roma);
- Francesco Varriale (AMRA S.C.aR.L. - INGV–Grottaminarda).

## 2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

La faglia Pernicana, che si estende per circa 8 km lungo il fianco Nord-Est dell'Etna, costituisce dal punto di vista tettonico una delle strutture più attive del vulcano. Questa faglia rappresenterebbe il margine settentrionale di un ampio settore instabile del vulcano in lento ma progressivo scivolamento verso Est Sud-Est.

In particolare, nell'area a sud di Presa, (figura 1a), la deformazione si estende attraverso un sistema di segmenti sub-paralleli ad andamento E-W con configurazione en-échelon e cinematica laterale sinistra; inoltre, tali segmenti sono collegati tra loro da thrust ad andamento N-S (Neri et al., 2004).



**Fig.1.** a) Modello digitale del settore NE del Monte Etna (da Acocella & Neri, 2005); il rettangolo mostra la localizzazione dell'esperimento rispetto la faglia Pernicana; b) dettaglio della localizzazione del profilo sismico "Presa" (immagine tratta da Google Earth).

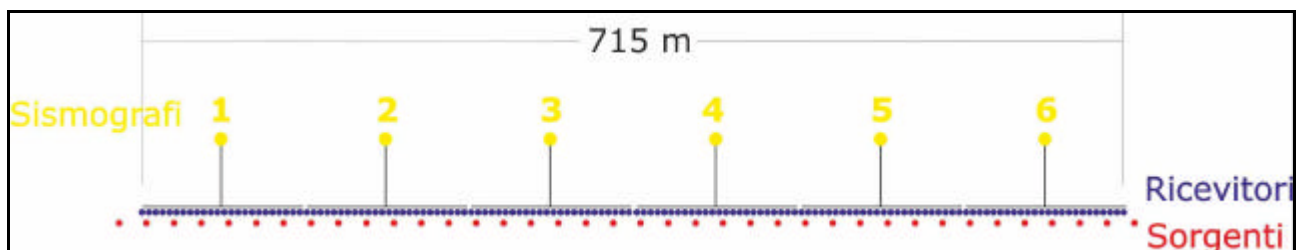
Nella zona di studio la faglia Pernicana perde progressivamente la sua identità morfologica essendo ricoperta dai recenti prodotti vulcanoclastici. La faglia è comunque ben identificabile grazie ai fenomeni di fagliazione superficiale che interessano numerosi manufatti. I rilievi strutturali e le misure geodetiche indicano una cinematica caratterizzata prevalentemente da una componente trascorrente sinistra con tassi di spostamento dell'ordine di 2.7 cm/anno (Azzaro et al., 1998b).

L'area in esame è stata interessata anche da fenomeni franosi connessi all'intensa tettonizzazione del fianco orientale Monte Finocchio, il quale è interessato da almeno due faglie riconducibili al sistema della Pernicana.

### 3. ACQUISIZIONE DEI DATI

L'area di studio è caratterizzata da una geologia di superficie estremamente complessa, derivante da un'evoluzione tettonica molto articolata. Per ovviare alla complessità geologico-strutturale del sito è stata impiegata, in fase di acquisizione, una geometria multicanale ad *offset globale* (Dell'Aversana et., al 2000). L'applicazione di tale strategia di acquisizione, già applicata con successo per l'imaging sismico in aree di catena e vulcaniche (Bruno e Castiello, 2009; Improta et al., 2003; Bruno et al., 2010), ha permesso di superare le limitazioni della sismica a riflessione in aree caratterizzate da elevata complessità strutturale. La tecnica si avvale dell'utilizzo di un elevato numero di ricevitori e di punti di energizzazione, densamente distribuiti all'interno di uno stendimento di lunghezza pari a due/tre volte la profondità d'esplorazione desiderata. Tale schema d'acquisizione consente di registrare sia eventi riflessi con alta copertura in un ampio intervallo di offset (riflessioni quasi verticali a piccoli offset e ad offset maggiori le riflessioni post-critiche), sia eventi rifratti in profondità, adatti per la tomografia dei primi arrivi.

In figura 2 è rappresentato lo schema esemplificativo della disposizione delle posizioni di energizzazione rispetto ai ricevitori impiegato per l'indagine sismica svolta a Presa.

