

## DINAMICA DEL SISTEMA LIPARI-VULCANO ATTRAVERSO DEFORMAZIONI DEL SUOLO E SISMICITÀ DEGLI ULTIMI 40 ANNI

S. Alparone<sup>1</sup>, A. Bonforte<sup>1</sup>, S. Gambino<sup>1</sup>, F. Obrizzo<sup>2</sup>, F. Guglielmino<sup>1</sup>, A. Scaltrito<sup>1</sup>, R. Velardita<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Osservatorio Etneo, Catania, Italy

<sup>2</sup> Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Osservatorio Vesuviano, Napoli, Italy

L'isola di Vulcano, con una superficie di 22 km<sup>2</sup>, è la più meridionale delle isole dell'arcipelago eoliano ed è localizzata a circa 20 km dalla costa settentrionale della Sicilia. L'isola è la parte sommitale di una grande e complessa struttura che si imposta sul fondo marino del Tirreno meridionale a circa 1000 m di profondità e si sviluppa fino ad una quota di 500 m s.l.m. con il Monte Aria, ubicato nel settore meridionale del vulcano. Le strutture geologiche ed i prodotti vulcanici affioranti più antichi sono distribuiti prevalentemente nel settore meridionale e sono datati circa 130.000 anni, mentre quelli più recenti (ultima eruzione a La Fossa nel 1888-90) si rilevano nel settore centrale e settentrionale. L'attività eruttiva subaerea, dopo l'emersione dell'isola, è migrata progressivamente da SE a NW, producendo una complessa struttura geologica composta, seguendo un ordine temporale, dal Vulcano primordiale, dalla Caldera del Piano, dal Complesso del Lentia, dalla Caldera della Fossa ed infine dal Cono della Fossa o Gran Cratere (ultima eruzione 1888-90 A.D.) e da Vulcanello (ultima eruzione 1550 A.D.) (Keller, 1980; De Astis *et al.*, 1993, 1997).

L'isola, insieme a Lipari e Salina, rappresenta la parte emersa dell'Aeolian Tindari-Letojanni Fault System, una struttura allungata in direzione NNW-SSE; sull'isola sono presenti anche lineamenti strutturali orientati N-S e NE-SW e lungo le stesse direzioni sono anche allineati dicchi, bocche e fessure eruttive (Mazzuoli *et al.*, 1995; Ventura *et al.*, 1999).

L'attività storica è stata caratterizzata da frequenti transizioni tra attività di tipo freatomagmatica e magmatica. L'ultima eruzione nel 1888-1890 è stata caratterizzata da esplosioni energetiche di tipo "vulcaniano". Da allora, l'attività è di tipo fumarolica con intensità variabile e principalmente concentrata a "La Fossa", con temperature massime comprese tra 200° e 300° C. Aumenti di temperatura e cambiamenti nel chimismo dei gas sono stati spesso osservati. L'episodio più recente è iniziato a metà degli anni '80, quando la temperatura delle fumarole è progressivamente aumentata fino a 690° C nel maggio 1993.

È stata indagata la dinamica di Vulcano e del settore meridionale di Lipari attraverso 40 anni di dati di deformazione del suolo e di sismicità raccolti dalle reti di monitoraggio INGV discrete e continue. Sono stati presi in considerazione i dati sismici, EDM, GPS, livellazione e tilt.

Il monitoraggio sismico nell'arcipelago eoliano inizia alla fine degli anni '70, attraverso una rete sismica composta da poche stazioni analogiche. A partire dagli anni '80, la rete fu implementata con altre stazioni distribuite sull'intero arcipelago eoliano e dotate di sismometri a corto periodo, con una frequenza naturale di 1 Hz. Nel corso del 2005 e del 2007, quasi tutte le stazioni sono state sostituite da sismometri 3C, 24-bit digitali, a larga banda larga (40 s).

