



ISSN 1590-2595

quaderni di geofisica

n. 45

**MONITORAGGIO GEODETICO
DELLE DEFORMAZIONI DEL SUOLO
IN AREA VULCANICA:
LE RETI GPS VULCANO NORD E
LIPARI-VULCANO (APRILE 2004)**

Marco Aloisi et alii

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

2007

Direttore

Enzo Boschi

Editorial Board

Raffaele Azzaro (CT)

Sara Barsotti (PI)

Viviana Castelli (MI)

Anna Grazia Chiodetti (AC)

Rosa Anna Corsaro (CT)

Luigi Cucci (RM1)

Mauro Di Vito (NA)

Sergio Gurrieri (PA)

Lucia Margheriti (CNT)

Simona Masina (BO)

Nicola Pagliuca (RM1)

Leonardo Sagnotti (RM2)

Salvatore Stramondo (CNT)

Andrea Tertulliani - coordinatore (RM1)

Gianluca Valensise (RM1)

Gaetano Zonno (MI)

Segreteria di Redazione

Francesca Di Stefano - responsabile

Tel. +39 06 51860055

Fax +39 06 36915617

Sabrina Palone

Tel. +39 06 51860405

Fax +39 06 51860585

redazionecen@ingv.it

quaderni
di
geofisica



**MONITORAGGIO GEODETICO DELLE DEFORMAZIONI
DEL SUOLO IN AREA VULCANICA: LE RETI GPS
VULCANO NORD E LIPARI-VULCANO (APRILE 2004)**

Marco Aloisi, Mauro Amore, Alessandro Bonaccorso, Alessandro Bonforte,
Francesco Calvagna, Massimo Cantanero, Salvatore Consoli, Orazio Consoli,
Mario Mattia, Biagio Puglisi, Giuseppe Puglisi, Massimo Rossi

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia - Sezione di Catania

Indice

Riassunto	5
Introduzione	5
1. La rete geodetica Vulcano Nord	6
1.1 La metodologia <i>fast-static</i>	7
1.2 Le misure della rete Vulcano Nord	8
2 Parametri di deformazione: la rete Vulcano Nord	9
2.1 Parametri di deformazione: la rete Lipari - Vulcano	10
Conclusioni	11
Bibliografia	12

Riassunto

Vengono illustrati i risultati delle campagne GPS Vulcano Nord (modalità di esecuzione *fast-static*) e Lipari-Vulcano (modalità di esecuzione statica) eseguite presso l'Isola di Vulcano (Isole Eolie) nel quadro delle attività di monitoraggio geodetico dell'area vulcanica di quest'isola.

Introduzione

Vulcano è la più meridionale delle Isole Eolie e, per grandezza, è la terza dell'intero arcipelago. L'isola è caratterizzata dalla presenza di un importante vulcano, La Fossa (Fig. 1), che dal 1890 non è interessato da fasi parossistiche di attività vulcanica [Locardi, 1988; Ventura, 1994].

Dal 1977, l'apparato ha mostrato segni evidenti di incremento dell'attività fumarolica ed, a partire da tale data, viene tenuto sotto stretto controllo da parte di diversi gruppi di ricerca e monitoraggio. Il monitoraggio delle deformazioni lente del suolo è una delle princi-

pali forme di sorveglianza de La Fossa e viene effettuato da parte dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia – Sezione di Catania (INGV–CT) per mezzo di una rete GPS permanente e reti geodetiche misurate in modalità EDM e GPS. Storicamente, le prime reti di monitoraggio geodetico dell'area de La Fossa e del complesso Lipari – Vulcano risalgono alla metà degli anni '70, quando vennero installati alcuni capisaldi misurati con teodolite. Successivamente, le reti sono state ridisegnate in funzione delle potenzialità della tecnica EDM (Electro-optical Distance Meter) ed il numero dei capisaldi è stato notevolmente aumentato. Infine, a partire dal 1996 è stata sperimentata con successo l'applicazione delle tecniche GPS sia in modalità statica (acquisizioni di durata superiore a 2 ore) che in modalità *fast-static* (acquisizioni non superiori a 30 minuti). L'ultima modifica alla configurazione della rete è avvenuta a partire dal 2002, quando le due reti sono state integrate e le acquisizioni sui siti della rete Lipari – Vulcano sono state portate a 24 ore al giorno per un numero minimo di due giorni (Tab. 1).

