

## Sperimentazione di corner per banda X nel monitoraggio di colate di terra lente con COSMO SkyMed<sup>1</sup>

Christian Iasio (\*), Alessandro Corsini (\*\*), Volkmar Mair(\*\*\*),  
Stefan Schneiderbauer (\*), Andrea Tamburini (\*\*\*\*)

(\*) EURAC, Istituto per il Telerilevamento Applicato, Via Esperanto 3, 39100 Bolzano, Italia  
Tel. +39 0471 055387, Fax +39 0471 055389, christian.iasio@eurac.edu, stefan.schneiderbauer@eurac.edu  
(\*\*) Univ. di Modena e Reggio Emilia, Dip. Scienze della Terra, Largo S. Eufemia 19, Modena, 41100 Italia  
Tel. +39 059 2058260, Fax +39 059 2055887, alessandro.corsini@unimore.it  
(\*\*\*) Provincia di Bolzano, Ufficio Geologia e Prove materiali, Via Val d'Ega 48, 39053 Cardano (BZ), Italia  
Tel. +39 0471 361510, Fax +39 0471 361512, Volkmar.Mair@provinz.bz.it  
(\*\*\*\*) TeleRilevamento Europa T.R.E., Ripa di Porta Ticinese 79, 20143 Milano, Italia  
Tel. +39 02 4343121, Fax +39 02 43431230, andrea.tamburini@treuropa.com

### Abstract

Nell'ambito delle attività di ricerca previste dal progetto LAWINA per il monitoraggio della Frana di Corvara, finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana e realizzato dall'Istituto di Telerilevamento Applicato dell'EURAC e dall'Ufficio di Geologia della provincia Autonoma di Bolzano, si stanno conducendo misure di spostamento del terreno attraverso l'uso della banda X del COSMO SkyMed CSK®, satellite radar ad alta risoluzione che permette di riconoscere anche velocità di pochi millimetri/anno.

Dopo i primi 6 mesi di acquisizione delle immagini è stato possibile verificare la quantità e la distribuzione di riflettori naturali utilizzabili come "*Persistent Scatterers*". Si è così evidenziata la necessità di integrare i punti di misura al suolo attraverso l'installazione di alcuni riflettori (*Corner Reflectors*, CRs), adatti ad essere riconosciuti e marcati ai vari passaggi del CSK®.

Per essere sicuri di poter descrivere gli spostamenti significativi che avvengono nei diversi settori della frana con l'affidabilità necessaria a supportare eventuali iniziative di pianificazione e di messa in sicurezza, sono stati analizzati i dati di monitoraggio di superficie e sottosuolo già prodotti durante precedenti studi, e decise le aree più meritevoli di specifiche misurazioni. In totale sono stati individuati 17 punti di controllo.

Poiché l'area della frana è in gran parte utilizzata da turisti invernali, dove possibile sono stati impiegati i CRs convenzionali per la banda C, ma nella gran parte dei casi, si è ritenuto più sicuro utilizzare riflettori radar nautici, più piccoli e leggeri, che sono stati installati in prossimità di baite o altri manufatti, fuori dalle piste da sci.

Attualmente si stanno acquisendo le ultime immagini che contengono i segnali riflessi dai CRs presenti sulla frana. Il contributo fornisce una valutazione preliminare della sperimentazione di tali CRs utilizzati al posto di stazioni GPS rover per il monitoraggio continuo della frana, dei quali è stata già condotta un'analisi dell'ampiezza del segnale riflesso.

---

<sup>1</sup> COSMO SkyMed o CSK® è un marchio registrato da ©ASI Agenzia Spaziale Italiana. Tutti i diritti riservati.

*LAWINA is a research project for monitoring Corvara in Badia (BZ, Italy) landslide, funded by Italian Space Agency ASI and realized by EURAC Institute for Applied Remote Sensing and Autonomous Province of Bolzano. Among the research activities envisaged in this context, ground displacement measurement are performed by mean of COSMO SkyMed CSK®, a radar satellite providing high resolution X-band data, ables to observe displacement starting from few millimeters/year.*

*After 6 months of X-band data acquisition, an early multi-interferometric analysis allowed to know the amount and distribution of natural scatterers recognized as “Persistent Scatterers”. The early product revealed that some corner reflectors (CRs) suitable for X-band had to be installed in the area of interest in order to receive sufficient data to achieve the envisaged aims of the project.*