La sismicità dell'arcipelago eoliano è stata raccolta in un catalogo che risulta completo fin dal 1983. Tuttavia gli eventi di maggior energia significativi dell'area sono stati registrati il 15/04/1978, M=5.5 ed il 28/05/1980, M=5.7 (Neri *et al.*, 1996). La Fig. 1, dove è riportato il rilascio sismico dal 1983, comprende pure i due eventi più forti registrati negli ultimi 40 anni mettendo in evidenza come l'area sia stata caratterizzata da 3 fasi con rilasci via via decrescenti.

Il forte incremento della fine degli anni '70 e quello più moderato negli anni '80 hanno segnato un incremento della dinamica regionale che avrebbe causato la riattivazione del sistema vulcanico sull'isola (e.g. Chiodini, 1992; Montalto, 1996).

Indagini sismologiche sull'area Lipari-Vulcano, attraverso localizzazioni di precisione di terremoti dal 1993, hanno evidenziato diversi allineamenti ed in particolare una struttura sismogenetica attiva che si estende quasi verticalmente da 4 a 9 km di profondità tra Vulcanello e La Fossa risultando orientata ENE-WSW (Gambino *et al.*, 2012).

Due gruppi di eventi risultano inoltre posizionati a Nord-Ovest di Lipari con orientazione NE-SW e profondità di 10-13 km e a SE di Vulcano con orientazione NNW-SSE, e profondità tra 5 e 8 km.

Nel complesso, la sismicità registrata negli ultimi vent'anni nell'area Lipari-Vulcano evidenzia solo in parte dinamiche riconducibili direttamente alle strutture orientate NE-SW del Aeolian Tindari-Letojanni Fault System mentre sembrano più attive strutture secondarie di svincolo.

Discorso a parte meriterebbe la sismicità superficiale dell'area della Fossa che risulta essere strettamente legata all'attività del sistema idrotermale (vedi Alparone *et al.*, 2010; Milluzzo *et al.*, 2011; Cannata *et al.*, 2012).

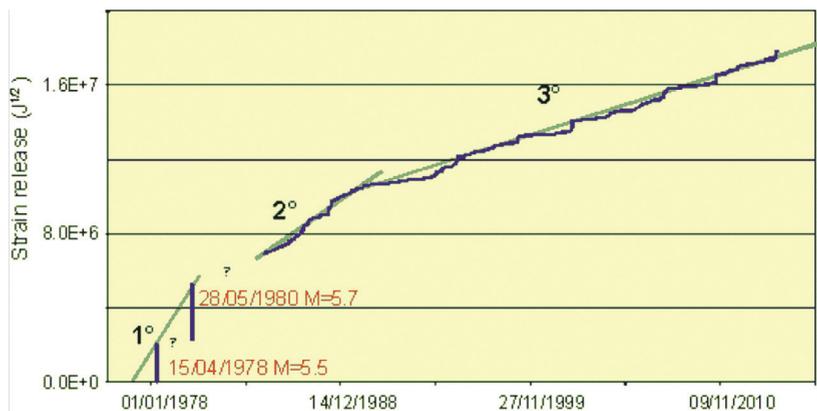


Fig. 1 – Rilascio sismico nell'arcipelago eoliano aggiornato al 2013.

Il monitoraggio delle deformazioni del suolo mediante misure di distanza elettro-ottiche (EDM) a Vulcano e Lipari inizia nel 1975, proseguendo fino al 1997 quando si è passati ad effettuare le misure sulle reti con tecnica satellitare GPS.

La tecnica EDM misura la distanza da una stazione base dove è posto un geodimetro laser, installato su un riferimento stabile, rispetto ad una serie di prismi riflettenti installati su benchmark posizionati in visibilità ottica. Ripetendo la misura nel tempo si ottiene la variazione di distanza tra il punto di riferimento stabile e il prisma da monitorare. Una prima rete EDM (LIPVUL), composta da 14 pilastri di cemento, è stata installata nel 1975 coprendo l'intera isola di Vulcano e la parte meridionale dell'isola di Lipari (ad es. Falsaperla *et al.*, 1989; Falzone *et al.*, 1991; Bonaccorso, 2002; Bonforte e Guglielmino, 2008). Nel 1987, una seconda rete EDM (VULNORD) è stata aggiunta a coprire l'intero cratere della Fossa ed è costituita da 16 benchmark e 32 linee, posti lungo quattro profili radiali. Ogni profilo si estende lungo le pendici del cono della Fossa e le misure sono effettuate dal bordo della caldera che circonda il cono e da Vulcanello.

