

## **INTERFEROMETRIA – RILIEVI SAR SATELLITARI**



*Dott. Ing. P. Valgoi (A2A S.p.A.)  
Dott. Ing. S.M. Colli (CVA S.p.A.)  
Dott. Ing. F. Birindelli (Studio PIETRANGELI)  
Dott. Ing. F. Sainati (EDISON.)  
Dott. Ing. A. Masera (CESI - ISMES)*

dicembre 2007

## **INDICE**

1.	<i>Premessa</i>	3
2.	<i>Brevi richiami all'interferometria SAR ed alla tecnica PS</i>	3
3.	<i>Applicazioni SAR per il monitoraggio di dighe e versanti</i>	5
4.	<i>Validazione della tecnica</i>	8
5.	<i>Vantaggi della tecnica</i>	10
6.	<i>Limiti della tecnica</i>	13
7.	<i>Possibili sviluppi</i>	14
8.	<i>Riferimenti bibliografici</i>	16



## **1. Premessa**

Scopo del presente documento è quello di individuare potenzialità, vantaggi e limiti nell'utilizzo della tecnologia dell'interferometria SAR da satellite, specificatamente per il controllo ed il monitoraggio di dighe e di versanti.

L'attività è condotta nell'ambito del gruppo di lavoro ITCOLD "Metodi innovativi per il monitoraggio delle dighe e possibili sviluppi futuri" istituito nell'inverno 2004/2005.

La trattazione teorica dettagliata della tecnologia SAR, solamente richiamata al capitolo 2 di questo documento, è rimandata ad articoli specialistici di autori illustri che operano nel settore, di cui ai riferimenti bibliografici in appendice.

L'argomento in oggetto è affrontato con attenzione particolare e con riferimenti espliciti all'esperienza condotta da A2A S.p.A., relativamente all'*Analisi di dati radar satellitari di tipo SAR con la tecnica dei Permanent Scatterers in Alta Valtellina, su un'area di oltre 500 km<sup>2</sup>*, eseguita nel 2004 per conto AEM dalla società TRE – Tele Rilevamento Europa.

## **2. Brevi richiami all'interferometria SAR ed alla tecnica PS**

I sistemi radar satellitari coerenti e nello specifico i radar di tipo SAR (*Synthetic Aperture Radar*) sono in grado di misurare la distanza tra il sensore e il bersaglio, registrando il tempo di volo tra l'onda trasmessa e la porzione retro-diffusa. Grazie alla loro periodicità di acquisizione (circa mensile) i dati SAR forniscono misure ripetute della distanza sensore-bersaglio, consentendo, mediante confronti successivi, di misurarne gli spostamenti nel tempo.

La Tecnica PS (*Permanent Scatterers Technique* - PSInSAR<sup>TM</sup>), o diffusori permanenti, è stata sviluppata e brevettata presso il Politecnico di Milano e concessa in licenza esclusiva a TRE, primo *spin-off* commerciale del Politecnico, nel 2000. Si tratta di uno strumento molto efficace per il monitoraggio ad alta precisione di fenomeni di deformazione della superficie terrestre, basato sull'impiego di serie temporali d'immagini radar satellitari (in particolare, dati dei satelliti ERS-1/2 dell'ESA - *European Space Agency*).

La Tecnica PS si pone come obiettivo quello di sfruttare tutte le acquisizioni disponibili su una stessa area ed individuare quei bersagli naturali (parti di edifici, strutture metalliche, rocce esposte, manufatti e comunque elementi già presenti al suolo) o artificiali, che mantengono inalterate nel tempo le proprie caratteristiche elettromagnetiche. L'individuazione dei PS si effettua attraverso uno studio statistico delle immagini, che porta alla selezione di un insieme di punti particolarmente adatti alla stima dei movimenti del suolo. Per ciascuno di essi è possibile stimare e rimuovere il disturbo atmosferico e quindi ricostruirne la storia dei movimenti nell'intervallo di tempo analizzato, con precisione millimetrica.

Si è quindi in grado di ricostruire il **trend medio di deformazione annua**, con precisione compresa **tra 0.1 e 1 mm/anno**. La precisione è funzione del numero di immagini disponibili e della “qualità” del PS stesso, espressa in termini di coerenza. Minore è la coerenza dei PS e maggiore è il numero di punti riflettenti individuabili, a scapito però della bontà dei dati ricavabili.

Tutte le misure sono rilevate lungo la congiungente sensore-bersaglio (*LOS, Line of Sight*), e sono di tipo differenziale, ottenute dopo avere determinato uno o più punti di riferimento a terra di coordinate note e supposti fermi, o espressamente collegati a misure GPS o di controllo topografico specifico.