*To ensure that the monitoring activity would provide new and relevant information for each part of the landslide, the CRs placement was defined on the base of previous geological studies. This analysis suggested the installation of 17 artificial reflectors at more representative locations for the understanding of the landslide dynamics.*

*Corvara in Badia hosts ski routes among the most famous in the Dolomites, including those situated on the landslide surface. The presence of multitude of tourists performing winter activities in the area of interest, forced to install 2 different types of CR: conventional C-band reflectors were installed on non-touristic areas, whereas smaller reflectors, usually installed on boats, were placed near huts or other features related with ski facilities, out of the ski tracks.*

*The research project is still in progress, and the CSK® sensor is recording a number of X-band images showing the CRs positions during approximately 9 months, including snow cover period. This contribution represent a preliminary evaluation of the experiment for continuous landslide monitoring by means of CRs instead of GPS rover stations, completed by an early X-band scattering amplitude assessment.*

## **Introduzione**

Nell’ambito del progetto LAWINA (ASI CSK AO#2163), finanziato quale progetto dimostrativo promosso da ASI con l’ ”Announcement of Opportunity” ASI COSMO-SkyMed (ASI, 2007) finalizzati all’analisi delle applicazioni civili e scientifiche della missione COSMO SkyMed, è stato implementato un nuovo sistema di monitoraggio delle deformazioni superficiali di un versante di 4,5 Km<sup>2</sup> ca. nei pressi dell’abitato di Corvara in Badia (Dolomiti, Provincia di Bolzano) interessato da fenomeni franosi complessi a cinematica lenta. Per sfruttare le capacità del sensore SAR a banda X del COSMO SkyMed è stata scelta la tecnica multi-interferometrica basata su riflettori persistenti (Persistent Scatterer Interferometry - PSI) (Crosetto et al., 2005).

Il principale tra i fenomeni franosi che interessano il versante oggetto di indagine è la frana di Corvara (Corsini et al., 2001), che può essere riferito a scivolamenti e colate di terra che coinvolgono i prodotti di disgregazione di formazioni geologiche a carattere torbiditico, caratterizzate dall’alternanza tra strati argillitico-marnosi e strati arenitici e calcarenitici. Dal punto di vista morfologico, la frana si compone di ben distinti settori di alimentazione, trasporto ed accumulo. In alcuni di tali settori, i fenomeni gravitativi hanno attualmente attività limitata o sono quiescenti mentre in altri sono attivi su superfici di scorrimento multiple, site fino ad oltre 30 m in profondità. L’asse maggiore della frana è lungo più di 3,3 km mentre la sezione di trasporto più larga misura all’incirca 300 m. Gran parte del movimento avviene per spostamenti traslativi alimentati da colate attive più superficiali, che giungono principalmente dai settori più alti. Queste colate sono avanzate in modo consistente negli ultimi anni, con valori di spostamento nel periodo 2001-2010, come risulta da monitoraggio GPS periodico di una serie di capisaldi posti sul corpo di frana, di massimo di 3 m/anno in alcune zone dell’area sorgente e del canale di transito e minimo di 10 cm/anno in alcune zone del piede. Nonostante ciò, l’unghia del piede della frana, che si pone a ridosso dell’abitato di Corvara, non è in fase di avanzamento, in relazione al fatto che, presumibilmente, essa è costituita dall’accumulo di altri antichi corpi franosi che hanno ormai esaurito la loro attività (Corsini et al., 2001; Corsini et al., 2005; Panizza et al., 2006).

L'estensione e le caratteristiche morfologiche e dinamiche della frana, hanno suggerito di concentrare in quest'area la sperimentazione, nell'ambito del progetto LAWINA, di tecniche di analisi PS-InSAR basate su dati radar in banda X ad alta risoluzione, anche attraverso l'uso di Corner Reflectors (CRs) opportunamente installati sul corpo di frana.

Per l'analisi delle deformazioni gravitative a scala regionale, i PS sono in genere costituiti da scatteratori "naturali" e non occorrono particolari studi preliminari sulle condizioni dei luoghi oggetto di analisi (fra gli altri, Allievi et al. 2003; Meisina et al., 2006). Se l'indagine si limita a singoli fenomeni, sono necessarie valutazioni tecniche a priori per valutare l'adeguatezza strumentale e metodologica del sistema che si intende adottare, partendo dai parametri ambientali e dal comportamento spaziale e temporale atteso dal processo di deformazione (Hanssen, 2005).

