

Monitoraggio dei vulcani del distretto campano mediante tecniche avanzate di Interferometria Radar ad Apertura Sintetica (DInSAR)

Francesco Casu, Gianfranco Fornaro, Mariarosaria Manzo, Eugenio Sansosti

Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente (IREA, Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)
via Diocleziano 328, 80124 Napoli, {casu.f, fornaro.g, manzo.mr, sansosti.e@irea.cnr.it}

Abstract

Grazie a delle caratteristiche uniche che consentono di ottenere misure con elevata densità spaziale su aree vaste, i sensori radar da satellite sono strumenti largamente utilizzati nell'ambito del monitoraggio delle deformazioni in diversi settori. Parallelamente è in corso una forte espansione del settore tecnologico con la messa in orbita di nuovi sensori e di costellazioni di satelliti. Ciò conduce alla disponibilità di archivi di dati che consentono di monitorare ogni area della superficie terrestre. Sfruttando gli archivi storici dei satelliti dell'Agenzia Spaziale Europea sull'area Campana ed una delle tecniche più popolari e diffuse a livello mondiale, la tecnica *Small Baseline Subset* sviluppata in IREA, in questo lavoro si illustrano le potenzialità applicative per il monitoraggio di aree vulcaniche.

Introduzione

I Radar ad Apertura Sintetica (SAR) sono strumenti che utilizzano una radiazione alle microonde, in grado di osservare, ad elevata risoluzione, la superficie terrestre giorno e notte ed in ogni condizione meteorologica: caratteristiche che consentono di osservare fenomeni dinamici. Le tecniche Interferometriche (InSAR), ottenute combinando coppie di dati, si utilizzano tuttora per mappare la topografia a livello globale della superficie terrestre. (Farr et al., 2007, Kriger et al., 2007). L'Interferometria Differenziale SAR (DInSAR), consente di misurare le deformazioni del terreno partendo dalla differenza di fase (interferogramma) tra due immagini SAR acquisite su due diverse orbite in passaggi ripetuti (Massonnet et al., 1994, Massonnet et al., 1995).

Un singolo interferogramma differenziale, ottenuto depurando l'interferogramma dal contributo topografico valutato a partire da un DEM (*Digital Elevation Model*) esterno, è affetto da diverse sorgenti di errore. Oltre alle imprecisioni del DEM, che può limitare la separazione spaziale delle orbite, un contributo fondamentale è associato alla variazione del ritardo di propagazione in atmosfera che introduce un segnale che agisce sullo stesso piano dei contributi di deformazione lenta.

Più recentemente sono stati sviluppati algoritmi in grado di eliminare i contributi atmosferici elaborando un insieme di immagini SAR acquisite su passaggi ripetuti (Ferretti et al., 2001, Ferretti et al., 2002, Berardino et al., 2002): in tal modo si riescono a: a) filtrare gli effetti atmosferici; b) compensare inaccurately del DEM esterno per combinare anche acquisizioni con elevate separazioni spaziali e pertanto aumentare il campionamento temporale, c) a monitorare l'andamento temporale della deformazione per ogni punto con accuratezza cm/sub-cm.

In particolare, in questo lavoro, è utilizzata la tecnica denominata Small Baseline Subset (SBAS) interamente sviluppata in IREA ed ormai largamente utilizzata dalla comunità scientifica (Berardino et al., 2002). Tale tecnica è stata integrata all'interno di un sistema di supporto alle decisioni nella gestione del rischio vulcanico (denominato SRV) sviluppato per la Protezione Civile (DPC) grazie ad un finanziamento dall'Agenzia Spaziale Italiana (ASI). Nella fase dimostrativa del progetto, le serie storiche sono aggiornate entro pochi giorni dalla disponibilità di una nuova acquisizione ed immediatamente rese disponibili al DPC.

In questo lavoro sono presentati i risultati recenti di questo progetto relativi all'area del distretto vulcanico campano, comprendente l'area del Vesuvio, la caldera dei Campi Flegrei e l'isola di Ischia. In particolare, sono stati elaborati tutti i dati presenti in archivio generando una unica serie storica che va dal 1992 al 2009 che prevede la combinazione dei dati dei satelliti ERS ed ENVISAT. Tale risultato è stato ottenuto sia per l'orbita ascendente sia per quella discendente.