La “geocodifica” dei punti individuati ne rende possibile il loro utilizzo anche in ambiente GIS; per la visualizzazione delle stime ottenute è così possibile rappresentare il trend medio di deformazione su un adeguato supporto informatico che aiuti nell’interpretazione e nella geo-localizzazione dei fenomeni in atto

La Figura 1 mostra una schematica rappresentazione della base teorica della tecnica interferometrica per la misura degli spostamenti di un Permanent Scatterers, che tiene conto dei disturbi presenti nelle acquisizioni SAR .

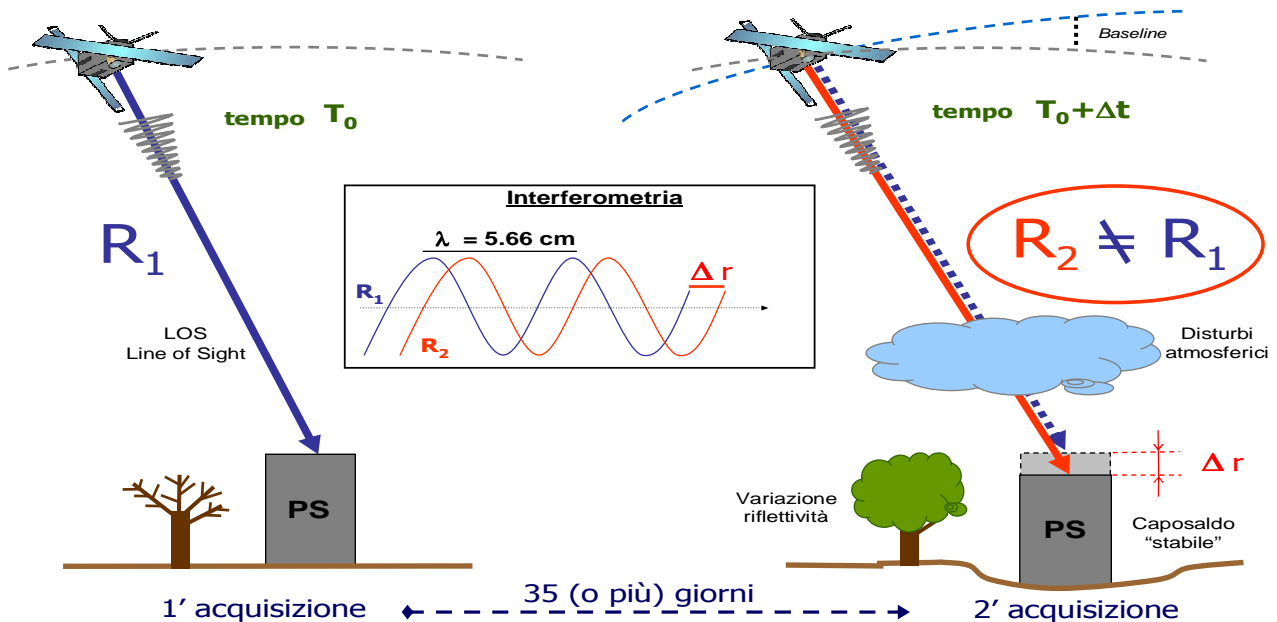


Figura 1.

Le applicazioni più importanti dell'interferometria SAR supportata dalla tecnica di elaborazione dei Permanent Scatterers sono:

- monitoraggio dei movimenti franosi
- monitoraggio di opere idrauliche (dighe, argini, canali superficiali a prevalente sviluppo lineare, etc.)
- monitoraggio delle aree in subsidenza
- individuazione di faglie sismiche
- monitoraggio delle zone costiere
- monitoraggio strutturale (centri abitati, monumenti, grandi strutture, parti di impianto)
- monitoraggio del rischio naturale (ghiacciai, vulcani, zone soggette ad alluvione e terremoti).

### **3. Applicazioni SAR per il monitoraggio di dighe e versanti**

Oggetto della presente trattazione è la specifica applicazione dell'interferometria SAR supportata dalla tecnica di elaborazione dei Permanent Scatterers per il controllo e monitoraggio dei movimenti franosi, delle dighe e/o di particolari parti di impianti idroelettrici quali ad esempio le condotte forzate.

Le informazioni ottenibili dall'elaborazione dei dati satellitari consentono la ricostruzione e la modellazione di un movimento franoso su larga scala, aiutando quindi l'interpretazione geologica del fenomeno e permettendo il riconoscimento di aree in movimento non ancora individuate. Il grado di accuratezza dello studio dipende dalle caratteristiche (coerenza) dei PS individuabili e dal loro numero: in genere è possibile eseguire analisi significative disponendo di almeno 20 punti per km<sup>2</sup>, condizione raggiunta in presenza di rocce esposte, manufatti, tralicci ed altri elementi facilmente riconoscibili.