Lo studio descritto in questa nota, si è in particolare concentrato sulla localizzazione ottimale di CRs e sull'individuazione della migliore geometria di acquisizione di CSK® per controllare in modo accurato la frana di Corvara, al fine di sostituire, o almeno integrare, il monitoraggio basato su GPS con questo sistema.

Tenuto conto della durata di soli 2 anni del progetto e della difficoltà di condurre elaborazioni PSI con un pacchetto di acquisizioni inferiori a 15 scene (Colesanti et al., 2003 a,b), i fattori limitanti per l'impiego della tecnica PSI nel contesto geomorfologico e ambientale tipici di queste zone alpine sono stati stimati a priori, sulla base di rilevamenti delle caratteristiche superficiali e di censimenti dei manufatti antropici condotti *ad hoc* nell'area di interesse, e grazie alla caratterizzazione della frana prodotta in passato dalla Provincia Autonoma di Bolzano in collaborazione con il Dip. di Scienze della Terra dell'Università di Modena e Reggio Emilia.

I risultati preliminari di questa esperienza permettono di definire criteri di stima dell'adeguatezza e della significatività del monitoraggio basato su PSI in zone con simili caratteristiche, linee guida per l'implementazione di sistemi di monitoraggio delle deformazioni del terreno basati su tecniche SAR multi-interferometriche in aree alpine e una check-list per il relativo studio di fattibilità, che non deve riguardare solo gli aspetti di tipo fisico, ma anche le difficoltà logistiche dovute alle attività economiche che si esercitano nell'area di interesse e alle condizioni climatiche estreme che si possono verificare in inverno. Inoltre viene discusso cosa sia possibile fare prima e durante il periodo di acquisizione delle immagini SAR, per assicurarsi che i riflettori mantengano un orientamento costante verso il sensore CSK®.

## **A) Analisi preliminare dei possibili problemi geometrici di visibilità del sensore CSK e della componente di movimento rilevabile in LOS.**

### **A.1) Questioni e soluzioni**

Il lavoro di ricerca e monitoraggio condotto in passato sulla frana, principalmente attraverso la cartografia geomorfologica e l'uso di sistemi inclinometrici e GPS (Panizza et al., 2006), ha permesso di acquisire una serie di conoscenze inerenti le caratteristiche del fenomeno franoso di Corvara all'avvio del progetto. Tali dati e conoscenze, integrate da dati morfometrici derivanti da DEM ad alta risoluzione, sono stati impiegati per valutare se e quali spostamenti fossero riconoscibili tramite l'analisi multi-interferometrica dei dati in banda X del CSK forniti da ASI. Per risolvere questo primo punto sono state condotte due analisi.

Per tenere conto dei possibili problemi geometrici di visibilità del sensore CSK® (*foreshortening*, *shadowing* e *layover*) sono stati esaminati l'orientamento e la pendenza delle superfici già note come attive e quiescenti. A tal proposito sono stati utilizzati i perimetri delle aree in movimento e un modello digitale del terreno derivato da dati LIDAR con risoluzione di 2.5m, comparabile con quella di 3m delle immagini CSK® Stripmap HIMAGE previste per il progetto.

Per comprendere se il comportamento già noto della frana fosse adeguatamente correlato con la sola componente di spostamento visibile lungo la LOS, si è fatto uso di misure GPS prese su circa 50 punti per 10 anni, e si è tenuto conto dell'angolo di vista del satellite (LOS) in azimuth e angolo d'incidenza. Poiché il sensore CSK® è montato su una piattaforma che può essere orientata secon-

do diverse inclinazioni nel piano di azimuth della LOS, questo tipo di analisi è utile a individuare quale sia l'angolo nadirale più idoneo per la stima delle componenti di spostamento di maggiore interesse per l'analisi della frana. Infatti, la frana in oggetto è composta anche da settori in cui la componente orizzontale di spostamento è dominante nel processo di deformazione traslativo: il materiale accumulato su superfici più ampie e meno inclinate lungo il versante, può venire spinto da monte verso il bordo opposto, con rigonfiamenti limitati o assenti a causa della scarse qualità reologiche dei terreni mobilizzati (Corsini et al., 2005).

