

ANALISI DEL CAMPO DI DEFORMAZIONE SUPERFICIALE DELLA REGIONE CAMPANIA DA DATI SAR (PS-INSAR™)

Giuseppe VILARDO (*), Carlo TERRANOVA (**), Fabio MATANO (*), Sergio NARDÒ (*),
Sabato IULIANO (*), Elena PISCITELLI (*), Guido VENTURA (*)

(*) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Napoli, Osservatorio Vesuviano,
Via Diocleziano 328, Napoli, tel. 0816108329, fax 0816108351, e-mail vilardo@ov.ingv.it

(**) Unità di Supporto Locale N° 6 Regione Campania – Progetto Operativo Difesa Suolo (PODiS)
Ministero per l'Ambiente e la Tutela del Territorio e del Mare (MATTM), c/o Ufficio dell'Autorità Ambientale,
Regione Campania, Via Bracco 15a, Napoli, Italia.

(***) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 1, Sismologia e Tettonofisica, Roma, Italia.

Riassunto

Il lavoro presenta un'applicazione della tecnica dei diffusori permanenti (*Permanent Scatterers*) finalizzata alla caratterizzazione del campo di deformazione superficiale della Regione Campania. Per effettuare l'analisi sono state processate, tramite la tecnica PS-InSAR™, 108 scene SAR ERS1 ed ERS2 relative al periodo giugno 1992 - gennaio 2001. Sulla base della velocità media annua di spostamento di 1.691.40 PS con coerenza maggiore di 0.65 sono state prodotte mappe di velocità media di deformazione mediante l'utilizzo di una procedura articolata nei seguenti punti: a) filtraggio dei dati effettuato sulla base dei valori di coerenza; b) produzione di mappe di velocità media di deformazione in coordinate SAR; c) generazione di mappe di velocità media di deformazione secondo le componenti verticale ed Est-Ovest; d) validazione di risultati mediante confronto con dati prodotti con differenti metodiche d'indagine. L'analisi dei risultati ottenuti ha consentito di identificare aree caratterizzate da distinti stili deformativi. Aree in subsidenza sono risultate essere, per il periodo di interesse, oltre all'area vulcanica dei Campi Flegrei, le aree costiere dei bacini dei fiumi Volturno e Sele ed il settore centrale dell'isola d'Ischia. Aree con significativi valori di sollevamento sono localizzate nel settore settentrionale del Monte Somma, nel settore centrale della Piana Campana, nel Sannio e nel Cilento. Significativi valori di velocità di spostamento in direzione EW si riscontrano, oltre che nell'area dei Campi Flegrei, nel settore appenninico del bacino del Sele e nell'area interposta tra il Somma-Vesuvio e la catena appenninica. Il quadro deformativo globale risulta essere caratterizzato da un andamento complesso, governato da una molteplicità di processi di differente natura (tettonici, vulcano-tettonici, esogeni ed antropici).

Abstract

We apply the Permanent Scatterers Synthetic Aperture Radar Interferometry (PS-InSAR™) technique to the Campania Region (Southern Italy) with the aim to detect ground displacements at a regional scale. PS-InSAR technique allows us to identify a set of radar benchmarks (PS) where accurate displacement measurements can be carried out. About $1.7 \cdot 10^6$ PS are identified by processing Synthetic Aperture Radar (SAR) images acquired in ascending and descending orbits from 1992 to 2001 by the ERS satellites. The PS-InSAR application at regional scale detected ground deformations ranging from +28 to -39 mm/yr. We identify volcanic areas in which the deformation is mainly related to the depressurization of the local hydrothermal systems, and recognize deformations along faults. The review of 9 years of SAR data show that tectonic, volcanic/hydrothermal, gravity, and anthropic processes are responsible for the ground deformation complex trend of the Campania Region.