La presenza di molti bersagli naturali permette così potenzialmente di perimetrare le aree in movimento e di ricostruire le serie storiche di misura degli ultimi quindici anni. Le classiche misure topografiche ed anche l'uso del GPS consentirebbero invece di controllare pochi punti per i quali non si avrebbero peraltro a disposizione le serie storiche.

La tecnologia dei Permanent Scatterers assume quindi particolare interesse, soprattutto per le implicazioni sulla sicurezza, nel monitoraggio dei versanti franosi incombenti su serbatoi artificiali, nell'affinamento del controllo delle strutture stesse di sbarramento (dighe in primis) ed in tutte quelle parti di impianto potenzialmente interessate da movimenti franosi (canali derivatori, vasche di carico, pozzi piezometrici, condotte forzate).

Relativamente ad una diga ad esempio, qualora "visibile" e ben rappresentata da più PS, possono emergere importanti informazioni sul comportamento d'insieme della struttura ed anche sulle sue

spalle. Le informazioni raccolte sarebbero così integrative alle misure di livellazione, di collimazione e di spostamento planimetrico tramite pendoli, solitamente limitate a pochi punti.

**E' tuttavia questa un'applicazione estrema di tale tecnologia spesso a causa della topografia complessa dei territori montani in cui sono inserite le dighe; trattare l'argomento porta inevitabilmente ad analizzarne dettagliatamente vantaggi e limiti.**

L'interpretazione dei risultati dell'elaborazione può trarre vantaggio dalla disponibilità di ortofoto a colori e di un DEM (Modello Digitale d'Elevazione) dell'area in osservazione. La tecnica dei Permanent Scatterers consente la generazione del DEM con un'accuratezza che può raggiungere valori di 1 m, che può essere anche migliorata con la disponibilità di misure a terra, ad esempio con capisaldi GPS o misure topografiche.

Le seguenti Figure 2÷5 mostrano i risultati dell'applicazione della tecnica dei Permanent Scatterers, sulle dighe A2A di San Giacomo di Fraele, Cancano, Valgrosina, Fusino nonché sui vasconi di carico dell'impianto di Lovero in provincia di Sondrio.



Figura 2. Diga di San Giacomo di Fraele







Figura 5. Vasconi di carico dell’Impianto di Lovero

#### **4. Validazione della tecnica**

Innanzitutto è da precisare che i Permanent Scatters individuati non rappresentano dei punti astratti, ma sono fisicamente individuabili e riconoscibili al suolo, con l’approssimazione di qualche metro, tramite la ricostruzione della loro posizione per mezzo delle coordinate topografiche.

A scopo di verifica sono state eseguite oggettive correlazioni fra la posizione di PS ad alto movimento e la presenza di evidenti stati fessurativi su facciate di fabbricati.

Nelle seguenti Figure 6÷8 si confrontano i risultati ottenuti dalle elaborazioni SAR con tecnica PS con i dati di controllo topografico di un versante. E’ presentato sia il caso di confronto fra PS e punto di triangolazione (componente verticale Z) che quello fra PS e punto di livellazione di precisione.

Si osserva come, sebbene in entrambe le modalità di controllo vi siano nubi di punti rappresentativi del movimento, i risultati di spostamento, individuati dalla linea di tendenza e dalla velocità media, siano ottimamente confrontabili fra loro. Le differenze sono ampiamente contenute in 0,5 mm annui.