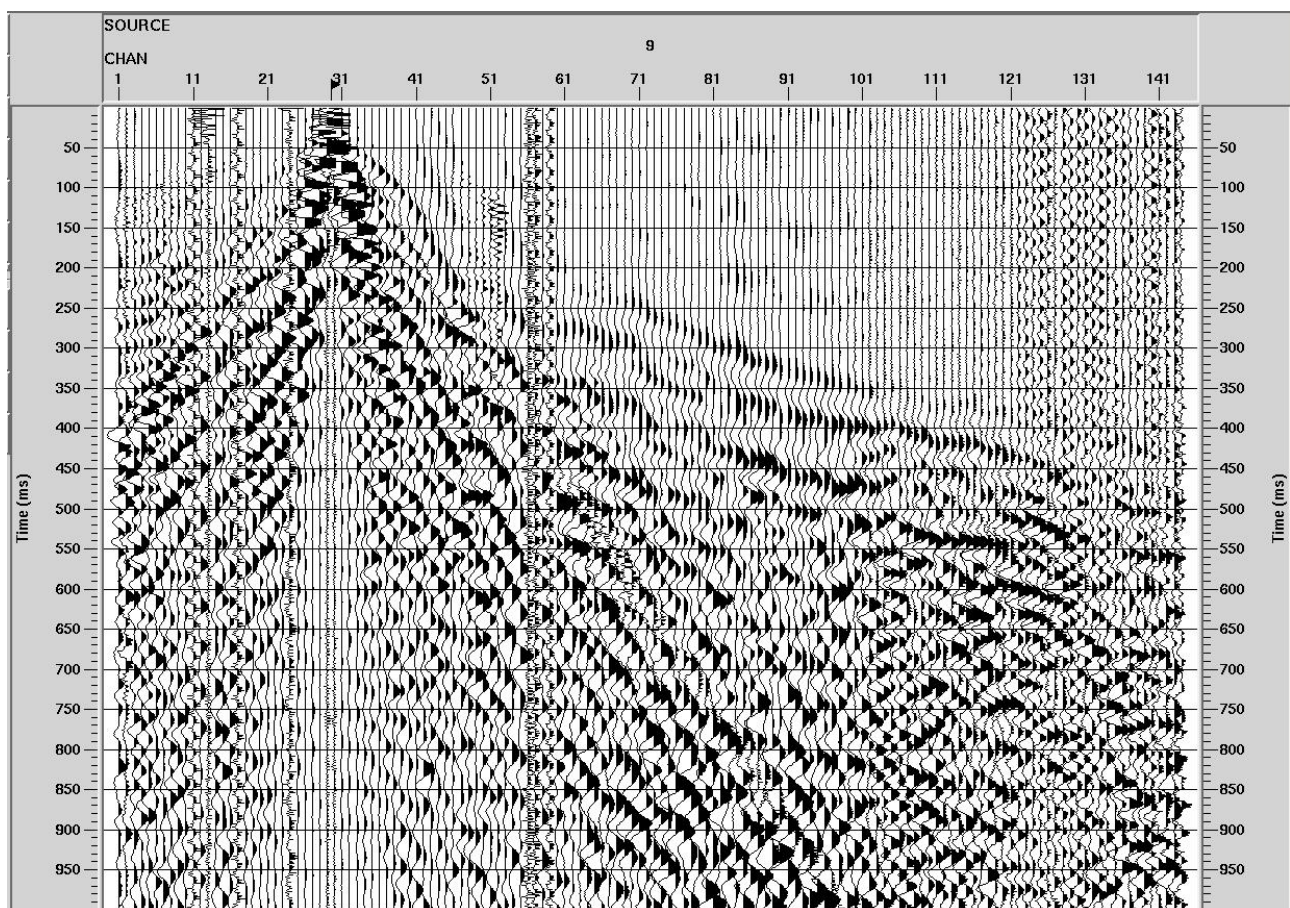


**Fig. 2.** Schema di acquisizione utilizzato per il profilo sismico "Presa". I punti blu rappresentano i ricevitori; quelli gialli i sismografi: ad ogni sismografo sono collegati 24 ricevitori; i punti rossi sono relativi alle posizioni di energizzazione.

Nella Tabella seguente sono riportati i dati relativi alla geometria d'acquisizione del profilo sismico a riflessione "Presa", di cui è mostrato un esempio di shot in figura 3.

Profilo Presa	
Lunghezza	715 m
Sorgente sismica	IVI - MINIVIB
Distanza intergeofonica	5 m
Spaziatura sorgenti	20 m
Numero energizzazioni	38
Numero di geofoni	144 geofoni verticali a 10 Hz
Spaziatura CDP	2.5 m
Copertura CDP	36
Numero CDP	292

**Tabella 1:** parametri della geometria d'acquisizione del profilo di Presa.



**Fig. 3.** Esempio di Common Shot Gather relativo al profilo sismico "Presa".

## 4. STRUMENTAZIONE

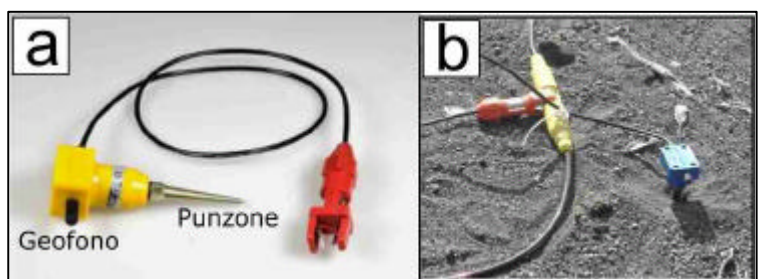
La strumentazione utilizzata per l'acquisizione del profilo sismico può essere descritta come costituita da 4 unità principali: sistema d'acquisizione dati, sistema di trasduzione, sistema di immagazzinamento dati e sistema di energizzazione.

Il *sistema di acquisizione dati* è costituito da 6 sismografi modulari GEODE della Geometrics (da 24 canali cadauno). Il Geode (figura 4) è un sismografo a 24 bit ad elevata dinamica (144 dB di range dinamico totale - 105 dB istantanei), ampia banda d'ingresso (1.75 Hz - 20 kHz), con passo di campionamento da 0.02 ms a 16 ms, che amplifica e digitalizza il segnale ricevuto dai geofoni e lo invia all'unità d'immagazzinamento dati. Ogni modulo è estremamente compatto (27 x 25 x 18 cm – circa 3 Kg) e può essere configurato da 3 a 24 canali. Più moduli geode possono essere collegati in serie da cavi di interfaccia digitali in modo da costituire sistemi fino a 1000 canali. Ogni modulo è alimentato autonomamente con batterie esterne da 12 Volt, con un consumo ridotto grazie ad un efficiente sistema di stand-by.



**Fig. 4.** Sismografo Geode

Il *sistema di trasduzione* è costituito da 144 geofoni Geospace 10 Hz verticali (mod. GS-20DX) per trasformare la sollecitazione dinamica dovuta alle vibrazioni del terreno, cui è reso solidale attraverso un punzone, in un segnale elettrico proporzionale alla velocità di vibrazione. I segnali elettrici uscenti dai geofoni vengono inviati tramite cavi multipolari (cavi sismici) ad un sismografo che li digitalizza consentendone la successiva acquisizione (figura 5)



**Fig. 5.** A) geofono; b) particolare della connessione tra il geofono ed il cavo sismico

Parte integrante del sistema di traduzione ed acquisizione sono anche:

12 cavi sismici multipolari Geospace, 12 take-out, con spaziature a 5 m;

6 cavi di interfaccia digitale, 125 m, per connessione moduli geode;

Il sistema d'immagazzinamento dati è rappresentato da un Laptop Panasonic CF-28 (figura 6). Il laptop collegato tramite rete locale Ethernet ai 6 Geodi, svolge il compito di archiviare i dati digitalizzati provenienti dai Geodi (in formato seg-2), di gestire i parametri d'acquisizione e consente di valutare interattivamente la qualità dei dati acquisiti.