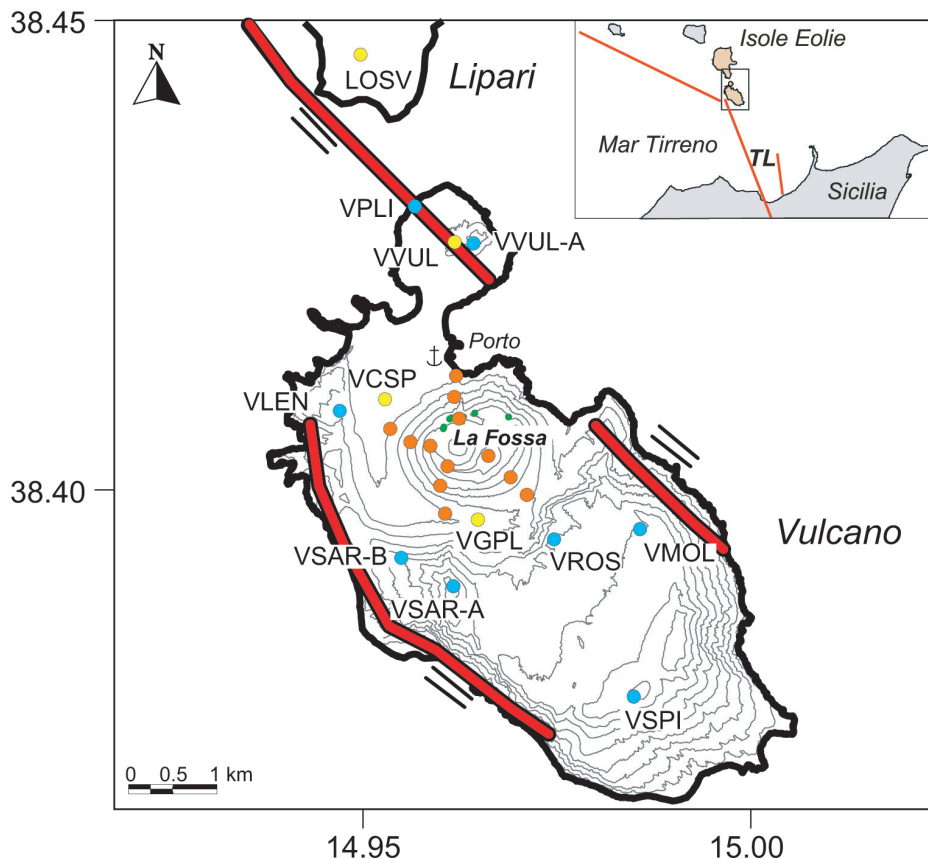


Figura 1. Capisaldi della rete Vulcano Nord. In giallo sono indicati i vertici in acquisizione continua, in arancione i vertici ubicati sull'apparato vulcanico La Fossa. I pallini più piccoli in verde indicano i vertici della Forgia. Sono inoltre indicate le principali strutture tettoniche dell'area [TL = faglia Tindari-Letojanni-Giardini da Billi et al., 2006].

	8-10/Nov/1995	6-8/Mar/1996	19-22/Giu/1996	29/lug/96	27-29/Nov/1996	1-4/Lug/1997	13-16/Mag/1998	13-14/Ott/1998
LCAP		X			X			
LFAL		X			X			
LGUA		X			X			
LMAN		X			X			
LMAZ		X			X			
LOSV		X			X			
LROS								
VCSP	X		X	X		X	X	X
VGPL	X			X		X	X	X
VLEN	X	X	X		X	X	X	X
VMOL		X			X			
VPLI		X			X			
VROS	X		X			X	X	
VSAR-A		X			X			X
VSAR-B	X		X	X		X	X	X
VSPI		X			X			X
VVUL	X		X			X	X	X
VVUL-A	X	X	X		X	X		
L1	X		X			X	X	X
L2	X		X			X	X	X
L3	X		X	X			X	X
R1	X		X			X	X	X
R2	X		X			X	X	X
R3	X	X	X	X	X	X	X	X
S1	X		X			X	X	X
S2	X		X			X	X	X
S3	X		X	X		X	X	X
V1	X		X			X	X	X
V2			X			X	X	X
V3	X		X	X			X	X
Forgia						X	X	

	14-17/Dic/1998	17-18/Mar/1999	30Mar-1Apr/2000	1-2/Apr/2000	26-27/Mar/2000	21-24/Mag/2002	15-18/Apr/2003	30Mar-2Apr/2004
LCAP	X							
LFAL	X			X		X	X	X
LGUA	X			X		X	X	X
LMAN	X			X		X	X	X
LMAZ	X			X		X	X	X
LOSV	X			X		X	X	X
LROS	X			X		X	X	X
VCSP						X	X	X
VGPL		X	X		X	X	X	X
VLEN			X		X	X	X	X
VMOL	X	X	X	X	X	X	X	X
VPLI	X	X	X	X	X	X	X	X
VROS	X			X		X	X	X
VSAR-A		X	X		X	X	X	X
VSAR-B	X	X		X		X	X	X
VSPI		X	X		X			
VVUL	X	X	X	X	X	X	X	X
VVUL-A		X	X		X	X	X	X
L1	X		X	X		X	X	X
L2		X	X		X	X	X	X
L3		X	X		X	X	X	X
R1		X	X		X	X	X	X
R2		X	X		X	X	X	X
R3		X	X		X	X	X	X
S1	X	X	X	X	X	X	X	X
S2		X	X		X	X	X	X
S3		X	X		X	X	X	X
V1		X	X		X	X	X	X
V2		X	X		X	X	X	X
V3		X	X		X	X	X	X
Forgia		X	X		X	X	X	X

Tabella 1

1. La rete geodetica Vulcano Nord

Nel mese di Novembre 1995 sono state effettuate le prime misure GPS in modalità *fast-*

static della rete Vulcano Nord (Fig. 1). Tale rete amplia notevolmente l'omonima rete geodetica periodicamente misurata fino al 1997 (Fig. 2) dall'Istituto Internazionale di Vulcanologia

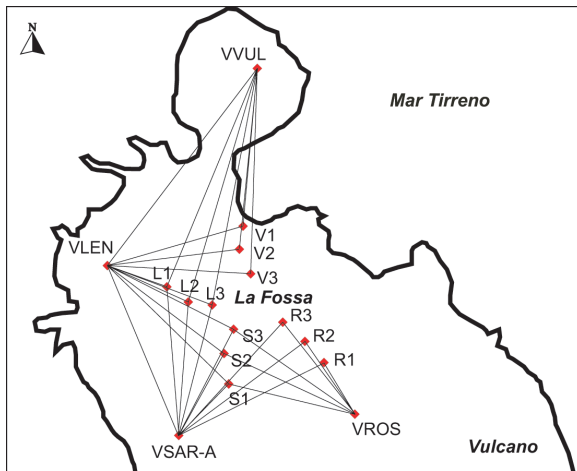


Figura 2 Rete EDM Vulcano Nord.

