

## **UN APPROCCIO MULTISCALARE PER L'USO DEI DATI DInSAR NELL'ANALISI DI FENOMENI DI SUBSIDENZA IN AREE URBANE**

Leonardo Cascini, Settimio Ferlisi, Dario Peduto, Livia Arena  
*Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Salerno*

*e-mail: [l.cascini@unisa.it](mailto:l.cascini@unisa.it); [sferlisi@unisa.it](mailto:sferlisi@unisa.it); [dpeduto@unisa.it](mailto:dpeduto@unisa.it); [liviaarena@libero.it](mailto:liviaarena@libero.it)*

Gianfranco Fornaro

*IREA-CNR, Napoli*

*e-mail: [fornaro.g@irea.cnr.it](mailto:fornaro.g@irea.cnr.it)*

### **Sommario**

La presente comunicazione illustra un approccio metodologico per l'utilizzo dei dati di interferometria differenziale derivanti dal processamento di immagini acquisite da radar ad apertura sintetica (DInSAR) nell'analisi, a diverse scale di riferimento, di fenomeni di subsidenza che interessano aree urbanizzate. I risultati conseguiti con riferimento ad alcuni casi di studio lasciano intravedere significative possibilità d'impiego delle tecniche DInSAR nell'ambito di tematiche proprie dell'Ingegneria Geotecnica.

### **Introduzione**

Nell'ultimo decennio il monitoraggio di strutture/infrastrutture in aree sede di fenomeni di subsidenza ha ricevuto un notevole impulso grazie alla messa a punto di tecniche interferometriche differenziali (DInSAR) per l'elaborazione di dati acquisiti da radar ad apertura sintetica (SAR) montati su piattaforme satellitari. Gli algoritmi finalizzati alla stima degli spostamenti di punti scelti della superficie topografica offrono numerosi vantaggi tra i quali: la disponibilità di un catalogo di dati che si estende dal 1992 ad oggi; la elevata precisione delle misure conseguibili; i costi decisamente contenuti anche nel monitoraggio di aree di rilevante estensione.

All'interesse della Comunità scientifica verso l'impiego di dati DInSAR nell'ambito di problematiche territoriali si è aggiunto, di recente, anche quello degli Enti preposti al controllo e alla gestione del territorio. Ne sono una chiara testimonianza sia i Progetti nazionali – quali il Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare – e sia le iniziative avviate a livello regionale. Tra queste ultime si cita il Progetto TELLUS grazie al quale il Settore Difesa del Suolo della Regione Campania ha reso disponibili, per l'intero territorio regionale, le serie storiche dei dati acquisiti, per il periodo 1992-2007, dai satelliti ERS1, ERS2 e RADARSAT1.

Sulla base dell'esperienza acquisita dagli scriventi nell'analisi e interpretazione dei dati telerilevati, nella presente comunicazione si avanza la proposta di un approccio metodologico per l'impiego delle tecniche DInSAR nello studio di fenomeni di subsidenza a diverse scale di riferimento.

## **Le tecniche interferometriche multi passaggio: gli algoritmi ed il dataset utilizzati**

Le tecniche DInSAR multipassaggio sono oggi ampiamente utilizzate per il monitoraggio di deformazioni della superficie topografica ascrivibili a differenti fenomenologie. Tali tecniche hanno superato i limiti legati al contributo di fase dovuto all'atmosfera (Atmospheric Phase Delay) e agli errori nel modello digitale del terreno (DEM) impiegato per la sottrazione del contributo della topografia e si possono distinguere in due classi: la prima (PSInSAR) fa ricorso ai Permanent Scatterers (Ferretti et al., 2000; Kampes B.M., 2006); la seconda si avvale dell'impiego degli algoritmi Small BASeline - SBAS (Berardino et al., 2002) ed ESD (Fornaro et al., 2009) messi a punto dai ricercatori dell'IREA-CNR di Napoli.

