

APPLICAZIONE DELLA TECNICA DInSAR (DIFFERENTIAL INTERFEROMETRIC SAR) PER IL MONITORAGGIO DI FENOMENI FRANOSI A CINEMATICA LENTA O INTERMITTENTE

Diego Di Martire, Massimo Ramondini, Domenico Calcaterra
Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Geotecnica ed Ambientale, Università di Napoli
"Federico II"
diego.dimartire@unina.it, ramondin@unina.it, domenico.calcaterra@unina.it

Giuseppe Ruello, Antonio Iodice
Dipartimento di Ingegneria Elettronica e delle Telecomunicazioni, Università di Napoli
"Federico II"
ruello@unina.it, iodice@unina.it

Sommario

Il presente lavoro è incentrato sull'applicazione della tecnica interferometrica DInSAR per la valutazione degli spostamenti superficiali nell'ambito del monitoraggio della frana di Calitri (AV), riattivata dal terremoto del 23 novembre 1980. Dopo aver processato gli interferogrammi per le immagini disponibili (ENVISAT - periodo 2003-2010) sono state generate le mappe di velocità e calcolati gli spostamenti, secondo le geometrie di acquisizione *ascending* e *descending*. I risultati di tali elaborazioni sono stati confrontati con gli spostamenti misurati mediante gli inclinometri installati in situ.

Introduzione

Negli ultimi anni sono state sviluppate tecniche SAR avanzate che consentono di seguire l'evoluzione temporale della deformazione osservata durante tutto il periodo di tempo esaminato. Tali tecniche, denominate *Advanced DInSAR* (A-DInSAR), lavorando su *set* di immagini acquisite in istanti di tempo successive, consentono di monitorare fenomeni deformativi, misurando gli spostamenti del suolo lungo la congiungente sensore-bersaglio (*Line of Sight* - LOS).

L'area di studio ricade nel territorio comunale di Calitri, in provincia di Avellino, dove i più antichi depositi affioranti appartengono al Gruppo delle Argille Varicolori, costituite da argille caotiche scagliose. Tali argille sono altresì interposte come olistostromi all'interno dei depositi pliocenici del Super-sistema di Ariano Irpino (sedimenti da argillosi ad arenaceo-conglomeratici). Il versante meridionale della collina di Calitri è stato interessato, anche in tempi passati, da un rilevante fenomeno franoso classificato come complesso (scorrimento roto-traslato evoluto in colamento), che ha coinvolto prevalentemente la frazione pelitica del Super-sistema di Ariano Irpino. L'ultima riattivazione di tale fenomeno, studiata da diversi autori (Del Prete e Trisorio Liuzzi, 1981; Hutchinson e Del Prete, 1985; Budetta et al., 1990; Parise e Wasowski, 1998, 1999; Martino e Scarascia Mugnozza, 2005) avvenne poche ore dopo il terremoto del 23 novembre 1980. A seguito di tale riattivazione, furono approntate diverse campagne di indagini di monitoraggio tradizionale (inclinometri e piezometri). Ad oggi sono ancora funzionanti sei inclinometri distribuiti all'interno dell'intero corpo di frana. Il presente lavoro è propedeutico all'utilizzo di immagini satellitari a maggiore risoluzione (costellazione Cosmo-SkyMed), per esaminare la possibilità di utilizzare riflettori artificiali installati nelle aree in frana, quale strumento integrativo per il monitoraggio di corpi di frana a

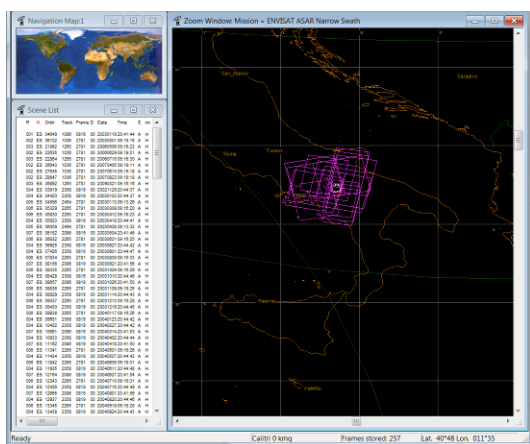
cinematica lenta.