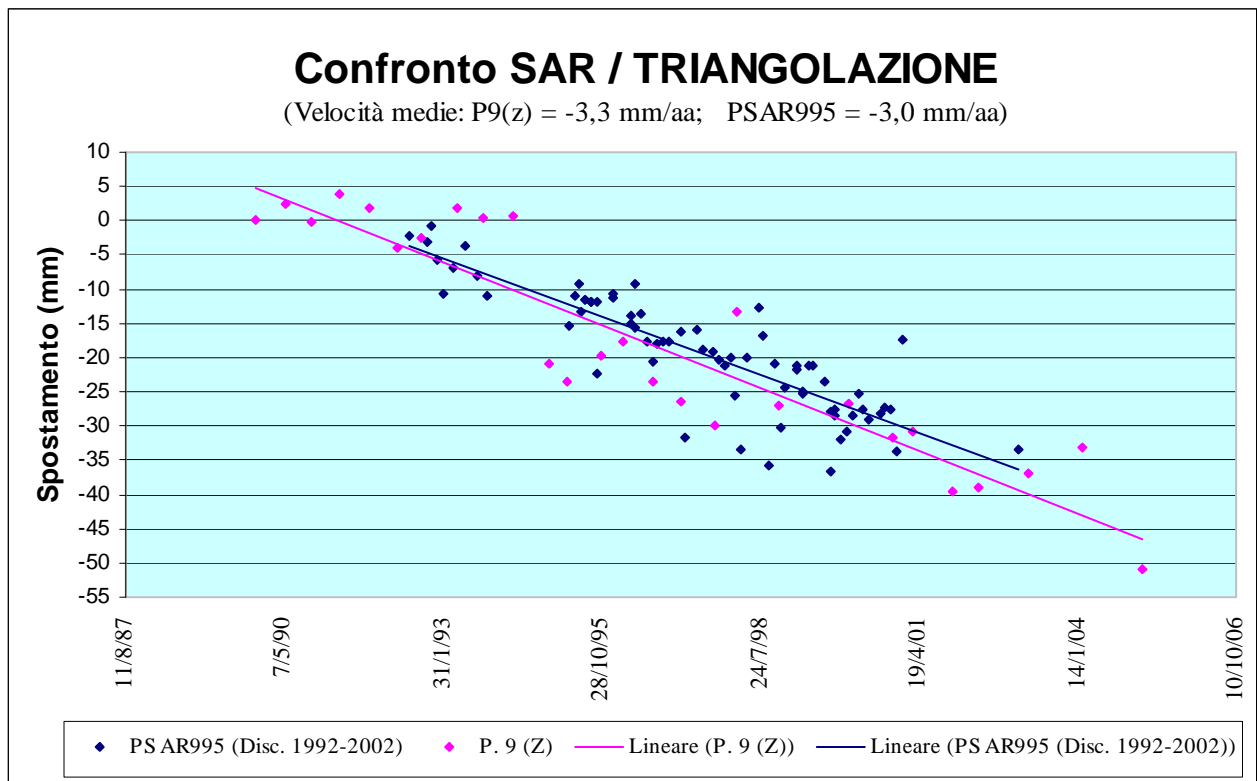


Figura 6

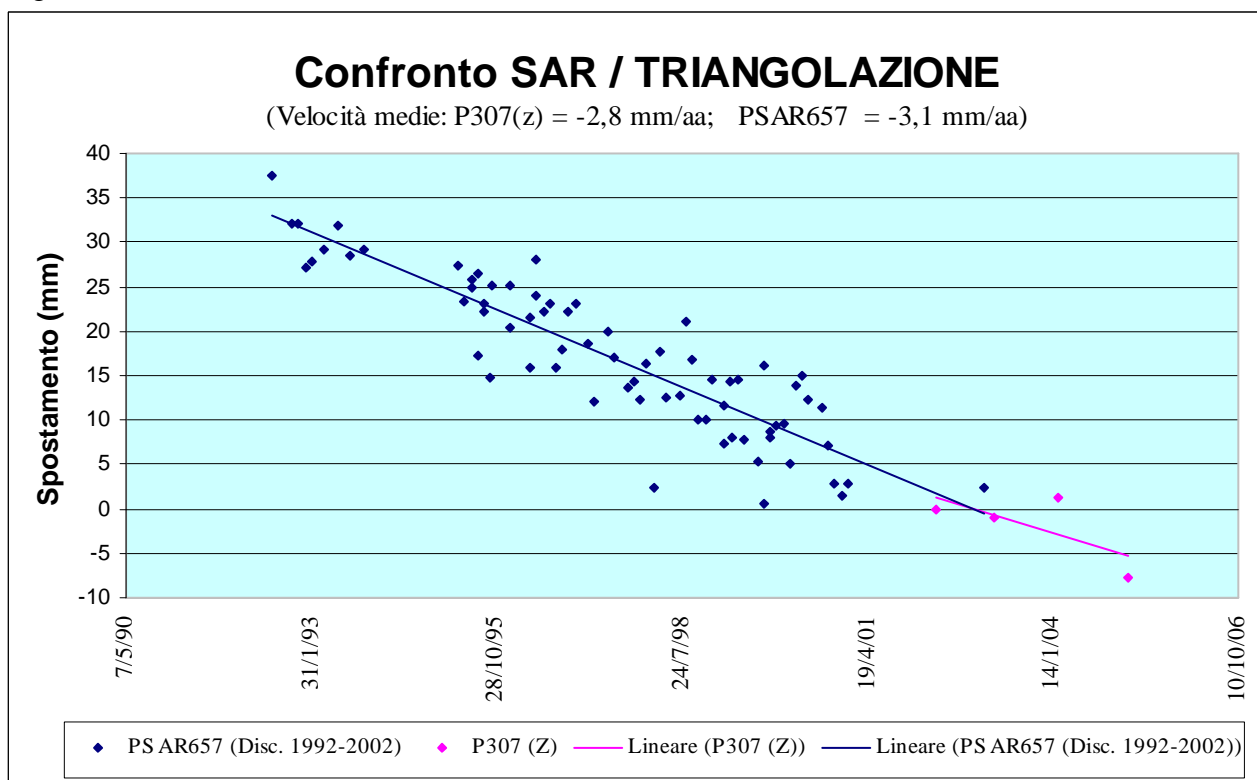


Figura 7

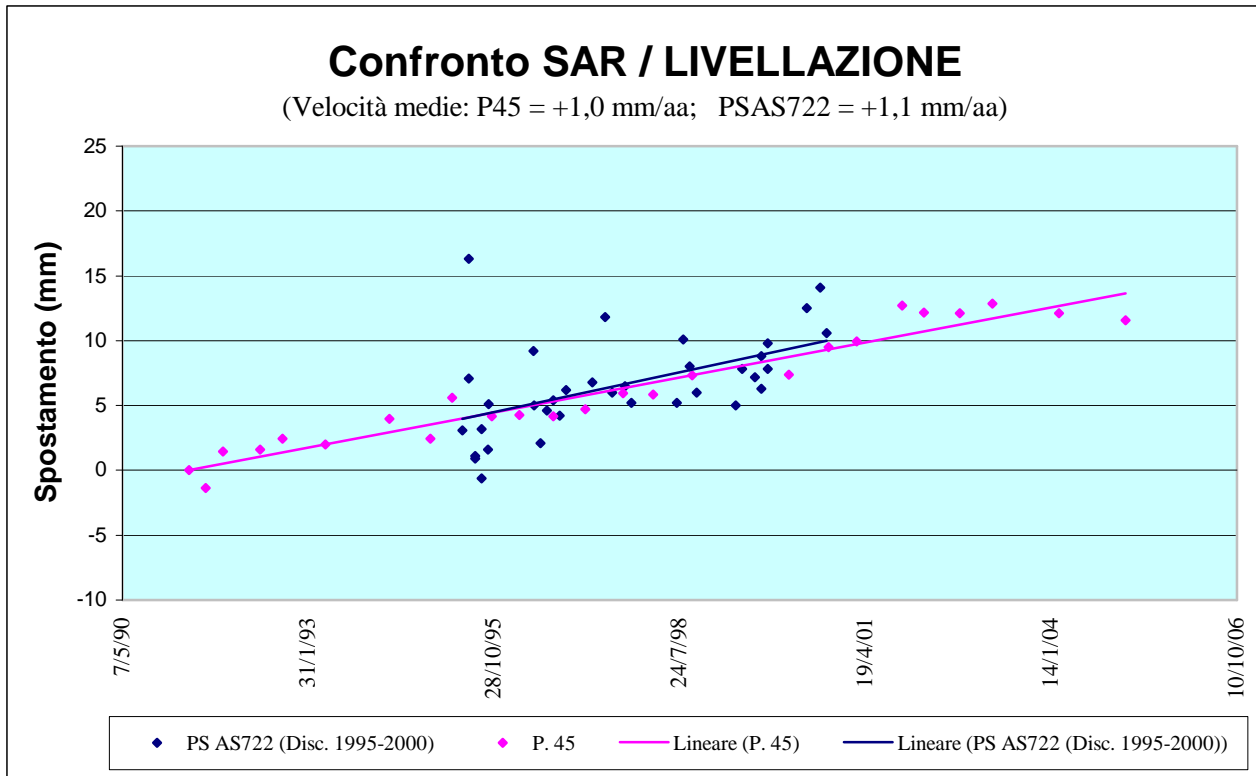


Figura 8

## 5. Vantaggi della tecnica

- Individuazione dell'area in movimento;  
La facile consultazione dei risultati attraverso l'immediatezza dell'impatto visivo dei PS a diversa sfumatura cromatica rende cioè facilmente individuabili le zone in movimento.
- possibilità di perimetrazione dell'area in movimento;  
La Figura 9 evidenzia gli ottimi risultati raggiunti dall'applicazione della tecnologia in oggetto sul Monte Padrio Varadega in Valtellina. I molti PS individuati, dislocati su tutto il versante e sino alla sua sommità, si trovano in corrispondenza di baite, radure, rocce esposte.



