

Monitoraggio del Vesuvio
con antenne sismiche:
primi risultati dell'array VAS

Quaderni di
Geofisica

107



Quaderni di Geofisica

Direttore

Enzo Boschi

Editorial Board

Raffaele Azzaro (CT)

Sara Barsotti (PI)

Mario Castellano (NA)

Viviana Castelli (BO)

Rosa Anna Corsaro (CT)

Luigi Cucci (RM1)

Mauro Di Vito (NA)

Marcello Liotta (PA)

Simona Masina (BO)

Mario Mattia (CT)

Nicola Pagliuca (RM1)

Umberto Sciacca (RM1)

Salvatore Stramondo (CNT)

Andrea Tertulliani - Editor in Chief (RM1)

Aldo Winkler (RM2)

Gaetano Zonno (MI)

Segreteria di Redazione

Francesca Di Stefano - coordinatore

Tel. +39 06 51860068

Fax +39 06 36915617

Rossella Celi

Tel. +39 06 51860055

Fax +39 06 36915617

redazionecen@ingv.it

Monitoraggio del Vesuvio con antenne sismiche: primi risultati dell'array VAS

Monitoring of Mt. Vesuvius with seismic antennas: first results of VAS array

Mario La Rocca, Danilo Galluzzo, Vincenzo Palomba, Edoardo Del Pezzo, Umberto Tammaro, Mario Dolce, Giuseppe Brandi, Mario Castellano, Francesca Bianco

INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Napoli - Osservatorio Vesuviano)

Monitoraggio del Vesuvio con antenne sismiche: primi risultati dell'array VAS

Nei primi mesi del 2012 è stato installato, sul versante sud del Vesuvio, un *array* di sismometri, denominato VAS (*Vesuvius Array South*) con lo scopo di migliorare il monitoraggio dell'attività sismica del vulcano. L'array è composto da 10 sensori a corto periodo, di cui uno a tre componenti, per un totale di 12 canali acquisiti da due stazioni sismiche (ciascuna a 6 canali), che operano in modalità continua su supporto locale con frequenza di campionamento di 100 campioni/secondo e range dinamico di 24 bit. I dati, prelevati periodicamente, sono elaborati con quattro diverse tecniche di array in varie bande di frequenza nell'intervallo 1 – 5 Hz al fine di evidenziare ogni segnale potenzialmente legato all'attività vulcanica. I risultati preliminari dell'analisi di terremoti locali mostrano che l'array ha una buona risoluzione in termini di *slowness* e *backazimuth* nella banda di frequenza 2 – 5 Hz. A frequenza maggiore i risultati possono essere affetti da errori di elevata entità, mentre a frequenza minore la coerenza del rumore può essere equivalente a quella del segnale prodotto dai terremoti, e quindi mascherare l'individuazione di eventi naturali potenzialmente legati a variazioni nella dinamica del vulcano.

A seismic array named VAS (*Vesuvius Array South*) has been installed at the beginning of 2012 on the south flank of Mt. Vesuvius to improve the seismic monitoring of the volcano. It is composed of 10 short period seismometers connected by cable to the acquisition system. One three-component and nine vertical components are acquired by two six-channel data loggers. Data acquisition is continuous, on local memory, 100 samples per second, with 24 bit dynamic range. Data are periodically collected, converted and analyzed by applying four different array methods in several frequency bands in the range 1 Hz – 5 Hz. Array methods furnish propagation direction and apparent velocity of coherent signals, giving an important contribution to the identification of seismic events that could be related to the volcanic activity. Preliminary results of array analysis show that the array VAS has an optimal resolution in the 2 Hz – 5 Hz frequency range. Higher frequency signals may have a poor coherence due to the short wavelength, while at frequency lower than 2 Hz, the coherence of seismic noise may be comparable to the signal of interest, thus preventing the identification of natural events potentially related to changes in the dynamic of the volcano.

Introduzione

L'uso di array per lo studio dei segnali sismici si è rivelato molto utile in numerose aree vulcaniche, come dimostra una vasta letteratura scientifica degli ultimi decenni [e.g. Almendros et al., 2002; Chouet, 2003; Di Lieto et al., 2007]. Ciò è dovuto soprattutto al fatto che la campionatura del segnale nel tempo e nello spazio consente l'individuazione e caratterizzazione di segnali coerenti "mascherati" dal rumore sismico [Rost and Thomas, 2002; Rost and Thomas, 2009]. Questa caratteristica rende gli array particolarmente utili nello studio del tremore vulcanico [Chouet, 2003; McNutt, 2005]. Il tremore vulcanico non è mai stato osservato al

Vesuvio con strumentazione sismica moderna, tuttavia esso potrebbe comparire nel caso lo stato dinamico del vulcano dovesse cambiare rispetto alla quiescenza degli ultimi decenni. Attualmente la sismicità del Vesuvio è monitorata da una rete di numerose stazioni di varia tipologia [Giudicepietro et al., 2010] che si è evoluta nel corso dei decenni [Castellano et al., 2002] a partire dagli anni '70. L'utilizzo di array di sismometri per il monitoraggio dell'attività sismica di questo vulcano è un obiettivo di primaria importanza, e per tale motivo diversi array sono stati installati sul Vesuvio nel corso degli anni. In molti casi si è trattato di array temporanei installati per scopi specifici in occasione di esperimenti [De Luca et al., 1997; La Rocca et

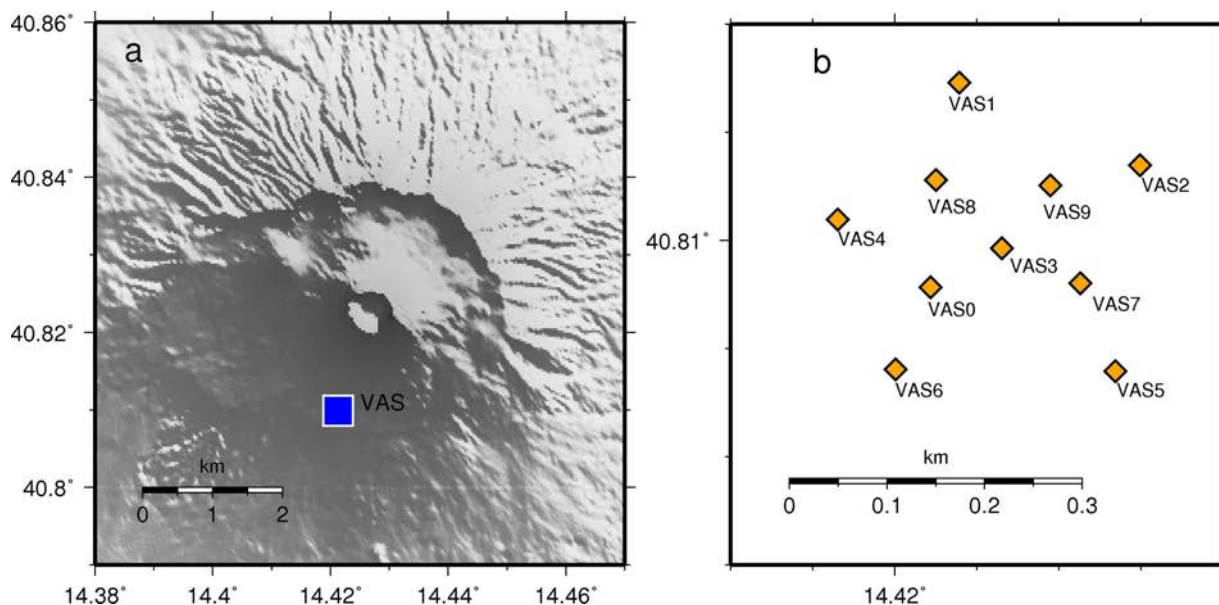


Figura 1 a) Mappa topografica del Vesuvio con indicata la posizione dell'array VAS. b) Configurazione dell'array VAS.
Figure 1 a) Topographical map of Mt. Vesuvius showing the position of VAS array. b) Configuration of the array VAS.