**Fig. 6** Unità di archiviazione dati

Infine, il sistema di energizzazione è costituito da un sorgente sismica vibratoria - Ivi-MiniVib<sup>®</sup> (proprietà del CRdC AMRA) - progettata specificamente per applicazioni ad alta risoluzione. Il MiniVib<sup>®</sup> è un mezzo pesante gommato che trasporta e gestisce una massa vibrante di 168 Kg azionata da un meccanismo idraulico ad alta pressione (figura 7a). Il vantaggio dell'utilizzo di tale sorgente vibratoria consiste nel essere una sorgente totalmente "non invasiva" e nel consentire il completo controllo dell'energia immessa nel sottosuolo. Il carattere non-invasivo della sorgente consente il suo impiego anche in zone densamente popolate e su strade ed autostrade, con costi e problemi organizzativi minori rispetto ad indagini effettuate mediante l'impiego di esplosivi.

Il MiniVib<sup>®</sup> presenta le seguenti caratteristiche:

- Peso: 6368 Kg
- Lunghezza: 6.04 m
- Altezza: 2.59 m
- Larghezza: 2.46 m





**Fig. 7.** a) veicolo Ivi-MiniVib®; b) particolare del sistema vibrante. Le frequenze di oscillazione in esercizio del MINIVIB vanno da 5 Hz a 550 Hz.

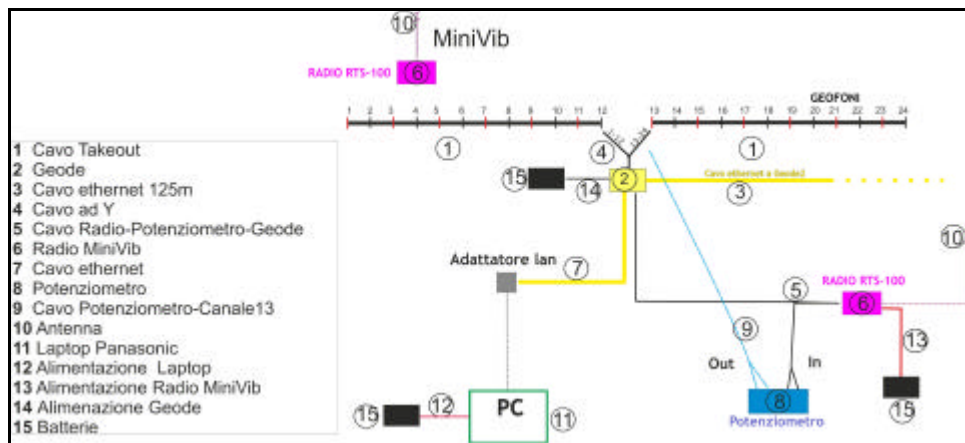
L' Ivi-MiniVib® è una sorgente di energia utilizzata nei rilievi sismici terrestri, basata sull'immissione nel sottosuolo di un treno d'onda controllato (sweep) in ampiezza, fase e durata, della durata massima di 65 secondi. Viene usato un vibratore idraulico ad alta pressione, collegato ad una piastra di superficie di circa 6567 cm<sup>2</sup>, tenuta sospesa tra gli assi delle ruote di un automezzo speciale a 4 ruote motrici ed abbassata sul terreno al momento dell'energizzazione (figura 7b). La massima forza che produce un tale sistema sul terreno è di circa 27 kN.

Il controllo e la gestione dei parametri del vibratore avviene tramite un PC interfacciato all'interno dell'automezzo all'unità di controllo SIB-100 (figura 8). Questa controlla l'idraulica del sistema ed è a sua volta collegata all'interfaccia RTS-100, che costituisce il collegamento radio con la stazione di controllo, a sua volta connessa con un'analogica interfaccia, per trasmettere/ricevere il segnale pilota ed i riferimenti temporali (figura 9).



**Fig. 8.** PC di controllo installato all'interno del Minivib

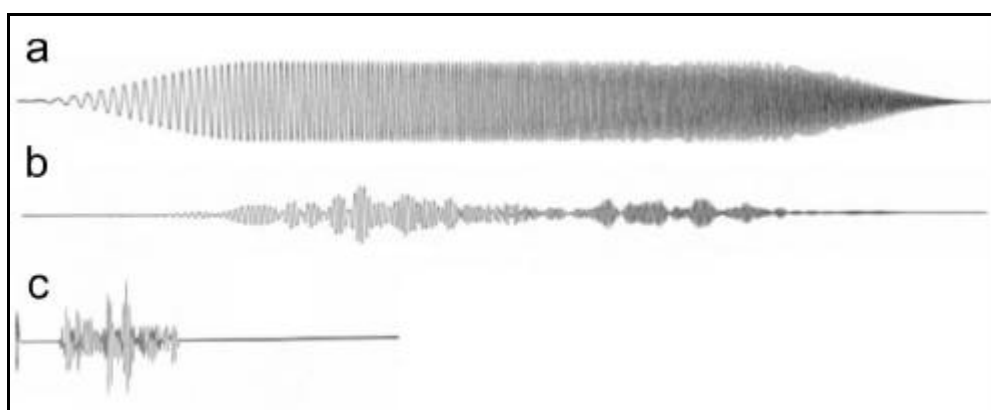
È possibile generare sweep da 5 a 550 Hz, lineari o non lineari (linear, db/Octave, db/Hertz, T-Power), inserire diversi tipi di smorzamento, e sono possibili diversi controlli sull'ampiezza del segnale emesso, sia manuali che automatici.