Dati utilizzati

Nell'ambito del protocollo d'intesa siglato dal Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Geotecnica ed Ambientale e dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare sono state acquisite le immagini SAR del satellite europeo ENVISAT, disponibili nell'intervallo di tempo 2003–2010 per il sito sperimentale di Calitri. Le immagini sono state individuate mediante il *software* DESCW (*Display Earth remote sensing Swath Coverage for Windows*), messo a disposizione dalla ESA-ESRIN, che consente di consultare il catalogo delle immagini ad oggi acquisite dai satelliti ERS e ENVISAT (Fig. 1).

In particolare, sono state processate le immagini del satellite ENVISAT (Tab. 1), che ricoprono il periodo 2003-2010, consistenti in 51 immagini in geometria di acquisizione *ascending* e 39 in *descending*.

Tabella 1. Track, frame e geometria di acquisizione delle immagini di Calitri.



Calitri (40° 54' - 15° 25')			
FRAME	TRACK	Geometria di acquisizione	Numero di immagini
819	358	Right Ascending	51
2781	265	Right Descending	39

Figura 1. Lista delle immagini SAR disponibili per l'area di studio.

Risultati

Nel presente lavoro per la valutazione delle deformazioni superficiali è stata utilizzata una particolare tecnica che rientra tra quelle tipo SBAS (*Small Baseline Subset* – Bernardino et al., 2002, Lanari et al., 2004). La tecnica SBAS, implementata presso l'IREA-CNR di Napoli, utilizza la combinazione di un numero elevato di interferogrammi differenziali caratterizzati da ridotta *baseline* spaziale e temporale, consentendo di valutare le deformazioni e di generare mappe di velocità media e serie storiche di deformazione con un'accuratezza dell'ordine di frazioni della lunghezza d'onda utilizzata. Si è preliminarmente proceduto a processare tutte le immagini disponibili, individuando coppie interferometriche utili per le elaborazioni (Fig. 2). Sono state individuate 24 e 34 coppie, rispettivamente in geometria *descending* ed *ascending*, con *baseline* spaziale variabile tra 9 e 155 m per le *descending* e tra 3 e 771 m per le *ascending*. Per quanto riguarda le *baseline* temporali, gli intervalli variano tra 35 e 210 giorni per entrambe le geometrie di acquisizione. La valutazione degli spostamenti è stata effettuata considerando i punti corrispondenti alla posizione di alcuni inclinometri, in modo tale da poter successivamente eseguire un confronto tra gli spostamenti misurati con le due diverse tecniche di monitoraggio. Nella Figura 3 e nelle Tabelle 2 e 3 sono riportate le mappe di coerenza e delle velocità medie ottenute. Le aree maggiormente coerenti sono state registrate nelle zone urbanizzate (centro storico a nord e zona industriale a sud). La coerenza media riscontrata è stata comunque non molto elevata, variabile tra 0.20 e 0.25 per le immagini *descending*, e tra 0.22 e 0.38 per le *ascending*. Sono state inoltre stimate le deviazioni standard degli spostamenti (Δs_d) e delle velocità medie (Δs_v). Si può osservare che

la deviazione standard è inversamente proporzionale al valore di coerenza registrato (Tabb. 2 e 3 e Fig. 4). Da qui la necessità di individuare punti a coerenza elevata per valutare spostamenti e velocità quanto più affidabili.