(IIV) nel corso di campagne distanziometriche effettuate per mezzo di geodimetri ad altissima precisione ($\pm 5 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$ di errore associato). I capisaldi sono stati materializzati in modo da coprire l'intero cono vulcanico de La Fossa ed, in generale, l'intera isola di Vulcano.

Le campagne di misura sono state pianificate con l'intento di utilizzare come riferimenti in acquisizione continua le esistenti stazioni di monitoraggio GPS presso Vulcano Campo Sportivo (VCPS), Vulcano Vulcanello (VVLC), Vulcano Grotta Palizzi (VGPL) e Lipari Osservatorio (LOSV). Tale progettazione presenta come obiettivo primario la realizzazione di campagne meno onerose, in ragione della disponibilità di uomini e mezzi e la possibilità di aumentare il numero di baselines osservate soprattutto a cavallo dell'area de La Fossa. Sulla base di *tests* di confronto tra le tecniche GPS statico e *fast-static*, tutti i punti sono stati misurati in modalità *fast-static*, esclusi LOSV, VCSP, VVLC e VGPL (Fig. 1). A partire dalla campagna del 2002 le due reti Vulcano Nord e Lipari - Vulcano sono state di fatto unificate e le procedure prevedono l'acquisizione dei dati presso i siti della rete Lipari - Vulcano in modalità statica per 24 ore al giorno e per almeno due giorni, mentre è rimasta pressoché invariata l'acquisizione dei dati per i capisaldi sul vulcano della Fossa (Fig. 1). Dal 2002 i capisaldi misurati in modalità *fast-static* vengono ripetuti almeno due volte nel corso della campagna, allo scopo di minimizzare eventuali grossolani errori di misura. Nonostante questa integrazione, tuttavia, in questo rapporto si preferisce mostrare le serie storiche delle due reti separatamente, visti i differenti obiettivi di monitoraggio che esse perseguono. Da un lato il moni-

toraggio dell'edificio vulcanico e delle sue risposte alla risalita di fluidi (Vulcano Nord), dall'altro il monitoraggio delle principali strutture tettoniche che agiscono sull'area ed influenzano profondamente sia l'attività vulcanica che quella sismotettonica.

1.1. La metodologia *fast-static*

Con questo termine si intende una particolare modalità esecutiva di misure GPS che prevede una breve occupazione dei siti a patto che vengano osservati, per l'intero periodo di misura, almeno 4 satelliti. Le acquisizioni presentano una durata variabile tra 8 e 20 minuti, in funzione delle caratteristiche della costellazione satellitare e dei ricevitori. La possibilità di disporre di ricevitori a doppia frequenza di acquisizione (L1 ed L2) riduce ulteriormente i tempi di acquisizione. Differentemente dalle misure GPS statiche tradizionali (tempi di acquisizione superiori alle due ore), la stima dei valori di ambiguità intera viene effettuata per mezzo di particolari algoritmi di calcolo. Nell'approccio statico, al termine della fase di elaborazione dei dati di campagna, le numerose osservazioni permettono di giungere ad una "forte" soluzione per quanto riguarda il valore di ambiguità, contemporaneamente ai valori delle coordinate dei punti. Nell'approccio *fast-static* prima ancora di disporre di una soluzione sufficientemente attendibile per tutte le incognite del sistema, si cerca di risolvere nel modo più veloce possibile i valori di ambiguità intera per mezzo di opportune strategie di ricerca. Una volta individuati i *sets* di ambiguità intera per i vari satelliti osservati, le equazioni di osservazione conterranno soltanto le tre incognite relative alle coordinate che, quindi, potranno essere facilmente risolte [Leick, 1994]. Ovviamente, il principale svantaggio di tale tecnica è l'impossibilità di disporre di osservazioni sufficientemente mediate che permettano, ad esempio, una corretta stima degli effetti di disturbo quali il *multipath*. Alcuni autori [Shepherd et al., 1998] hanno già applicato le metodologie di misura GPS *fast-static* al monitoraggio di vulcani attivi, presentando delle considerazioni sui valori di ripetibilità di tali misure. In particolare, si riportano valori di deviazione standard per le distanze e le coordinate planimetriche pari a 5 mm. L'errore associato alle quote è maggiore (1.5 cm). Altri autori [Hoffmann-Wellenhof et al., 1997] riportano deviazioni standard pari a ($\pm 5 \text{ mm} + 0.5 \text{ ppm}$), mentre la casa produttrice (Trimble, 1998) suggerisce di considerare un valore di ($\pm 5 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$).

1.2. Le misure della rete Vulcano Nord

Le misure delle campagne Vulcano Nord si svolgono, in media, nell'arco temporale di due-tre giorni [Mattia *et al.*, 1998]. La strumentazione utilizzata, nel corso degli anni, è stata la seguente:

- ricevitori Trimble 4600 LS (dal giugno 1997 e solo per misure in modalità *fast-static*), 4000SSI, e 4700.
- antenne TrimbleCompact L1/L2 wg, Geodetic L1/L2 e Trimble Dorne Margolin Choke Ring.