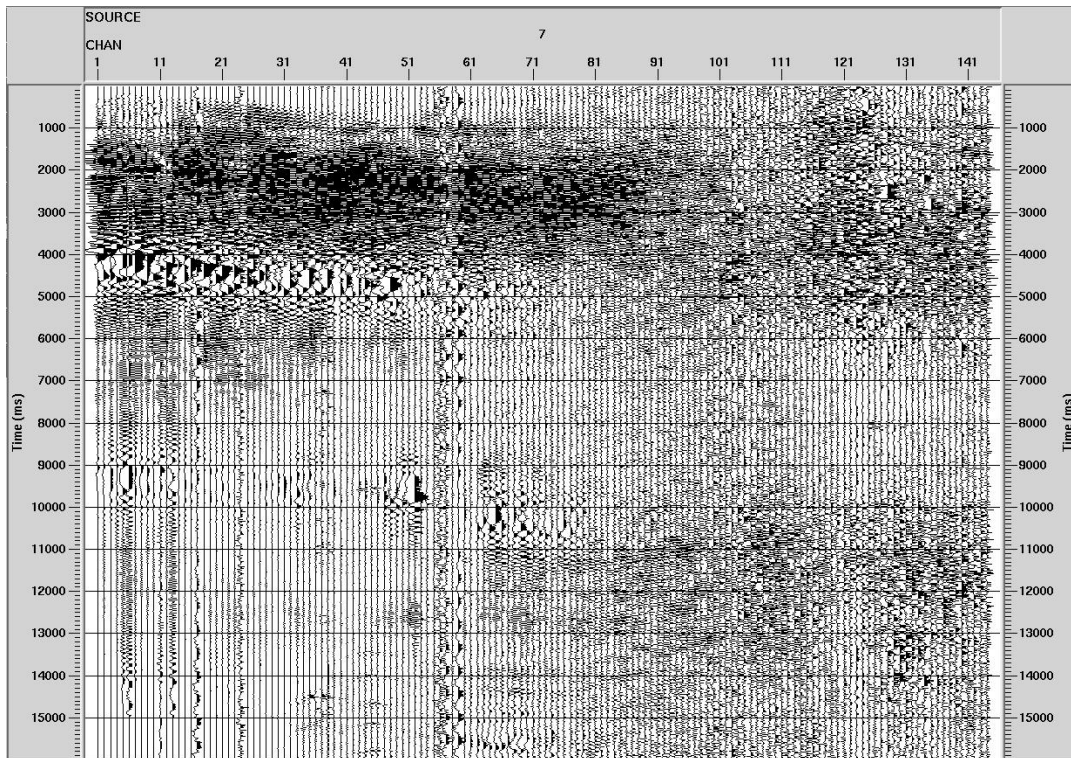
**Fig. 9.** Schema esemplificativo delle componenti della stazione di controllo.

Il vibratore è dotato di due accelerometri, montati rispettivamente sulla piastra e sulla massa vibrante, i cui dati sono inviati alla stazione d'acquisizione, per essere registrati al fine d'ottenere le funzioni di correlazione. Si possono trasmettere 3 diversi segnali pilota: a) il segnale sintetico (SYN); b) la composizione degli accelerometri non filtrata (GF); c) la composizione degli accelerometri filtrata con un filtro taglia alto, per rimuovere le armoniche superiori.

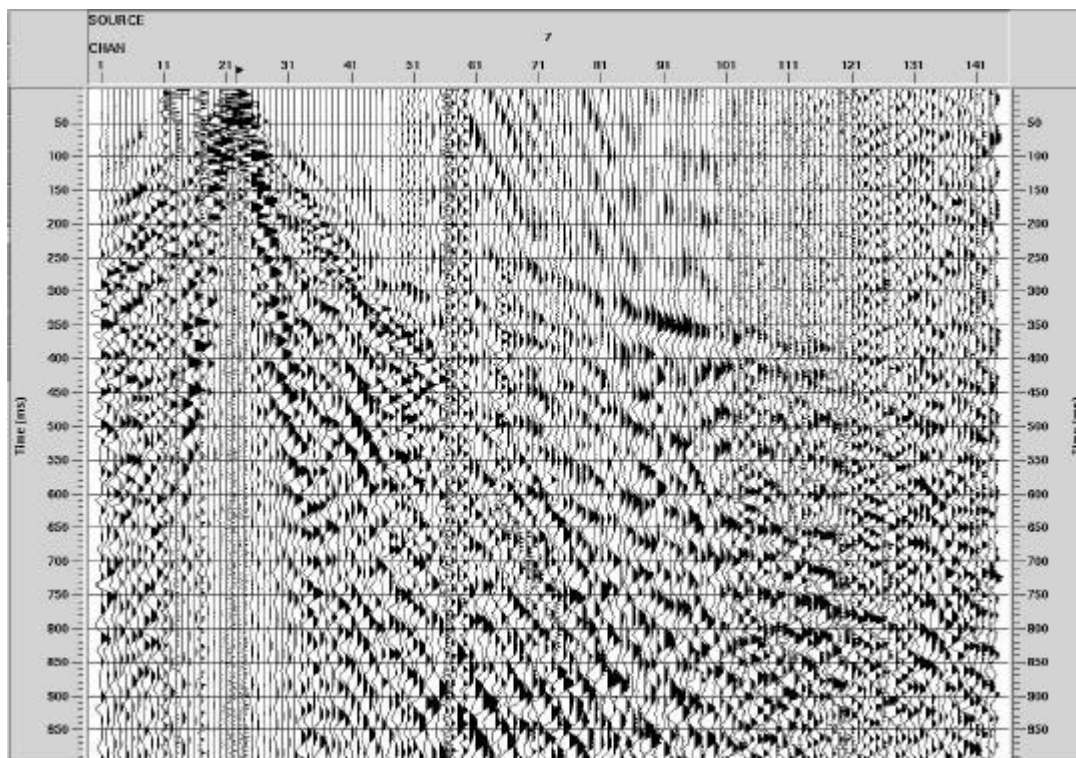
I dati registrati con sorgente vibratoria si presentano come treni di forme sinusoidali che non evidenziano la struttura del sottosuolo (figura 10 e 11). Solamente dopo un'operazione matematica (crosscorrelazione tra il segnale registrato e il segnale immesso) si ottiene un segnale sismico analogo a quello ottenuto dall'impiego di sorgenti impulsive (figura 12).