Le distanze inclinate misurate, sono state corrette per le condizioni atmosferiche con temperature e valori di pressione atmosferica acquisiti presso i punti di misura. L'errore strumentale è di 5 millimetri più 1 parte per milione (ppm) della distanza.

La rete di livellazione gestita dall'INGV - Osservatorio Vesuviano per la rilevazione di massima precisione dei movimenti verticali del suolo su Vulcano è attualmente composta da 100 capisaldi di riferimento, distribuiti su una lunghezza di circa 25 km nel suo complesso. Allo stato attuale, la rete è strutturata in 5 circuiti collegati in modo da permettere un controllo incrociato e una regolazione rigorosa della misurazione. La rete operativa è stata ampliata più volte dal 1976, anno di installazione (Corrado *et al.*, 1979; Obrizzo *et al.*, 1993a, 1993b, 1994, 1998, 2000).

Il benchmark di riferimento (1A) per l'intera rete per calcolare le variazioni di altezza è situato nella parte meridionale dell'isola (Vulcano Piano), che può essere considerata una zona relativamente stabile rispetto al resto dell'isola.

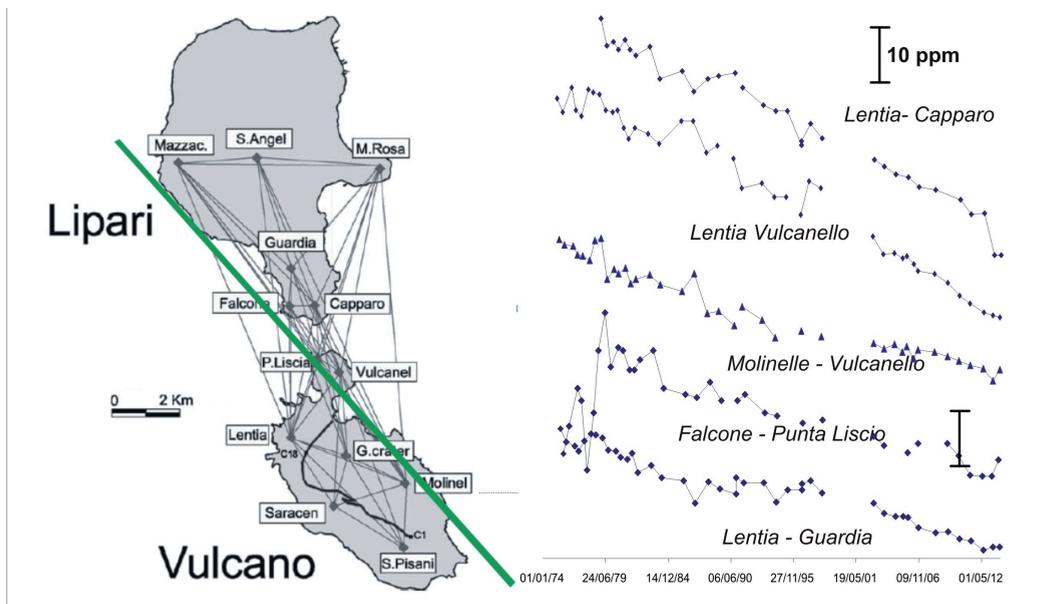


Fig. 2 – Rete EDM-GPS “LIPVUL” ed esempi di misure di distanze nel periodo 1975-2014. In verde è riportata la struttura orientata circa NNW-SSE lungo la quale si ha una generale cinematica di tipo transpressivo del complesso Lipari-Vulcano, con una componente destra di spostamento. Le distanze riportate appartengono a linee che si trovano a cavallo della struttura e mostrano un continuo accorciamento, abbastanza costante se si esclude il periodo 1975-1979 (crisi del Golfo di Patti evento 15/04/78 M=5.5).

