

MONITORAGGIO DI UNA DIGA IN ROCKFILL MEDIANTE INTERFEROMETRIA SATELLITARE

Rita De Stefano

*Dipartimento di Scienza della Terra dell'Ambiente e delle Risorse
Università degli Studi di Napoli "Federico II"*

rita.destefano@unina.it

Andrea Fiorino

So.Ri.Cal Catanzaro

Diego Di Martire

*Dipartimento di Scienza della Terra dell'Ambiente e delle Risorse
Università degli Studi di Napoli "Federico II"*

diego.dimartire@unina.it

Domenico Calcaterra

*Dipartimento di Scienza della Terra dell'Ambiente e delle Risorse
Università degli Studi di Napoli "Federico II"*

domenico.calcaterra@unina.it

Sergio De Marco

So.Ri.Cal Catanzaro

Giacomo Russo

*Dipartimento di Scienza della Terra dell'Ambiente e delle Risorse
Università degli Studi di Napoli "Federico II"*

gjarusso@unina.it

Sommario

Negli ultimi anni l'utilizzo della tecnica interferometrica nel monitoraggio di grandi opere di ingegneria civile è sempre più diffuso e viene considerato univocamente come valido strumento nell'analisi delle condizioni di sicurezza nel corso della loro vita utile. La presente nota mostra i risultati preliminari relativi alle misure di monitoraggio satellitare di una diga in rockfill con il manto di tenuta in conglomerato bituminoso. Le misure si riferiscono al comportamento della diga durante la fase di invaso sperimentale, dal 2015 al 2020.

1. Introduzione

La sicurezza dei bacini di invaso delle grandi dighe è un aspetto che durante l'intera vita utile delle infrastrutture deve essere oggetto di costante controllo mediante attività di monitoraggio. Tanto la sezione di sbarramento quanto le sponde del bacino di invaso sono infatti soggetti ad un'evoluzione delle condizioni di stabilità, in particolar modo per i mutati equilibri climatici che possono comportare il verificarsi di eventi estremi, rispetto ai quali i sistemi infrastrutturali non sono stati dimensionati. Il monitoraggio di grandezze rilevanti consente di quantificare la capacità del sistema bacino-infrastruttura a contenere le azioni e le sollecitazioni derivanti dagli eventi estremi, e costituisce la

base per l'esercizio di sistemi di allarme di tipo *early-warning*, di significato strategico quando si faccia riferimento ad infrastrutture la cui stabilità è sinonimo di sicurezza per i territori nei quali sono realizzate.

Le tecnologie di telerilevamento delle deformazioni del suolo indotte da movimenti gravitativi di versante hanno avuto negli ultimi anni una rapida crescita, consentendo il perfezionamento di metodologie idonee sia all'analisi della pericolosità da frana, commisurate alla variabile tipologia dei fenomeni franosi e dei contesti territoriali, sia al controllo di grandi opere di ingegneria civile quali gli sbarramenti artificiali (Ullo et al. 2019, Di Martire et al. 2014). Un approccio che combina l'utilizzo di risultati di rilevamento da satellite ai risultati di monitoraggio da terra si rivela particolarmente efficace nell'indagine del comportamento dei sistemi bacino-infrastruttura (Albano et al. 2016, Infante et al. 2018), e costituisce il riferimento per l'analisi di previsione mediante l'uso di modelli numerici. In questa prospettiva, nella nota si riportano i primi risultati di un'attività mirata all'analisi del comportamento di una diga in esercizio attraverso tecnologie *proximal* e *remote sensing*, allo scopo di integrare le informazioni che le differenti fonti di dati forniscono. Il monitoraggio integrato che si intende realizzare è riferito al caso di studio della Diga del Menta, ubicata nel cuore dell'Aspromonte, a 40 km ad est di Reggio Calabria, che con la sua capacità di invaso di circa 18 milioni di metri cubi rappresenta il serbatoio principale del nuovo sistema acquedottistico a servizio della città di Reggio Calabria. La seguente nota illustra i risultati preliminari del monitoraggio satellitare ottenuti attraverso l'elaborazione delle immagini Sentinel-1 in geometria *ascending* e *descending* nel periodo 2015-2020.