La tecnica DInSAR e l'algoritmo SBAS

Per comprendere le caratteristiche della tecnica SBAS è necessario descrivere brevemente il principio DInSAR: l'interferenza (differenza di fase), dato dal battimento (prodotto coniugato) della risposta punti al suolo in due immagini SAR, acquisite in tempi diversi (la cui separazione viene indicato come base temporale) e da orbite diverse (la cui separazione viene indicato come base spaziale), è la composizione di diversi termini che possono essere classificati in due categorie principali (Ferretti et al., 2001, Ferretti et al., 2002, Berardino et al., 2002):

- a) geometrici (termini associati alla distanza sensore-bersaglio);
- b) di rumore (es. ritardo di propagazione in atmosfera, cambiamenti della risposta dei bersagli nel tempo e in direzione di osservazione, ecc.)

Il contributo geometrico associato alla distanza sensore-bersaglio si compone di un termine che è sensibile (proporzionalmente alla base spaziale) alla topografia e di un termine legato alla possibile variazione della distanza da un passaggio all'altro.

I contributi di rumore associati ai cambiamenti delle proprietà di scattering sono denominati di "decorrelazione". Si distinguono effetti di decorrelazione temporale (cambiamenti di natura random nel tempo) ed effetti di decorrelazione angolare (cambiamenti legati al differente angolo di vista dei pixel). La decorrelazione angolare cresce con l'aumentare della separazione spaziale dei passaggi. Le variazioni di ritardo di propagazione in atmosfera (APD, dall'inglese *Atmospheric Phase Delay*), ha delle ben determinate caratteristiche di correlazione spazio temporali (Hanssen, 2001).

Basandosi sulla caratterizzazione con modelli deterministici e statistici, le tecniche DInSAR multipassaggio operano, partendo da un sufficiente numero di acquisizioni (tipicamente maggiore di 25), una separazione dei vari contributi. Tale approccio consente quindi di combinare numerose immagini degli archivi ottenendo: a) un filtraggio degli effetti atmosferici; b) una compensazione delle inaccurately del DEM esterno per combinare anche acquisizioni con elevate separazioni spaziali e pertanto aumentare il campionamento temporale, c) un monitoraggio dell'andamento temporale della deformazione in un gran numero dei milioni di pixel delle immagini con accuratezza cm/sub-cm.

La tecnica SBAS deve la sua popolarità proprio alle caratteristiche di continuità con le analisi DInSAR classiche a singola coppia utilizzate in modo intensivo negli scorsi anni nel campo geofisico (Massonnet et al., 1994, Massonnet et al., 1995). SBAS svolge, infatti, un'analisi di interferogrammi multilook: vale a dire di interferogrammi su cui è operata, sfruttando l'ipotesi di scattering distribuito che ben si adatta anche alle scene rurali, una media spaziale che permette di migliorare la qualità del segnale di fase. Un altro vantaggio della SBAS è relativo alla mitigazione degli effetti di decorrelazione che degrada la qualità del segnale interferometrico. La tecnica SBAS utilizza infatti interferogrammi scelti con soglie sulla separazione spaziale e temporale. Infine, l'approccio SBAS utilizza la tecnica della Decomposizione a Valori Singolari (SVD) tecnica durante l'inversione della fase interferometrica a fase assoluta (legata alle possibili deformazioni nel tempo): ciò consente di gestire anche il caso in cui, a causa delle limitazioni delle basi spaziali e temporali, le acquisizioni possono essere raggruppate in diversi sottoinsiemi indipendenti (da cui il nome SBAS). Quest'ultima caratteristica consente inoltre di integrare facilmente i dati dei sensori diversi (per esempio ERS ed ENVISAT) (Pepe et al., 2005). L'approccio SBAS è stato largamente utilizzato e validato (Casu et al., 2006; Lanari et al., 2007) per l'indagine delle deformazioni associate a fenomeni diversi, come quelli che si verificano in aree vulcaniche e sismiche, in aree dove si praticano estrazioni dal sottosuolo e in aree caratterizzate dalla presenza di frane lente.