Il dataset di immagini e le tecniche DInSAR utilizzati nelle analisi svolte nell'ambito del presente lavoro comprendono: 55 immagini acquisite dai satelliti ERS1 ed ERS2 su orbita discendente (periodo giugno 1992 – novembre 2000) processate con gli algoritmi ESD e SBAS; 72 immagini acquisite dai satelliti ERS1 ed ERS2 su orbita discendente (periodo giugno 1992 – dicembre 2000) e 59 immagini acquisite su orbita ascendente (periodo gennaio 1993 – novembre 2000) processate con la tecnica PSInSAR nell'ambito del progetto PODIS-TELLUS (2008).

La possibilità di impiego congiunto di dati DInSAR processati con diversi algoritmi è stato già testata con successo in Cascini et al. (2007a; 2011).

## **Analisi dei dati DInSAR a diverse scale di riferimento**

I passi da compiere per un utilizzo ottimale dei dati DInSAR nell'analisi dei fenomeni di subsidenza a differenti scale di riferimento sono indicati in Figura 1. Naturalmente, partendo da quanto indicato in figura, si può mettere in atto una procedura che consente l'analisi ottimale del territorio e degli effetti indotti dalla subsidenza. Nella presente nota si suggerisce una procedura che consta di tre fasi i cui passi salienti sono qui di seguito illustrati.

Nella Fase I, finalizzata all'individuazione di aree critiche, gli spostamenti della superficie topografica indotti da subsidenza possono essere analizzati a piccola scala ( $< 1:100,000$ ) interpolando, con griglia di lato pari ad almeno 100 m, dati sia a bassa e sia ad alta risoluzione. Ciò consente di generare una mappa su cui è possibile individuare, a livello preliminare, le porzioni di territorio affette da cedimenti di maggiore entità ascrivibili a differenti fenomenologie e, quindi, di enucleare le aree affette da subsidenza dovuta a cause sia naturali e sia antropiche (Cascini et al., 2007a; Peduto, 2008).

All'interno di tali aree, si possono condurre analisi a grande scala (da  $1:25.000$  a  $1:5.000$ ) finalizzate alla individuazione delle relazioni tra causa ed effetto (Fase II). A tal fine, si possono generare mappe dei cedimenti e dei gradienti di cedimento utilizzando, ad esempio, una griglia a maglie quadre di lato compreso nell'intervallo  $5 \div 25$  m. Tali mappe possono consentire, a loro volta, di individuare "zone critiche" all'interno delle quali è lecito attendersi conseguenze significative su strutture/infrastrutture esistenti; in tali zone si rendono, pertanto, necessari studi da condurre a scale di dettaglio, con il supporto di dati acquisiti da prove in sito e di rilievo del danno agli edifici.

La terza fase è mirata all'analisi del comportamento dell'edificio. In particolare, con riferimento agli edifici che richiedono un approfondimento e per i quali è garantita un'adeguata copertura di dati DInSAR ad alta risoluzione, si possono analizzare gli effetti dei cedimenti attraverso l'applicazione di criteri di danneggiabilità che si avvalgono di parametri significativi (cedimenti, rotazioni relative, rapporti di inflessione, etc.) ampiamente utilizzati nella pratica ingegneristica.

Nella presente comunicazione si presentano sinteticamente alcuni risultati ottenuti, alle diverse scale di analisi proposte, con riferimento ad alcuni casi di studio.

ANALISI DELLA SUBSIDENZA CON DATI DInSAR			
FASE	I	II	III
Tipologia Scala	Piccola	Grande	Dettaglio
Range di scala	< 100,000	1:25,000 a 1:5,000	> 1:5,000
Dati DInSAR di input	bassa/alta risoluzione	bassa/alta risoluzione	alta risoluzione
Dati di output	Mappe di subsidenza	Mappe di cedimento; mappe dei gradienti di cedimento	Profili di cedimento e calcolo delle rotazioni relative su sezioni scelte di edifici
Tipo di analisi	Individuazione di aree critiche	Individuazione di relazioni causa-effetto	Comportamento dell'edificio

Figura 1. Schema metodologico per l'impiego dei dati DInSAR nelle analisi dei fenomeni di subsidenza a diverse scale di riferimento.