Introduzione

I significativi progressi tecnologici e metodologici compiuti negli ultimi anni nell'acquisizione e nell'elaborazione dei dati acquisiti da sensori satellitari radar ad apertura sintetica (SAR) hanno concretamente migliorato le capacità di individuazione di aree soggette a fenomeni di deformazione della superficie terrestre dovuti a processi naturali o antropici. La tecnica dei diffusori permanenti (*Permanent Scatterers*, PS), brevettata dal Politecnico di Milano e perfezionata da Telerilevamento Europa (T.R.E.), è uno strumento per l'analisi interferometrica di dati SAR che, utilizzando lunghe serie di dati radar acquisiti con regolarità (tipicamente ogni 35 giorni), consente di studiare il movimento di singoli bersagli radar che mantengono immutata la propria firma elettromagnetica nel tempo (Ferretti et al. 2001). In questo lavoro è presentata un'applicazione della tecnica PS-InSARTM finalizzata all'analisi del campo di deformazione di un'area di 13.600 km², corrispondente all'intero territorio della Regione Campania. L'analisi della distribuzione spaziale delle velocità medie annue di spostamento calcolate per un totale di quasi 1.M L di PS distribuiti sull'intera area di studio ha permesso di individuare le principali aree soggette a significativi fenomeni deformativi di ampiezza locale o sub-regionale. Al fine di interpretare e connotare i fattori che governano la deformazione della superficie terrestre a scala regionale, i risultati dell'analisi PS sono stati successivamente confrontati ed esaminati alla luce delle informazioni geologiche e geofisiche disponibili. Si sottolinea che i dati ed i risultati presentati in questo lavoro ricoprono l'area più vasta mai analizzata mediante applicazione della tecnica dell'interferometria differenziale da immagini radar SAR.

Processamento dati SAR

Per effettuare l'analisi interferometrica sono state utilizzate 108 immagini SAR acquisite lungo le orbite discendente e ascendente dai satelliti ERS1/ERS2 nel periodo giugno 1992 – gennaio 2001. Le immagini sono state elaborate dalla T.R.E. mediante la tecnica dei diffusori permanenti (PS-InSARTM). L'utilizzo di tale tecnica ha portato alla stima della velocità media annua di 998.640 PS discendenti e 693.110 PS ascendenti corrispondenti a strutture antropiche ed a riflettori naturali (edifici, strutture metalliche, affioramenti rocciosi, ecc.).