**Fig. 10.** Dati sintetici: a) esempio di sweep; b) registrazione del segnale inviato ad un ipotetico geofono; c) riflettività terrestre: risultato della crosscorrelazione tra a e b.



**Fig. 11.** Dati sperimentali: Common Shot Gather relativo al profilo sismico "Presa" prima dell'operazione di crosscorrelazione tra lo sweep e le registrazioni ai 144 geofoni. Lo sweep ha una durata di 15 sec ed un intervallo di frequenze tra 10 e 150 Hz



**Fig. 12.** Common Shot Gather relativo al profilo sismico "Presa" dopo l'operazione di crosscorrelazione tra lo sweep e le registrazioni ai 144 geofoni. La crosscorrelazione ha compresso il segnale registrato (i 16 secondi di registrazione della figura precedente sono stati compressi in un secondo) restituendo l'informazione desiderata: la riflettività terrestre

In ogni posizione d'energizzazione sono stati acquisiti 3 sweep lineari della durata di 15 s, con frequenze che vanno dai 10 ai 150 Hz. La somma delle tre registrazioni in un'identica posizione consente di ridurre notevolmente il rumore ambientale già in fase d'acquisizione.

Il passo di campionamento impiegato è stato di 1 ms; le tracce totali acquisite sono state 5472. La ridotta interdistanza tra ricevitori (5 metri) ha garantito un'elevata risoluzione spaziale (distanza tra i CDP di soli 2.5 m) ed un'elevata copertura con un massimo di 36 tracce per CDP (vedi Tabella 1). Il profilo è stato acquisito con una massima distanza sorgente-ricevitori (offset) di circa 730 m al fine di poter elaborare i dati acquisiti sia in chiave sismica a riflessione che a rifrazione (figura 13). Questa elaborazione combinata permette, infatti, di ottenere informazioni complementari sulla struttura investigata in termini di modelli di riflettività (sezioni stack) e di immagini tomografiche, queste ultime determinate mediante inversione dei tempi di primo arrivo delle onde P.