Sensore	Data di acquisizione	Baseline temporale (giorni)	Baseline perpendicolare (m)	Sensore	Data di acquisizione	Baseline temporale (giorni)	Baseline perpendicolare (m)
ENVISAT	08/03/03	21/06/03	105	ENVISAT	18/04/03	27/06/03	70
ENVISAT	30/08/03	04/10/03	35	ENVISAT	10/10/03	14/11/03	35
ENVISAT	30/08/03	17/01/04	140	ENVISAT	10/10/03	19/12/03	70
ENVISAT	17/01/04	10/07/04	175	ENVISAT	14/11/03	19/12/03	35
ENVISAT	05/06/04	23/10/04	140	ENVISAT	27/02/04	02/04/04	35
ENVISAT	23/10/04	27/11/04	35	ENVISAT	27/02/04	07/05/04	70
ENVISAT	27/11/04	16/04/05	140	ENVISAT	02/04/04	16/07/04	105
ENVISAT	01/01/05	12/03/05	70	ENVISAT	02/04/04	24/09/04	175
ENVISAT	01/01/05	25/06/05	175	ENVISAT	07/05/04	16/07/04	70
ENVISAT	12/03/05	25/06/05	105	ENVISAT	16/07/04	24/09/04	70
ENVISAT	16/04/05	21/05/05	35	ENVISAT	24/09/04	07/01/05	105
ENVISAT	03/09/05	21/01/06	140	ENVISAT	29/10/04	07/01/05	70
ENVISAT	12/11/05	17/12/05	35	ENVISAT	29/10/04	18/03/05	140
ENVISAT	21/01/06	01/04/06	70	ENVISAT	23/12/05	03/03/06	70
ENVISAT	25/02/06	10/06/06	105	ENVISAT	29/09/06	12/01/07	105
ENVISAT	10/06/06	28/10/06	140	ENVISAT	29/09/06	16/02/07	140
ENVISAT	28/10/06	10/02/07	105	ENVISAT	12/01/07	23/03/07	70
ENVISAT	10/02/07	26/05/07	105	ENVISAT	16/02/07	23/03/07	35
ENVISAT	17/03/07	08/09/07	175	ENVISAT	23/03/07	06/07/07	105
ENVISAT	26/05/07	04/08/07	70	ENVISAT	23/03/07	14/09/07	175
ENVISAT	26/05/07	13/10/07	140	ENVISAT	06/07/07	23/11/07	140
ENVISAT	08/09/07	17/11/07	70	ENVISAT	06/07/07	01/02/08	210
ENVISAT	13/10/07	01/03/08	140	ENVISAT	14/09/07	23/11/07	70
ENVISAT	01/03/08	27/09/08	210	ENVISAT	23/11/07	01/02/08	70
				ENVISAT	23/11/07	11/04/08	140
				ENVISAT	01/02/08	11/04/08	70
				ENVISAT	01/02/08	29/08/08	210
				ENVISAT	11/04/08	29/08/08	140
				ENVISAT	11/04/08	07/11/08	210
				ENVISAT	29/08/08	07/11/08	70
				ENVISAT	07/11/08	16/01/09	70
				ENVISAT	14/08/09	23/10/09	70
				ENVISAT	23/10/09	12/03/10	140
				ENVISAT	12/03/10	30/07/10	140

Figura 2. Coppie interferometriche (descending a sinistra, ascending a destra): Sensore, data di acquisizione, baseline, temporale, baseline perpendicolare.

Tabella 2. Risultati delle elaborazioni immagini ascending.

Inclinometro	Velocità media (cm/anno)	Coerenza media	$\Delta\phi$ [°]*	Δs_d [cm]	Δs_v (cm/anno)
I1	0.24	0.22	60	0.46	0.038
I8	0.10	0.23	58	0.45	0.037
I11	0.11	0.25	54	0.42	0.034
I14	0.34	0.38	35	0.27	0.022

*Valore della deviazione standard della fase valutato mediante abaco (Rodriguez et al. 1992).

Tabella 3. Risultati delle elaborazioni immagini descending.

Inclinometro	Velocità media (cm/anno)	Coerenza media	$\Delta\phi$ [°]*	Δs_d [cm]	Δs_v (cm/anno)
I1	0.12	0.25	54	0.42	0.050
I8	0.47	0.22	60	0.46	0.056
I11	-0.11	0.21	62	0.48	0.058
I14	0.17	0.20	64	0.50	0.060

*Valore della deviazione standard della fase valutato mediante abaco (Rodriguez et al. 1992)

Le misure di spostamento così ottenute sono state poi, come detto in precedenza, confrontate con quelle registrate, nel corso della presente ricerca, mediante inclinometri installati in una precedente campagna d'indagine (Fig. 5).

Il confronto è stato possibile per le sole immagini *ascending*, in quanto solo per queste è stato individuato un periodo comune di acquisizione di dati (giugno 2008 - marzo 2010).