## Casi di studio

In accordo con la procedura proposta si illustra un caso di studio per il quale si sono sviluppate le tre fasi di analisi partendo dalla piccola scala.

*Fase I.* L'analisi preliminarmente ha riguardato l'intero territorio della Piana Campana che si estende per circa 2.280 km<sup>2</sup> (Fig. 2). Le aree coperte (individuate con una griglia a maglie quadre di lato pari a 250 m) dal dato DInSAR, sia ad alta e sia a bassa risoluzione, sono state distinte in stabili o instabili a seconda della presenza o meno al loro interno di un dato telerilevato caratterizzato da un valore soglia di velocità pari a 2 mm/anno (Cascini et al., 2007a). La mappa di Figura 2 evidenzia che possono essere così individuate almeno 5 aree instabili: la foce del fiume Volturno; l'area Flegrea; il quartiere Vomero di Napoli; una fascia comprendente alcuni Comuni vesuviani; la città di Sarno.

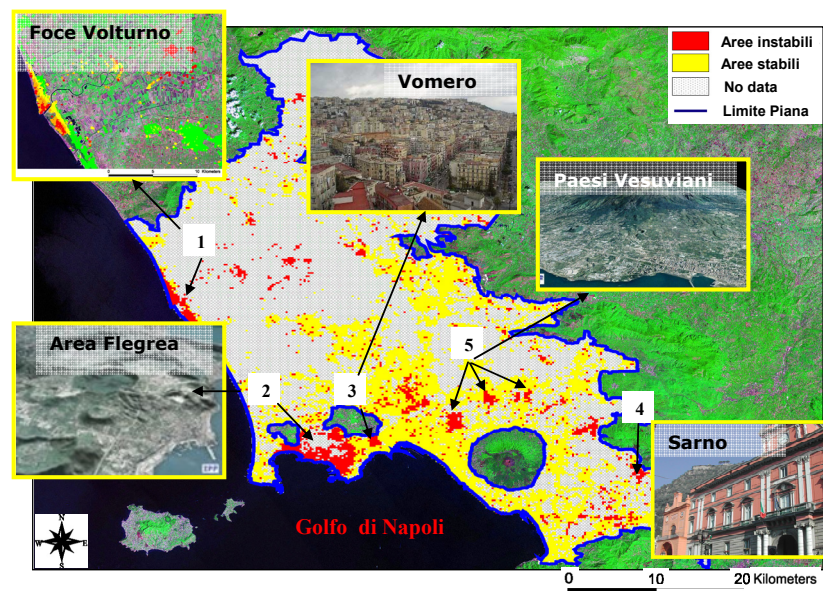


Figura 2. Aree in movimento all'interno della Piana Campana (modificata da Cascini et al., 2007a).

Come è facile intuire, gli spostamenti della superficie topografica registrati in queste aree nel periodo di osservazione (giugno 1992 – novembre 2000) sono da collegare a fenomenologie differenti, ovvero: erosione costiera, subsidenza e inclusione del cuneo salino

per quel che riguarda la foce del fiume Volturno; fenomeni bradisismici nell'area Flegrea; cedimenti indotti in superficie da scavi in sotterraneo nell'area del Vomero; deformazioni indotte dal complesso vulcanico del Somma-Vesuvio nella fascia vesuviana; subsidenza legata a forti emungimenti dal sottosuolo nell'area di Sarno.

*Fase II.* Con riferimento a quest'ultima problematica, sono state condotte analisi a grande scala con dati DInSAR a bassa ed alta risoluzione, utilizzando l'intero dataset disponibile.