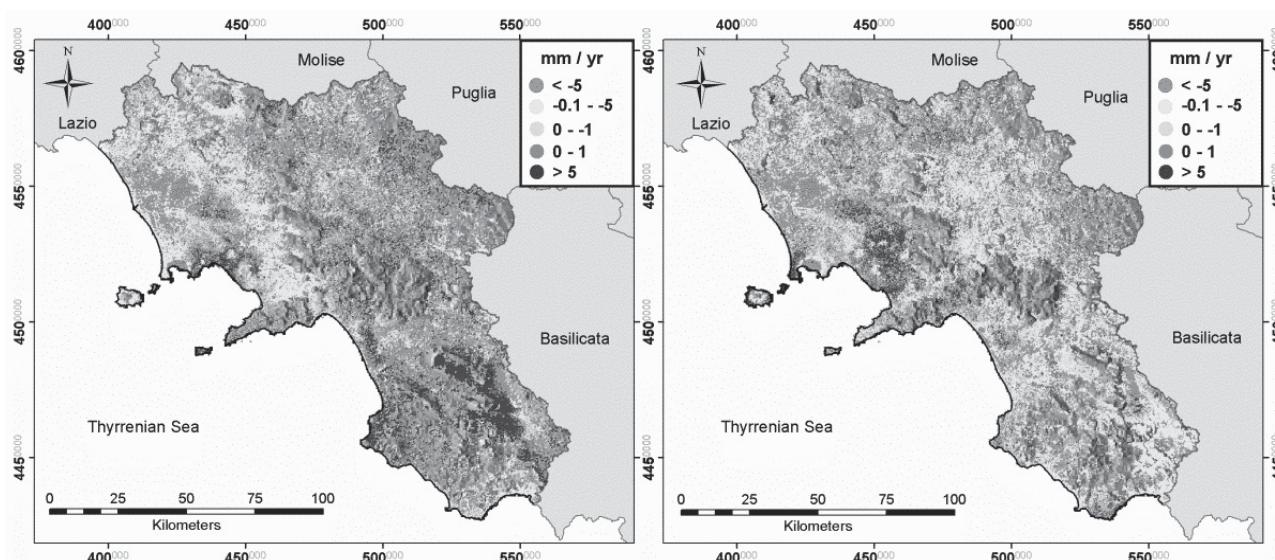


Figura 1 – Distribuzioni dei PS relative alle geometrie ascendente (sinistra) e discendente (destra) dai satelliti ERS-1 ed ERS-2 SAR tra il 1992 ed il 2001. I valori delle velocità medie annue di spostamento lungo la congiungente satellite-bersaglio (mm/anno) sono rappresentati in scala cromatica che varia dal rosso (velocità negative) al blu (velocità positive).

La gran parte dei PS ricade in aree pianeggianti, laddove la densità dei manufatti è maggiore. Un minor numero di PS risultano localizzati nelle aree montane a causa delle condizioni non favorevoli all'applicazione dell'approccio PS quali, la più estesa e fitta copertura delle aree vegetate e le elevate acclività dei versanti.

Le velocità medie annue di spostamento, rilevate lungo la linea di vista del satellite (*Line of Sight: LOS*), ovvero lungo la congiungente satellite-bersaglio, variano da + 27,97 a - 38,87 mm/anno e sono riferite a più punti di riferimento a terra assunti fermi. La precisione di ogni singola misura è funzione del rapporto segnale/rumore caratteristico di ogni singolo PS (coerenza) e varia da 3 a 5 mm per valori di coerenza pari a 0.65. Stime più accurate si ottengono per valori di coerenza maggiori. Da un'analisi preliminare delle distribuzioni spaziali delle velocità medie annue di spostamento lungo la congiungente satellite-bersaglio (Fig. 1) si rileva che, in entrambe le geometrie di acquisizione ascendente e discendente, i valori negativi si concentrano nel settore nord-occidentale della piana campana e nelle aree dei Campi Flegrei e dell'isola d'Ischia. Al contrario, le distribuzioni dei valori di velocità positivi mostrano andamenti differenti, funzione della differente geometria di acquisizione; osservazione questa che suggerisce anche la presenza di una componente orizzontale della velocità di deformazione.

Stima delle componenti di spostamento verticale ed Est-Ovest

Nell'interpretazione del dato radar risulta fondamentale tenere in considerazione la geometria di acquisizione. I satelliti ERS acquisiscono lungo una direzione inclinata di un angolo pari a circa 23° rispetto alla verticale. Questo significa che i movimenti misurati, essendo variazioni di distanza, sono in realtà la proiezione degli spostamenti del punto lungo la congiungente sensore-bersaglio. In assenza di moti orizzontali, il movimento stimato è puramente riconducibile alla deformazione lungo la direzione verticale, ma se l'area in analisi è affetta anche da spostamenti orizzontali, la misura ottenuta è la combinazione dei due fenomeni. In ogni caso, utilizzando entrambe le geometrie di acquisizione del sensore (ascendente e discendente) e considerando anche che, a causa della direzione dell'orbita del satellite il sistema risulta molto poco sensibile alle deformazioni orizzontali in direzione Nord-Sud, è in generale possibile valutare le componenti della deformazione in direzione Est-Ovest e in direzione verticale. Tale stima è, comunque, realizzabile solo per le aree in cui si hanno a disposizione PS appartenenti sia al data-set ascendente che a quello discendente.