La strumentazione utilizzata per eseguire le misure di livellazione è costituita da livelli Wild NA2 corredati di micrometro e da stadie centimetrata con nastro in Invar. Le tecniche e modalità di misura utilizzate sono quelle imposte dalle procedure standard della livellazione geometrica di precisione dal mezzo. I risultati della livellazione sono caratterizzati da un valore dell'errore chilometrico medio inferiore a  $1.0 \text{ mm/km}^{1/2}$  e da valori delle chiusure dei circuiti (lunghezza massima 4 km) che al più raggiungono valori di 2 mm. La presenza nella rete dei poligoni consente un controllo incrociato dei dati e la compensazione rigorosa dei dislivelli. La coerenza interna dei dati rilevati viene verificata esaminando gli errori di chiusura dei circuiti (le cui lunghezze variano da 1 a 4 km) con tolleranza pari a  $2 L^{1/2} \text{ mm}$ , dove L è la lunghezza in km del circuito. Successivamente i dati sono sottoposti a compensazione rigorosa per determinare le quote dei capisaldi, rispetto al caposaldo di riferimento.

La rete clinometrica permanente comprende cinque stazioni per pozzi equipaggiati con strumenti bi-assiali, quattro dei quali installati a 8-10 m di profondità. Le prime stazioni furono installate nel 1980 in pozzi a circa 2-3 m di profondità. Alla fine degli anni '90, la rete è stata ampliata con l'aggiunta di altre stazioni, con sensori posizionati a 10 metri dalla superficie (Gambino *et al.*, 2007).

Gli strumenti sono modelli AGI, con una precisione di 0,1 microradiani, che utilizzano un sensore a bolla elettrolitica di alta precisione per misurare il movimento angolare. La prima componente è orientata verso il cratere, quindi un segnale positivo indica sollevamento dell'area del cratere (componente radiale); il secondo è orientato di  $90^\circ$  in senso antiorario (tangenziale).

In generale, i dati clinometrici degli ultimi 20 anni hanno evidenziato solo variazioni impulsive legate a forti eventi sismici occorsi in un raggio di circa 30 km da Vulcano e trend a lungo termine; Non sono state mai evidenziate variazioni rapide (ore-giorni) correlabili a sorgenti magmatiche.

Le osservazioni sui dati di deformazione insieme alla sismologia sembrano suggerire 3 principali sorgenti che concorrono a definire la dinamica dell'isola:

Una prima sorgente è legata alla tettonica regionale ed ha una generale cinematica di tipo transpressiva del complesso Lipari-Vulcano con una componente destra di spostamento lungo una struttura orientata circa NNW-SSE (Aeolian Tindari-Letojanni Fault System) (Bonaccorso, 2002; Bonforte e Guglielmino, 2008); I dati di livellazione e delle distanze sulla rete "Lipari-Vulcano" su tutto il periodo 1975-2014 evidenziano bene il ruolo della tettonica regionale, mostrando anche le variazioni che caratterizzarono la crisi del Golfo di Patti culminata con la scossa del 15 aprile del 1978 di magnitudo 5.5 (Ferri *et al.*, 1988; Falsaperla *et al.*, 1989; Bonafede, 1995); un evento, che è stato associato alla Aeolian Tindari-Letojanni Fault System e che sembra aver giocato un ruolo importante nella transizione del sistema vulcanico da una fase di stabilità ad una fase di agitazione, inducendo il riscaldamento e l'espansione dei fluidi idrotermali superficiali.