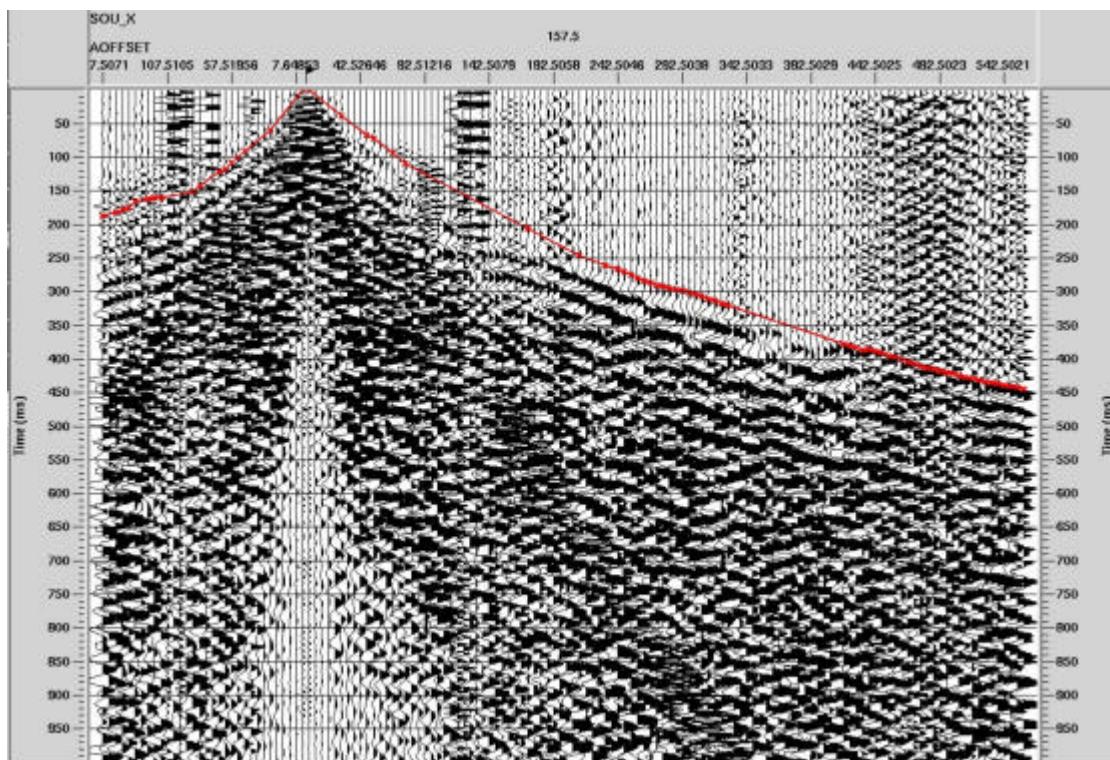


**Fig. 13.** Particolare dell'acquisizione del profilo sismico "Presa".

## 5. RISULTATI PRELIMINARI

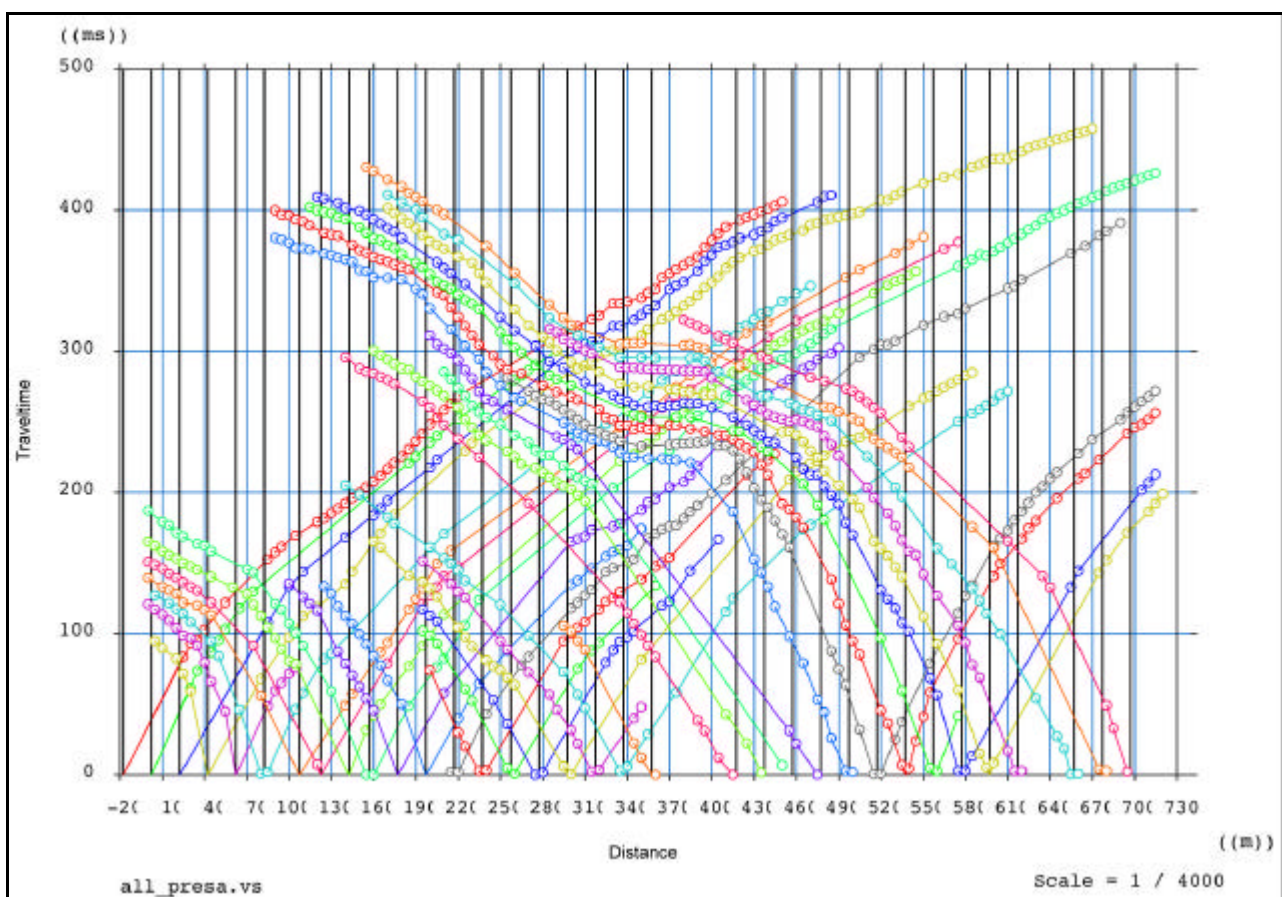
Il dato acquisito a Presa è caratterizzato nel complesso da un basso rapporto segnale/rumore, sia a causa dei fenomeni di scattering comuni nelle acquisizioni in ambiente vulcanico, sia per l'alto rumore ambientale legato all'urbanizzazione del sito d'indagine.

Sul dato acquisito si è proceduto effettuando la lettura dei tempi dei primi arrivi (picking) (figura 14) al fine di eseguire un'analisi a rifrazione, per la costruzione di un modello tomografico. Le dromocrone (figura 15) ottenute sono state controllate mediante la verifica della coerenza dei tempi (Ackermann, 1984), soprattutto per oggettivizzare i tempi data l'elevata incertezza delle letture a causa del basso rapporto segnale/rumore dei dati. Per ridurre l'incertezza del picking, si sono eseguite operazioni di filtraggio (Filtro a fase minima e Filtro Passa Banda) prima di procedere al picking. La lettura dei primi arrivi è stata eseguita selezionando, sui complessivi 34 shot, 5 shot guida caratterizzati da un miglior rapporto segnale/rumore; tali letture sono state prese a riferimento per estendere il picking sul restante dataset.