Per effettuare la stima delle componenti di spostamento verticale ed Est-Ovest si è dapprima proceduto ad effettuare un filtraggio dei dati sulla base dei valori di coerenza e ciò allo scopo di minimizzare gli effetti dovuti all'accuratezza nella stima dei valori di spostamento. A tal fine sono stati selezionati solo i PS aventi migliore rapporto segnale-rumore (coerenza ≥ 0.85). I valori di velocità media annua di spostamento dei PS così selezionati sono stati utilizzati per generare due differenti mappe di velocità media di deformazione in coordinate SAR relative alle geometrie di acquisizione ascendente e discendente. Tali mappe sono state prodotte interpolando i dati puntuali di velocità media utilizzando il metodo d'interpolazione dell'inverso della distanza pesata (*Inverse Distance Weighted: IDW*). Tale interpolatore assegna il valore per ogni punto della mappa sulla base della media pesata dei valori noti circostanti ed è comunemente usato per garantire la conservazione delle variazioni locali per distribuzioni di punti spazialmente non omogenee e per le quali i singoli valori non siano necessariamente in relazione con i valori assunti dai punti ad essi vicini (Mueller et al., 2004). Si è poi proceduto alla generazione delle mappe di velocità media di deformazione verticale ed E-W (Fig. 2) sulla base di una combinazione vettoriale delle due mappe di velocità media di deformazione relative all'orbita ascendente ed a quella discendente (Manzo et al., 2006).

Il confronto tra i risultati ottenuti in questa analisi con quelli prodotti, per alcuni settori dell'area di studio, dall'applicazione di differenti metodiche d'indagine (SBAS, GPS e livellazioni di precisione) conferma, nel complesso, l'andamento della deformazione ricavata dall'elaborazione PS-InSAR. In particolare, le mappe di velocità media di deformazione nelle componenti verticale ed Est-Ovest (Fig. 2) ottenute per la zona vulcanica napoletana (Campi Flegrei, Vesuvio e Isola d'Ischia) sono del tutto simili alle distribuzioni di velocità ottenute tramite l'utilizzo della tecnica

SBAS (Casu et al., 2006; Lanari et al., 2007). La velocità verticale media di deformazione di -32 mm/anno osservata per il periodo 1992-2001 nell'area dei Campi Flegrei è in perfetto accordo con il valore di -33 mm/anno ottenuto dall'elaborazione dei dati acquisiti durante le campagne periodiche di livellazione di precisione. Un ulteriore confronto con le misure GPS acquisite nell'arco di cinque anni (1995-2000) nel settore meridionale della linea di costa campana (Ferranti, Oldow, 2005; Ferranti et al., 2008) evidenzia ancora una volta che, i valori di spostamento in direzione Sud-Ovest dell'ordine di circa 2–3.5 mm/anno derivati da dati GPS sono del tutto confrontabili con quelli stimati in questo lavoro (1–3 mm/anno; Fig. 2).