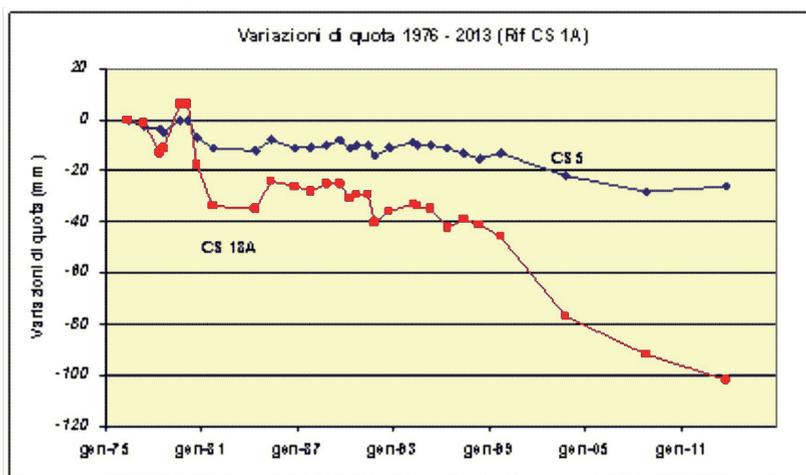


Fig. 3 – Variazioni di quota dal 1976 al 2013 misurate tramite livellazione di precisione ai capisaldi CS 5 e CS 18A (riferimento CS 1A). Si nota la differenza di trend tra il Piano (Cs 5) stabile e la Caldera (Cs18A) in subsidenza. Sono visibili le variazioni del periodo 1975-1979 (crisi del Golfo di Patti evento 15/04/78 M=5.5).

I dati di livellazione e delle distanze sulla due reti evidenziano inoltre una seconda sorgente i cui effetti si ripercuotono sulla parte settentrionale dell'isola e che potrebbero essere correlati ad una dinamica della caldera della Fossa le cui evidenze si hanno maggiormente tra la seconda metà degli anni '80 e gli anni '90.

Una terza sorgente risulta essere concentrata sul cono del "La Fossa"; Gambino e Guglielmino (2008) hanno evidenziato, attraverso le misure EDM effettuate sulla rete "VULNORD" e le livellazioni dell'area sommitale, che il cono della Fossa è stato interessato da una dinamica tra il 1990 ed il 1996. Le singole misure EDM hanno mostrato una estensione generale tra linee che collegano i capisaldi posizionati sull'edificio e quelli esterni. In particolare, variazioni di distanza fino 6-7 cm e subsidenza fino a 5.5 cm (sulla livellazione) furono registrate in quel periodo. Queste misure indicano una deflazione e contrazione generale del cono vulcanico. Invertendo i dati EDM e di livellazione si è ottenuta una sorgente sub-verticale posizionata all'incirca sotto il cono e profonda poco al di sotto del livello del mare. In considerazione

della profondità e delle concomitanti forti variazioni di temperatura e di flusso alle fumarole, le deformazioni sono state attribuite ad una sorgente idrotermale. Harris *et al.*, (2012) hanno evidenziato come dopo il 1997 non siano state registrate variazioni significative della dinamica del cono; tuttavia un'analisi sui dati storici suggerisce che il cono sia stato interessato prima da una fase inflattiva del 1989.

In conclusione, le osservazioni sui dati di deformazione insieme alla sismologia sembrano suggerire 3 principali sorgenti che concorrono a definire la dinamica dell'isola:

- la prima legata alla tettonica regionale
- la seconda correlata ad una dinamica della caldera della Fossa;
- la terza legata solo al cono di La Fossa.

In generale le deformazioni del suolo su aree vulcaniche sono interpretate come variazioni di volume di sorgenti magmatiche ma possono essere legate all'attività di sistemi idrotermali. Su Vulcano le osservazioni legate sia alla dinamica della Caldera che, soprattutto, della Fossa sembrano essere collegate più al sistema geotermico che a sorgenti magmatiche.

Inoltre tutto il periodo di osservazione può essere suddiviso almeno in 3 sottoperiodi durante i quali le sorgenti hanno avuto un ruolo diverso: un primo periodo in cui l'attività tettonica regionale ha marcato tutta la dinamica del complesso Lipari-Vulcano; un secondo periodo in cui si accentuano le dinamiche della Fossa e della Caldera ed un terzo periodo in cui il sistema vulcanico ha mostrato variazioni meno significative

**Ringraziamenti.** Lo studio presentato ha beneficiato del contributo finanziario della Presidenza del Consiglio dei Ministri – Dipartimento della Protezione Civile, nell'ambito della convenzione 2014-2015 con l'Istituto Nazionale di geofisica e Vulcanologia, Progetto V3: “Multi-disciplinary analysis of the relationships between tectonic structures and volcanic activity “. La presente pubblicazione, tuttavia, non riflette necessariamente la posizione e le politiche ufficiali del Dipartimento.