al., 2001] o nell'ambito di progetti di ricerca [Del Pezzo et al., 1999; Saccorotti et al., 2001]. Sono stati installati anche dei prototipi di array permanenti per contribuire al monitoraggio e alla sorveglianza in tempo reale dell'attività vulcanica [Bianco et al., 2005; Giudicepietro et al., 2010]. Tuttavia le difficoltà tecniche e logistiche che caratterizzano l'installazione e la gestione di questo tipo di apparati hanno impedito fino ad oggi la realizzazione di un array permanente, stabile e affidabile, da utilizzare nel monitoraggio del Vesuvio. Tali difficoltà sono state affrontate e risolte al meglio con l'installazione, nel primo semestre del 2012, di un nuovo array sismico, denominato VAS (*Vesuvius Array South*). Questo lavoro descrive le caratteristiche dell'array VAS ed i primi risultati delle analisi effettuate sui dati da esso acquisiti.

1. Descrizione dell'array VAS

L'array è composto da 10 stazioni installate in un'area boscosa di circa 0.1 km² sul versante sud del Vesuvio, a quota compresa tra 635 e 700 metri slm (Figura 1). Il diametro dell'array è di circa 300 metri. I sismometri utilizzati sono a corto periodo, Lennartz LE-3Dlite (1 Hz), e sono collegati via cavo al sistema di acquisizione dati. Tutti i sensori sono a tre componenti, ma dato il ridotto numero di canali disponibili attualmente, per nove di essi viene acquisita solo la componente verticale. Solamente per la stazione centrale (VAS3) vengono acquisite tutte e tre le componenti. L'acquisizione dei dati è realizzata utilizzando due stazioni sismiche digitali a 6 canali. Esse sono collocate in un contenitore metallico,

in cui trovano alloggiamento anche le batterie, posizionato in una radura nella zona centrale dell'array. L'energia è fornita da pannelli solari.

Diversi acquisitori (ciascuno con 6 canali disponibili) sono stati utilizzati nei primi mesi di funzionamento, e precisamente: Nanometrics Taurus/Trident, Lennartz M24, Reftek 130. Per alcune settimane nella fase iniziale dell'acquisizione sono state utilizzate due stazioni Nanometrics Taurus (3 canali), ognuna munita di modulo Trident (ulteriori 3 canali), per un totale di 12 canali. Successivamente sono state utilizzate due Lennartz M24, ognuna con 6 canali. Una di esse è stata irreparabilmente danneggiata da sovratensione durante un temporale, quindi è stata sostituita con una Reftek 130 a 6 canali.

Le sovratensioni che si generano sui cavi quando un fulmine cade nella zona dell'array sono la causa principale di guasti strumentali in tutti gli array che utilizzano questo sistema per il collegamento sensore - acquisitore. Per minimizzare tali danni, dopo la fulminazione di una stazione gli acquisitori sono stati dotati di un dispositivo di protezione da scariche elettriche, su ogni canale acquisito e sull'alimentazione dei sensori.

L'installazione dell'array è stata effettuata ipotizzando una durata di almeno cinque anni di questo strumento. Pertanto tutti i cavi utilizzati (quasi 1.5 km) sono stati sotterrati per ridurre sia l'impatto ambientale che i danni che possono essere causati da animali (roditori, cavalli) e persone. Per l'installazione di ogni sismometro è stata scavata una buca profonda circa 50 cm. In fondo alla buca è stata posizionata una robusta mattonella su cui poggiare e mettere in bolla il sismometro. Sopra la mattonella un pozzetto in PVC da



Figura 2 Due fasi della installazione dei sismometri. 1) posizionamento della base in fondo alla buca; 2) posizionamento del pozzetto sopra la base, livellamento e orientamento del sismometro.
Figure 2 Two phases of the seismometers installation. 1) Leveling of the thick tile at the bottom of a hole; 2) leveling and orientation of the three-component seismometer inside a plastic case.

30x30x30 cm³, privato del fondo, garantisce facile accesso e adeguata protezione allo strumento. Il tutto è stato ricoperto da circa 15 cm di terra per ulteriore protezione. Alcune fasi di tali installazioni sono mostrate in Figura 2.

La posizione di ogni punto stazione è stata misurata con GPS. Sono state effettuate due sessioni di misure GPS della durata di 1 ora per ogni punto e con campionamento ogni 30 secondi. Per la realizzazione delle misure sono stati usati ricevitori GPS Leica della serie 1200 a doppia frequenza (Tabella 1). I dati sono stati elaborati con il software LGO della Leica utilizzando i parametri riportati in Tabella 1 e considerando la stazione permanente OSVE come riferimento. Tale stazione è inclusa nella rete NeVoCGPS di stazioni GPS permanenti che coprono l'area vulcanica napoletana.

Per alcuni siti in cui la copertura del bosco impediva una buona ricezione del segnale GPS, la misura è stata fatta nella radura più vicina, e la posizione del sensore è stata misurata a partire da tale punto utilizzando rollina metrica e bussola.

La quota ellissoidica di ogni punto è stata riportata al geoido sottraendo 47 metri. Dai risultati si evince che la minima altezza è di 635 m s.l.m. e la massima di 700 m s.l.m., per una differenza di quota di 65 m. Siccome la massima apertura dell'array è di circa 300 m, la pendenza media è circa 12° e risulta trascurabile nella maggior parte delle applicazioni.