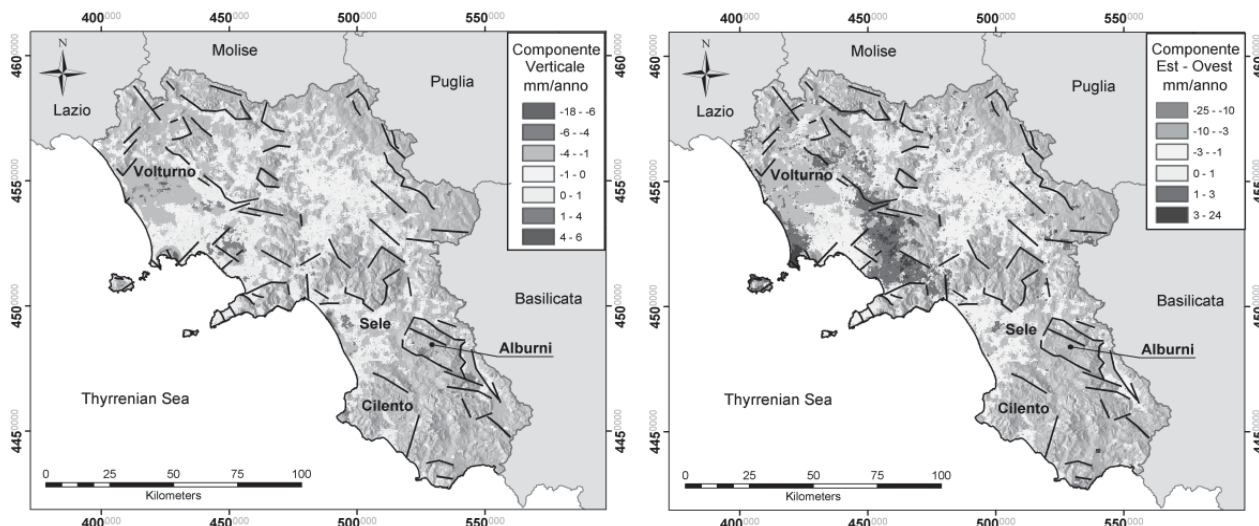


Figura 2 – Mappe della velocità media di deformazione in mm/anno. Componente verticale (sinistra): i valori positive indicano sollevamento ed i negativi subsidenza. Componente Est-Ovest (destra): i valori positivi indicano spostamento verso est ed i valori negativi rappresentano spostamenti verso ovest. Le linee in nero presenti in entrambe le mappe rappresentano i lineamenti strutturali derivati dalla carta neotettonica di Ciaranfi et al. (1981).

Risultati

L'analisi delle mappe di velocità media di deformazione in direzione verticale ed orizzontale mostrate in Fig. 2 consente di identificare aree caratterizzate da distinti stili deformativi.

Aree in subsidenza ($-18 \leq V_{\text{vert}} \leq -4$ mm/anno) sono risultate essere, oltre all'area vulcanica dei Campi Flegrei, le aree costiere dei bacini dei fiumi Volturno e Sele ed il settore centrale dell'isola d'Ischia. Aree con significativi valori di sollevamento ($V_{\text{vert}} \geq 4$ mm/anno) sono localizzate nel settore settentrionale del Monte Somma, nel settore centrale della Piana Campana, nel settore settentrionale della Piana del Sele e nel Cilento. Significativi valori di velocità di spostamento in direzione Est-Ovest si riscontrano, oltre che ancora una volta nell'area dei Campi Flegrei, nel settore appenninico del bacino del Sele e nell'area interposta tra il Somma-Vesuvio e la catena appenninica. Sulla base di tali osservazioni si evidenzia che il quadro deformativo globale risulta essere caratterizzato da un andamento complesso, governato verosimilmente da una molteplicità di processi di differente natura e scala areale (tettonici, vulcano-tettonici, esogeni ed antropici).

In particolare, le aree vulcaniche dei Campi Flegrei ed Ischia sono entrambe interessate, nel periodo di disponibilità dei dati, sia da subsidenza che da contrazione. Tali dinamiche, interpretate alla luce delle informazioni vulcanologiche e dei modelli derivati da dati di livellazione, riconducono tali manifestazioni superficiali a fenomeni di depressurizzazione dei rispettivi sistemi idrotermali (De Vita et al., 2006; Sepe et al., 2007; Todesco et al., 2004).

Notevolmente più complesso si rivela il campo di deformazione nell'area Vesuviana. Nel settore settentrionale dell'edificio vulcanico è evidente un sollevamento non attribuibile a dinamiche vulcaniche o a cambiamenti del sistema idrotermale, ma probabilmente connesso a processi che

implicano significativi aumenti nella pressione di poro (De Vita, Vallario, 1996). L'area circumvesuviana è poi caratterizzata dalla presenza di zone in subsidenza con geometria sub-circolare, corrispondenti ai principali centri urbani o ad aree industriali e agricole. In tali aree, il deficit nel ricarico della falda acquifera, dovuto all'emungimento da pozzi per uso civile ed industriale, è particolarmente elevato e stimato nell'ordine di $55 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$ (ENEA, 2002) per cui è ragionevole supporre che i fenomeni di subsidenza osservati siano attribuibili a compattazioni nel suolo determinate dalla diminuzione della pressione di poro. Il campo di deformazione orizzontale nell'area vesuviana non sembra essere collegato con quello verticale. Il valore massimo di 3 mm/anno evidenzia la presenza di una marcata discontinuità che separa distintamente il settore orientale da quello occidentale e si estende per oltre 20 km verso Nord-Ovest. Tale discontinuità risulta essere esattamente coincidente con la struttura tettonica, individuata dall'analisi di dati strutturali e sismologici (Bianco et al., 1998), che taglia l'apparato vulcanico con direzione NNO-SSE. Pertanto, l'analisi del campo di deformazione orizzontale (Fig. 2) suggerisce che tale struttura si estende verso nord fino ad interessare il settore orientale della Piana Campana e verso sud fino alle pendici dei Monti Lattari.