2. Interferometria DInSAR

L'Interferometria Differenziale SAR (DInSAR – Franceschetti et al., 1992) trova ampia applicazione in molti campi scientifici e ingegneristici offrendo il grande vantaggio di effettuare analisi di area vasta sfruttando l'elevata risoluzione (3m x 3m) e il breve tempo di rivisitazione (6-8 giorni) dei satelliti di ultima generazione (Sentinel-1 e COSMO-SkyMed). Il principio sul quale si basa è l'analisi delle differenze di fase del segnale tra due immagini radar acquisite sulla stessa area in tempi diversi. Tale tecnica viene utilizzata per misurare le deformazioni della superficie terrestre, proiettate lungo la linea di vista (Line of Sight - LoS) del sensore, calcolando la differenza di fase (interferogramma) tra due diverse immagini relative all'area analizzata, acquisite in istanti di tempo (*baseline temporale*) e da diverse posizioni orbitali (*baseline spaziale*).

La differenza di fase $\delta\phi_{int}$ è funzione di una serie di parametri legati dalla seguente relazione (Hanssen, 2001):

$$\delta\phi_{int} = \delta\phi_{flat} + \delta\phi_{topo} + \delta\phi_{mov} + \delta\phi_{noise}$$

dove $\delta\phi_{flat}$ è il contributo dovuto alla terra piatta, $\delta\phi_{topo}$ è legato alla topografia, $\delta\phi_{mov}$ è dovuto ad eventuali movimenti, $\delta\phi_{atm}$ è la differenza di fase dovuta alla presenza dell'atmosfera e, infine, $\delta\phi_{noise}$ è il contributo dovuto alla decorrelazione spaziale e temporale. I risultati che si ottengono dalla catena interferometrica si esplicano attraverso la mappa del tasso di spostamento medio e le serie temporali di deformazione nel corso dell'arco temporale indagato. Le immagini vengono acquisite lungo orbite in geometria *ascending* e *descending* in tempi differenti (Fig.1). Dalle elaborazioni si ottengono valori di velocità/spostamento lungo la congiungente sensore-bersaglio (LoS), positivi in caso avvicinamento del bersaglio al satellite (direzione Est-Ovest per la geometria *ascending*), negativi nel caso contrario (direzione Ovest-Est in geometria *ascending*).

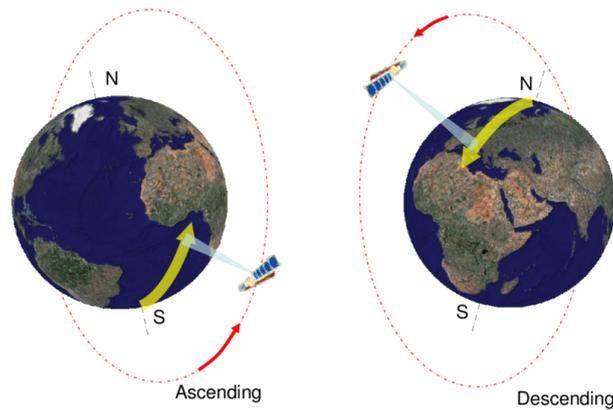


Fig 1. Geometrie ascending e descending (Lantieri et al. 2014)

3. Diga del Menta

La Diga del Menta (Fig.2) è ubicata nel cuore dell'Aspromonte, in località Roccaforte del Greco (RC) ad una quota di circa 1400 m s.l.m. Si tratta di una diga in rockfill con manto di tenuta impermeabile in conglomerato bituminoso (Vecchietti et al. 2019, Russo et al. 2020), ed è parte del principale sistema acquedottistico della Provincia di Reggio Calabria.



Fig 2. Diga del Menta

La diga presenta un coronamento curvilineo con uno sviluppo di 325 m e una altezza massima dal piano di fondazione di 89.75 m (a quota 1431.75 m s.l.m.). La pendenza dei paramenti di monte e di valle è di 1:1.8, con quest'ultimo che vede la presenza di due banchine poste alle quote di 1404.50 e 1377.50 m s.l.m. Il livello di invaso in condizioni di normale esercizio, in rapporto alle esigenze volumetriche dell'utilizzazione, è fissato alla quota 1424.5 m s.l.m. mentre i livelli di minimo invaso (quota scarico fondo) e massimo invaso (quota sfioratore di superficie) sono pari a 1370.0m s.l.m. e 1426.0 m s.l.m. rispettivamente. La larghezza massima della sezione raggiunge 350 m circa e la fondazione è impostata a contatto con l'ammasso roccioso di base. Al contatto tra il corpo diga e la formazione rocciosa è stato interposto un tappeto drenante come presidio rispetto all'eventuale insorgenza di un regime di pressioni neutre positive nel corpo del rilevato, mentre uno schermo di iniezioni cementizie è stato realizzato lungo il cunicolo perimetrale.

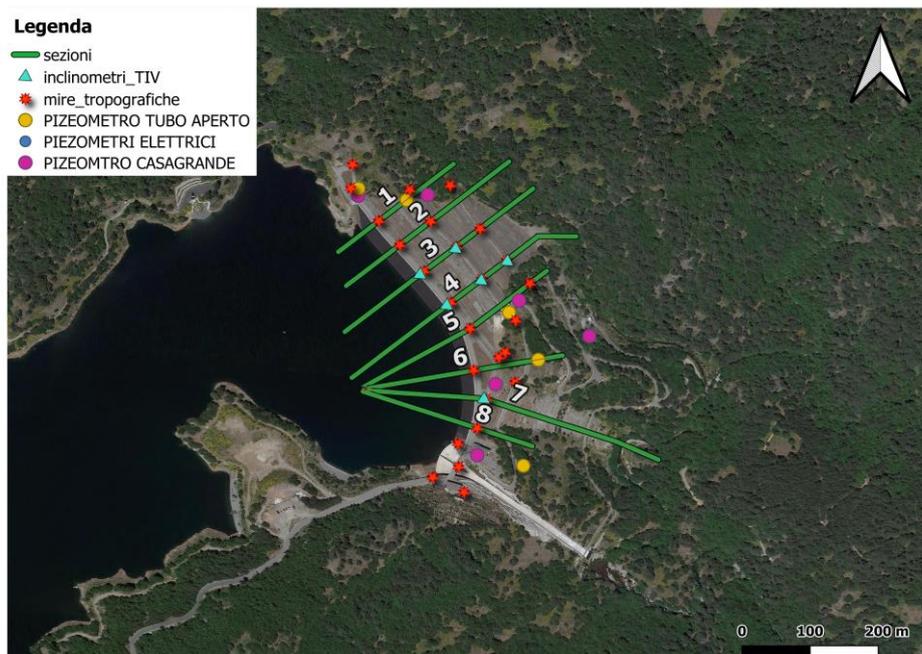


Fig 3. Rete di monitoraggio della Diga del Menta

Il sistema di monitoraggio dello sbarramento comprende accelerometri, inclinometri, estensimetri, una stazione meteo, e numerosi piezometri. Gli strumenti sono in gran parte posizionati lungo le otto sezioni identificate sul corpo diga (Fig. 3)

I terreni affioranti nell'Aspromonte sono ascrivibili al Complesso Calabride (Bonardi et al. 1979; Parise et al. 1996), suddiviso in una serie di falde che si differenziano per grado di metamorfismo, tanto più accentuato quanto più si procede verso la parte alta del complesso. Si distinguono quindi quattro falde, che dal basso verso l'alto sono denominate:

- Falda di Longi: semiscisti-filladici, conglomerati, arenarie, calcari e flysh del Lias Eocene;
- Falda di Galati: filladi con intercalazioni di calcari di scogliera del Malm-Cretacico;
- Falda di Castagna: filladi e scisti quarzoso-feldspatici;
- Falda dell'Aspromonte: graniti, gneiss e micascisti ("Formazione kinzigitica").

Il territorio che ospita la diga del Menta è caratterizzato prevalentemente da micascisti e paragneiss, alternati da lenti di quarzo e quarzo pegmatitico. Nel settore settentrionale e sud-occidentale dell'area, invece, la quarzite è la litologia prevalente.

4. Monitoraggio satellitare della Diga del Menta

La tecnica DInSAR è stata utilizzata per monitorare il comportamento del corpo diga durante alcune delle fasi di invaso sperimentale (2015-2020). Sono state elaborate le immagini satellitari SENTINEL-1, in geometria *ascending* e *descending*, processate con l'approccio dei "Permanent Scatterer" (PS). I PS sono rappresentati dai riflettori naturali, come edifici, strutture, rocce, presenti nell'area. Le immagini sono state elaborate con il software SUBSIDENCE sviluppato dall'Università Politecnica de Catalunya (UPC – Barcelona). Nel dettaglio sono stati utilizzati due dataset di immagini: 139 immagini acquisite in geometria *ascending* dal 05/06/2015 al 15/02/2020 con un angolo di incidenza pari a 41.2° e una soglia di coerenza pari a 0.63; 111 in geometria *descending* dal 08/01/2016 al 27/06/2020 acquisite con un angolo di incidenza pari a 43.4° e una soglia di coerenza pari a 0.7.

Sebbene l'area della diga sia ricca di vegetazione, si può notare dalle mappe di spostamento lungo la LoS (Fig.4) che lo sbarramento sia caratterizzato da una notevole densità di target (1431) in geometria *ascending*, mentre in geometria *descending* i target (431) sono localizzati essenzialmente sullo

sbarramento. Si osserva che le velocità di spostamento rilevate dei target lungo la LoS sono tutte molto contenute e prevalentemente ricadenti nell'intervallo $[-2.0 \text{ mm/anno} - 2.0 \text{ mm/anno}]$.

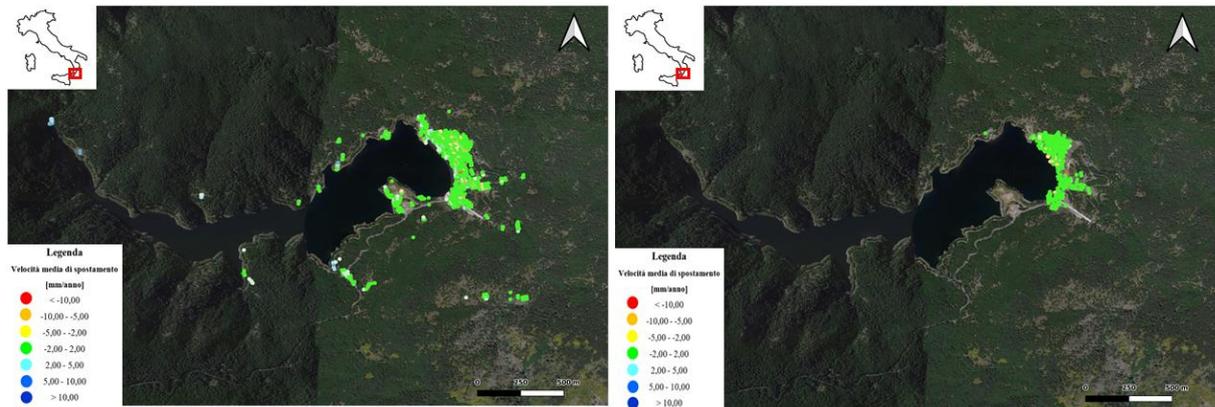


Fig 4. Mappe del tasso di spostamento medio lungo la LoS dei target identificati in geometria ascending (a sinistra) e descending (a destra)

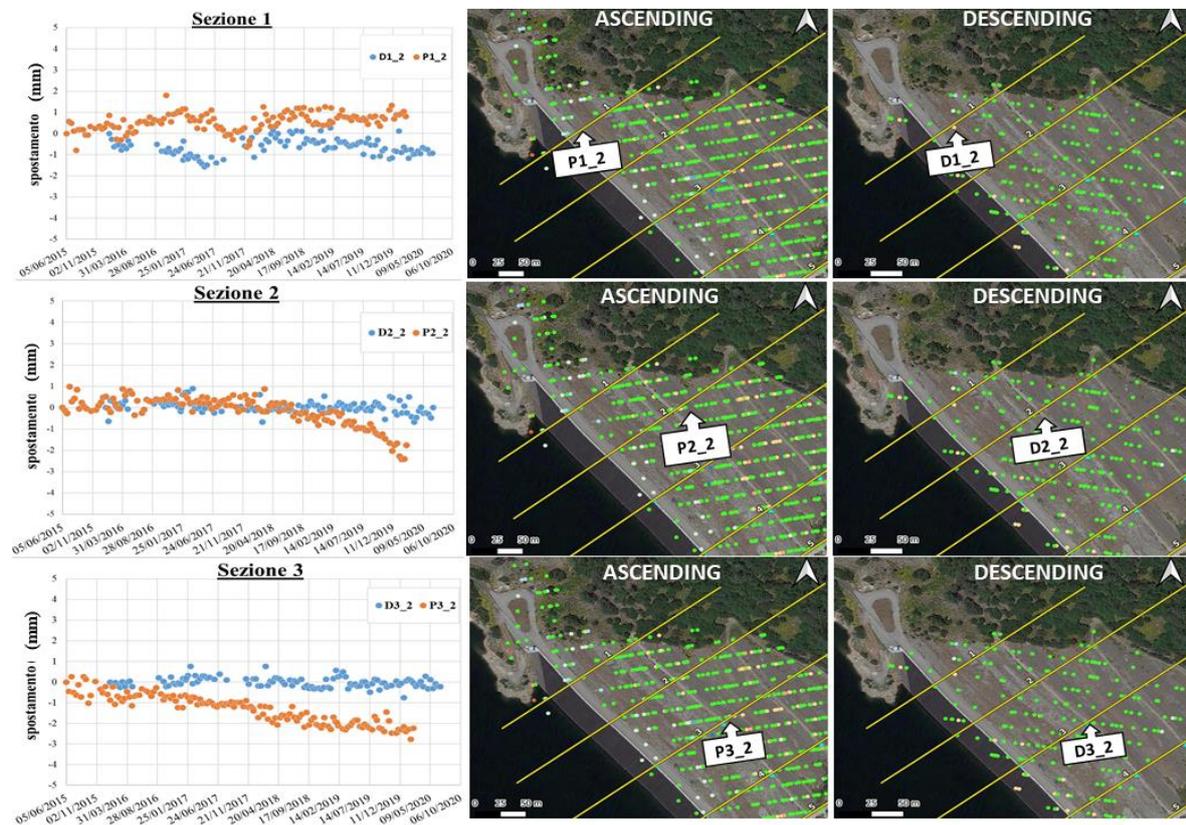


Fig 5. Target individuati lungo il paramento di valle della diga, in corrispondenza delle sezioni di monitoraggio 1,2,3, e relativi diagrammi di spostamento lungo la LoS in geometria ascending (arancione) e descending (blu).

Per la futura analisi comparativa delle misure interferometriche con le misure inclinometriche, sono stati selezionati alcuni target significativi (PS) lungo il paramento di valle dello sbarramento e lungo il coronamento della diga. I target sono stati scelti in corrispondenza delle sezioni lungo le quali sono posizionati gli strumenti di misura (in particolare gli inclinometri). A titolo di esempio, in Figura 5 sono indicati i PS localizzati sul paramento di valle, lungo le sezioni di monitoraggio 1, 2 e 3; nei diagrammi riportati sono rappresentate le serie temporali degli spostamenti lungo la LoS in geometria ascending e descending. In Figura 6 sono indicati i PS selezionati lungo il coronamento della diga in

corrispondenza delle medesime sezioni, e sono riportati gli spostamenti relativi lungo la LoS.

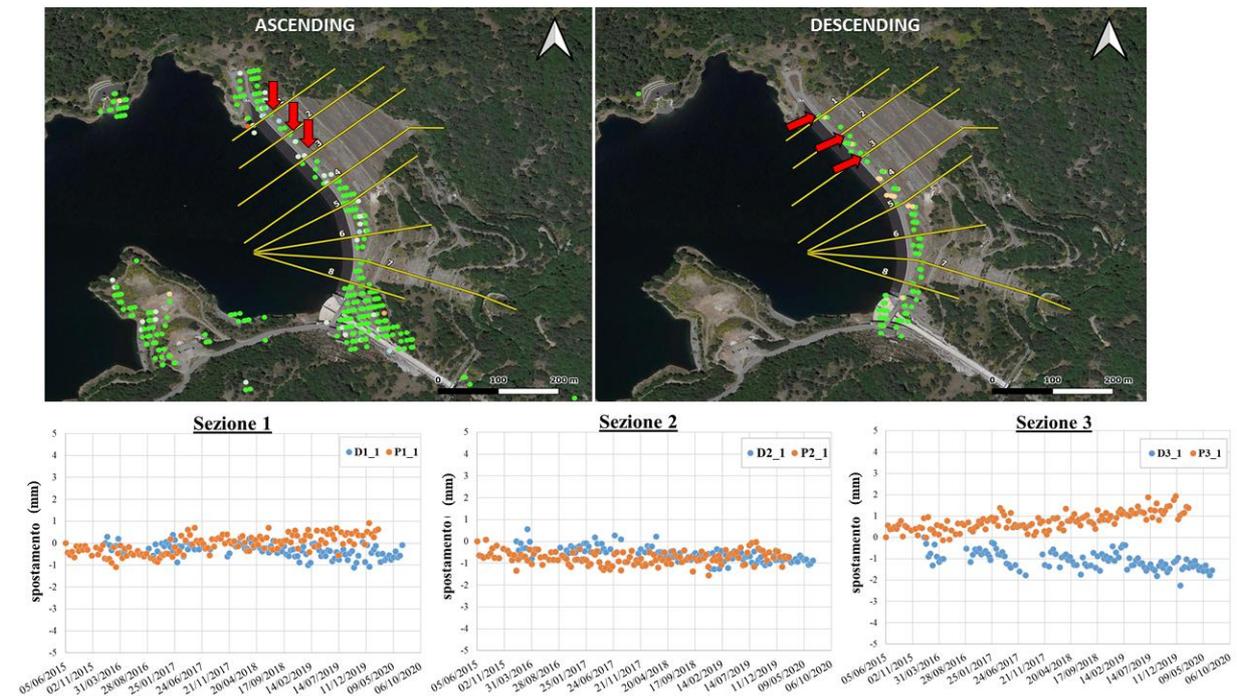


Fig 6. Target individuati lungo il coronamento di valle della diga, in corrispondenza delle sezioni di monitoraggio 1,2,3, e relativi diagrammi di spostamento lungo la LoS in geometria ascending (arancione) e descending (blu).

I valori di spostamento lungo la LoS risultano molto contenuti, e ciò vale in particolare per le misure in geometria *descending*. In geometria *ascending*, invece, si può notare una variazione del trend a partire dal secondo semestre del 2018, lungo le sezioni 2 e 3, con un'entità di spostamento misurato lungo la LoS pari a circa 2 mm. Lungo il coronamento, per la sezione 3 si osserva un trend di spostamento per entrambe le geometrie di circa 1 mm. I valori osservati devono essere posti in relazione alle cause forzanti, che essenzialmente coincidono con la variazione del livello di invaso del bacino.

Gli spostamenti individuati nei target saranno analizzati e convertiti in spostamenti lungo le direttrici geometriche del corpo diga al fine di poter evidenziare gli spostamenti rilevati con la tecnica interferometrica. Nel contempo le misure interferometriche saranno confrontate con quelle inclinometriche, rilevate nel corso degli invasi sperimentali sul coronamento e lungo il paramento di valle della diga, al fine di stabilire il grado di affidabilità delle tecniche di *remote sensing* nel rilevare gli spostamenti dell'opera. Tale confronto costituirà un punto base per lo sviluppo di una metodologia di monitoraggio integrato, che potrà validamente essere implementata su diverse tipologie di dighe.

Bibliografia

- Albano, M., Modoni, G., Russo, G., Croce, P., Polcari, M., Saroli, M., Bignami C., Moro M., & Stramondo, S. (2016). Rockfill dam monitoring through ground-based and remote sensing techniques. In 1st IMEKO TC4 international workshop on metrology for geotechnics, metrogeotechnics (pp. 276-280). Lancellotta R. (2007). "Lower bound approach for seismic passive earth resistance", *Géotechnique*, 57, 319-321.
- Bonardi, G. (1979). Osservazioni geologiche e petrografiche sull'Aspromonte.
- Di Martire D., Iglesias R., Monells D., Centolanza G., Sica S., Pagano L., Ramondini M., Mallorquì J.J., Calcaterra D., 2014. Comparison between Differential SAR interferometry and ground measurements data in the displacement monitoring of the earth-dam of Conza della Campania (Italy). *Remote Sensing of*

- Environment 148C (2014), pp. 58-69, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.03>.
- Franceschetti, G., Migliaccio, M., Riccio, D., & Schirinzi, G. (1992). SARAS: a synthetic aperture radar (SAR) raw signal simulator. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(1), 110-123.
- Hanssen, R. F. (2001). Radar interferometry: data interpretation and error analysis (Vol. 2). Springer Science & Business Media.
- Infante, D., Di Martire, D., Confuorto, P., Tessitore, S., Ramondini, M., & Calcaterra, D. (2018). Differential SAR interferometry technique for control of linear infrastructures affected by ground instability phenomena. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci*, 251-258.
- Lanteri, L., Pispico, R. (2014). La banca dati geologica di ARPA Piemonte, l'evoluzione delle conoscenze sul territorio piemontese dal 1994 ad oggi.
- Parise M., Sorriso-Valvo M., C. Tansi, (1996). Mass movements related to tectonics in the Aspromonte massif (southern Italy), *Engineering Geology* 47 (1997) 89-106
- Russo G., Cecconi M., Vecchietti A., Pane V., Fiorino A., and De Marco S., 2020. Seismic Analyses of Menta Embankment Dam: Formulation and Synthesis of Results. *Numerical Analysis of Dams, Proceedings of the 15th ICOLD International Benchmark Workshop*. G. Bolzon, D. Sterpi, G. Mazzà, A. Frigerio (eds.). Lecture Notes in Civil Engineering, Volume 91, Springer.
- Ullo S.L., Addabbo P., Di Martire D., Sica S., Fiscante N, Cicala L., Cesario V.A. (2019). Application of DInSAR Technique to High Coherence Sentinel-1 Images for Dam Monitoring and Result Validation through in situ Measurements. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 12(3),8654715, pp. 875-890
- Vecchietti A., Cecconi M, Russo G., Pane V., 2019. Seismic Vulnerability of a Rockfill Dam through Different Displacement-based Approaches, *Journal of Earthquake Engineering*, DOI: 10.1080/13632469.2019.1662346