In Figura 3 è mostrata la risposta dell'array calcolata per un segnale teorico a quattro diverse frequenze: 1 Hz, 2 Hz, 4 Hz, 8 Hz. La forma pressoché circolare del massimo nello spettro Sx-Sy riflette la distribuzione isotropa delle stazioni nello spazio. Come sempre nelle analisi con tecniche di array, la risoluzione teorica aumenta con l'aumentare della frequenza, come si vede dalla graduale riduzione della larghezza del picco. La curva di colore celeste, corrispondente all'ampiezza 0.9 (90% del massimo), descrive chiaramente tale fenomeno. Nella pratica, tuttavia, si riscontra il fenomeno inverso, cioè la capacità risolutiva dell'array diminuisce quando la frequenza supera una certa soglia. Questo dipende

Strumentazione usata per le misure GPS		Parametri di calcolo usati	
Ricevitore	Antenna	Cut off	20°
GRX1200PRO	LEIAT504 LEIS	Effemeridi	Broadcast
GX1220	LEIAX1202 NONE	Modello troposferico	Saastamoinen
GX1230	LEIAX1202GG NONE	Modello Ionosferico	Standard
		Tipo di soluzione	Iono free fixed
		File di variazione del centro di fase delle antenne	

Tabella 1 Strumentazione utilizzata per le misure GPS e parametri di analisi.
Table 1 Instruments used for GPS measures and parameters for data analysis.

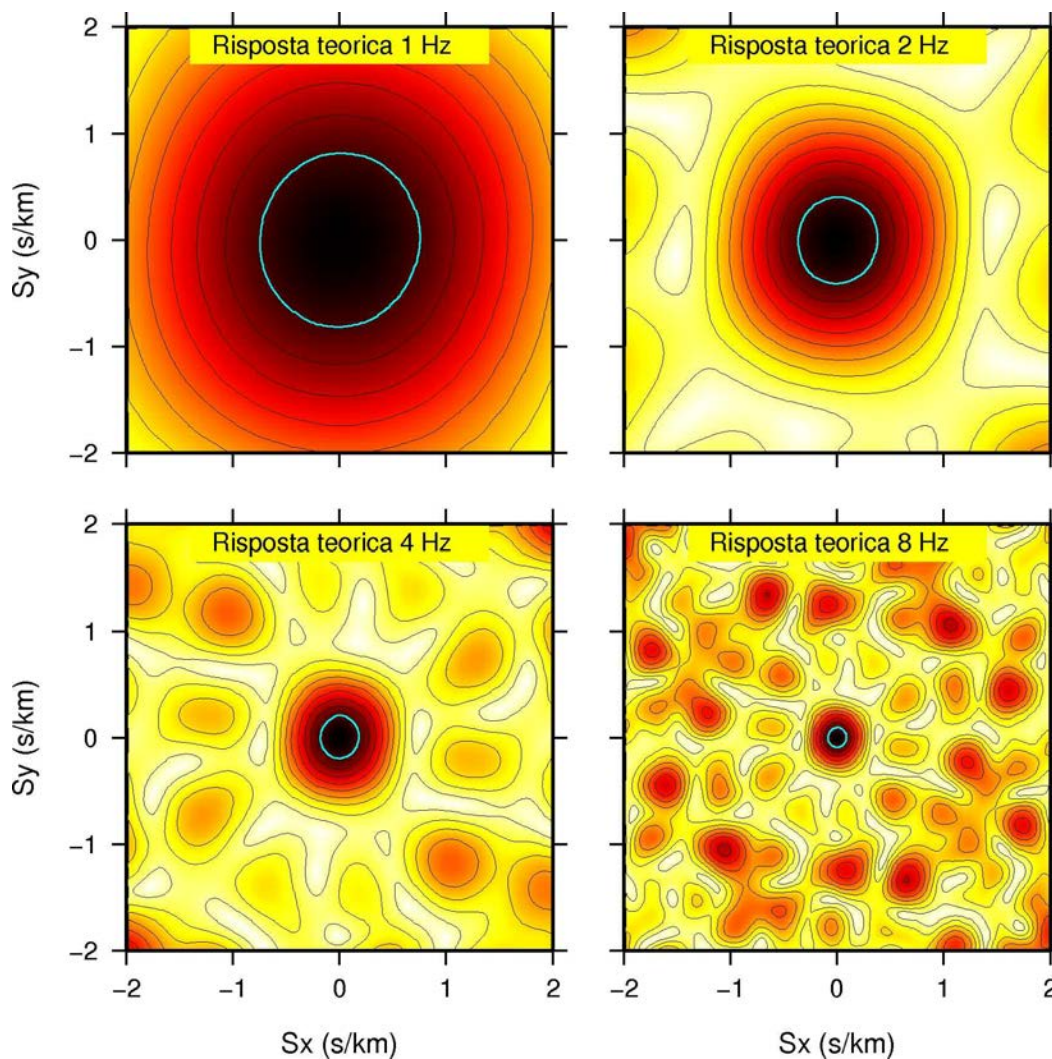


Figura 3 Risposta teorica dell'array VAS calcolata per quattro diverse frequenze.
Figure 3 Theoretical array response computed at four different frequency.

dal fatto che la coerenza del segnale sismico tra le stazioni dell'array generalmente diminuisce con l'aumentare della frequenza a causa della propagazione nel mezzo fortemente eterogeneo. Dagli spettri teorici è evidente come la risoluzione dell'array per frequenze basse sia alquanto ridotta. Ciò non sorprende, poichè a frequenze minori di 2 Hz la lunghezza d'onda dei segnali sismici è maggiore della estensione dell'array, e dunque anche il rumore sismico risulta molto coerente. Nello spettro S_x/S_y calcolato per la frequenza 8 Hz si vede bene come l'ampiezza di tutti i picchi secondari sia molto minore del picco principale centrale. Questo dimostra che l'aliasing spaziale è trascurabile nelle analisi effettuate sui dati dell'array VAS.

2. Analisi dei dati

I dati acquisiti in modalità continua su memorie locali vengono periodicamente raccolti, trasferiti su un computer in

laboratorio e convertiti in formato SAC [Goldstein et al., 2003; Goldstein and Stroke, 2005] includendo nell'header tutti i parametri necessari (*kstnm*, *kztime*, *beg*, *delta*) e potenzialmente utili per le elaborazioni successive e per l'archivio (*kcmpnm*, *stla*, *stlo*, *stel*, *cmpaz*, *cmpinc*, etc., <http://www.iris.edu/software/sac/>). I dati sono quindi analizzati con varie tecniche di array in diverse bande di frequenza. Nel dominio del tempo si applicano il metodo *Zero Lag Cross-Correlation* (ZLCC) [Frankel et al, 1991; Del Pezzo et al., 1997] e il metodo della *Semblance* [Neidell and Taner, 1971]; i relativi risultati sono poi confrontati per valutare eventuali discrepanze e poter decidere quale tecnica è più adeguata ai nostri scopi. Entrambi i metodi, applicati ai segnali filtrati nelle bande di frequenza 1 – 3 Hz, 2 – 4 Hz, 3 – 6 Hz, su piccola finestra mobile (ad esempio 1 secondo a 2 Hz) risultano molto efficaci nell'analisi di segnali transienti di breve durata. I metodi spettrali *Beam Forming* (BF) e *High Resolution* (HR) [Capon, 1969] sono applicati focalizzando l'analisi a frequenze intorno a 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz, 4 Hz.