Dataset

In questo lavoro sono stati utilizzati due dataset costituiti da dati SAR acquisiti dai sensori ERS-1, ERS-2 ed ENVISAT dell'Agenzia Spaziale Europea e relativi all'area del distretto vulcanico campano, comprendente il Vesuvio, la caldera dei Campi Flegrei e l'isola di Ischia. Il primo dataset è costituito da 143 dati SAR (95 ERS-1/2 e 48 ENVISAT) acquisiti su orbita discendente (track 36, frame 2781) tra giugno 1992 e giugno 2009 e con i quali sono stati generati 410 interferogrammi differenziali; il secondo da 126 dati SAR (74 ERS-1/2 e 52 ENVISAT) acquisiti su orbita ascendente (track 129, frame 809) nel periodo gennaio 1993 - giugno 2009 e che sono stati utilizzati per generare 364 interferogrammi; in entrambi i casi, ogni coppia interferometrica è stata scelta con una baseline perpendicolare minore di 400 m. Inoltre, tutti i prodotti SAR generati, a valle di un'operazione di multilook (Rosen et al., 2000), sono caratterizzati da una risoluzione spaziale di circa 100 x 100 m. La tecnica SBAS ha consentito di combinare acquisizioni dai sensori ERS ed ENVISAT operanti a diversa frequenza.

Risultati

Come primo risultato dell'elaborazione SBAS, in Figura 1a-b sono mostrate le mappe di velocità media di deformazione (in falsi colori) geocodificate e sovrapposte alle immagini modulo SAR (in scala di grigi) relative all'orbita discendente e ascendente, rispettivamente. Si sottolinea che solo le zone dove la misura di deformazione non è affetta da rumore (zone "coerenti") sono incluse nelle mappe a falsi colori. Le due figure mostrano chiaramente diversi pattern di deformazione in molte aree: l'isola di Ischia, la caldera dei Campi Flegrei, il quartiere Vomero nella città di Napoli, molte altre zone nell'area del Vesuvio e per finire la sommità del vulcano. Tali fenomeni deformativi sono associati ad attività naturale (vulcani attivi, frane, compattazione dei suoli, ecc.) ed antropica (emungimento di acque, scavi nel sottosuolo, ecc.)

Inoltre, per ogni pixel coerente della scena osservata è possibile, applicando la tecnica SBAS, seguire l'evoluzione temporale della deformazione misurata. Nei plot di Figura 2 sono mostrate le serie storiche di deformazione in corrispondenza di pixel collocati in aree di particolare interesse. In Figura 2a e 2b sono riportate le serie storiche di deformazione nell'area di massima subsidenza dei Campi Flegrei, ottenute dai dati SAR (ERS: triangoli neri; ENVISAT: triangoli rossi) acquisiti da orbite discendenti e ascendenti, rispettivamente. E' evidente che dopo un periodo di quiescenza o lenta subsidenza (che va dal 1992 all'inizio del 2000), l'attività vulcanica si è manifestata con due uplift (confermati anche dalle misure di livellazione dell'Osservatorio Vesuviano): il primo nella primavera del 2000 (Lundgren et al., 2001) ed il secondo nel periodo che va dall'estate del 2005 alla fine del 2006 (Trasatti et al., 2008). Entrambi i fenomeni sono stati rilevati dai sensori radar già durante i periodi di maggiore interesse. Le Figure 2c e 2d mostrano, invece, l'evoluzione temporale della subsidenza relativa ad una frana nel settore nord-occidentale dell'isola di Ischia (Manzo et al., 2006) ed alla sommità del Vesuvio (Borgia et al., 2005) ottenute utilizzando, rispettivamente, dati SAR discendenti e ascendenti. In entrambi i casi, i fenomeni deformativi sono piuttosto continui rispetto all'intero intervallo di osservazione.