I dati sono stati campionati con una frequenza pari a 15 secondi. L'elaborazione e la compensazione sono state effettuate per mezzo del software Trimble Geomatics Office. In fase di elaborazione, sono state utilizzate le effemeridi trasmesse ed il modello troposferico di Saastamoinen (1973). In ragione delle piccole distanze esistenti tra i punti (Fig. 1), si preferisce utilizzare la soluzione ad ambiguità intere fissate sulla sola frequenza L1 per distanze inclinate entro la lunghezza massima di 5 km. La compensazione per mezzo del metodo dei minimi quadrati viene effettuata con lo stesso software, impostando un livello di confidenza delle misure pari a 2σ . In tale fase, pochissime misure vengono rigettate dai *tests* statistici (tau test) e nella maggior parte dei casi sono stati risolti i problemi nei dati affetti da acquisizioni rumorose o da *multipath*. Infine, è stata effettuata una compensazione vincolata, considerando come riferimento fisso, per la rete

Vulcano Nord, due capisaldi della rete in continuo di Vulcano (VVLC e VCSP) e per la rete Lipari – Vulcano il caposaldo di Monte S. Angelo (LMAN). Entrambi i *sets* di coordinate sono stati calcolati rispetto a stazioni ASI (Noto, Matera, Cagliari) esterne al complesso Lipari – Vulcano.

Al fine di valutare la ripetibilità delle misure realizzate in modalità *fast-static* rispetto all'approccio statico, è stato effettuato un *test* di confronto tra le due tecniche durante il trattamento dei dati della campagna del Maggio 1998. Nel corso di tale *survey*, i capisaldi esterni al vulcano, ovvero VPLI, VLEN, VSAR-A, VSAR-B, VROS e VMOL ed i quattro vertici della rete in continuo sono stati misurati in assetto statico. Il *test* consiste nell'estrazione dalle sessioni statiche tra i suddetti capisaldi, di acquisizioni pari a 20 minuti, ovvero di durata corrispondente alla media di una sessione *fast-static*. Le differenze (in parti per milione della distanza) tra le lunghezze delle baselines, ottenute tramite le elaborazioni della rete statica e *fast-static*, sono mostrate in funzione dei valori di lunghezza degli stessi vettori (Fig. 3). Le differenze tra i due valori sono per la maggior parte dei casi comprese entro il campo definito dalle curve pari a $\pm 1\text{mm} + 1\text{ppm}$, valore di incertezza contenuto entro i margini di precisione attesa, in assoluto, dalle misure di baselines per mezzo di metodi GPS (curva azzurra in Fig. 3). La tecnica *fast-static* è, quindi, in grado di raggiungere gli obiettivi necessari ad un metodo geodetico finalizzato al monitoraggio vulcanico sia in termi-

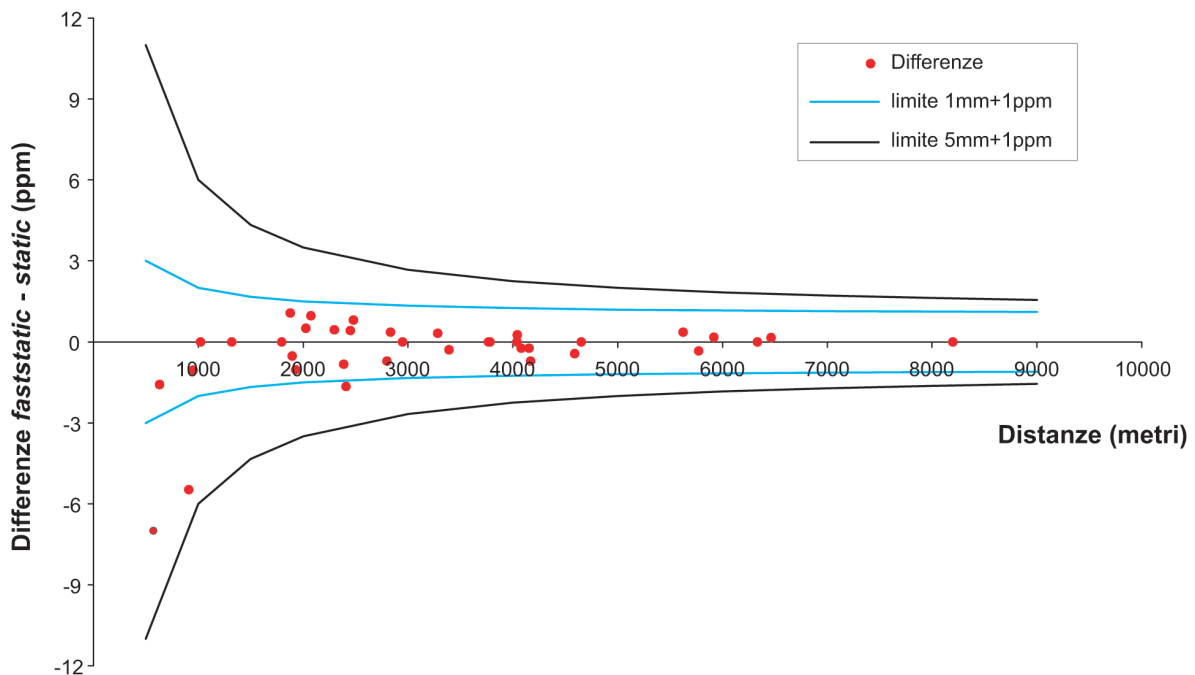


Figura 3 Confronto tra valori di distanze ottenuti con metodo statico e *fast-static* per la campagna del Maggio 1998.

ni di velocità e semplicità di svolgimento delle campagne di misura, sia soprattutto in termini di affidabilità e di qualità dei risultati.