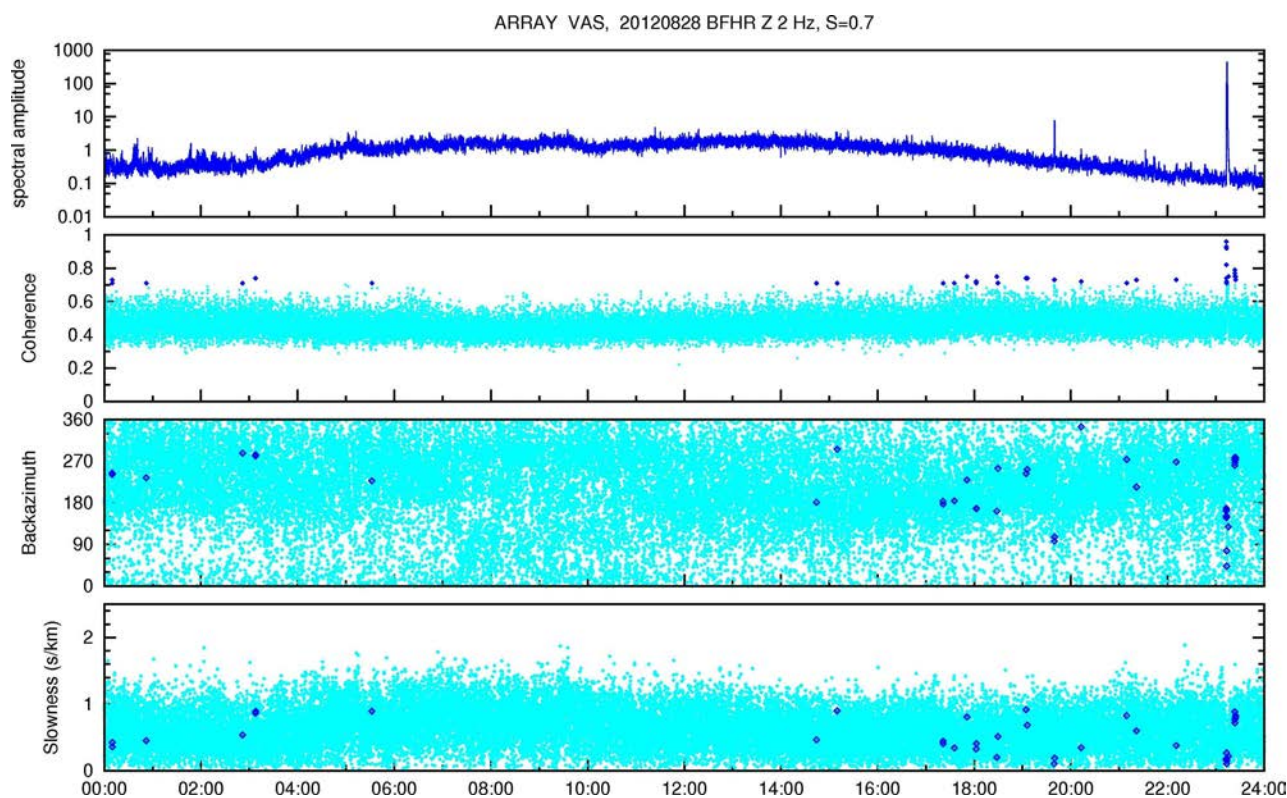


Figura 4 Risultati dell'analisi Beam Forming focalizzata a frequenza 3 Hz per il giorno 28-08-2012. Sono mostrati l'ampiezza spettrale del segnale, la coerenza, il backazimuth e la slowness. Poche finestre superano la soglia di coerenza di 0.7 in questa giornata. L'evento più appariscente è sicuramente il picco che si vede nel grafico dell'ampiezza spettrale intorno alle 23:14. Si tratta del terremoto regionale di $M=4.6$ localizzato nei pressi dello stretto di Messina.

Figure 4 Results of the Beam Forming analysis focused at frequency of 3 Hz for the data recorded on August 28, 2012. Spectral amplitude, coherence, backazimuth and slowness are shown from top to bottom. A few coherent signals are seen in this day. The most evident is the high amplitude peak around 23:14, corresponding to a regional earthquake ($M=4.6$) located near the Messina strait.

Tali metodi risultano molto efficaci nello studio di segnali stazionari e persistenti, come ad esempio il tremore vulcanico [Konstantinou and Schlindwein, 2002], pertanto vengono applicati a finestre temporali mobili di maggiore durata (nel nostro caso 10 o 20 secondi). Queste analisi vengono effettuate su tutti i dati acquisiti e i risultati vengono graficati per finestre temporali di un giorno. Ogni grafico contiene, oltre all'ampiezza del segnale, i parametri più significativi dell'analisi, cioè la correlazione (coerenza per i metodi spettrali), il *backazimuth* e la *slowness* ottenuti per ogni finestra mobile. Per evidenziare i segnali più correlati (coerenti), i risultati delle finestre temporali la cui correlazione (coerenza) supera una soglia prestabilita vengono plottati con simboli più grandi e di colore più appariscente. L'individuazione di segnali potenzialmente interessanti è demandata all'operatore che visiona tutti i grafici e seleziona le finestre temporali su cui effettuare ulteriori approfondimenti. Un esempio di tale analisi è riportato in Figura 4, dove sono mostrati i risultati dell'analisi BF alla frequenza di 3 Hz per il giorno 28.08.2012. Poiché l'array acquisisce anche i dati relativi ad un sensore a

tre componenti, effettuiamo anche l'analisi di polarizzazione, contemporaneamente a quelle di array, nella stessa finestra mobile e banda di frequenza, utilizzando il metodo della matrice di covarianza nel dominio del tempo [Montalbetti and Kanasevich, 1970; Jurkevics, 1988]. Mediante questa tecnica vengono calcolati la rettilinearità del "particle velocity", l'angolo di incidenza, l'angolo di polarizzazione nel piano orizzontale e il rapporto H/V per ogni finestra mobile. I risultati non vengono plottati nello stesso grafico dei risultati di array per non appesantire troppo quest'ultimo, ma sono conservati nello stesso file dati, pronti per essere visionati all'occorrenza. In questo modo quando l'operatore individua un evento interessante può facilmente vedere ogni dettaglio sui risultati delle analisi di array e polarizzazione.

3. Risultati

La sismicità del Vesuvio è alquanto bassa da circa 10 anni, ed è costituita da qualche centinaio di terremoti vulcano-tetto-

nici ogni anno che raramente superano magnitudo 2.0. Tuttavia le analisi dei dati dell'array VAS evidenziano molti segnali coerenti ogni giorno. Ciò è dovuto al fatto che l'array, oltre ai terremoti locali del Vesuvio, individua molto bene anche i terremoti regionali e la fase iniziale di forti tele-sismi (Figura 5). A questi segnali bisogna aggiungere le frane che si verificano spesso all'interno del cratere, nonché una serie di eventi di natura artificiale, soprattutto esplosioni realizzate nelle cave per l'estrazione di materiale da costruzione. Occasionalmente vengono anche registrate esplosioni localizzate in mare nel golfo di Napoli. Segnali coerenti di lunga durata e bassa ampiezza composti da onde superficiali e talvolta acustiche, prodotti da non ben identificate sorgenti artificiali, completano la vasta gamma di segnali coerenti registrati dall'array VAS. Una trattazione dettagliata di tutti i tipi di segnali coerenti osservati va oltre l'obiettivo di questo lavoro, pertanto viene omessa. Descriviamo solamente due esempi di eventi naturali, che sono i più interessanti, e cioè un terremoto locale e una frana.