## A.2) Risultati

Poichè l'analisi della componente orizzontale è determinante per comprendere correttamente la dinamica della frana di Corvara, sono state analizzati gli effetti di distorsione geometrica per angoli d'incidenza superiori a quelli generalmente utilizzati con questo sensore. La figura 1. mostra la distribuzione e la tipologia delle distorsioni prospettiche SAR prodotte nell'area della frana dal *beam 14\_H4* del CSK® in orbita discendente, corrispondente ad un angolo di azimuth di 6,75° e angolo d'incidenza al centro della scena 45,77°. Questa geometria, nonostante l'elevato angolo di ripresa, nell'area produce solo molto limitate zone di *shadowing* e *layover*, mentre quelle in *foreshortening* risultano in genere a bassa inclinazione.

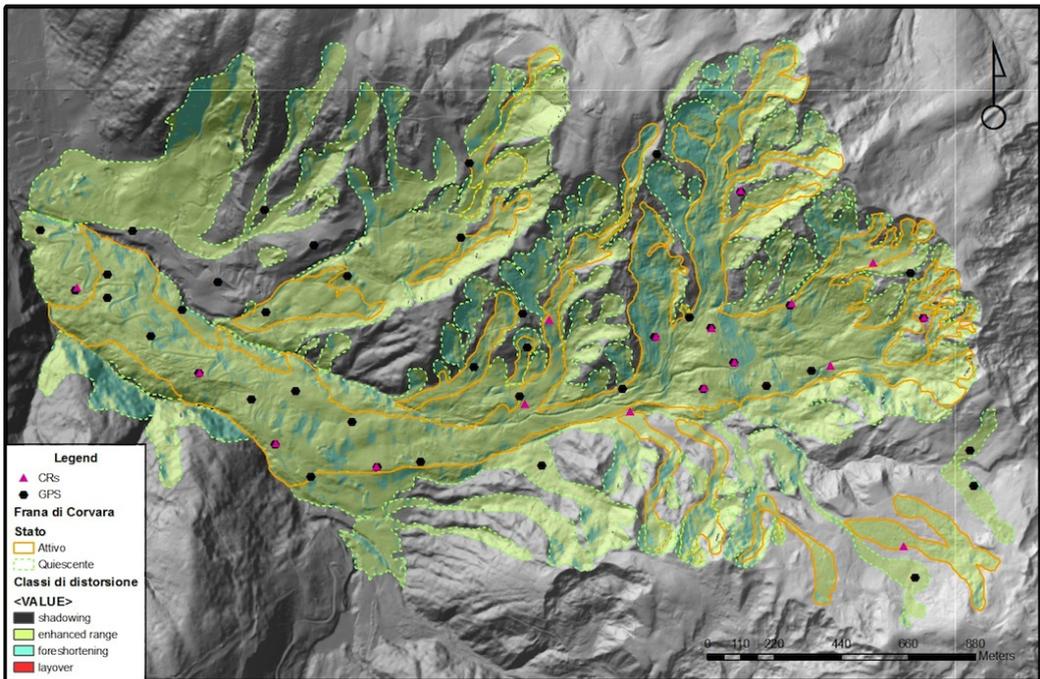


Figura 1 – Rappresentazione delle distorsioni prospettiche prodotte dal *beam 14\_H4* del CSK®, impiegato per l'acquisizione dei dati in banda X della frana di Corvara. Oltre al perimetro delle aree attive e quiescenti si distinguono anche le posizioni dei punti di monitoraggio GPS e quelli in cui sono stati installati i CRs del progetto LAWINA.

L'analisi dei dati GPS misurati negli ultimi 10 anni dalla provincia di Bolzano, ha rivelato che gli spostamenti avvengono per lo più fra i 180° e i 340° e che gran parte di essi scorrono quasi paralleli all'azimuth della LOS dell'orbita discendente del CSK®, mentre l'entità di spostamento descritta lungo la LOS corrisponde a ca. il 68% dello spostamento complessivo sul piano orizzontale (fig. 2 a,b).