2. Parametri di deformazione: la rete Vulcano Nord

I dati relativi alle distanze tra i caposaldi sono stati invertiti per mezzo di algoritmi basati sulla formulazione di Jaeger [1969], allo scopo di ricavare i valori di dilatazione areale per l'apparato de La Fossa (Fig.4). Questa analisi è stata operata sull'intero *set* di misure.

In figura 4 viene mostrato un confronto tra i dati EDM e GPS. Dall'analisi della dilatazione areale GPS si evidenzia un modesto incremento nel valore di dilatazione areale tra le campagne a cavallo dell'estate 1996 e 1997 e tra il 1998 ed il 1999. Di contro, nei restanti periodi si nota sempre un decremento nel valore della dilatazione areale. Questo dato mostra interessanti analogie con un'intensa attività di degassamento osservata nei primi mesi del 1996 ed a cavallo del 1998-1999. Tale attività fu evidenziata sia da dati sismologici che geochimici. In particolare, nel periodo Febbraio-Luglio 1996 si è assistito ad un deciso incremento degli eventi denominati VCR5 (Fig. 5) caratterizzati da bassa magnitudo, piccola profondità e legati all'attività di degassamento del vulcano. Nello stesso periodo, venivano registrate significative variazioni nei contenu-

ti gassosi delle fumarole di Vulcano, ed in particolare nel rapporto gas/H₂O e nella composizione isotopica della CO₂ [Capasso *et al.*, 1999]. Ulteriori variazioni sono state osservate nelle concentrazioni di He [Capasso *et al.*, 1997]. Tali anomalie nella composizione dei gas fumarolici hanno permesso di concludere che nel periodo a cavallo tra Febbraio e Settembre 1996 si è assistito ad un input di fluidi magmatici che ha avuto l'effetto di omogeneizzare l'intero campo fumarolico dell'Isola di Vulcano [Capasso *et al.*, 1997]. Durante lo stesso periodo sono state osservate marcate variazioni nel livello freatico di un pozzo sito nei pressi dell'abitato di Vulcano Porto – “Camping Sicilia” [Capasso *et al.*, 1999; vedi fig. 1], interpretate come una diretta conseguenza di un incremento della risalita di gas lungo strutture tettoniche permeabili. Già altri autori [Nappi *et al.*, 1976], avevano rimarcato la stretta connessione esistente presso l'Isola di Vulcano tra variazioni nel campo geotermale e deformazioni del suolo. I dati della rete GPS Vulcano Nord sembrano confermare che il sistema ha subito, nel corso del 1996, una sia pur modesta *inflation* (Fig. 4). Successivamente a questo episodio, una ulteriore *inflation* è stata osservata tra la campagna del Maggio 1998 e quella svoltasi nel Marzo 1999. Tale episodio (Fig. 4) può essere riferito ad un'altra crisi sismica avvenuta a cavallo del 1998-1999 e caratterizzata da numerosi eventi VCR5 collegati alla risalita di fluidi e da importanti variazioni nel contenuto

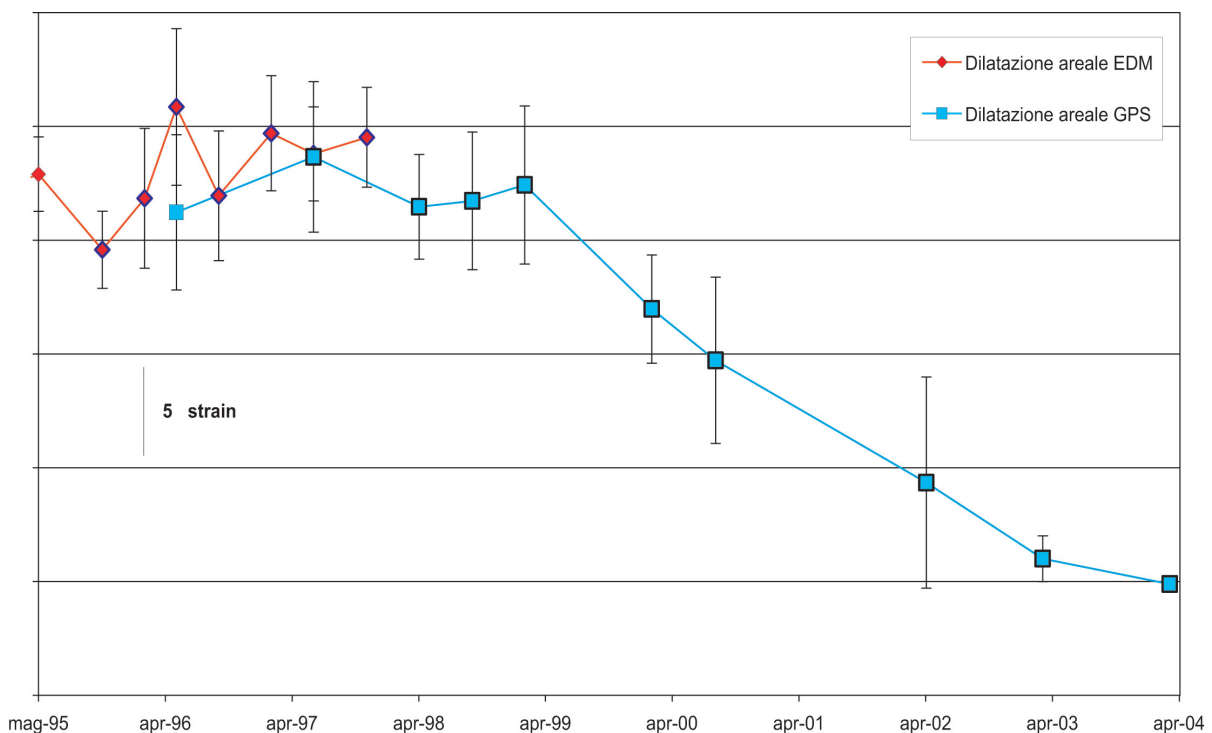


Figura 4 Dilatazione areale cumulativa della rete GPS Vulcano Nord.