### Bibliografia

- Alparone, S., Bonforte, A., Gambino, S., Gresta, S., Guglielmino, F., Obrizzo, F., Puglisi, G., 2009. Tectonic dynamics at Vulcano island revealed by ground deformation and seismic data. Conferenza A. Rittmann “La vulcanologia italiana: stato dell'arte e prospettive future”, Nicolosi (Catania) 11-13 June 2009, ISBN 978-88-89972-11-3.
- Alparone, S., Cannata, A., Gambino, S., Gresta, S., Milluzzo, V., Montalto, P., (2010), Time-space variation of volcano-seismic events at La Fossa (Vulcano, Aeolian Islands, Italy): new insights into seismic sources in a hydrothermal system. *Bulletin of Volcanology* 72, 803–816.
- Bonaccorso, A., 2002. Ground deformation of the south-central sector of the Aeolian islands arc from geodetic data, *Tectonophysics*, 351, 181-192.
- Bonforte, A., Guglielmino, F., 2008. Transpressive strain on the Lipari–Vulcano volcanic complex and dynamics of the “La Fossa” cone (Aeolian Islands, Sicily) revealed by GPS surveys on a dense network. *Tectonophysics* 457, 64-70, doi:10.1016/j.tecto.2008.05.016
- Cannata, A., Diliberto, S., Alparone, S., Gambino, S., Gresta, S., Liotta, M., Madonia, P., Milluzzo, V., Aliotta, M., Montalto, P (2012) Multiparametric approach in investigating volcano-hydrothermal systems: the case study of Vulcano (Aeolian Islands, Italy) *Pure and App. Geophy.*, doi:10.1007/s00024-011-0297-z.
- Chiodini, G., Cioni, R., Falsaperla, S., Guidi, M., Marini, L., and Montalto, A., (1992), Geochemical and seismological investigations at Vulcano (Aeolian islands) during 1978–1989: *Journal of Geophysical Research*, v. 97, p. 11,025–11,032.
- Corrado G., Grimaldi M., Lo Bascio A., Luongo G. (1979). Deformazioni del suolo Campi Flegrei, Ischia, Vulcano, Rapporto U.O. 3.1.1 PFG-CNR (in italian).
- De Astis, G., Ventura, G., Vilardo, G., 2003. Geodynamic significance of the Aeolian volcanism (Southern Tyrrhenian Sea, Italy) in light of structural, seismological and geochemical data. *Tectonics* 22, 1040. doi:10.1029/2003TC001506.
- De Astis, G., L. La Volpe, A. Peccerillo, and L. Civetta (1997): Volcanological and petrological evolution of Vulcano island (Aeolian Arc, southern Tyrrhenian Sea), *J. Geophys. Res.*, 102, 8021– 8050.
- Falsaperla S., Frazzetta G., Neri G., Nunnari G., Velardita R. and Villari L., (1989). Volcano monitoring in the Aeolian Islands (Southern Tyrrhenian Sea): the Lipar-Vulcano eruptive complex. In IAVCEI Proceedings in Volcanology 1 “Volcanic Hazards: Assessment and monitoring”, J. H. Latter (Ed.), Springer Verlag, New York, 337-356.
- Falzone G., Puglisi B. and 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 Vulcanol.*, 1, 153-162.