Il settore sud-orientale della Piana Campana è interessato da fenomeni di subsidenza con velocità medie che raggiungono i -6 mm/anno. In quest'area, i fenomeni di carsismo che interessano il basamento carbonatico (Celico e Guadagno, 1998) e l'intenso emungimento della falda sono probabilmente le cause delle subsidenze osservate.

La Piana del fiume Volturno ed il suo estuario sono interessati da significativa subsidenza ($V_{\text{vert}} \leq -6 \text{ mm/anno}$). Tale andamento è compatibile con le stime di bilancio idrico (ENEA, 2008) che evidenziano una capacità di ricarica del bacino non sufficiente ad riequilibrare l'emungimento della falda per scopi agricoli ed industriali.

Il settore occidentale del bacino del fiume Sele mostra un andamento della componente verticale del campo di velocità più complesso. Lungo la fascia costiera si osserva un'area in subsidenza ($-6 \leq V_{\text{vert}} \leq -4 \text{ mm/anno}$) e parallelamente ad essa verso l'entroterra un'area in sollevamento ($1 \leq V_{\text{vert}} \leq 4 \text{ mm/anno}$). Al contempo, in quest'area, non si osservano evidenze di movimenti in direzione E-O. La presenza dell'area in sollevamento a ridosso di quella in subsidenza non è compatibile con gli effetti attesi dal manifestarsi di fenomeni di ingressione marina. Al contrario, sebbene in superficie non vi sia alcuna evidenza della presenza di discontinuità strutturali, la geometria del campo di deformazione verticale sembrerebbe suggerire la presenza di una faglia diretta sepolta con piano in direzione NNO-SSE.

Per quanto riguarda l'analisi del campo di deformazione dell'intera fascia sismogenetica dell'Appennino campano, va sottolineato che non ci sono particolari evidenze di aree caratterizzate da significativi fenomeni di subsidenza o di sollevamento. Tutta la fascia appenninica risulta relativamente stabile con valori medi di velocità verticale per lo più compresi nell'intervallo $-1 \div 1 \text{ mm/anno}$. Tuttavia, si rileva la presenza di aree, di estensione limitata, con evidenze più marcate di subsidenza ($-4 \leq V_{\text{vert}} \leq -1 \text{ mm/anno}$), ma il confronto con la distribuzione dei fenomeni franosi (SGN, 2008) riconduce tali abbassamenti a manifestazioni superficiali di instabilità gravitativa.

Infine, in corrispondenza del massiccio carbonatico degli Alburni, si osservano valori di sollevamento dell'ordine di $1 \div 4 \text{ mm/anno}$ ed una componente di movimento orizzontale verso ovest di circa $3 \div 10 \text{ mm/anno}$. Tale geometria del campo di deformazione è chiaramente riconducibile al movimento delle faglie trascorrenti a componente inversa che bordano la struttura.

Ringraziamenti

Questo lavoro è stato realizzato nell'ambito del progetto TELLUS (TELErilevamento Laboratori Unità di Supporto), che a sua volta è stato sviluppato nel contesto del progetto PODIS (Progetto Operativo Difesa Suolo) del Ministero dell'Ambiente e per la Tutela del Territorio e del Mare, ed è stato finanziato su fondi dell'Unione Europea - QCS 2000-2006 PON-ATAS.