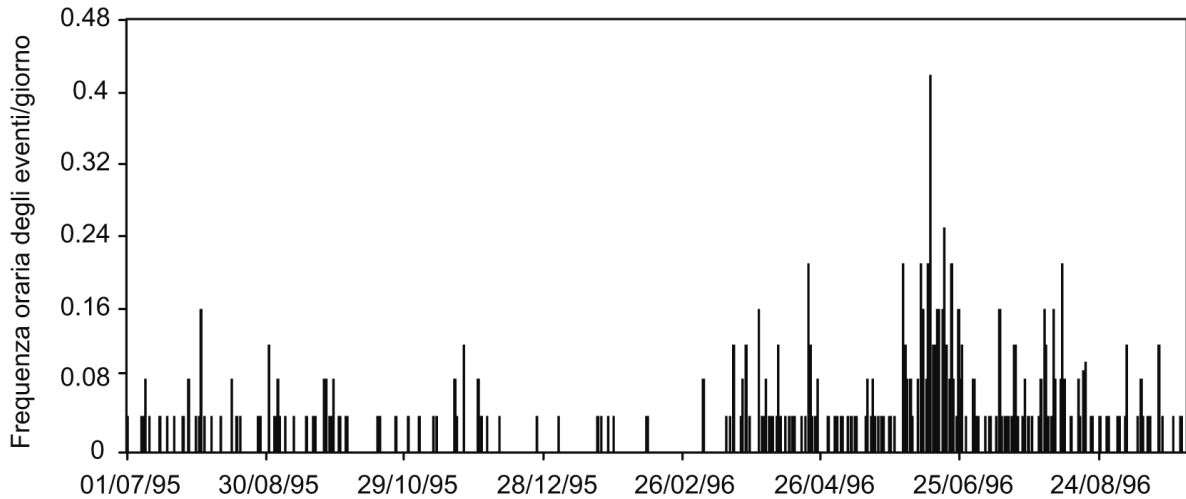


Figura 5 Frequenza oraria degli eventi della classe VCR5 registrati per giorno.

dei gas fumarolici. Dopo questo episodio è stata osservata una sostanziale e continua contrazione dell'area.

Probabilmente, tale andamento è da collegarsi all'attività della struttura regionale denominata Tindari-Letojanni-Giardini [Barberi *et al.*, 1973; Ghisetti and Vezzani, 1982; Mantovani *et al.*, 1990; Barberi *et al.*, 1994; Mazzuoli *et al.*, 1995].

2.1. Parametri di deformazione: la rete Lipari - Vulcano

Da parecchi anni vengono effettuate da parte dei tecnici e dei ricercatori dell'IIV misure di deformazione del suolo per mezzo di distanziometri ad infrarosso (Mod. AGA6000) tra

l'Isola di Lipari e l'Isola di Vulcano (Fig. 6). Dopo un adeguato periodo di sovrapposizione delle due tecniche, dal 1997 questa rete è misurata esclusivamente con tecnica GPS statico. A partire dal 2002 i capisaldi di questa rete sono stati occupati per periodi di 24 ore e per almeno due giorni. Analogamente a quanto fatto in occasione del passaggio dalla modalità di acquisizione statica a quella *fast-static* nella rete Vulcano Nord, è stato operato un confronto tra i livelli di precisione delle tecniche GPS ed EDM. Tale confronto, effettuato sui dati di due campagne del 1996 (Marzo e Novembre) svoltesi con entrambe le metodologie, ha fornito i risultati mostrati in Fig. 7. Si nota come oltre la metà dei punti (che rappresentano le differenze

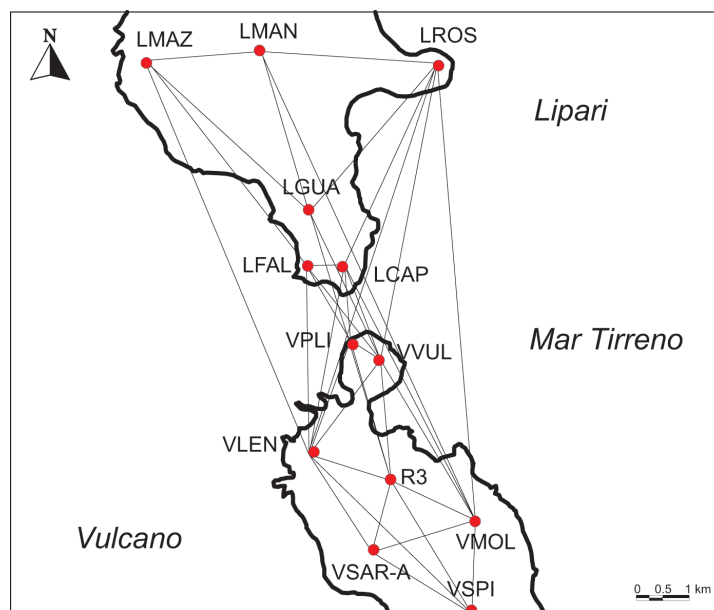


Figura 6 Rete EDM Lipari - Vulcano.