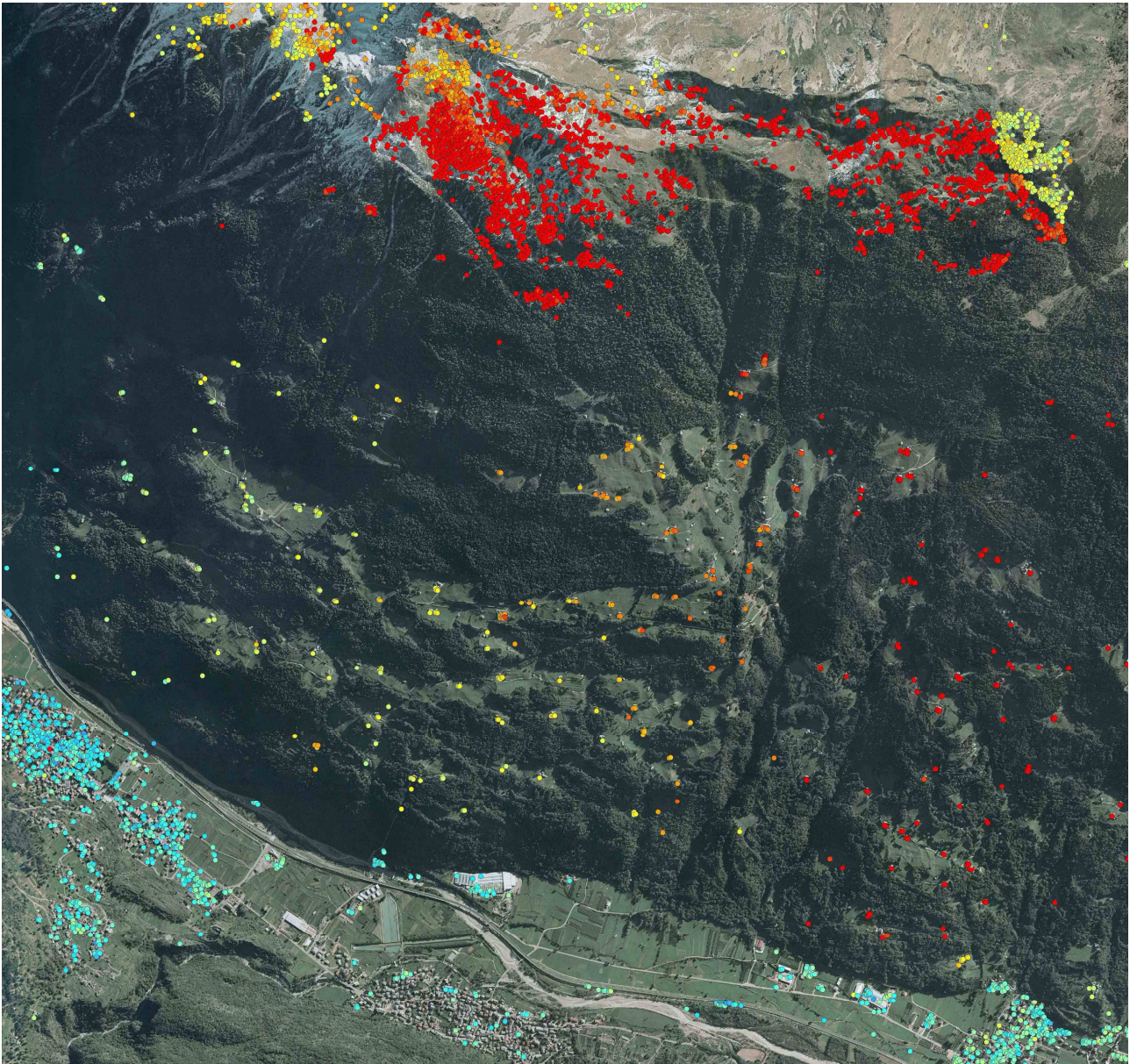


Figura 9

- ricostruzione a ritroso, sino all'anno 1992, delle serie storiche di movimento dei PS individuati; La Figura 10 mostra la bontà della serie temporale di movimento di un PS nell'arco di 11 anni.