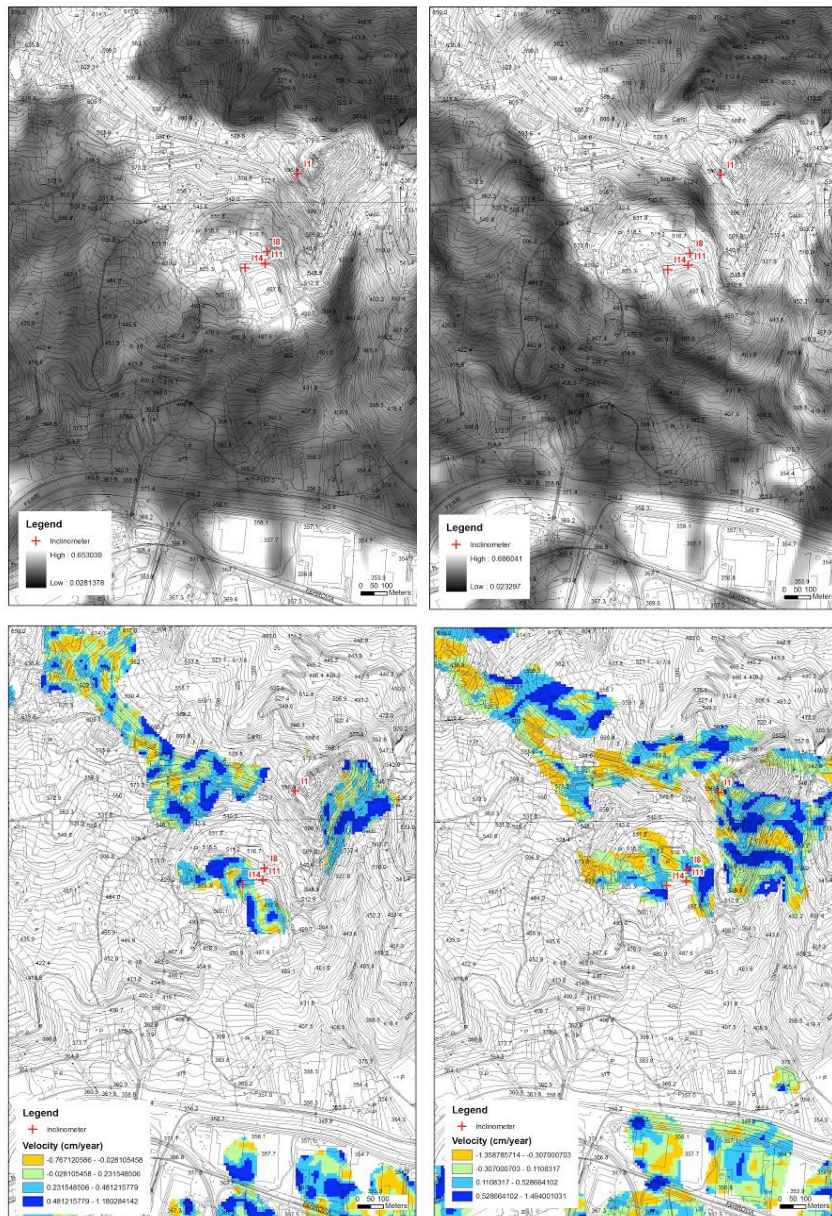


Figura 3. Mappe delle coerenze e delle velocità medie: orbita ascending (sinistra), orbita descending (destra)

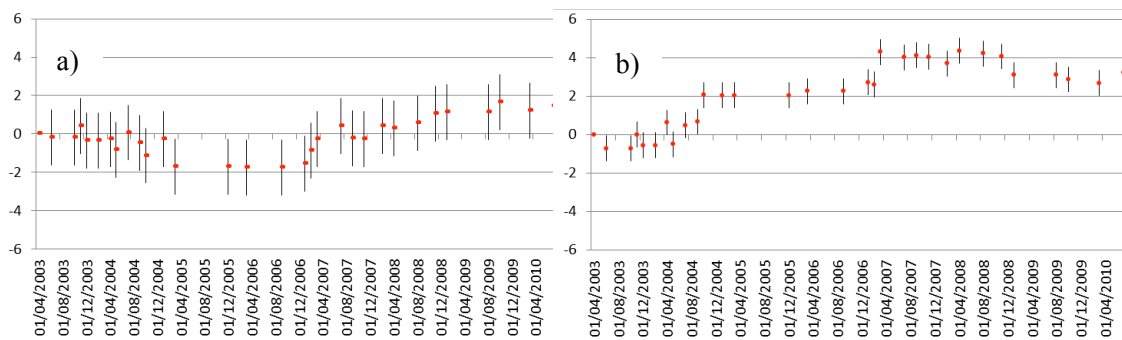


Figura 4. Variazione della deviazione standard in funzione del valore di coerenza calcolato: a) coerenza 0.20; b) coerenza 0.40. Sulle ordinate sono riportati gli spostamenti in cm, in ascisse le date di acquisizione. In rosso è rappresentato il valore medio dello spostamento, la barretta indica la variabilità della deviazione standard.