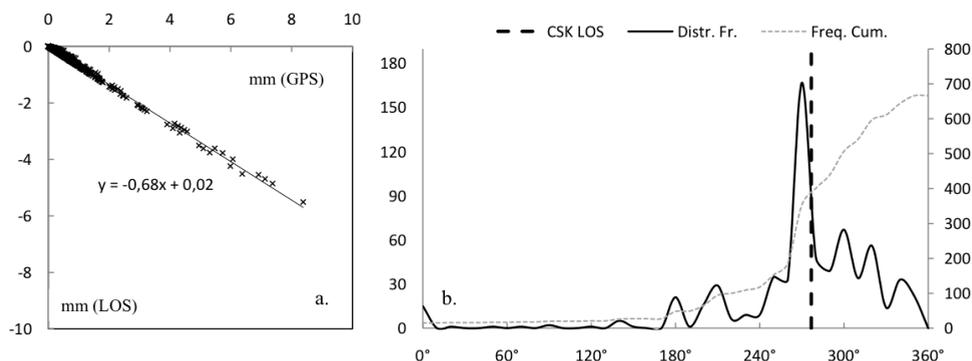


Figura 2 – Analisi del comportamento dei diversi settori che compongono la frana, secondo le misure effettuate su tutti i punti monitorati con GPS durante gli ultimi 10 anni. a. Relazione fra lo spostamento 2D reale e quello misurabile in 1D lungo la LOS. b. Relazione fra direzione degli spostamenti prevalenti sulla frana e l'azimuth della LOS scelta per il progetto LAWINA.

## B) Analisi dei potenziali scatteratori persistenti SAR

### B.1) Questioni e soluzioni

Per avere una prima stima della presenza di oggetti capaci di rispondere come PS al segnale radar, sono state osservati i dati contenuti nel Piano Straordinario di Telerilevamento (PST-A) e sono stati elaborate scene RADARSAT e 35 ENVISAT.

La parte più alta dell'area di interesse è ricoperta da prati in cui è più difficile trovare riflettori naturali, come grossi blocchi o affioramenti di roccia. Qui sono presenti numerose piccole baite con caratteristiche costruttive che possono influenzare notevolmente la loro risposta al segnale radar:

- la dimensione,
- l'orientamento delle falde del tetto,
- il materiale di rivestimento del tetto,
- la presenza di oggetti altamente riflettenti, come comignoli di metallo o pannelli solari,
- la condizione della struttura, che può talvolta essere molto degradata,
- il tipo di fondazione.

Le prime quattro caratteristiche condizionano la possibilità che questi manufatti riflettano opportunamente il segnale del CSK®, mentre le ultime devono essere tenute in considerazione, qualora una baita corrisponda ad un PS, onde assicurarsi che le deformazioni rilevate in quel punto siano legate effettivamente al terreno e non a cedimenti della struttura stessa, senza alcuna relazione lineare con movimenti del terreno. Per tenere conto di questo aspetto, tutte le baite presenti nel perimetro di frana sono state censite, rilevandone la posizione e le caratteristiche menzionate sopra.

### B.2) Risultati

La consultazione del PST-A attraverso il sito <http://www.pcn.minambiente.it/viewer/index.php> ha permesso di apprezzare la quantità e la velocità LOS di PSs ottenuti da scene ERS ed ENVISAT di orbite ascendenti e discendenti. Si è constatata l'assenza di PS derivati da orbite ascendenti, mentre erano solo scarsi quelli delle orbite discendenti. Nell'area più alta della frana si sono riconosciuti alcuni piloni degli impianti di risalita (seggiovie e cabinovie presenti nella zona soprattutto per servire i turisti della stagione sciistica) posizionati, per lo più, su speroni di roccia più stabili.

L'analisi PSI delle immagini SAR storiche è stata realizzata *ad hoc* per il progetto, utilizzando l'algoritmo SqueeSAR™ della TeleRilevamento Europa (Ferretti et al., 2010), su scene di orbite discendenti, acquisite nel periodo compreso fra il 6/1/2003 e il 6/9/2010 da ENVISAT, e fra il 25/3/2003 e il 9/3/2006 da RADARSAT. L'elaborazione dei dati SAR storici ha restituito un numero di PS maggiore di quello riscontrato nel PST-A e ancor più consistente è stato l'incremento otte-

nuto dall'elaborazione delle prime 18 immagini CSK, realizzata a Dicembre 2010 con immagini riprese fra Maggio e Novembre (fig. 3).