Come mostrato in Cascini et al. (2011), la combinazione di immagini acquisite su orbita ascendente e discendente ha consentito di verificare che i movimenti avvengono prevalentemente lungo la direzione verticale. Sulla base di tale ipotesi, le misure di spostamento sono state prima proiettate lungo la verticale (Cascini et al., 2006) e, quindi, interpolate su una griglia a maglie quadrate di lato pari a 10 m per la generazione di mappe di cedimento e di gradiente di cedimento. Con riferimento al periodo 1992-2000, la mappa in Figura 3 mostra che i più alti valori di cedimento (circa 15 cm) si attingono nell'area, riportata negli zoom di Figura 3 e Figura 4, dove gli strati di torba nel sottosuolo raggiungono lo spessore di 6 m (Cascini e Di Maio, 1994). In quest'area, dove si registrano anche i massimi gradienti di cedimento (Fig. 4), sono stati registrati i danni agli edifici di severità più elevata verso la fine degli anni ottanta.

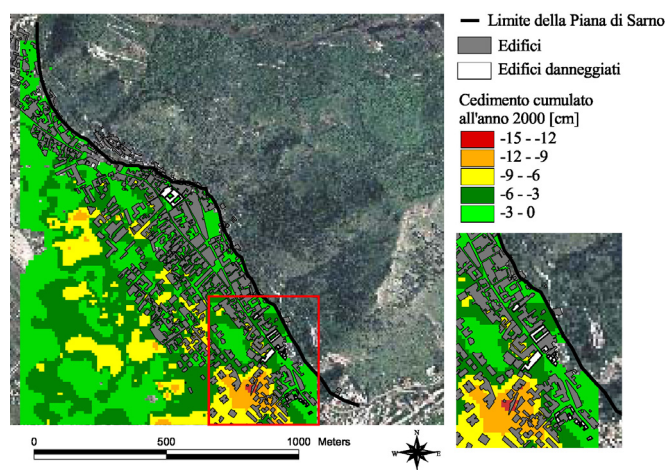


Figura 3. Mappa dei cedimenti cumulati derivante dalla proiezione di dati SBAS ad alta risoluzione e PSInSAR lungo la direzione verticale ed interpolati su una griglia a maglie quadrate di lato 10 x 10 m (periodo 1992-2000).

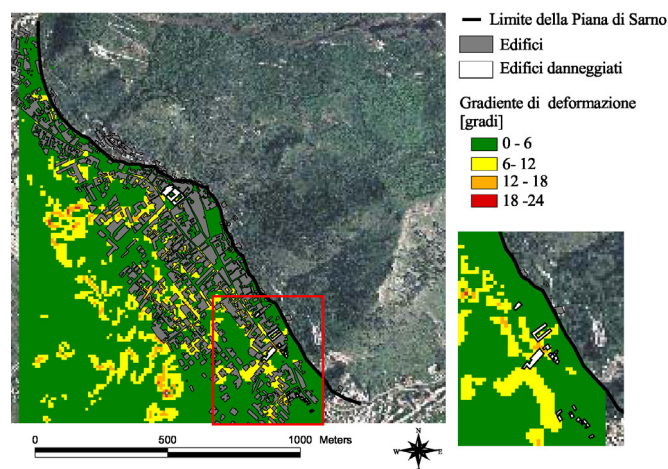


Figura 4. Mappa dei gradienti di cedimento cumulati derivante dalla proiezione di dati SBAS ad alta risoluzione e PSInSAR lungo la direzione verticale ed interpolati su una griglia a maglie quadrate di lato 10 x 10 m (periodo 1992-2000).



*Fase III.* Nell'ambito dell'area così individuata è stata applicata la terza fase del processo proposto ad una costruzione coperta dai dati PS e dai dati SBAS ad alta risoluzione (Fig. 5).

In particolare, l'edificio analizzato risale agli inizi del novecento ed è costituito da una struttura a due piani in muratura portante su fondazioni superficiali. I dati DInSAR ricadenti sull'edificio sono stati interpolati su una griglia a maglie quadre di lato di 5 m con l'ausilio della quale si sono computati i cedimenti cumulati nel periodo giugno 1992 – novembre 2000 lungo le due sezioni indicate in Figura 5 nell'ipotesi che l'edificio si deformi secondo un meccanismo di taglio puro (Cascini et al., 2007b).