In Figura 6 sono mostrati i segnali prodotti da un terremoto

VT di magnitudo locale 2.1 registrato il 21.03.2012 dalle 7 stazioni installate a quella data. A sinistra sono plottati i segnali originali, mentre a destra gli stessi segnali sono stati filtrati passa basso a 6 Hz. La differenza tra i 7 sismogrammi originali è notevole, mentre quelli filtrati mostrano una maggiore somiglianza, soprattutto all'inizio. Ciò rientra nella norma poichè le frequenze molto alte, tipiche dei VT di piccola magnitudo, rendono i segnali molto diversi anche a brevi distanze. Ad esempio un'onda simica di tipo P di frequenza 15 Hz ha una lunghezza d'onda dell'ordine di 0.1 – 0.2 km in prossimità della superficie. Per le onde di taglio della stessa frequenza la lunghezza d'onda è anche inferiore a 0.1 km. Tenuto conto che lo *scattering* nel mezzo fortemente eterogeneo (tipico dei vulcani) aumenta ulteriormente le differenze del segnale con la distanza, e che la larghezza dell'array VAS è di circa 0.3 km, i sismogrammi mostrati in Figura 6a di fatto non mostrano anomalie. La maggiore somiglianza (coerenza) dei sismogrammi filtrati (Figura 6b) è in buon accordo con l'intervallo di frequenza in cui l'array è utile, stimato empiricamente tra circa 1 Hz e 5 Hz.

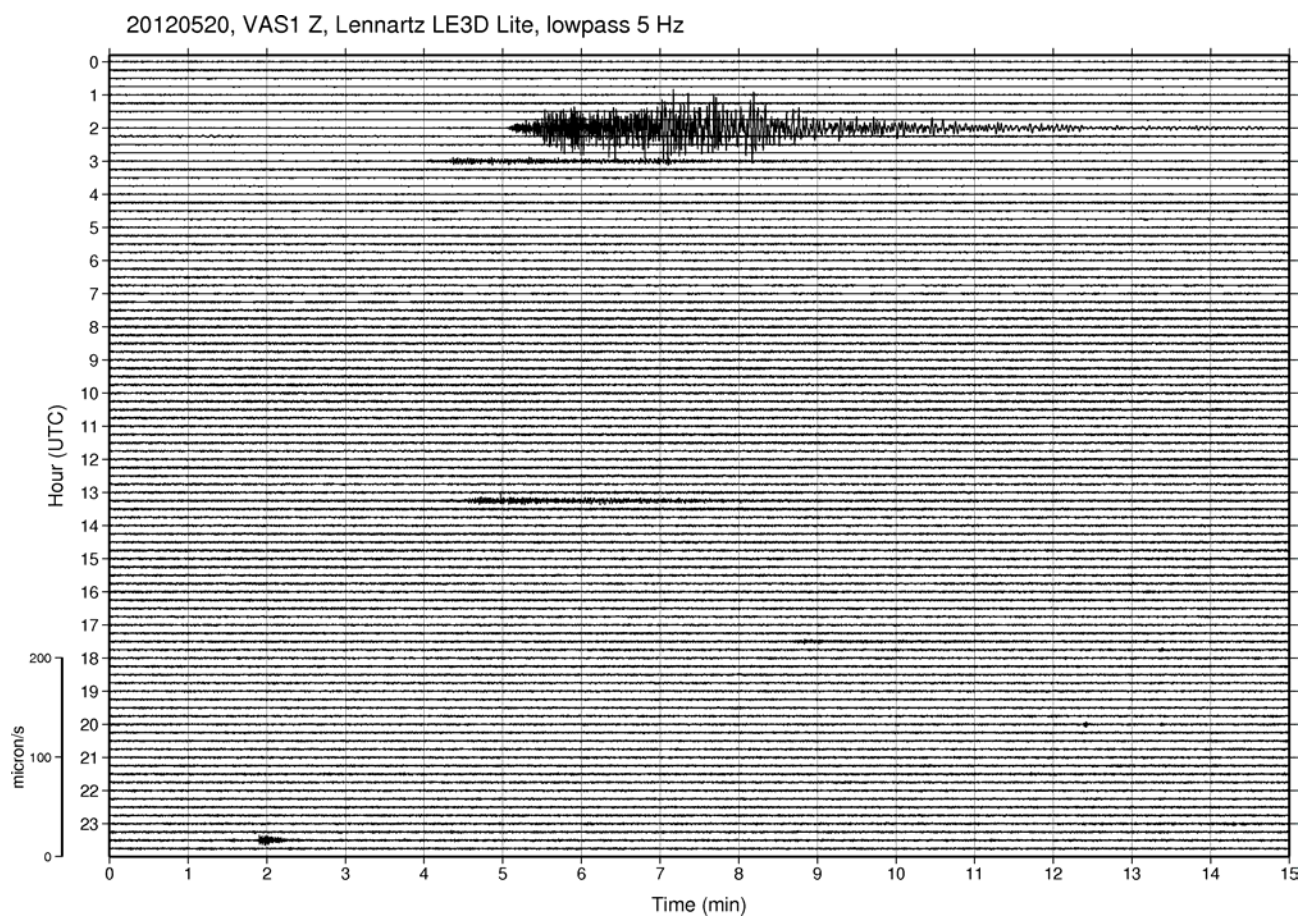


Figura 5 Esempio di sismogramma giornaliero relativo alla stazione VAS1 per il giorno 20 maggio 2012. Il segnale è stato filtrato nella banda 1-5 Hz. Il terremoto più forte (ore 02:05) è la scossa principale della sequenza di Reggio Emilia. Alcune repliche della stessa sequenza si distinguono nel corso della giornata, mentre il segnale di breve durata alle 23:31 è un terremoto locale del Vesuvio.

Figure 5 One day seismogram recorded by the station VAS1 on May 20, 2012. This signal has been band pass filtered between 1 Hz and 5 Hz. The strongest earthquake (02:05) is the mainshock of the Reggio Emilia sequence. Some aftershocks are recognized during the day, while the small short signal at 23:31 is a local earthquake of Mt. Vesuvius.