	ENVISAT	RADARSAT-1	COSMO-SkyMed
orbit	Descending		
polarization	HH		
mode	Stripmap IS2	Single S3	Stripmap Himage
risoluzione	30m	25m	3m
incidence angle	24.27	34.05	45.77
n. of images	35	40	18
time interval	6/1/2003 - 6/9/2010	25/3/2003 - 9/3/2006	24/5/2010 - 16/11/2010
mean time int.	70 days	24 days	8 days
AOI ext.	51 km <sup>2</sup>		
PS processing	SqueeSAR™		
identified PSs	1,909	2,062	35,121

Figura 3 – Comparazione del numero di PS individuati nella stessa area di Corvara, elaborando diversi tipi di dati SAR con l'algoritmo SqueeSAR™ di TeleRilevamento Europa T.R.E.

L'area della frana più prossimale alla cittadina di Corvara è solcata dalla strada che sale al Passo di Campolongo, verso Arabba; questa fornisce spesso oggetti ed elementi strutturali che si comportano da PS. Verso la parte più alta della frana, caratterizzata invece da prati-pascolo e macchie di bosco, i punti risultano di nuovo piuttosto scarsi, sebbene più numerosi di quelli riconosciuti nel PST-A. Fra le 109 baite rilevate in questa zona, circa 10 compaiono contrassegnate come PS nell'archivio di punti elaborati dal CSK® (fig. 4).

### C) Analisi della potenziale influenza della variazione stagionale di copertura del suolo rispetto al sensore CSK

#### C.1) Questioni e soluzioni

Esperienze DinSAR fatte in passato nell'area di interesse con scene ERS-1/2 in banda C (Belitz et al., 2004) e J-ERS in banda L (Strozzi et al., 2005), hanno mostrato che le coperture di prati e boschi, che caratterizzano gran parte della frana, subiscono variazioni stagionali tali da penalizzare l'impiego di tecniche di interferometria differenziale con segnali a media e corta lunghezza d'onda. L'arrivo della neve durante l'inverno compromette anche i risultati interferometrici elaborati con la banda L.

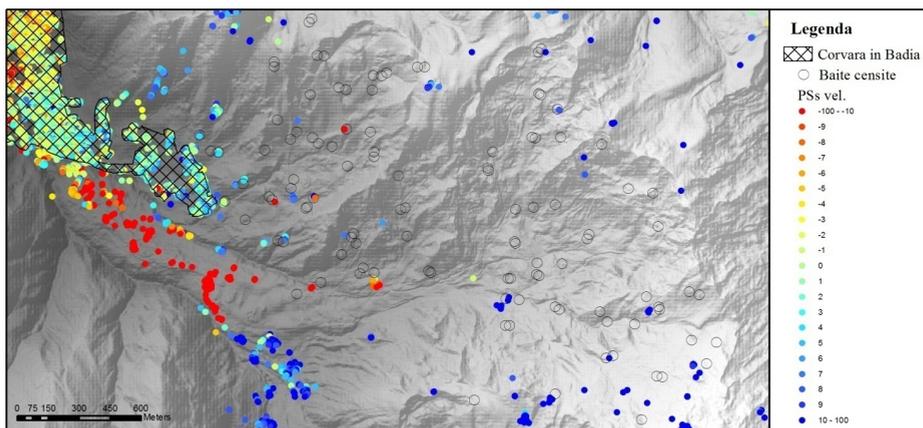


Figura 4 – Distribuzione delle baite censite sulla frana di Corvara e dei PS risultanti dall'analisi PSI realizzata con SqueeSAR™ su 18 scene CSK® precedenti all'installazione dei CRs.

La presenza della neve è legata anche alla stagione turistica invernale, principale risorsa economica della zona. Gli impianti di innevamento artificiale, presenti anche sull'area in movimento, tendono a prolungare quanto possibile la copertura nevosa, fissandola fin dalle prime nevicate della stagione autunnale. Pertanto, alle quote dell'area di interesse, comprese fra 1500 e 2100 m ca., la neve può permanere per periodi compresi fra la fine di ottobre e la fine di aprile compromettendo per un lungo periodo gli scatteratori "naturali". Questo difficoltà deve essere tenuta in considerazione nella definizione del calendario di acquisizione, come pure nella pianificazione dell'installazione e degli interventi di controllo e manutenzione dei riflettori artificiali (punto D).