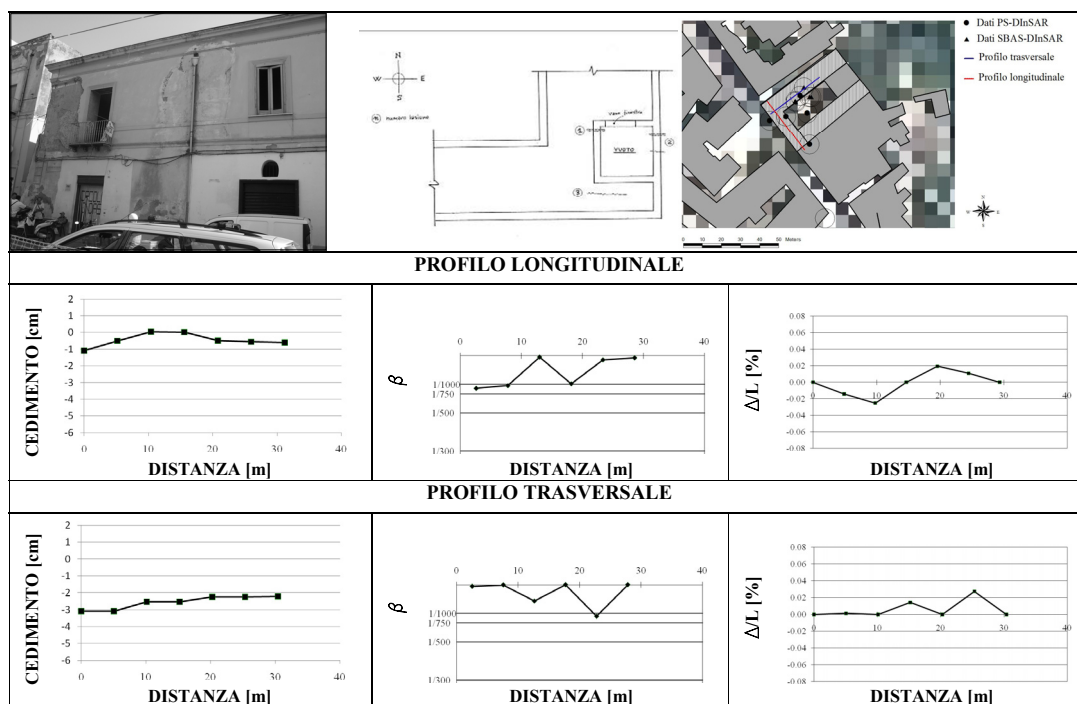


Figura 5. Cedimenti cumulati, rotazioni relative e rapporti di inflessione calcolati dai dati DInSAR lungo una sezione trasversale ed una longitudinale nel periodo giugno 1992 – novembre 2000.

Dai diagrammi ottenuti si riconosce come l'edificio sia animato da un atto di moto rotatorio con asse di rotazione disposto longitudinalmente, in armonia con quanto evidenziato da Nigro (1992) sulla base degli esiti di un rilievo dello stato di fessurazione. Di particolare interesse appaiono i diagrammi relativi all'andamento, lungo le sezioni scelte, dei valori cumulati della rotazione relativa  $\beta$  e del rapporto d'inflessione  $\Delta/L$  (Burland e Wroth, 1974). Tali diagrammi evidenziano la presenza di sezioni deboli in cui i suddetti parametri attingono i valori più elevati senza, peraltro, giustificare l'occorrenza del danno. Tale circostanza è confermata dal fatto che, sebbene nell'edificio in esame si siano manifestati dei danni prima dell'inizio della serie storica dei dati DInSAR e in concomitanza di un periodo di forti emungimenti (Cascini e Di Maio, 1994), non si è registrato alcun incremento della severità del danno tra il 1992 e il 2006, anno in cui si è effettuato un nuovo rilievo (Cascini et al., 2007b).