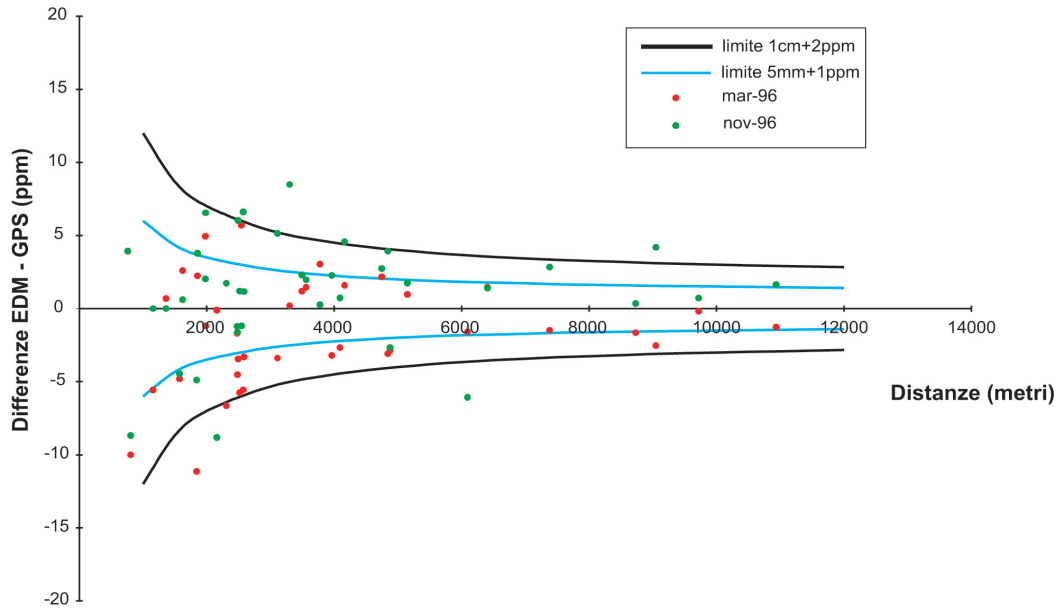


Figura 7 Confronto tra valori di distanze ottenuti con metodo GPS ed EDM per due campagne del 1996.

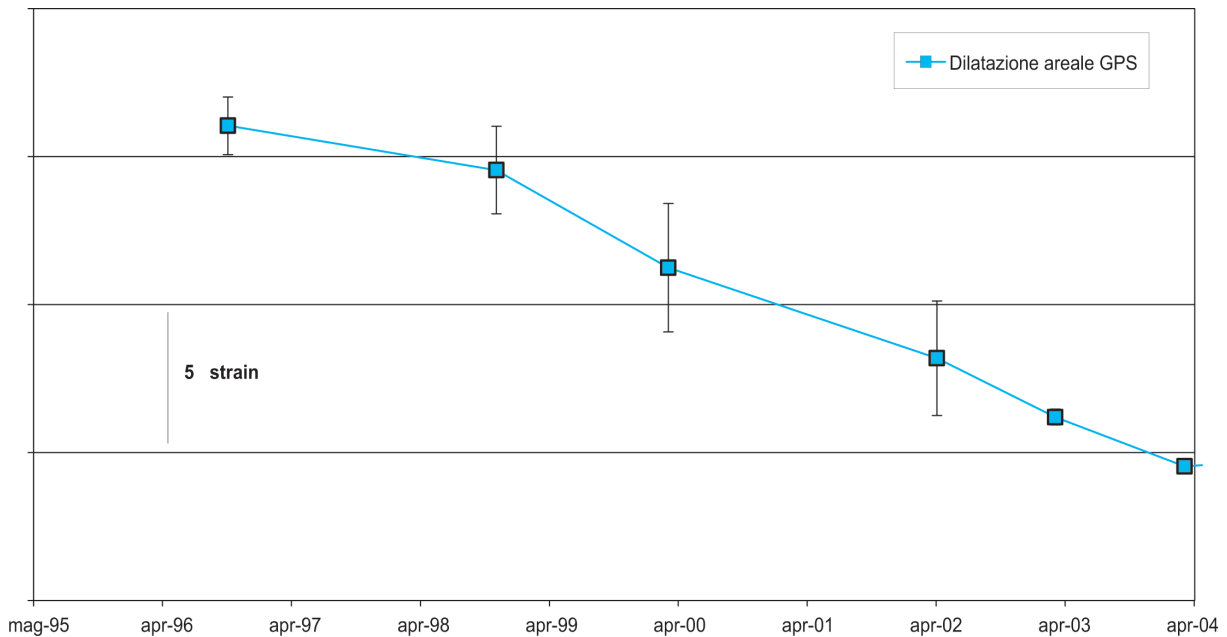


Figura 8 Dilatazione areale cumulativa della rete GPS Lipari - Vulcano.

tra i valori di distanza misurati con le due tecniche, ovvero i residui) ricadano entro la curva del limite di precisione atteso per le misure GPS pari a $5 \text{ mm} \pm 1 \text{ ppm}$ e comunque quasi tutti entro il limite di $1 \text{ cm} \pm 2 \text{ ppm}$.

Sulla base di questi risultati, dal 1997 questa rete viene misurata utilizzando la sola tecnica GPS statico. In Fig. 8 è riportato l'andamento della dilatazione areale. Si osserva una marcata tendenza contrattiva. Come già eviden-

ziato per la rete Vulcano Nord, tale andamento è da collegarsi all'attività della struttura regionale denominata Tindari-Letojanni-Giardini.