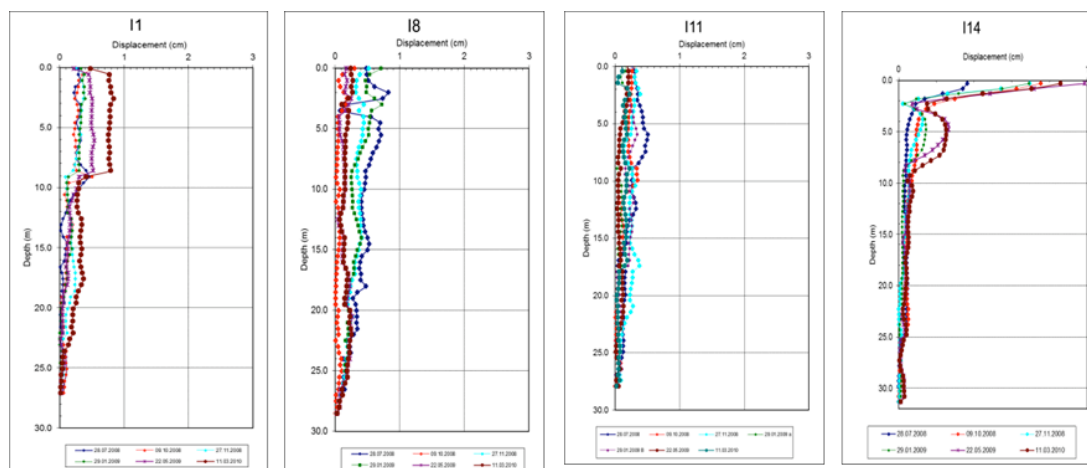


Figura 5. Misure inclinometriche effettuate nel periodo giugno 2008 – marzo 2010.

Ipotizzando nulla la componente verticale (S_z) degli spostamenti degli inclinometri, sono stati proiettati lungo la LOS i vettori spostamento misurati nel piano N-E, per verificare che le direzioni individuate dalle due tecniche fossero congruenti. Mediante il prodotto scalare tra le componenti del vettore spostamento dell'inclinometro (S_N , S_E e S_z) e le componenti del vettore spostamento calcolato lungo la LOS (V_N , V_E e V_z), è stato possibile risalire al valore alla proiezione dello spostamento inclinometrico lungo la LOS (Tab. 4).

$$\begin{aligned} S_N &= S \cos\alpha & V_N &= \text{sen}\theta \cos\varphi \\ S_E &= S \text{sen}\alpha & V_E &= \text{sen}\theta \text{sen}\varphi \\ S_z &= 0 & V_z &= \cos\theta \end{aligned}$$

con S valore dello spostamento misurato dall'inclinometro, θ angolo d'incidenza, φ azimuth della LOS ed α azimuth dell'inclinometro.

Dei quattro punti analizzati, tre (I1, I8 e I14) concordano con la direzione di spostamento, mentre per il quarto (I11) la direzione di spostamento è discorde, probabilmente a causa di un errore strumentale legato ai valori del modulo estremamente ridotti, letti con l'inclinometro (errore di misura).

Tabella 4. Componente dalla proiezione lungo la LOS del vettore spostamento misurato tramite inclinometro.

Inclinometro	Periodo di osservazione	Spostamento inclinometro (cm)	Azimuth inclinometro (°)	Spostamento LOS (cm)	Proiezione sulla LOS della misura inclinometrica
I1	giugno 2008 marzo 2010	0.78	260	0.93	-0.31
I8	giugno 2008 marzo 2010	0.25	280	0.12	-0.09
I11	giugno 2008 marzo 2010	0.11	230	-0.73	-0.04
I14	giugno 2008 marzo 2010	0.85	94	-1.16	0.32

Conclusioni

Si è potuto procedere al confronto tra le deformazioni al suolo stimate con le diverse tecniche di monitoraggio solo per un numero limitato di punti (4 inclinometri), in quanto solo questi presentavano valori di coerenza accettabili. Come si evince dalla Figura 6, i punti interni alla

frana riattivatasi a seguito del terremoto del novembre 1980 risultano poco coerenti, in quanto il fenomeno franoso si sviluppa per circa la metà della sua estensione in una zona ricoperta da vegetazione. L'obiettivo che ci si propone, per validare le misure calcolate con la tecnica interferometrica, è quello di incrementare il numero di punti al suolo per i quali poter effettuare un confronto. Ciò al fine di definire un algoritmo che permetta di stimare spostamenti al suolo misurati da satellite e paragonarli con quelli ricavabili da tecniche tradizionali *in situ*. In tale prospettiva, si è già proceduto ad installare nel corpo di frana alcuni riflettori artificiali muniti di antenna GPS, al fine di individuare ulteriori punti con coerenza elevata ed allo stesso tempo valutare le deformazioni al suolo mediante misure GPS.