## Conclusioni

Nella presente comunicazione si sono illustrati alcuni risultati di una ricerca finalizzata alla definizione di un approccio metodologico che consta di tre fasi ed è rivolto all'impiego ottimale dei dati DInSAR nell'analisi, a diverse scale di riferimento, di fenomeni di subsidenza in aree urbane. In particolare, i risultati ottenuti a piccola scala (Fase I) hanno

evidenziato che i dati DInSAR possono essere proficuamente utilizzati per una preliminare individuazione delle porzioni di territorio affette da cedimenti della superficie topografica indipendentemente dalle cause che ne sono alla base.

Con riferimento, invece, alla grande scala (Fase II) le carte tematiche generate per una zona risultano significative della distribuzione spaziale di alcune grandezze (cedimento e rotazione relativa) che intervengono nei criteri di danneggiabilità degli edifici usualmente adottati nell'Ingegneria Geotecnica consentendo di mettere in relazione cause ed effetti.

Infine, a scala di dettaglio (Fase III), i dati interferometrici hanno evidenziato la possibilità di analizzare il comportamento degli edifici con l'impiego dei criteri di danneggiabilità per l'oggettivazione della severità del danno rilevato oltre che per il controllo della sua evoluzione nel tempo. In tale ottica, i risultati ad oggi conseguiti appaiono ancora più promettenti se si tiene conto che i dati SAR acquisiti dai sensori di ultimissima generazione, quali Cosmo-SkyMed e TerraSAR-X, offrono una risoluzione spaziale tale da permettere un controllo capillare dei singoli edifici ricadenti in aree urbane.

### **Bibliografia**

- 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. and Remote Sens.*, 40 (11): 2375-2383.
- Burland J.B., Wroth C.P., (1974). "Allowable and differential settlement of structures, including damage and soil-structure interaction". *Proc. Conf. on Settlement of Structures*, Cambridge University, pp. 611-654.
- Cascini L., Di Maio C., (1994). "Emungimento delle acque sotterranee e cedimenti nell'abitato di Sarno: analisi preliminare". *Rivista Italiana di Geotecnica*, 3, 217-231.
- Cascini L., Ferlisi S., Fornaro G., Lanari R., Peduto D., Zeni G., (2006). "Subsidence monitoring in Sarno urban area via multitemporal DInSAR technique". *International Journal of Remote Sensing*, 27 (8), 1709-1716.
- Cascini L., Ferlisi S., Fornaro G., Peduto D., (2011). "The use of DInSAR techniques to analyse ground deformations and related effects to buildings in urban areas". Accettato la pubblicazione negli atti di IS-SEOUL 2011, 5th Int. Symp. on deformation characteristics of geomaterials, Seoul, South Korea, 31 Agosto - 3 Settembre 2011.
- Cascini, L., Di Nocera S., Ferlisi, S., Fornaro, G. & Peduto, D. (2007a). "A land subsidence study via DInSAR technique over large urbanized areas". *Urban Remote Sensing Joint Event URS 2007*, Parigi. 11-13 April 2007. IEEE Catalogue number: 07EX1577, ISBN:1-4244-0712-5.
- Cascini L., Ferlisi S., Peduto D., Fornaro G., Manunta M., (2007b). "Analysis of a subsidence phenomenon via DInSAR data and geotechnical criteria". *Italian Geotechnical Journal*, 4, 50-67
- Ferretti, A., Prati, C. & Rocca, F. (2000). "Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry", *IEEE Transaction Geoscience and Remote Sensing*, 38 (5): 2202-2212.
- Fornaro G., Pauciuolo A., Serafino F., (2009). "Deformation monitoring over large areas with multipass differential SAR interferometry: a new approach based on the use of spatial differences". *International Journal of Remote Sensing* 30 (6), 1455-1478
- Kampes B. M., (2006). *Radar Interferometry: Persistent Scatterer Technique*. Springer
- Nigro E., (1992). *Relazione sul rilievo dello stato fessurativo di edifici dell'area urbana del Comune di Sarno* (non pubblicato).
- Peduto D., (2008). *Analysis of ground deformations related to subsidence and landslide phenomena via DInSAR Techniques*. Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Salerno. Relatore Cascini L., Correlatore Fornaro G.