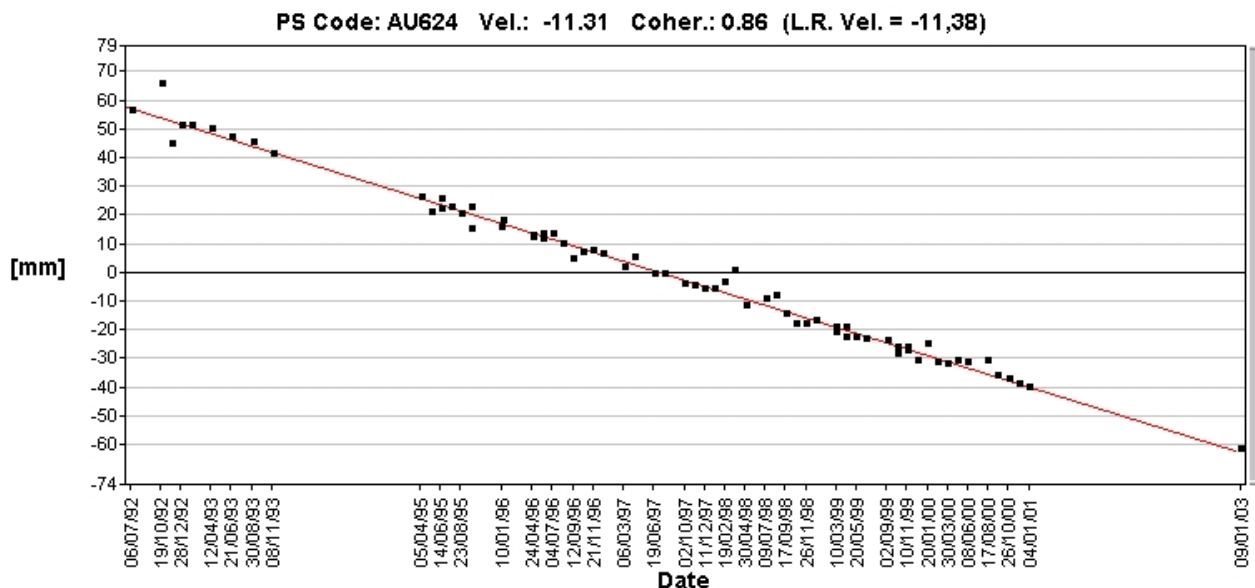


Figura 10

- analisi di grandi porzioni di territorio difficilmente controllabili con misure topografiche tradizionali o con il GPS, spesso anche a causa dell'inaccessibilità dei siti. Ne consegue l'abbattimento dei costi e dei tempi per indagini di zonazione su larga scala;
- elevata precisione delle misure differenziali;  
Sui trend di deformazione dei PS si raggiungono precisioni pari a 0,1 mm/aa mentre le precisioni degli spostamenti verticali sulla singola misura sono pari ad 1 mm.
- integrabilità dei risultati con le misure topografiche al suolo;
- possibilità di eseguire diversi livelli di approfondimento dell'analisi satellitare;  
Attraverso una prima analisi territoriale STANDARD vengono cioè solitamente analizzate grosse porzioni di territorio con l'obiettivo di individuare le aree in movimento. Analisi di dettaglio ADVANCED permettono poi di affinare i risultati su limitate porzioni di territorio, già note a priori o individuate dalla propedeutica analisi standard, sia in termini di numero di PS disponibili che di qualità dei PS (coerenza) che di serie storiche.
- ottimizzazione costi benefici;  
L'analisi SAR viene generalmente suddivisa in più Work Package, ciascuno coincidente con una diversa fase di lavoro (studio di fattibilità dataset discendente, analisi dataset discendente, studio di fattibilità dataset ascendente, analisi dataset ascendente). Attraverso un processo di elaborazione GO / no GO il Committente ha la possibilità, sulla base dei risultati ottenuti/ottenibili, di scegliere se interrompere o se proseguire l'analisi.



## **6. Limiti della tecnica**

- presenza dei PS, densità dei PS (non sempre verificata in aree non urbane) e loro coerenza;
- copertura nevosa;  
L'affinamento dell'analisi in ambienti di montagna implica necessariamente l'eliminazione delle immagini invernali. Ne consegue spesso la disponibilità finale di un numero limitato di immagini e la conseguente mancanza di informazioni sulle serie storiche;
- vegetazione;  
Rappresenta di fatto uno dei principali limiti dell'applicazione della tecnica in ambienti montani in quanto maschera gli eventuali bersagli naturali ivi presenti;
- esposizione e larghezza della valle;  
Rappresentano anch'esse un grosso limite. Determinate sponde orografiche di aste torrentizie strette e profonde (esempio sponda destra orografica fiume Adda da Bormio a Sondalo, sponda sinistra orografica torrente Frodolfo in Valfurva) ed al limite anche intere vallate (esempio Val Viola), anche in presenza di isolate baite e manufatti vari, possono risultare non visibili dal satellite.
- di fatto non completa disponibilità delle immagini ERS;  
Vi è infatti assenza di misure nell'anno 1994 e negli anni 2001÷2003.
- proseguo delle riprese da satellite nel tempo futuro e loro continuità;  
Non vi è infatti certezza che ciò avvenga.
- unica direzione di spostamento risultante di default dallo studio;  
Le misure restituite sono cioè relative alla congiungente satellite – bersaglio che con buona approssimazione coincide con la verticale sul punto.  
E' ovviamente possibile poi proiettare i valori di velocità stimati lungo la direzione di massima pendenza ma questo necessita informazioni aggiuntive.  
La ricostruzione di vettori planimetrici di spostamento (limitatamente però alla sola direzione est-ovest) necessita la disponibilità di PS ottenuti sia con la geometria ascendente che con quella discendente.
- individuazione, quantificazione ed assegnazione del “giusto peso” a movimenti prevalentemente traslazionali;  
Alla luce di quanto sopra esposto relativamente alla direzione di spostamento restituita, l'analisi SAR ben si presta a misurare componenti di spostamento altimetrico (e quindi ad esempio fenomeni di subsidenza, individuazione di faglie sismiche ecc). Più complessa è l'interpretazione e soprattutto il confronto con misure di monitoraggio tradizionale di fenomeni franosi a dinamica complessa ove la componente traslazionale di movimento è significativa quali distacchi, frane rotazionali, scivolamenti lungo superfici suborizzontali.