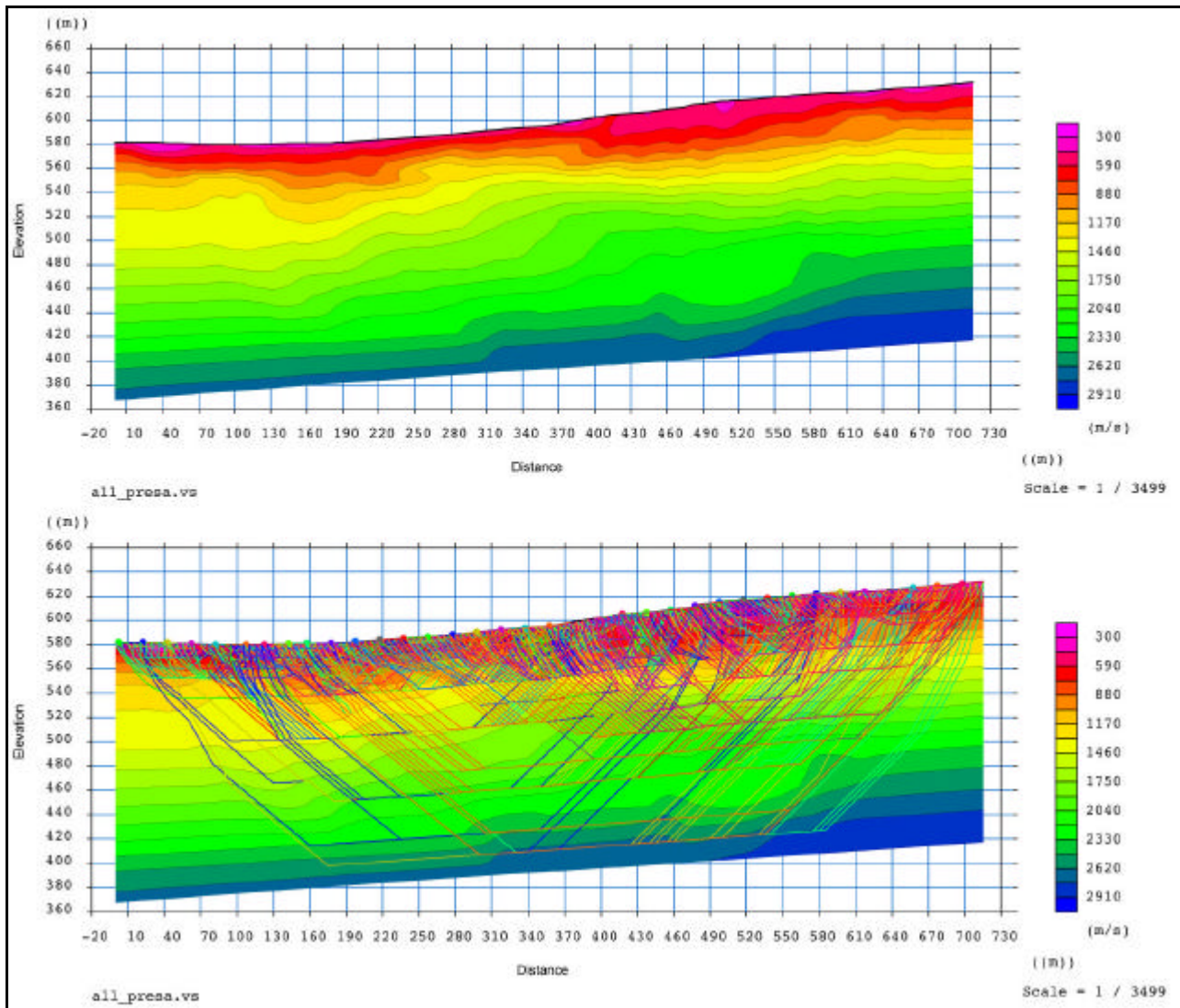


**Fig. 14:** Esempio di shot utilizzato per la lettura (picking) dei primi arrivi

I tempi letti sono stati impiegati per ottenere un modello tomografico di velocità. Il metodo tomografico richiede la creazione di un modello iniziale di velocità 1D, attraverso il quale ritracciare i raggi sismici. Dalla comparazione dei tempi calcolati con quelli osservati l'algoritmo modifica il modello iniziale, ripetendo questo processo in maniera iterativa finché l'RMSE (Root Mean Square Error) tra i tempi calcolati e misurati non è minimizzato. Il programma d'inversione utilizzato per ottenere il tomogramma si basa su un algoritmo di tipo iterativo (SIRT: Simultaneous Iteration Reconstruction Technique) il cui scopo è di ricavare il tempo minimo di percorrenza dei raggi tra sorgente e ricevitore per ogni coppia sorgente-ricevitore, attraverso il calcolo del percorso dei raggi e della lentezza (slowness). Essendo entrambe le variabili incognite il problema è sottovincolato, l'algoritmo procede con un approccio iterativo ai minimi quadrati. Il risultato è un'immagine bidimensionale che mostra la distribuzione delle velocità sismiche del sottosuolo (figura 16).

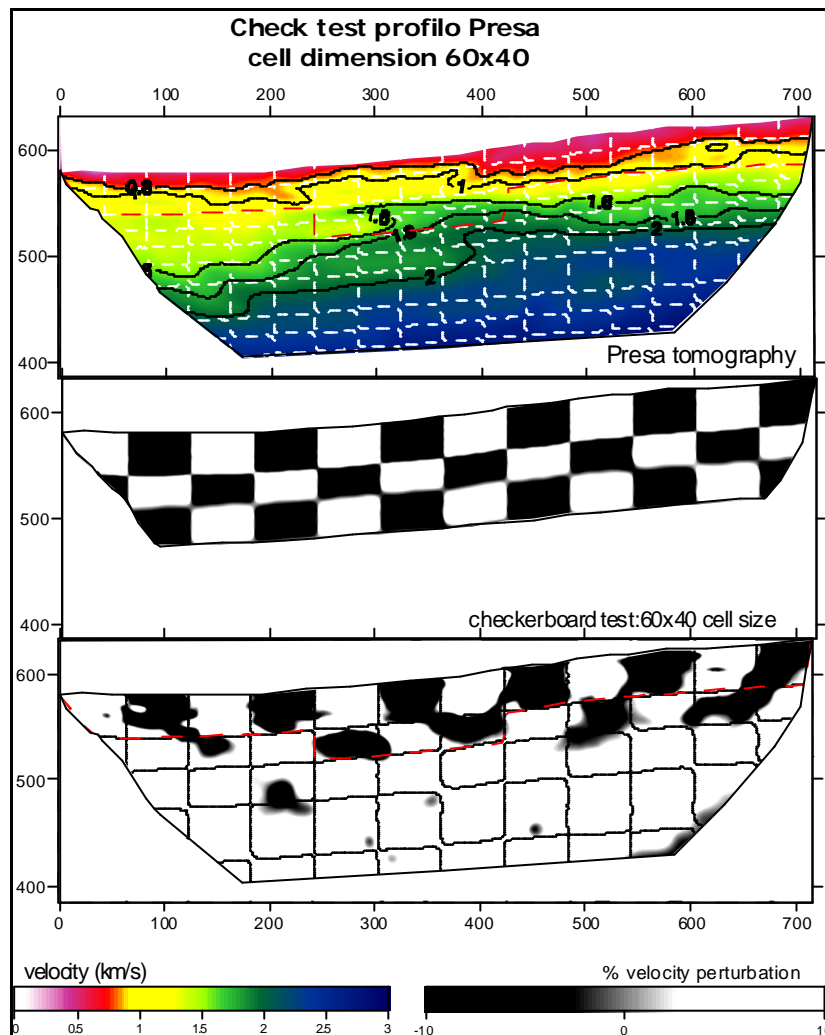


**Fig. 15:** Dromocroni dei tempi letti ed impiegati per la costruzione del modello



**Fig. 16:** Sopra: Modello tomografico del profilo di Presa, l'RMS dopo 10 iterazioni di 7. 1 msec. Sotto: la copertura dei raggi tracciati dal programma d'inversione sulla base del modello di partenza preimpostato. Lo studio di ortofoto suggerisce che la traccia della faglia interseca grossomodo la stesa tra i geofoni numero 42 e 54 (205 e 265 mt della stesa).