La presenza di un comprensorio sciistico condiziona anche altri aspetti della progettazione di un sistema di monitoraggio come quello impiegato per il progetto LAWINA. Piste da sci, impianti di risalita e di innevamento implicano la possibilità di riscontrare altri scatteratori artificiali non solo nelle zone più stabili del versante. D'altra parte, però, dove si renda opportuno installare un CR, è necessario considerare che:

- l'oggetto riflettente deve sporgere sempre dalla neve;
- il suo posizionamento non deve rappresentare un pericolo per gli sciatori.

## C.2) Risultati

Questi condizionamenti hanno indotto a sperimentare un tipo di riflettore normalmente impiegato nel settore nautico, notevolmente più piccolo e leggero di quelli utilizzati per la banda C, prodotto in scala industriale e acquistabile a costi molto contenuti. Prima dell'installazione nell'area di Corvara, 2 esemplari di questo tipo sono stati testati dalla TeleRilevamento Europa fra risaie nei pressi di Milano, in condizioni ideali per evidenziarne la differenza di risposta al segnale radar. Il guadagno in ampiezza rispetto alla superficie libera circostante, seppur non di grande entità, ha fatto ritenere che la dimensione e la geometria di questi riflettori fossero adeguati per la banda X, ma impiegando particolare accortezza durante l'installazione e la manutenzione: errori di orientamento di un *corner* nautico anche molto limitati rispetto alla LOS, possono ridurre la differenza di ampiezza fra risposta del riflettore e della superficie circostante, modificare la fase in modo rilevante, tanto da non poter più trattare il *corner* installato come PS. Poichè per il progetto sono acquisite solo immagini dell'orbita discendente del CSK®, i *corners* nautici sono stati installati tenendo conto di una sola geometria.

## D) Analisi dei fattori logistico - operativi per l'installazione, l'orientamento e la gestione dei CRs

### D.1) Questioni e soluzioni

Per i limiti temporali imposti dal progetto, la fase di installazione è avvenuta principalmente fra l'inizio di Gennaio e la fine di Febbraio 2011, quando l'area era coperta di neve e frequentemente soggetta a temperature sotto lo 0°. Inoltre, questo periodo corrisponde ad alta stagione turistica, con un notevole affollamento delle piste.

Un'altra criticità determinata dalle condizioni climatiche della stagione invernale riguarda direttamente l'acquisizione delle scene SAR. L'attenuazione prodotta dalla neve sulla risposta del segnale in banda X e il limitato guadagno di intensità della risposta dei CRs nautici, hanno costretto a considerare una campagna di manutenzione e pulizia dei CRs ad ogni passaggio del satellite previsto durante il periodo con precipitazioni e copertura di neve. In questo caso, la presenza di piste da sci rappresentava un vantaggio logistico per poter condurre agevolmente le visite di manutenzione necessarie ad evitare che i CRs fossero coperti di neve nel momento del passaggio del CSK®. Durante il periodo invernale le acquisizioni avvenivano ogni 16gg., contro gli 8gg. pianificati per il resto dell'anno.

Infine, nella valutazione della migliore localizzazione dei CRs, si è prestato attenzione alla "compatibilità" con i punti di misura GPS utilizzati per il monitoraggio della frana dalla Provincia di Bolzano.

## D.2) Risultati

Le difficoltà ad impiantare nuovi basamenti nel terreno durante il periodo invernale e i tempi limitati per la realizzazione del progetto, hanno indotto ad installare i nuovi CRs in corrispondenza di due tipi di oggetti pre-esistenti, che prevedevano la presenza di un plinto (o un palo) di fondazione:

- 6 sono stati installati in corrispondenza di stazioni degli impianti di innevamento;
- 11 sono stati installati in corrispondenza delle basi per le misure GPS.

L'orientamento di precisione dei CRs è stata realizzata con una livella digitale tipo STABILA e una bussola GPS, anch'essa reperita fra gli accessori del settore nautico.

Il 24 Febbraio 2011 tutti i CRs che costituiscono l'attuale rete di riflettori artificiali di controllo della frana (fig. 1) risultavano installati e orientati. Da allora fino alla data di preparazione di questo contributo, sono state acquisite 20 immagini CSK®. L'analisi PSI dei CRs installati in campo verrà realizzata solo alla fine del progetto in corso, il corretto assetto dei riflettori installati è stato controllato con periodiche analisi dell'ampiezza del segnale da loro riflesso, assumendo di poter così evidenziare precocemente ed eventualmente riparare loro deformazioni o spostamenti accidentali di entità tali da impedirne il riconoscimento come PS (fig. 5).