La stessa restituzione cromatica dei risultati può essere ingannevole dell'effettiva entità del fenomeno in osservazione qualora le componenti planimetriche di spostamento sono decisamente maggiori rispetto a quelle altimetriche.

- moti rapidi;  
Movimenti superiori a circa  $1 \div 1,5$  cm/mese non possono essere monitorati senza informazioni a “priori”.
- tendenza all'errata interpretazione dei risultati;  
L'assenza di PS viene cioè facilmente equivocata come assenza di movimento.  
Inoltre, PS isolati, anche se in movimento, non sono sufficientemente attendibili a localizzare e quantificare un fenomeno.
- indeterminatezza iniziale fra costi sostenuti e risultati ottenuti;  
Una quota sostanziosa del costo totale è impiegata infatti per la ricerca dei Permanent Scatters che non sono noti a priori, ma possono essere determinati solo dopo un'analisi accurata delle informazioni fornite dai satelliti; solo successivamente si può passare alla fase vera e propria della determinazione delle grandezze ricercate.
- impossibilità del monitoraggio in tempo reale.

## **7. Possibili sviluppi**

- studio propedeutico sulla presenza dei PS;  
E' auspicabile che, affinché il metodo possa divenire di uso corrente nell'ambito delle opere idrauliche o, comunque, non rimanere nell'ambito di studi rivolti a grandi ed estese aree specialmente in zone a elevata presenza antropica (maggiore presenza di PS), venga offerta al Committente una propedeutica verifica di fattibilità sulla effettiva presenza di PS nell'area da indagare, ad esempio attraverso la possibilità di visionare a priori immagini che evidenzino i PS disponibili, con assegnato livello di coerenza degli stessi.
- bersagli artificiali;  
Nel caso non sia possibile ottenere misure di una specifica area di interesse o di una particolare infrastruttura o edificio, per la totale assenza di bersagli radar con caratteristiche di *Permanent Scatterers*, è possibile installare degli specifici riflettori artificiali che, per caratteristiche costruttive, si comportano da capisaldi radar. Si tratta di manufatti in metallo di tipo passivo (cfr Figura 11), a base quadrata o triangolare, con lato di dimensioni indicative di 120-170 cm che non richiedono una particolare manutenzione, e che, successivamente al momento dell'installazione, si possono identificare e monitorare nelle immagini SAR.





Figura 11. Triedro utilizzato come bersaglio artificiale

- utilizzo Radarsat;  
L'impiego dei satelliti Radarsat dell'Agenzia Spaziale Canadese potrebbero sopperire ad alcuni limiti della tecnica.  
La frequenza di campionamento della stessa area (24 giorni anziché 35 giorni) fornisce una serie più fitta di immagini disponibili per l'elaborazione.  
L'angolo di incidenza al suolo leggermente diverso e la diversa geometria delle orbite satellitari potrebbero inoltre potenzialmente permettere di coprire aree non visibili dai satelliti ERS dell'Agenzia Spaziale Europea.  
Il campionamento di immagini satellitari Radarsat è regolarmente disponibile, per tutto il territorio italiano, a partire dal mese di Aprile 2003.
- sinergia con altre tecnologie affini quali laser scanner ed interferometria sar da terra;

## **8. Riferimenti bibliografici**

- *Tele rilevamento Europa – T.R.E. S.R.L., Analisi di deformazioni superficiali e di movimenti di capisaldi mediante elaborazione di dati radar satellitari con la tecnica dei Permanent Scatterers (Permanent Scatterers Technique) – TRE\_INF\_030515\_1 Ver. 1 -15 maggio 2003*
- *Massimo Cerini, Dario Fossati, Giovanni Di Trapani, Giovanni Battista Crosta, Christian Ambrosi, Fabrizio Novali, Stefano Cespa - I movimenti millimetrici degli ultimi dieci anni sul monte Padrio Varadega. Analisi di un fenomeno di DGPV con la tecnica PS*
- *SCIENCE MAGAZINE, 25 Giugno 2004, Volume 304, Numero 5679, Pagine 1952-1955 – Dynamics of Slow-Moving Landslides from Permanent Scatterer Analysis - Gorge E. Hilley, Roland Burgmann, Alessandro Ferretti, Fabrizio Novali, Fabio Rocca.*
- *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 39, NO. 1, Gennaio 2001, Pagine 8–20 - Permanent Scatterers in SAR Interferometry - Alessandro Ferretti, Claudio Prati, and Fabio Rocca "*
- *Descrizione tecnica PS, documentazione varia e casi di studio, direttamente consultabili sul sito della società Tele rilevamento Europa – T.R.E. S.R.L.:*  
<http://www.treuropa.com/>