Conclusioni

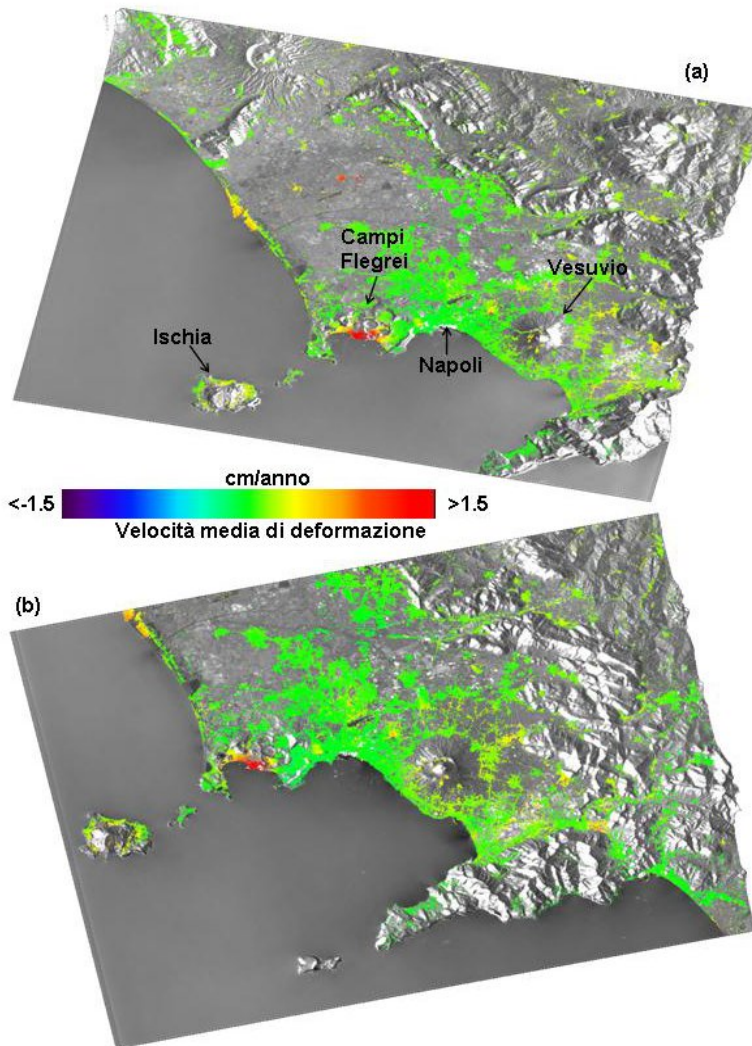
I risultati presentati in questo lavoro mostrano le potenzialità applicative della tecnica DInSAR per il monitoraggio delle deformazioni del suolo a livello regionale. In particolare si è mostrato come utilizzando archivi storici di dati SAR sia possibile condurre analisi storiche sull'arco di due decenni che consentono di fornire informazioni utili allo studio e caratterizzazione dei rischi naturali. Parallelamente, la tecnica DInSAR consente anche di fornire informazioni, spazialmente dense, utili in situazioni critiche. In tal senso, rispetto ai sensori della scorsa generazione (ERS ed ENVISAT) in cui la frequenza di misurazione temporale è dell'ordine di una ogni 35 giorni, i sensori di ultima generazione (su tutti la costellazione italiana COSMO/SKYMED) consentono di infittire il campionamento temporale fino ad una acquisizione ogni 4, 5 giorni fornendo, pertanto, un salto tecnologico per le applicazioni di monitoraggio in situazioni di emergenza.

Ringraziamenti

Questo lavoro è stato in parte supportato dal progetto pilota dell’Agenzia Spaziale Italiana “Sistema Rischio Vulcanico”.