Conclusioni

La rete GPS Vulcano Nord rappresenta l'evoluzione delle tecniche di monitoraggio geodetico sviluppate all'interno del programma di sorve-

gianza dell'attività vulcanica presso l'apparato de La Fossa. Nel presente lavoro risulta evidente la qualità dei risultati che la tecnica GPS *fast-static* permette di ottenere in modo meno oneroso e più completo rispetto alla tecnica EDM. La migliore copertura del cono vulcanico ottenuta per mezzo della rete GPS permette una analisi dettagliata dei principali parametri di deformazione ricavabili tramite l'inversione dei valori delle distanze. Notevole interesse scientifico riveste altresì la rete Lipari – Vulcano, giacchè, confrontando ed estendendo la serie temporale dei parametri di deformazione di questo complesso vulcanico si stanno via via evidenziando parametri di grande interesse vulcanologico che possono contribuire alla comprensione degli stretti legami tra tettonica e vulcanismo dell'area eoliana.

Bibliografia

- Barberi F., Gasparini P., Innocenti F., Villari L., (1973). *Volcanism of the Southern Tyrrhenian Sea and its Geodynamic Implications*, J. Geophys. Res., 78, 5221-5232.
- Barberi F., Gandino A., Gioncada A., La Torre P., Sbrana A., Zenucchini C., (1994). *The deep structure of the Eolian Arc (Filicudi-Panarea-Vulcano sector) in light of gravimetric, magnetic and volcanological data*, J. Volcanol. Geotherm. Res., 61, 189-206.
- Billi A., Barberi G., Faccenna C., Neri G., Pepe F., Sulli A. (2006). *Tectonics and seismicity of the Tindari Fault System, southern Italy: Crustal deformations at the transition between ongoing contractional and extensional domains located above the edge of a subducting slab*, Tectonics, 25, TC2006, doi:10.1029/2004TC001763.
- Bonaccorso A. (2002). *Ground deformation of the southern sector of the Aeolian islands volcanic arc from geodetic data*, Tectonophysics 351 181–192.
- Capasso G., Favara R., Inguaggiato S. (1997). *Chemical features and isotopic composition of gaseous manifestations on Vulcano Island (Aeolian Islands, Italy): an interpretative model of fluid circulation*, Geochim. Cosmochim. Acta, 61, 3425-3440.
- Capasso G., Favara R., Francofonte S., Inguaggiato S. (1999). *Chemical and isotopic variations in fumarolic discharge and thermal waters at Vulcano Island (Aeolian Islands, Italy) during 1996: evidence of resumed volcanic activity*, J. Volcanol. Geotherm. Res., 88, 167-175.
- Falzone G., Puglisi B., Velardita R. (1991). *Ground deformation studies in the Lipari-Vulcano eruptive complex (Aeolian Islands): notes and comments on the most significant observations during the period 1975-1988, with particular reference to the Summer 1988 Special Surveillance Plan*, Acta Vulcanologica, 1, 153-162.
- Finetti I., Del Ben A. (1986). *Geophysical study of the Tyrrhenian opening*, Boll. Geof. Teor. Appl., 28, 75-155.
- Ghisetti F., Vezzani L. (1982). *Different styles of deformation in the Calabrian Arc (Southern Italy): implication for a sismotectonic zoning*, Tectonophysics 85, 149-165.
- Hoffmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. (1997). *GPS Theory and Practice*, Springer-Verlag Wien New York.
- Jaeger J.C. (1969). *Elasticity, Fracture and Flow with Engineering and Geological Applications*, Chapman & Hall, London.
- Leick (1994). *ACSM Bulletin, May/June*.
- Locardi E. (1988). *The origin of the Apenninic arcs*, Tectonophysics, 146, 105-123.
- Mantovani E., Babbucci D., Albarello D., Mucciarelli M. (1990). *Deformation pattern in the Central Mediterranean and behavior of the African/Adriatic promontory*, Tectonophysics, 179, 63-79.
- Mattia M., Puglisi G., Rossi M. (1998). *Definizione delle procedure operative di una rete GPS permanente locale: il caso della rete di Vulcano*, XVI Convegno Nazionale GNGTS, Roma
- Mazzuoli R., Tortorici L., Ventura G. (1995). *Oblique rifting in Salina, Lipari and Vulcano islands (Aeolian islands, southern Italy)*, Terra Research, 444-452.
- Nappi G., Bonasia V., Montagna S., Pingue F. (1976). *Primi risultati sulla sorveglianza del complesso vulcanico Lipari-Vulcano (Tirreno Meridionale)*, Boll. Soc. Geol. It., 95, 967-980.
- Saastamoinen II (1973). *Contribution to the theory of atmospheric refraction*, Bulletin Geodesique, 107, 13-34.
- Scandone P. (1979). *Origin of the Tyrrhenian Sea and Calabrian Arc*, Boll. Soc. Geol. It., 98, 27-34.
- Shepherd J.B., Herd R.A., Jackson P., Watts R. (1998). *Ground deformation measurements at the Soufrière Hills Volcano, Montserrat, 2, Rapid static GPS measurements June 1996-June 1997* Geophys. Res. Lett. Vol. 25, No. 18, p. 3413.
- Trimble (1998). *Manuale d'uso del software GP Survey v. 2.30*, Trimble Navigation Limited.
- Ventura G. (1994). *Tectonics, structural evolution and caldera formation on Vulcano island (Aeolian Archipelago, Southern Tyrrhenian Sea)*, J. Volcan. Geotherm. Res., 60, 207-224.



Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
Via di Vigna Murata, 605 - 00143 Roma - Italy
www.ingv.it