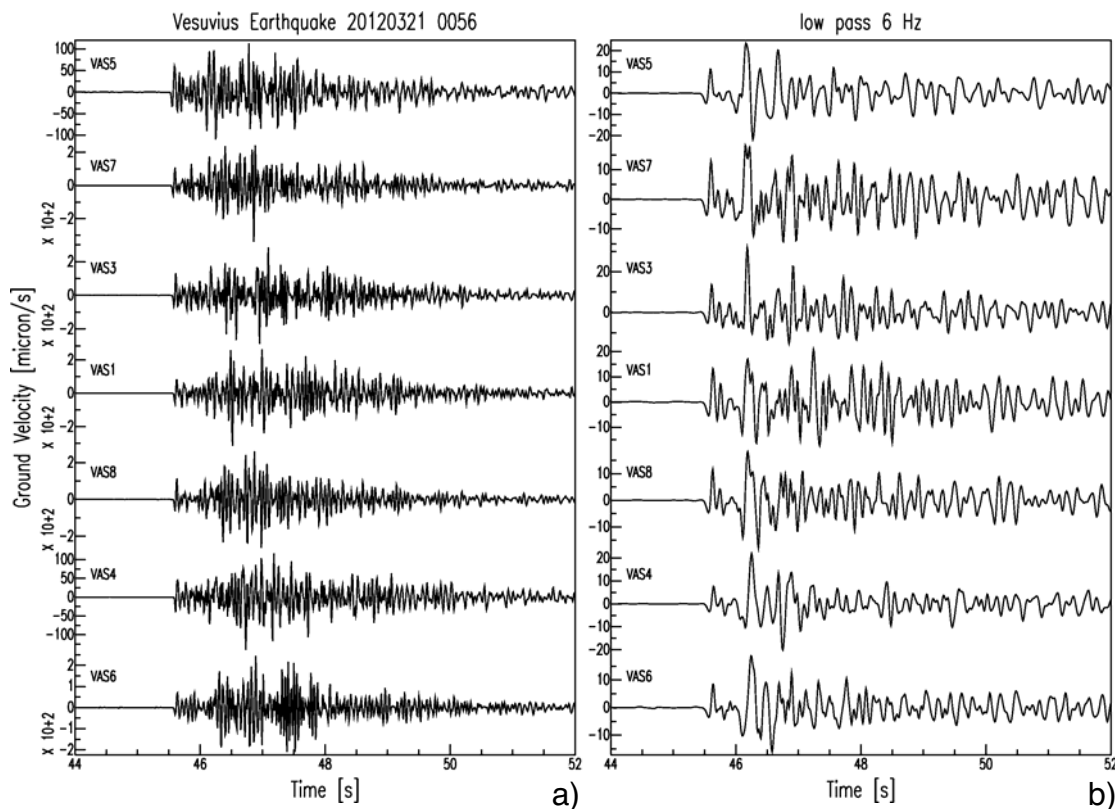


Figura 6 a) Terremoto vulcano-tettonico registrato il 21 marzo 2012 alle ore 00:56. Poiché l'array era in fase di installazione solamente 7 stazioni hanno registrato questo evento. b) Stessi segnali filtrati passa basso 6 Hz.

Figure 6 a) Volcano-tectonic earthquake recorded on March 21, 2012 at 00:56 UTC. Only 7 stations were installed at that time. b) The same signals low pass 6 Hz filtered.

In Figura 7 sono mostrati i risultati dell'analisi *Semblance* dello stesso terremoto VT illustrato in Figura 6. L'analisi è stata effettuata sui segnali filtrati nella banda passante 3 Hz – 6 Hz, su finestra mobile di 0.8 secondi. Oltre al sismogramma di VAS3, la figura mostra la *semblance*, il *backazimuth* e la *slowness* per ogni finestra mobile analizzata. I risultati delle finestre con *semblance* maggiore di 0.7 sono plottati con simbolo più grande e di diverso colore per facilitare l'interpretazione dei dati. La massima *semblance* appare traslata verso sinistra rispetto all'inizio del terremoto a causa della larghezza della finestra mobile di analisi. Il primo impulso è estremamente simile alle varie stazioni dell'array, il che produce un valore di *semblance* molto vicino a 1.

Nelle finestre successive la *semblance* diminuisce gradualmente fino a riportarsi a valori equivalenti al rumore sismico precedente il terremoto in poco più di un secondo. Lungo la coda del terremoto non si osservano segnali coerenti. Il primo impulso del terremoto è caratterizzato da *backazimuth* di circa 90 gradi e *slowness* di circa 0.2 s/km, equivalente a velocità apparente di circa 5 km/s. Questi valori sono perfettamente compatibili con la localizzazione del terremoto (lat = 40.8144, long = 14.4391, prof = 0.8 km) se si tiene conto dell'incertezza sulla localizzazione e sul *backazimuth* stimato dall'array. La Figura 7 mostra

anche i risultati dell'analisi di polarizzazione effettuata sui segnali di VAS3 contemporaneamente all'analisi *Semblance*. I tre grafici mostrano rispettivamente la rettilinearità (RL), l'angolo di incidenza (beta) e la direzione di polarizzazione. La Figura 8 mostra i risultati dell'analisi con il metodo spettrale *Beam Forming* di una frana avvenuta il 05.07.2012 all'interno del cratere. Questo evento è stato registrato da 9 stazioni su 10 in quanto VAS4 era momentaneamente in avaria. Nel sismogramma riportato in Figura 8, filtrato nella banda passante 1 Hz – 3 Hz, si possono apprezzare le importanti differenze di questo segnale rispetto ai terremoti locali. Per prima cosa l'inizio è talmente emergente che risulta impossibile stabilire un tempo di inizio dell'evento con un'incertezza inferiore a qualche secondo. Poi è evidente come l'involuppo fortemente irregolare del segnale indichi una sorgente di durata molto lunga (decine di secondi). In effetti i risultati dell'analisi indicano due frane consecutive iniziate approssimativamente a 48 s e 84 s, con riferimento alla scala temporale di Figura 8. La prima frana ha prodotto segnali con coerenza maggiore della soglia stabilita per circa 15 secondi, mentre la seconda è durata almeno 25 secondi. *Backazimuth* e *slowness* delle prime finestre coerenti sono perfettamente compatibili con due sorgenti localizzate nella parte alta interna del cratere del Vesuvio.