- Ferri M, Grimaldi M. and Luongo G. (1988). Vertical Ground Deformation on Vulcano, Aeolian Islands, Southern Italy: Observation and Interpretations 1976 – 1986. *JVGR* , 35, 141-150.
- Gambino, S., Campisi, O., Falzone, G., Ferro, A., Guglielmino, F., Laudani, G., Saraceno, B., (2007), Tilt measurements at Vulcano Island. *Annals of Geophysics* 50, 233–247.
- Gambino, S., and F. Guglielmino (2008), Ground deformation induced by geothermal processes: a model for La Fossa Crater (Vulcano Island, Italy), *J. Geophys. Res.*, 113, B07402, doi:10.1029/2007JB005016.
- Gambino, S., V. Milluzzo, A. Scaltrito and L. Scarfi (2012), Relocation and focal mechanisms of earthquakes in the south-central sector of the Aeolian Archipelago: New structural and volcanological insights, *Tectonophysics*, 524–525, 108–115.
- Harris A., Alparone, S., Bonforte, A., Dehn, J., Gambino, S., Lodato, L., and Spampinato, L., 2012, Vent temperature trends at the Vulcano Fossa fumarole field: the role of permeability: *Bulletin of Volcanology*, v. 74, p. 1293–1311, doi:10.1007/s00445-012-0593-1.
- Keller, J. (1980): The Island of Vulcano, *Rend. Soc. Ital. Mineral. Petrol.*, 36, 369–414.
- Obrizzo F., C. Del Gaudio and Ricco C. (1993a). **Slow vertical ground movements at Vulcano Island : 1987 – 1992.** In *Unrest at Vulcano ( A collection of preliminary contribution for the IPG-WOVO Meeting – Guadaloupe, Dicembre 1993)* F. Barberi Ed., GNV-CNR, pp 67-86, Rome (Italy)
- Obrizzo F., Del Gaudio C., Ferri M., Sepe V. & Luongo G., (1993b). **Vulcano island : Vertical ground movements.** *Acta Vulcanologica. Data Related to Eruptive Activity, Unrest Phenomena and Other Observations on Italian Active Volcanoes 1991.* Villari L. (Ed.), Vol. 3, 291-293.
- Obrizzo F., Del Gaudio C. & Ricco C. (1994). **Vulcano - Vertical Ground Movements .** *Acta Vulcanologica. Data Related to Eruptive Activity, Unrest Phenomena and other Observations on the Italian Active Volcanoes 1992,* Editor L. Villari, , 6, 61-63.
- Obrizzo F. (1998). Vertical Ground Movements at Vulcano: precise levelings. *Acta Vulcanologica. Data Related to Eruptive Activity, Unrest Phenomena and other Observations on the Italian Active Volcanoes - Geophysical monitoring of Italian Active Volcanoes 1993-1995.* P.Gasparini (Ed.), Vol 10 (1), 127-130.
- Obrizzo F. (2000). Vulcano - Vertical ground movements: precise levelling. May 1995- May 1996. *Acta Vulcanologica. Data Related to Eruptive Activity, Unrest Phenomena and other Observations on the Italian Active Volcanoes 1996,* Editor L. Villari, Vol 12 (1-2), 115-116.
- Milluzzo, V., Cannata, A., Alparone, S., Gambino, S., Hellweg, M., Montalto, P., Cammarata, L., Dilibero, I.S., Gresta, S., Liotta, M., and Paonita, A., 2010, Tornillos at Vulcano: clues to the dynamics of the hydrothermal system: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 198, p. 377–393, doi:10.1016/j.jvolgeores.2010.09.022.
- Montalto (1996): Signs of potential renewal of eruptive activity at La Fossa (Vulcano, Aeolian Islands). *Bull. Volc.* 57, 483-492.
- Mazzuoli R, Tortorici L, Ventura G., (1995): Oblique Rifting in Salina, Lipari and Vulcano Islands (Aeolian Islands, Southern Italy) *Terra Nova*, 7, 4, 444-452.
- Neri, G., Caccamo, D., Cocina, O., Montalto, A., (1996), Geodynamic implications of earthquake data in the southern Tyrrhenian sea. *Tectonophysics* 258, 233–249.
- Ventura, G., G. Vilaro, G. Milano, and N. A. Pino (1999): Relationships among crustal structure, volcanism and strike-slip tectonics in the Lipari-Vulcano volcanic complex (Aeolian Islands, southern Tyrrhenian Sea, Italy), *Phys. Earth Planet. Inter.*, 116, 31– 52.