Bibliografia

- Bianco, F., Castellano, M., Milano, G., Ventura, G., Vilardo, G. (1998), "The Somma-Vesuvius stress field induced by regional tectonics: evidences from seismological and mesostructural data", *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 82, 199–218.
- Casu, F., Manzo, M., Lanari, R. (2006), "A quantitative assessment of the SBAS algorithm performance for surface deformation retrieval", *Remote Sensing of Environment*, 102, 195–210.
- Celico, P., Guadagno, F.M. (1998), "L'instabilità delle coltri piroclastiche delle dorsali carbonatiche in Campania: attuali conoscenze", *Quaderni Geologia Applicata*, 5, 75-133.
- Ciaranfi N, Cinque A, Lambiase S, Pieri P, Rapisardi L, Ricchetti G, Sgrosso I, Tortorici L. (1981) "Proposta di zonazione sismotettonica dell'Italia Meridionale", *Rend. Soc. Geol. It.*, 4:493–496
- De Vita, P., Vallario, A. (1996), "Il rischio idrogeologico del Somma-Vesuvio", *Mem. Soc. Geol. It.*, 51, 1075-1085.
- De Vita, S., Sansivero, F., Orsi, G., Marotta E. (2006), "Cyclical slope instability and volcanism related to volcano-tectonism in resurgent calderas: The Ischia island (Italy) case study", *Engineering Geology*, 86, 148–165.
- ENEA (2002), *Progetto Regi Lagni. Stato della qualità delle acque 2*. ENEA, Sezione Protezione-Idrogeologica, Roma.
- ENEA (2008), *Analisi di specifiche situazioni di degrado della qualità delle acque in Campania, in riferimento ai casi che maggiormente incidono negativamente sulle aree costiere*. ENEA, Sezione Protezione-Idrogeologica, Roma.
- Ferranti, L., Oldow, J. S. (2005), "Latest Miocene to Quaternary horizontal and vertical displacement rates during simultaneous contraction and extension in the Southern Apennines orogen, Italy", *Terra Nova*, 17, 209–214.
- Ferranti, L., Oldow, J. S., D'Argenio, B., Catalano, R., Lewis, D., Marsella, E., Maschio, L., Pappone, G., Pepe, F., Sulli, A. (2008), "Active deformation in Southern Italy, Sicily and southern Sardinia from GPS velocities of the Peri-Tyrrhenian Geodetic Array (PTGA)", *Boll. Soc. Geol. It.*, in stampa.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. (2001), "Permanent Scatters in SAR Interferometry", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39, 8-20.
- Lanari, R., Casu, F., Manzo, M., Zeni, G., Berardino, P., Manunta, M., Pepe, A. (2007), "An overview of the Small Baseline subset algorithm: A DInSAR technique for surface deformation analysis", *PAGEOPH*, 164, 637–661.
- Manzo, M., Ricciardi, G.P., Casu, F., Ventura, G., Zeni, G., Borgström, S., Berardino, P., Del Gaudio, C., Lanari, R. (2006), "Surface deformation analysis in the Ischia island (Italy) based on spaceborne radar interferometry", *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 151, 399–416.
- Mueller, T.G., Pusuluri, N. B., Mathias, K.K., Cornelius, P.L., Barnhisel, R.I., Shearer S.A. (2004), "Map quality for ordinary Kriging and inverse distance weighted interpolation", *Soil Science Society of America Journal*, 68, 2042–2047.
- Sepe, V., Atzori, S., Ventura, G. (2007), "Subsidence due to crack closure and depressurization of hydrothermal systems: a case study from Mt Epomeo (Ischia Island, Italy)", *Terra Nova*, 19 (2), 127–132.
- Servizio Geologico Nazionale (2008), *Progetto IFFI - Inventario Fenomeni Franosi in Italia*, Cartografia on-line, APAT, Roma, (http://www.apat.gov.it/site/it-IT/Progetti/IFFI_-_Inventario_dei_fenomeni_franosi_in_Italia).
- Todesco, M., Rutqvist, J., Chiodini, G., Pruess, K., Oldenburg, C.M. (2004), "Modeling of recent volcanic episodes at Phlegrean Fields (Italy): geochemical variations and ground deformation", *Geothermics*, 33, 531-547.