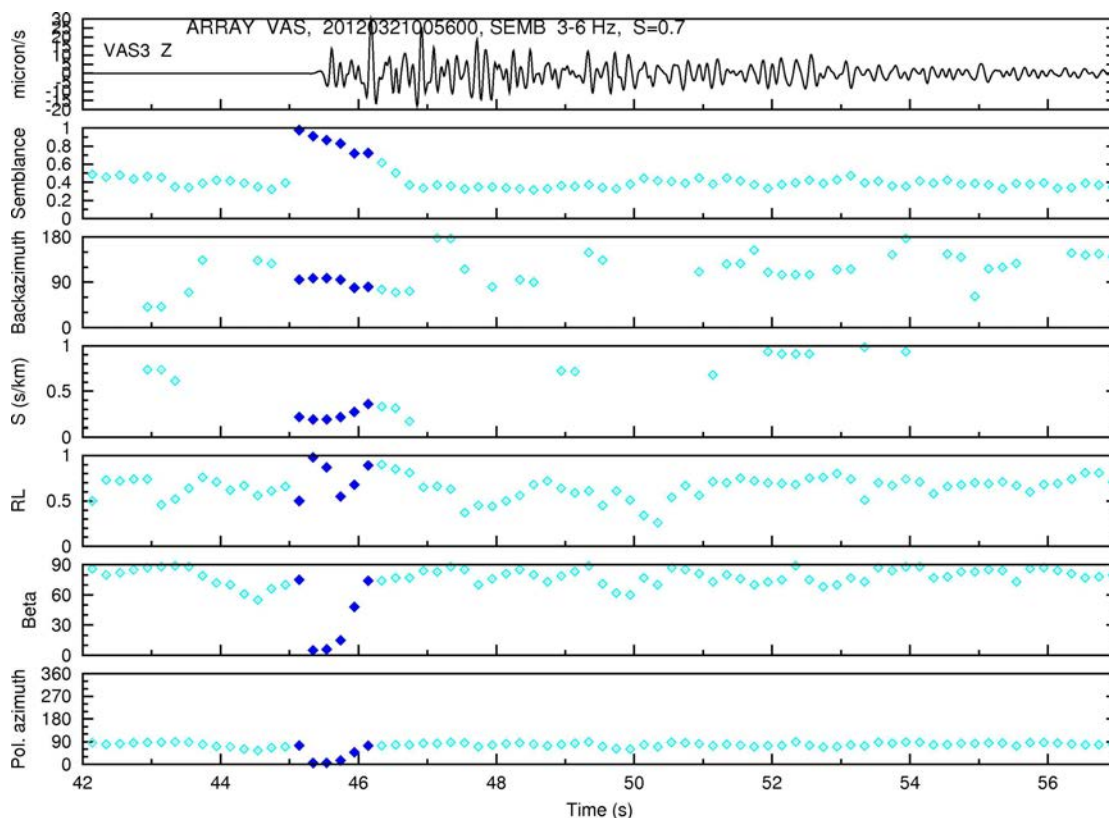


Figura 7 Risultati dell'analisi *semblance* e polarizzazione per il terremoto vulcano-tettonico mostrato in Figura 6. Oltre al sismogramma relativo alla componente verticale di VAS3 filtrato nella banda 3 Hz – 6 Hz, la figura mostra la *semblance*, il *backazimuth* e la *slowness* ottenuti dall'analisi di array. I successivi riquadri mostrano i risultati dell'analisi di polarizzazione, e cioè la rettilinearità (RL), l'angolo di incidenza (beta) e la direzione di polarizzazione. I risultati delle finestre temporali la cui *semblance* supera la soglia 0.7 sono plottati con simboli di maggiore dimensione e diverso colore per facilitare l'interpretazione del grafico.

Figure 7 Results of the semblance and polarization analysis of the VT earthquake shown in Figure 6. The seismogram recorded by VAS3 vertical component, filtered between 3 Hz and 6 Hz, is shown at the top. Semblance, backazimuth and slowness obtained by the array analysis are shown in the following three plots. The last three plots show the results of polarization analysis, that is rectilinearity (RL), incidence angle (beta) and polarization direction. Results of windows with semblance greater than 0.7 are shown by bigger symbol of different color to favor the data interpretation.

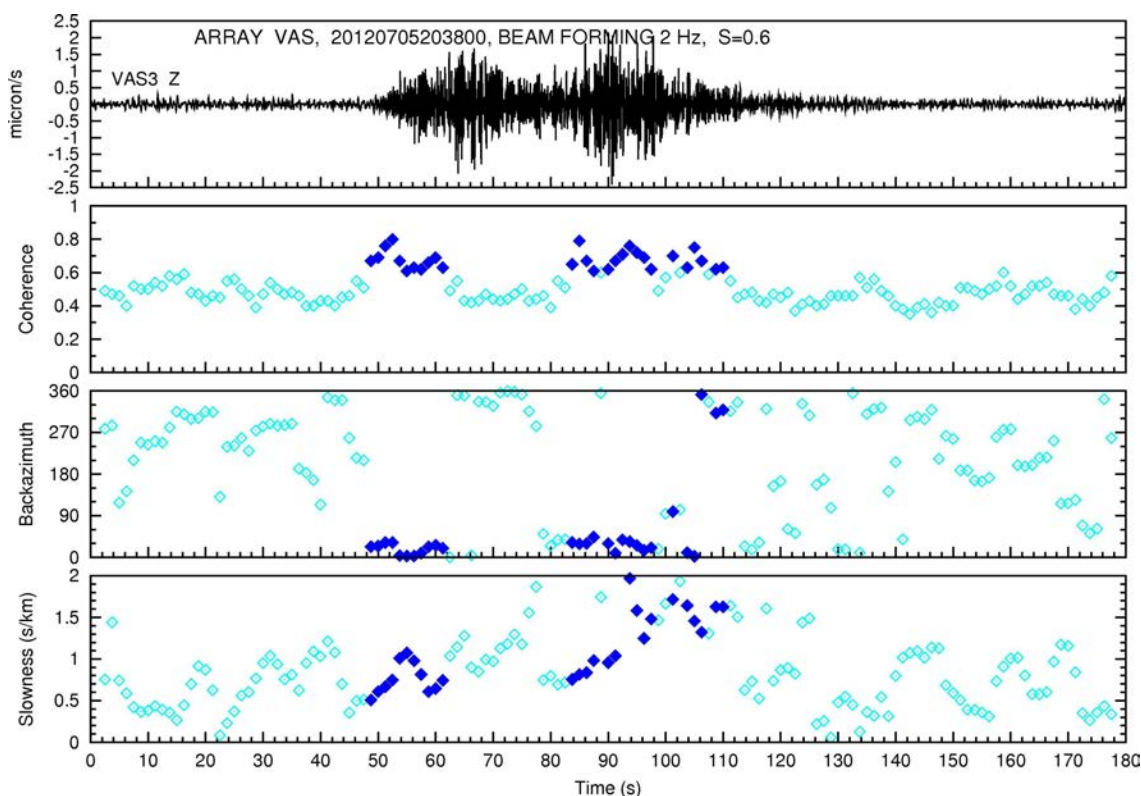


Figura 8 Analisi con il metodo spettrale Beam Forming di una frana avvenuta il 5 luglio 2012 nel cratere del Vesuvio.

Figure 8 Beam Forming analysis of a rockfall occurred on July 5, 2012, inside the crater of Mt. Vesuvius.