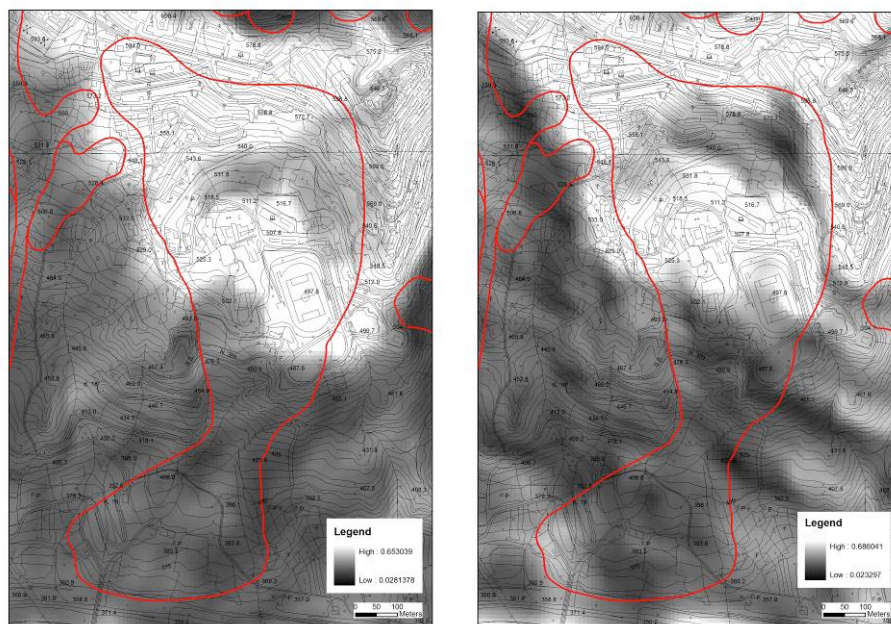


Figura 6. Mappe di coerenza media (ascending sulla sinistra, descending sulla destra); in rosso sono riportati i perimetri dei corpi di frana cartografati attraverso rilievi di campagna e fotointerpretazione.

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 Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40 (11): 2375-2383.
- Budetta, P., Calcaterra, D., De Riso, R., Santo, A., 1990. Geologia e fenomeni franosi dell'Alta Valle del fiume Ofanto (Appennino Meridionale). *Mem. Soc. Geol. It.*, 45, pp.309-324.
- Del Prete, M., and Trisorio Liuzzi, G., 1981. Risultati dello studio preliminare della frana di Calitri (AV) mobilitata dal terremoto del 23/11/1980. *Geologia Applicata e Idrogeologia*, 16, pp. 153–165.
- Hutchinson J.N., Del Prete M. 1985. Landslides at Calitri, southern Apennines, reactivated by the earthquake of 23rd November 1980. *Geologia Applicata ed Idrogeologia*, 20(1): 9–38.
- Lanari R., Mora O., Manunta M., Mallorqui J.J., Berardino P., Sansosti E. 2004. A small baseline approach for investigating deformations on full resolution Differential SAR Interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42: 1377–1386.
- Martino S., Scarascia Mugnozza G. 2005. The role of the seismic trigger in the Calitri landslide (Italy): historical reconstruction and dynamic analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25: 933–950.
- Parise, M. and Wasowski, J., 1998. Aspetti evolutivi e stato attuale della franosità nei dintorni dell'abitato di Calitri. *Proc. Intern. Conf. on "Prevention of hydrogeological hazards: the role of scientific research"*, Alba (Italy), Nov. 5-7, 1996, 135-144.
- Parise M., Wasowski J. 1999. Landslide activity maps for landslide hazard evaluation: three case studies from Southern Italy. *Natural Hazards*, 20: 159-183.
- Rodriguez E., Martin J.M. 1992. Theory and design of interferometric synthetic aperture radars", *Proc. Inst. Elect. Eng. F.*, 139: 147 – 159.