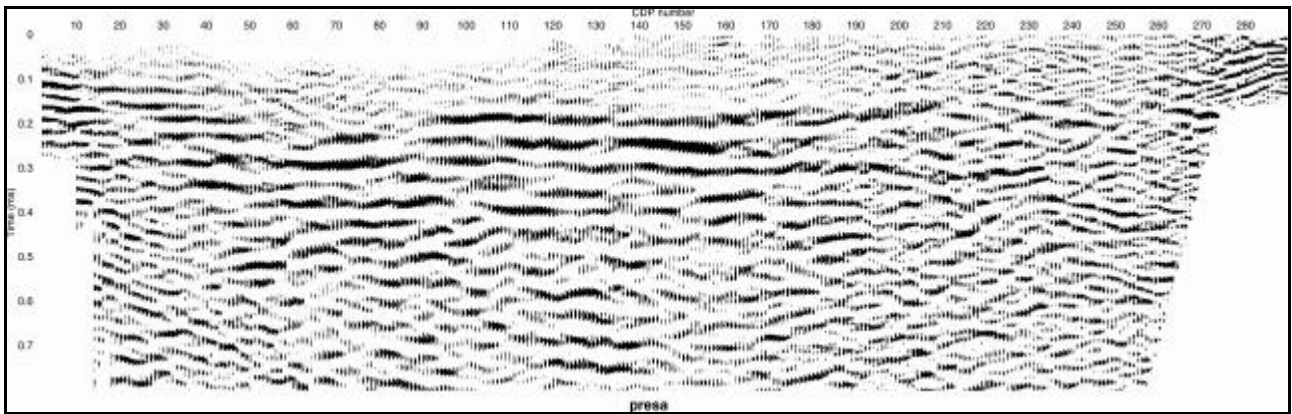
Il modello tomografico è stato testato eseguendo alcuni test sintetici (checkerboard, test a scacchiera) (figura 17). I valori di velocità del modello tomografico sono stati "perturbati" del  $\pm 10\%$  schematizzando il sottosuolo in celle regolari di dimensioni di 60x40 m. Le dromocrone sono state quindi ricalcolate sul modello di velocità perturbato ed invertite utilizzando il modello di velocità della tomografia iniziale. Il risultato finale (figura 17c), rappresenta la capacità dell'inversione tomografica nel risolvere le celle di perturbazione e fornisce un'indicazione della risoluzione superficiale del modello (primi 60/70 metri di profondità). La ridotta profondità di risoluzione è dovuta alla dispersione del segnale sismico, imputata alla predominanza di litologie vulcaniche, ed a problemi di lettura dei primi arrivi, legati alla qualità del dato.



**Fig. 17:** **In alto:** Modello tomografico del profilo di Presa. **Al centro:** perturbazione delle velocità ( $\pm 10\%$ ) imposta al modello tomografico (modello a scacchiera). **In basso:** risposta del modello tomografico alla perturbazione. La linea rossa tratteggiata indica il limite di affidabilità della tomografia.

I dati acquisiti sono stati elaborati anche in chiave sismica a riflessione, si presenta qui una sezione preliminare dell'elaborazione. Per il profilo sismico a riflessione (figura 18), l'attenzione è stata focalizzata nei primi 400 ms. Nonostante la scarsa qualità del dato acquisito, esso potrà fornire indicazioni interessanti per la localizzazione e lo studio in dettaglio la traccia superficiale della faglia e chiarire la natura delle dislocazioni a cui tale profilo è ortogonale.





**Fig.18:** Sezione stack preliminare del profilo sismico Presa.

## **RINGRAZIAMENTI**

Le attività di questo rapporto sono state attuate grazie a fondi di ricerca della sezione "Sismologia e Tettonofisica" dell'INGV di Roma e un parziale contributo finanziario del Progetto FLANK della convenzione DPC -INGV degli anni 2008-2010.

Si ringrazia Marco Neri della sezione INGV di Catania, per le utili informazioni fornite e la fattiva collaborazione.

Si ringraziano inoltre Paolo Gasparini, Roberto Muti e Fabio Vigliotta di AMRA S.C.aR.L. per il supporto scientifico ed amministrativo.

## 6. BIBLIOGRAFIA

Ackermann H. D., Pankratz L. W., and Dansereau D. (1986). *Geophysics*, Vol. 51, N. 2; P. 223-235,

Azzaro R., Ferelli L., Michetti A., Serva L., Vittori E. (1998). Environmental Hazard of Capable Faults: The Case of the Pernicana Fault (Mt. Etna, Sicily). *Natural Hazards* 17: 147–162.

Bruno, P. P. G., and A. Castiello, (2009), High-resolution onshore seismic imaging of complex volcanic structures: An example from Vulcano Island, Italy, *J. Geophys. Res.*, 114, B12303.

Bruno, P.P., Improta, L., Castiello, A., Villani, F., Montone, P., 2010. The Vallo di Diano fault system; new evidence for an active range-bounding fault in southern Italy using shallow, high-resolution seismic profilino *BSSA* 100(2):882-890.

Dell'Aversana P., E. Ceragioli S. Morandi and A. Zollo (2000). A simultaneous acquisition test of high density "global offset" seismic in complex geological settings. *First Break* 18, 87-96.

Improta, L., A. Zollo, P.P. Bruno, A. Herrero, and F.Villani, (2003). High-resolution seismic tomography across the 1980 (Ms 6.9) Southern Italy earthquake fault scarp, *Geoph. Res. Lett.*, 30-10, 1494-1498.

Neri M., Acocella V., Behncke B., 2004. The role of the Pernicana Fault System in the spreading of Mt. Etna (Italy) during the 2002–2003 eruption. *Bull Volcanol* (2004) 66:417–430