4. Sviluppi futuri

L'array VAS è stato installato pensando a una durata di almeno cinque anni per poter valutare l'utilità di tale strumento nel monitoraggio dell'attività sismica del Vesuvio. Un miglioramento molto importante da realizzare nel prossimo semestre è l'adozione di un unico acquisitore multicanale. Appena disponibile sarà utilizzato una stazione Reftek 130-MC a 18 canali, che permetterà di acquisire i segnali di quattro stazioni a tre componenti e sei componenti verticali. Un acquisitore di questo tipo è già utilizzato con ottimi risultati da più di due anni per il monitoraggio dei Campi Flegrei [La Rocca and Galluzzo, 2012]. Questa innovazione migliorerebbe di molto le prestazioni dell'array, in particolare dell'analisi di polarizzazione, senza modificare la configurazione attuale. Tuttavia future modifiche con l'aggiunta di ulteriori sismometri di cui acquisire solo la componente verticale non sono escluse, e saranno attentamente valutate nei prossimi mesi in base ai risultati ottenuti. Come ulteriore miglioramento da apportare in una fase successiva sarà considerata la possibilità di trasmettere i dati in tempo reale o almeno brevi finestre temporali a richiesta. La possibilità di un collegamento infatti sarebbe molto importante per il controllo quotidiano del corretto funzionamento e per scaricare dati in caso di eventi significativi.

Ringraziamenti

I seguenti software gratuiti sono stati utilizzati in questo lavoro per elaborare i dati, plottare i risultati e produrre le figure: GMT (*Generic Mapping Tools*), di Wessel and Smith [1998]; SAC (*Seismic Analysis Code*) di Goldstein et al., [2003]; Goldstein and Snoke, [2005].

Si ringraziano i colleghi M. Orazi e C. Buonocunto per aver fornito i dispositivi di protezione da scariche elettriche.

Bibliografia

Almendros J., Chouet B., Dawson P. and Huber C., (2002). *Mapping the sources of the seismic wave field at Kilauea volcano, Hawaii, using data recorded on multiple seismic antennas*. Bull. Seism. Soc. Am., 92, no. 6, pp. 2333-2351.

Bianco F., Cusano P., Petrosino S., Castellano M., Buonocunto C., Capello M. and Del Pezzo E., (2005). *Small-aperture array for seismic monitoring of Mt. Vesuvius*. Seism. Res. Lett., 76, 3, pp. 344-355.

Capon J., (1969). *High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis*. Proc. IEEE, vol. 57, no. 8, pp. 1408-1418.

Castellano M., Buonocunto C., Capello M. and La Rocca M., (2002). *Seismic surveillance of active volcanoes: the*

Osservatorio Vesuviano Seismic Network (OVSN – Southern Italy). Seism. Res. Lett., Vol. 73, 2, pp. 168-175.

Chouet B., (2003). *Volcano seismology*. Pure Appl. Geophys., 160, 739-788, 2003.

Del Pezzo E., La Rocca M. and Ibanez J., (1997). *Observation of high-frequency scattered waves using dense arrays at Teide volcano*. Bull. Seism. Soc. Am., 87, no. 6, pp. 1637-1647.

Del Pezzo E., Bianco F., Castellano M., Petrosino S., Pingue F., Capello M., Esposito T., Augusti V., Saccorotti G., La Rocca M., Maresca R., Galluzzo D., Cirillo A., Grozea B., Ibanez J., Carmona E. and Alguacil G., (1999). *A seismic array on Mt. Vesuvius*. Osservatorio Vesuviano Open File Report, available on-line at www.ov.ingv.it.

De Luca G., Scarpa R., Del Pezzo E. and Simini M., (1997). *Shallow structure of Mt. Vesuvius volcano, Italy, from seismic array analysis*. Geophys. Res. Lett., 24, 4, pp. 481-484.

Di Lieto B., Saccorotti G., Zuccarello L., La Rocca M. and Scarpa R., (2007). *Continuous tracking of volcanic tremor at Mount Etna, Italy*. Geophys. J. Int., 169, pp. 699-705, doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03316.x.

Frankel A., Hough S., Friberg P. and Busby R., (1991). *Observations of Loma Prieta aftershocks from a dense array in Sunnyvale, California*. Bull. Seismol. Soc. Am., 81, 1900-1922.

Giudicepietro F., Orazi M., Scarpato G., Peluso R., D'Auria L., Ricciolino P., Lo Bascio D., Esposito A. M., Borriello G., Capello M., Caputo A., Buonocunto C., De Cesare W., Vilardo G. and Martini M., (2010). *Seismological Monitoring of Mount Vesuvius (Italy): More than a Century of Observations*. Seism. Res. Lett., 81, 4, 625-634.

Goldstein P. and Snoke A., (2005). *SAC Availability for the IRIS Community*. Incorporated Institutions for Seismology Data Management Center Electronic Newsletter.

Goldstein P., Dodge D., Firpo M. and Minner L., (2003). *SAC2000: Signal processing and analysis tools for seismologists and engineers*. Invited contribution to "The IASPEI International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology", Edited by WHK Lee, H. Kanamori, P.C. Jennings, and C. Kisslinger, Academic Press, London.

Jurkevics A., (1988). *Polarization analysis of three-component array data*. Bull. Seismol. Soc. Am., 78(5), 1725-1743.

Konstantinou K.I. and Schlindwein V., (2002). *Nature, wave-field properties and source mechanism of volcanic tremor: a review*. J. Volc. Geoth. Res. 119, 161-187, 2002.

La Rocca M., Del Pezzo E., Simini M., Scarpa R. and De Luca G., (2001). *Array analysis of seismograms from explosive sources: evidence for surface waves scattered at*

- the main topographical features.* Bull. Seism. Soc. Am., 91, 2, pp. 219-231.
- La Rocca M. and Galluzzo D., (2012). *A seismic array in the town of Pozzuoli in Campi Flegrei (Italy).* Seism. Res. Lett., 83, 1, pp. 86-96.
- McNutt S. R., (2005). *Volcanic seismology.* Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 32, 461-491.
- Montalbetti J. F. and Kanasevich E. R., (1970). *Enhancement of teleseismic phases with a polarization filter.* Geophys. J. R. astr. Soc., 21, 119-129.
- Neidell N.S. and Taner M.T., (1971). *Semblance and other coherence measures for multichannel data.* Geophysics, 36, 3, pp. 482-497.
- Rost S. and Thomas C., 2002. *Array seismology: methods and applications.* Review of Geophysics, 40, 3.
- Rost S. and Thomas C., 2009. *Improving seismic resolution through array processing techniques.* Surv. Geophys. 30, 271-299. doi: 10.1007/s10712-009-9070-6.
- Saccorotti G., Maresca R. and Del Pezzo E., (2001). *Array analyses of seismic noise at Mt. Vesuvius Volcano, Italy.* J. Volcanol. Geoth. Res., 110, 79-100.
- Wessel P. and Smith W.H.F., (1998). *New, improved version of the Generic Mapping Tools released.* EOS Trans AGU 79:579.

Indice

Introduzione	4
1. Descrizione dell'array VAS	5
2. Analisi dei dati	7
3. Risultati	8
4. Sviluppi futuri	12
Ringraziamenti	12
Bibliografia	12

Coordinamento editoriale e impaginazione

Centro Editoriale Nazionale | INGV

Progetto grafico e redazionale

Daniela Riposati | Laboratorio Grafica e Immagini | INGV

© 2013 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Via di Vigna Murata, 605

00143 Roma

Tel. +39 06518601 Fax +39 065041181

<http://www.ingv.it>



Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia