

Monitoraggio strutture afferenti ad impianti idroelettrici mediante elaborazioni di dati satellitari

Mario Costantini, Federico Minati, Fabio Malvarosa, Monica Palandri

e-GEOS, via Tiburtina 965, 00156 Roma Italy, +390640793833, monica.palandri@e-geos.it, mario.costantini@e-geos.it, federico.minati@e-geos.it, fabio.malvarosa@e-geos.it

Riassunto

L'utilizzo di misure di deformazioni millimetriche ottenute da dati radar ad apertura sintetica (*synthetic aperture radar*, SAR) acquisiti da satellite tramite tecniche di analisi interferometrica (InSAR), sta entrando ormai nell'uso corrente da parte delle pubbliche amministrazioni e dei gestori di infrastrutture ed asset strategici.

In questo articolo analizziamo la possibilità di utilizzare la tecnologia InSAR per il monitoraggio delle deformazioni superficiali delle strutture idroelettriche: impianti di generazione e opere di sbarramento, considerando in particolare due siti caratterizzati da condizioni molto difficili per l'analisi InSAR: alta quota con abbondanti precipitazioni nevose, elevata copertura vegetale dei versanti, esposizione sfavorevole alle acquisizioni satellitari.

L'attività svolta ha previsto l'elaborazione interferometrica dei dati radar ad alta risoluzione COSMO-SkyMed con la tecnica *persistent scatterer pair* (PSP) (vedi bibliografia) per ottenere misure millimetriche dello spostamento del terreno e delle strutture.

I prodotti ottenuti con l'analisi interferometrica delle immagini SAR sono stati confrontati con i dati delle reti di misura tradizionali di misura topografica a terra, e le diverse tipologie di misurazione hanno fornito risultati compatibili.

In generale, i risultati ottenuti hanno dimostrato l'applicabilità dell'interferometria radar satellitare per il monitoraggio di strutture e siti di interesse afferenti ad impianti idroelettrici.

Obiettivi dello Studio

La sperimentazione è stata rivolta alla individuazione e valutazione dei moti deformativi degli impianti di generazione e delle opere di sbarramenti, allo scopo di effettuare un monitoraggio da remoto di spostamenti plano-altimetrici millimetrici su impianti idroelettrici.

Per l'esperimento sono stati scelti due siti dove l'applicazione della tecnologia satellitare InSAR è particolarmente difficile per la presenza di vegetazione e di neve per lunghi periodi. Dopo un'analisi di fattibilità, è stata svolta l'analisi interferometrica con tecnica PSP (M. Costantini et al., July 2014) di dati SAR ad alta risoluzione acquisiti dalla costellazione COSMO-SkyMed. Infine è stato eseguito un confronto con i dati da misura topografica a terra.

Contesto geografico e temporale

L'analisi di fattibilità sul Primo Sito è stata eseguita elaborando due dataset di immagini COSMO-SkyMed HIMAGE Strimap, uno acquisito in geometria ascendente (47 immagini acquisite tra giugno 2011 e maggio 2017) e uno in geometria discendente (38 immagini acquisite tra gennaio 2010 e marzo 2017). Questo sito è stato scelto per le sue peculiarità, in particolare per la presenza di strutture lineari e per il fatto che in studi precedenti il numero dei punti di misura interferometrica (persistent scatterers, PS) era stato insufficiente per caratterizzare il fenomeno.

Per quanto riguarda il Secondo Sito la scelta è stata motivata dalla presenza della copertura nevosa per molti mesi all'anno e quindi è stato ritenuto utile testare il monitoraggio dei versanti insistenti sulla diga. L'analisi di fattibilità è stata eseguita con le immagini COSMO-SkyMed disponibili nell'area, ma data la scarsità di punti PS sulla sponda idraulica sinistra, si è proceduto considerando i dati dei satelliti Sentinel-1A, le cui diverse caratteristiche (lunghezza d'onda, frequenza temporale, baseline, etc.) in questa determinata situazione morfologica, di uso del suolo e climatologica, avrebbero potuto individuare un maggior numero di PS seppure con una peggiore risoluzione spaziale.

Il dataset utilizzato quindi per le immagini COSMO-SkyMed è stato pari a 73 immagini acquisite in geometria ascendente tra giugno 2012 e febbraio 2017, e 51 immagini acquisite in geometria discendente tra giugno 2011 e gennaio 2017.

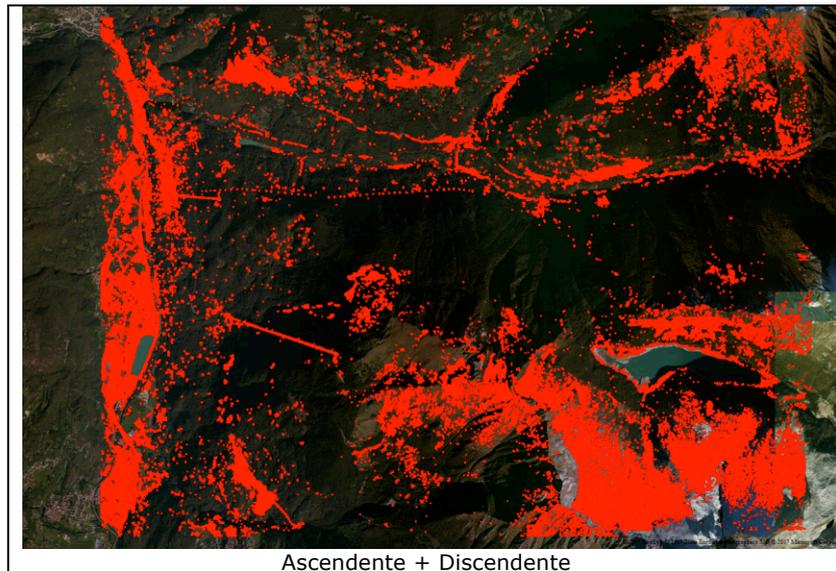
Con i dati Sentinel 1 sono stati eseguiti due tipi di elaborazione: nella prima è stato utilizzato il set completo, nella seconda solo le immagini dove non è presente la copertura nevosa. Nei due casi nella geometria ascendente sono state utilizzate 95 immagini, di cui 51 senza neve, mentre nella geometria discendente 86 dati, di cui 48 senza copertura nevosa. In entrambe i dataset le immagini sono state acquisite tra ottobre 2014 e giugno 2017.

Descrizione dei risultati

L'estrazione delle misure di deformazione per effettuare il monitoraggio è stata eseguita applicando la tecnica PSP partendo dai PS ottenuti nella fase di fattibilità per entrambe le geometrie di acquisizione.

Primo Sito

Nella figura seguente la mappa dell'unione dei PS selezionati da entrambe le geometrie per evidenziare le aree coperte dalle misure.



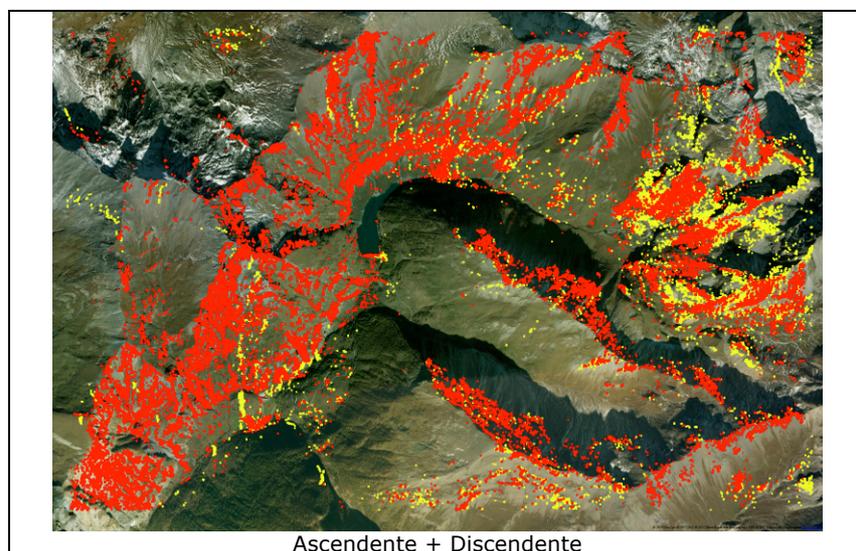
Ascendente + Discendente

Figura 1 – Mappa dell’unione dei PS selezionati da entrambe le geometrie.

Dalle viste globali si evince che grazie alla doppia geometria di acquisizione si riesce a ottenere una buona copertura dell’area interesse.

Secondo Sito

Di seguito sono presentati i risultati ottenuti dalle analisi effettuate con i dati di COSMO-SkyMed acquisiti in geometria ascendente e discendente. Per entrambi i satelliti e per entrambe le geometrie sono stati selezionati i PS utilizzando la tecnica PSP.



Ascendente + Discendente

Figura 2 – Vista globale della mappa dell’unione dei PS selezionati con i dati ascendenti (punti rossi) e discendenti (punti gialli) – set completo dati CSK

Confronto dei risultati con i dati delle misure tradizionali

L’elaborazione porta a due tipologie di risultati:

- Velocità media dello spostamento di ogni PS identificato nell’area di analisi: si tratta della velocità media dei PS nell’intervallo di tempo comprendente tutte le acquisizioni elaborate (misurata lungo la direzione di vista del sensore e relativamente ad un punto di riferimento)

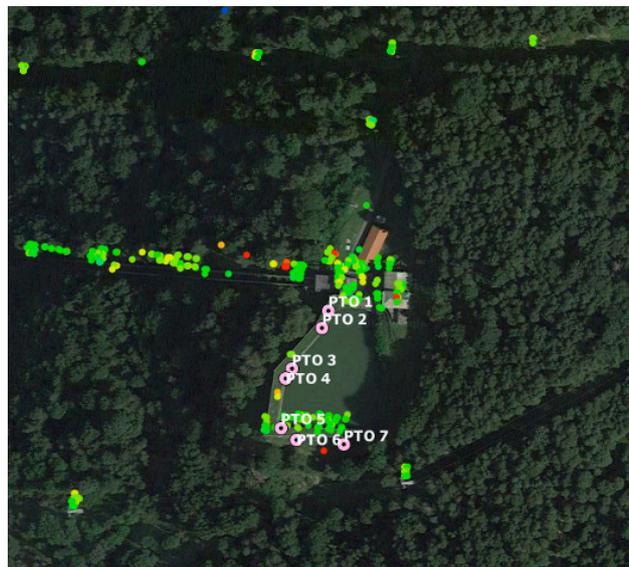
- Evoluzione temporale dello spostamento dei PS; si tratta della misura dello spostamento dei PS avvenuto in corrispondenza di ciascuna acquisizione utilizzata (questa misura viene fatta lungo la direzione di vista del sensore e relativamente a un punto di riferimento). Questa informazione supporta l'analisi della deformazione di ciascun punto di misura analizzandone il comportamento durante un certo arco temporale

L'interferometria SAR permette di osservare la componente del movimento lungo la linea di vista del sensore e le misure sono relative a un punto di riferimento nello spazio e nel tempo. Tramite tecniche tradizionali è possibile invece misurare altre componenti del moto rispetto ad altri riferimenti spaziali e temporali. Al fine di effettuare un confronto consistente fra le misure satellitari e le misure tradizionali è necessario omogenizzare i due insiemi di misure. Sono state quindi proiettate le misure tradizionali lungo la direzione di vista del sensore SAR e sono stati comparati i moti relativi tra coppie di punti per eliminare il problema del riferimento spaziale.

Di seguito si riportano i risultati del confronto in corrispondenza di una vasca, di una diga e di una condotta forzata nel Primo Sito e sulla sponda idraulica sinistra del Secondo Sito.

I risultati relativamente ad una vasca posizionata nel Primo Sito, mostrano una completa aderenza tra le due tipologie di misure (topografiche e satellitari), che avvalorano quindi una stabilità dei valori ricavati con i dati SAR. In particolare nelle seguenti figure sono riportate la posizione dei punti PS sovrapposti ai punti in cui sono disponibili le misure in-situ, e l'evoluzione dei punti PTO1 e PTO7 rispetto al punto PTO5 (riferimento comune).

Le misure satellitari sono disponibili su un insieme di date più denso rispetto a quello delle misure tradizionali, consentendo di andare a osservare fenomeni con dinamiche più articolate come si evince dal primo grafo in *Figura 3*. Nel grafo sottostante sono visualizzati solo i punti rilevati dal satellite in corrispondenza delle date di lettura dei sensori a terra per evidenziarne il quasi perfetto allineamento.



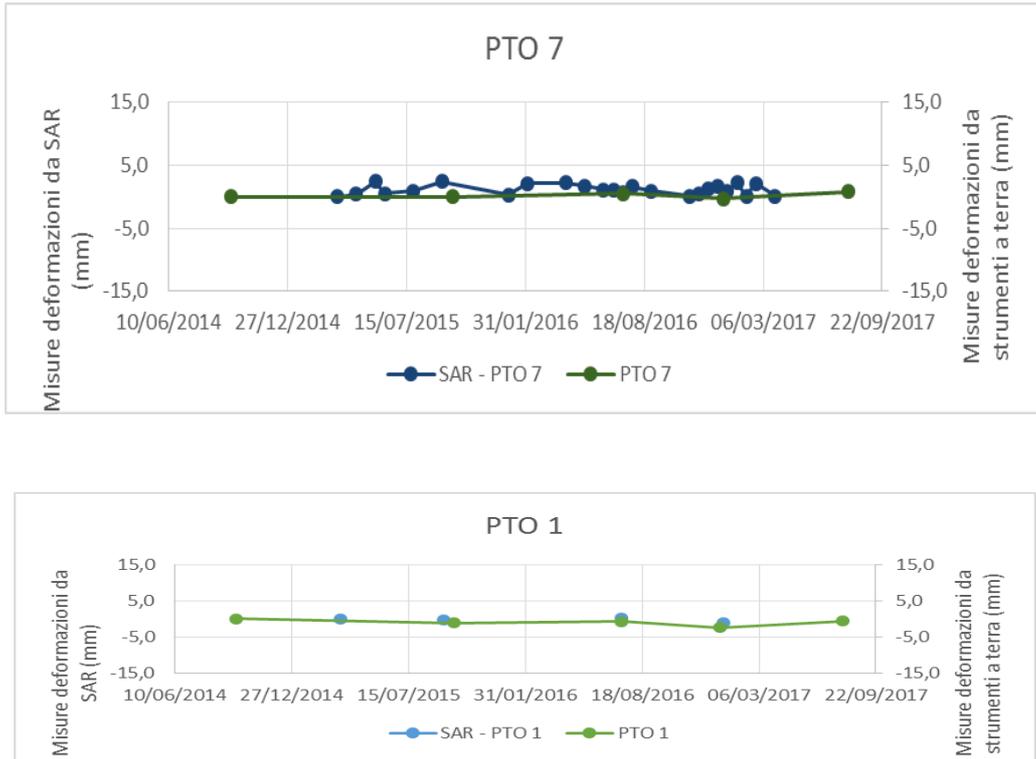
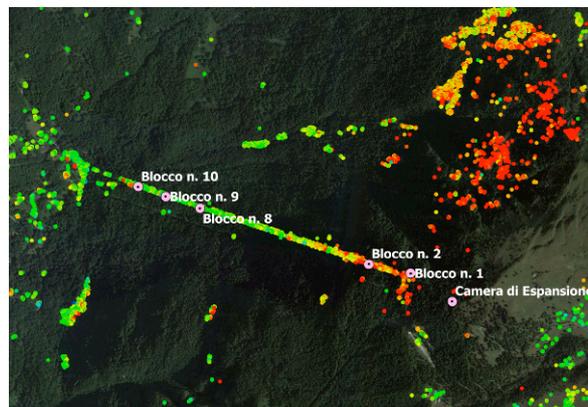


Figura 3 – Risultati analisi vasca del Primo Sito. In alto tutte le misure SAR disponibili in corrispondenza del PTO7; sotto le misure SAR estratte in corrispondenza della data più prossima a quelle delle misure in-situ.

L’analisi interferometrica applicata su una condotta idraulica lineare localizzata sempre nel Primo Sito ha permesso di ottenere numerose misure lungo la condotta forzata e sul versante della montagna a nord-est della condotta stessa. In particolare il confronto delle misure delle deformazioni da satellite con i dati raccolti dai sensori sul blocco è stato eseguito sul blocco di ancoraggio N° 9. Il grafico seguente mostra un’ottima corrispondenza tra i dati satellitari e topografici.



Blocco ancoraggio n 9

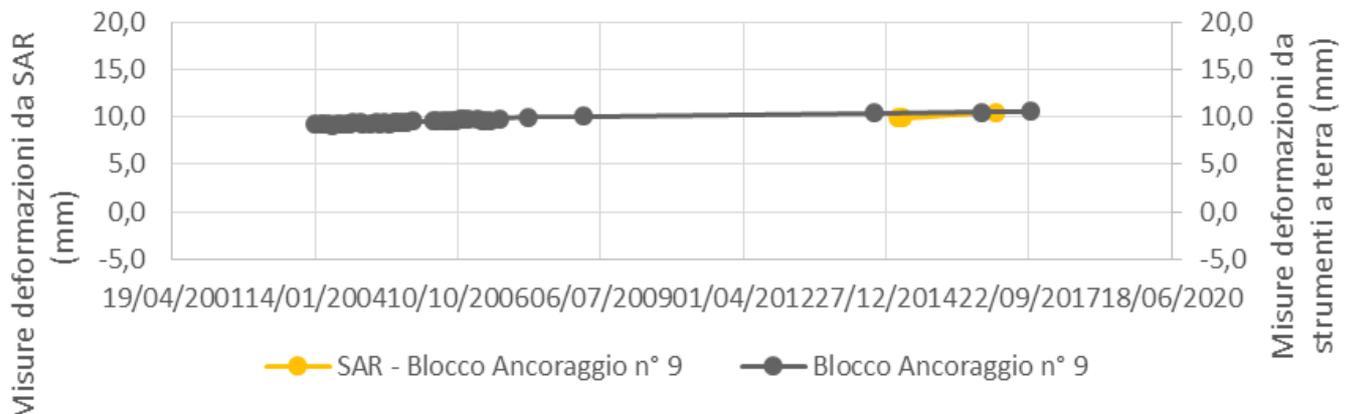


Figura 4 – Primo Sito - Risultati analisi su una condotta idraulica

Per quanto riguarda una diga posizionata nel Primo Sito, gli spostamenti nelle direzioni Nord-Sud non risultano rilevabili da queste tecniche satellitari. Ma rispetto ad una precedente campagna di misure realizzata nel 2005 con tecniche interferometriche si osserva un maggior numero di PS sulla diga e dintorni ed una notevole congruenza con le misure di livellazione. Le misure degli spostamenti sono tutte relative al punto L00SR selezionato come punto di riferimento.



L02CV

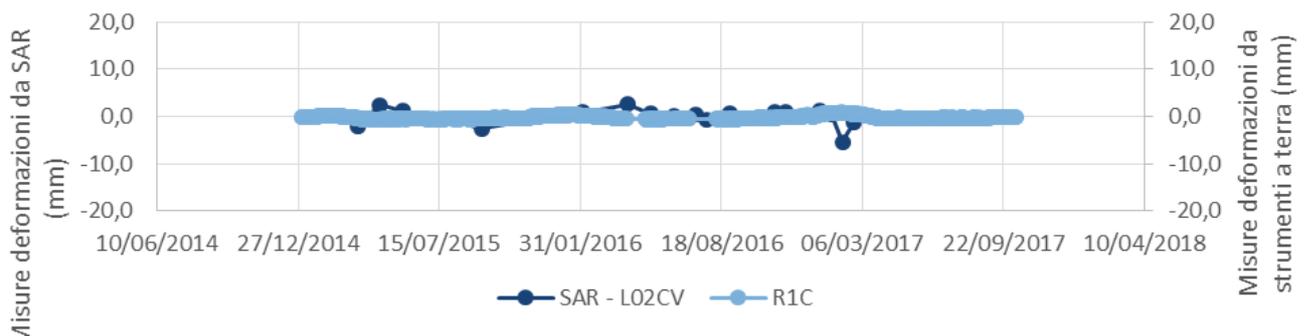


Figura 5 – Primo Sito : risultati analisi su diga.

I dati della costellazione Sentinel 1A in geometria ascendente si sono rivelati i migliori per l'osservazione dei fenomeni d'interesse sul Secondo Sito. Di seguito le misure PS sovrapposte alle posizioni su cui sono disponibili misure in-situ e il confronto fra le evoluzioni temporali. Per il confronto è stata adottata la stessa procedura eseguita per i punti della vasca sul Primo Sito. In particolare è stato riportato il moto relativo tra il punto S20 e il punto D5 selezionato come riferimento comune. A seguito dell'estrazione delle misure SAR in corrispondenza delle misure in-situ si nota la perfetta aderenza fra i due insiemi di misure.

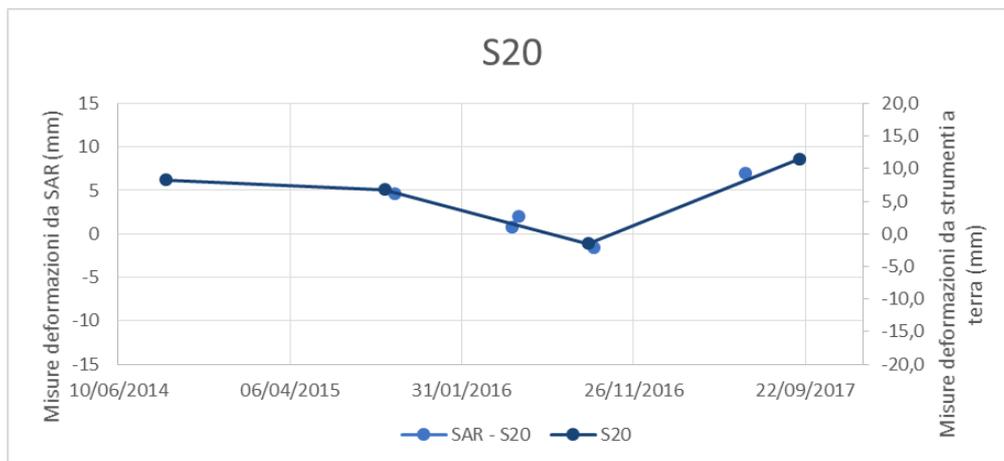
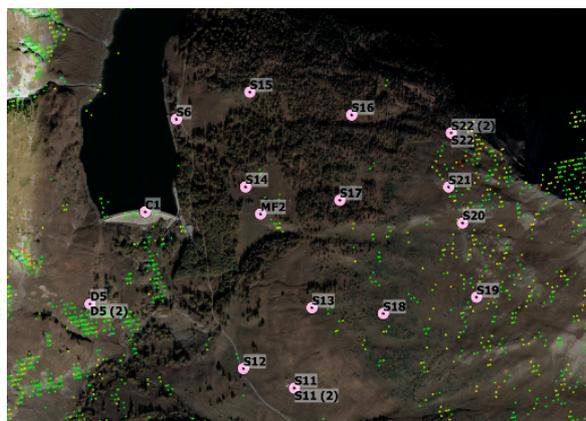


Figura 6 – Risultati analisi Secondo Sito

Conclusioni

La sperimentazione effettuata dimostra che è possibile un utilizzo operativo della tecnologia InSAR, e in particolare della tecnica PSP, per il monitoraggio da satellite delle deformazioni superficiali di strutture idroelettriche: impianti di generazione e opere di sbarramento. La sperimentazione è stata eseguita su aree con particolari criticità, a maggior ragione l'utilizzo operativo di questa tecnica sarà valido su altre aree.

Durante la sperimentazione sono emersi i seguenti principi di applicabilità:

- Orientamento dei movimenti (e del versante/struttura): La tecnologia InSAR satellitare permette di osservare con sensibilità millimetrica movimenti verticali o lungo la direzione est-ovest (tipici dei versanti

esposti verso est o ovest), mentre ha una scarsa sensibilità ai movimenti nord-sud. In ogni caso, come visto per la diga del Primo Sito, a sviluppo prevalente lungo l'asse N/S, in genere le deformazioni sono complesse e presentano componenti anche lungo altre direzioni, e le osservazioni satellitari sono comunque utili in quanto identificano deformazioni che possono essere indice di movimenti esistenti più importanti.

- Monitoraggio: la tecnologia InSAR satellitare necessita di una serie di acquisizioni sufficientemente numerosa (tipicamente almeno 25-30 immagini per avere misure affidabili), almeno un anno di osservazione (per non confondere deformazioni stagionali con veri trend), e una frequenza di acquisizione tale che ci si aspetti movimenti inferiori al cm tra due immagini (per non sottostimare i movimenti a causa di aliasing della fase).
- Copertura dell'area:
 - **Vegetazione**: la tecnologia InSAR satellitare, basandosi sulla risposta coerente nel tempo di alcuni punti notevoli, è maggiormente efficace nei casi di scarsa vegetazione presente sul territorio. È possibile in ogni caso estrarre un numero adeguato di misure anche in presenza di aree parzialmente vegetate, e nei casi più critici si possono installare riflettori artificiali (che in alcuni casi possono essere utili anche per avere misure puntuali su punti specifici delle strutture, come ad esempio i blocchi di ancoraggio).
 - **Copertura nevosa**: in caso di aree soggette a periodi con alta copertura nevosa, l'analisi dovrà tenere in considerazione le sole immagini acquisite in periodi liberi da neve (considerando però che lunghi periodi senza acquisizioni potrebbero compromettere la rilevazione di movimenti veloci).

Biografia

M. Costantini, S. Falco, F. Malvarosa, F. Minati, F. Trillo, and F. Vecchioli (July 2014), "Persistent Scatterer Pair Interferometry: Approach and Application to COSMO-SkyMed SAR Data," *IEEE Journal of Selected Topics In Applied Earth Observations And Remote Sensing*, vol. 7, no. 7