Riferimenti bibliografici

- Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E. (2002), “A new Algorithm for Surface Deformation Monitoring based on Small Baseline Differential SAR Interferograms”, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 40: 2375-2383.
- Borgia A., Tizzani, P., Solaro, G., Manzo, M., Casu, F., Luongo, G., Pepe, A., Berardino, P., Fornaro, G., Sansosti, E., Ricciardi, G. P., Fusi, N., Di Donna, G., Lanari, R. (2005), “Volcanic spreading of Vesuvius, a new paradigm for interpreting its volcanic activity”, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L03303, doi:10.1029/2004GL022155.
- Casu F, Manzo M, Lanari R (2006), “A quantitative assessment of the SBAS algorithm performance for surface deformation retrieval from DInSAR data”, *Remote Sensing of Environment*, 192: 195-210.
- Farr, T. G., et al. (2007), “The Shuttle Radar Topography Mission”, *Rev. Geophys.*, 45, RG2004, doi:10.1029/2005RG000183.
- Ferretti A., Prati C., Rocca F. (2000), “Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry”, *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.*, 38 (5): 2202–2212.
- Ferretti A., Prati C., and Rocca F. (2001), “Permanent scatterers in SAR interferometry”, *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.*, 39 (1): 8–20.
- Hanssen, R. (2001). *Radar Interferometry*. Kluwer Academic Publishers
- Kruger G, et al. (2007), “TanDEM-X: A Satellite Formation for High-Resolution SAR Interferometry”, *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.*, 45 (11): 3317–3341.
- Lanari, R., Casu, F., Manzo, M., Lundgren, P. (2007), “Application of the SBAS-DInSAR technique to fault creep: a case study of the Hayward fault, California”, *Remote Sensing of Environment Journal*, vol. 109, 1, pp. 20-28, doi: 10.1016/j.rse.2006.12.003.
- Lundgren, P., S. Usai, E. Sansosti, R. Lanari, M. Tesauro, G. Fornaro, P. Berardino (2001), “Modeling surface deformations observed with synthetic aperture radar interferometry at Campi Flegrei caldera”, *J. Geophys. Res.*, 106, 19,355– 19,366.
- 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”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 151, pp 399-416, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2005.09.010.
- Massonnet, D. et al. (1994), “Radar interferometric mapping of deformation in the year after the Landers earthquake”, *Nature*, 369.
- Massonnet D., Briole P., Arnaud A. (1995), “Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar Interferometry”, *Nature*, 375: 567-570
- Pepe, A., Sansosti, E., Berardino, P., & Lanari, R. (2005) “On the Generation of ERS/ENVISAT DInSAR Time-Series via the SBAS technique”, *IEEE on Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2(3), 265–269.
- Rosen, P. A., S. Hensley, I. R. Joughin, F. K. Li, S. N.Madsen, E. Rodriguez, R. M. Goldstein (2000), “Synthetic aperture radar interferometry”, *Proc. IEEE*, 88, 333– 382.
- Trasatti, E., Casu, F., Giunchi, C., Pepe, S., Solaro, G., Tagliaventi, S., Berardino, P., Manzo, M., Pepe, A., Ricciardi, G.P., Sansosti, E., Tizzani, P., Zeni, G., Lanari, R. (2008), “The 2004–2006 uplift episode at Campi Flegrei caldera (Italy): Constraints from SBAS-DInSAR ENVISAT data and Bayesian source inference”, *Geophysical Research Letters*, vol. 35, L073078, doi:10.1029/2007GL033091.



*Figura 1 – Risultati dell’analisi SBAS relativa al distretto vulcanico campano.
(a) Mappa in falsi colori delle velocità medie di deformazione sovrapposta all’immagine modulo valutate da dati SAR acquisiti su orbite discendenti. (b) Mappa in falsi colori delle velocità medie di deformazione sovrapposta all’immagine modulo valutate da dati SAR acquisiti su orbite ascendenti.*

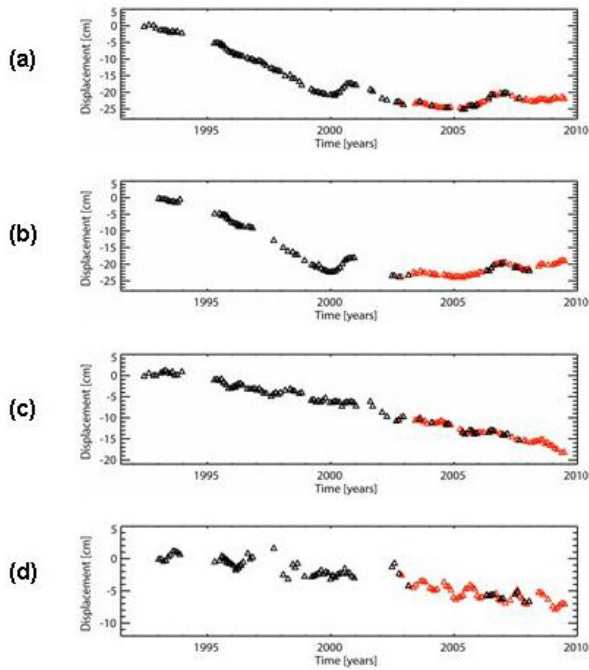


Figura 2 – Serie storiche di deformazione relative a punti collocati in aree di particolare interesse: caldera dei Campi Flegrei (a e b), isola di Ischia (c) e Vesuvio (d). I plot a e c sono relativi a dati SAR discendenti, i plot b e d a dati SAR ascendenti. I dati ERS-1 ed ERS-2 sono rappresentati da triangoli neri, gli ENVISAT da triangoli rossi.