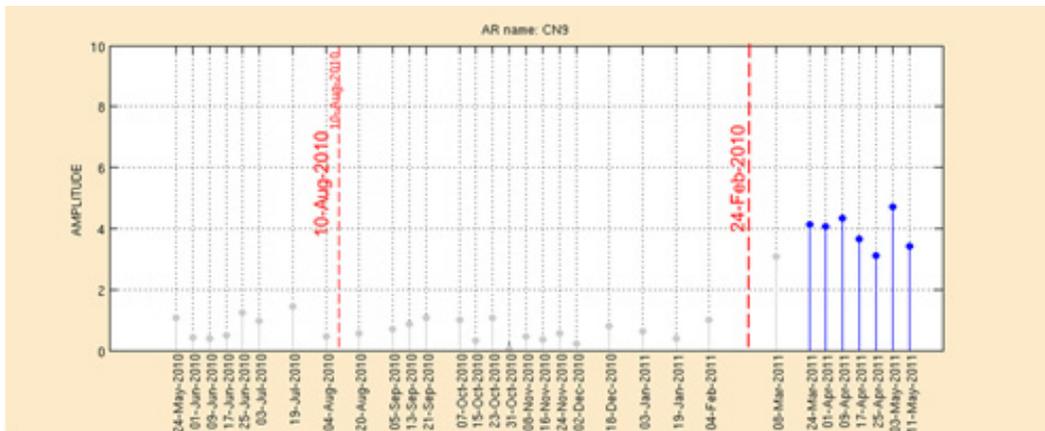


Figura 5 – Esempio di analisi della condizione di visibilità (e ampiezza) di un riflettore nautico, con le prime 7 immagini CSK® acquisite dopo l'installazione.

## Discussione e conclusioni

Il progetto LAWINA è ancora in corso. Questo contributo viene scritto mentre immagini in banda X del CSK® sono ancora in fase di acquisizione. Intanto, l'esperienza fin qui maturata porta a ritenere che programmi di monitoraggio di specifici versanti in area di montagna, basati su tecniche multi-interferometriche, possano essere progettati in modo da ottimizzare i risultati rispetto alle condizioni a contorno e minimizzando le limitazioni proprie del sistema SAR, anche grazie all'aumentata disponibilità di sensori di nuova generazione.

Nell'impiego di tecniche radar si incontrano spesso difficoltà dovute alla geometria obliqua di ripresa e alle conseguenti distorsioni prospettiche. Le caratteristiche costruttive del sensore CSK® offrono una flessibilità di orientamento che, se opportunamente sfruttata e investigata, può ridurre questo genere di problemi per studi su specifiche aree di interesse.

L'analisi di deformazione del terreno di media e alta risoluzione spaziale e temporale con dati SAR su superfici naturali libere da manufatti antropici, possono rivelarsi problematiche. Nel progetto LAWINA la continuità di misure durante tutte le stagioni dell'anno è garantita attraverso l'installazione di riflettori artificiali che sono stati regolarmente controllati al fine di garantirne la visibilità anche durante la stagione delle precipitazioni nevose. Un tale approccio, che avvicina questa applicazione della tecnica PSI alle più tradizionali campagne di monitoraggio terrestre con GPS, permette di esaminare superfici molto estese, per lunghi periodi e virtualmente "in continuo" (otti-

mizzando l'intervallo di acquisizione in base al tasso di deformazione del terreno), con un costo per punto di misura che decresce all'aumentare del numero dei PSs, al contrario di quanto si verifica con le reti di misura GPS.

La messa a punto della rete di *corners* per il monitoraggio della deformazione dei versanti basata su *remote-sensing* per la fornitura di dati utili per valutazioni ingegneristiche o sistemi di controllo della pericolosità, deve essere progettata tenendo conto dei vincoli ambientali e di calibrazioni e controlli periodici con misure topografiche indipendenti (tecniche topografiche tradizionali o rilievi GPS).

Con questo contributo si vogliono riepilogare i criteri messi in atto per l'analisi di fattibilità e l'implementazione del sistema di monitoraggio della frana di Corvara, ed in particolare:

- evidenziare l'origine delle maggiori difficoltà e gli aspetti più rilevanti per la fattibilità del progetto di monitoraggio basato su PSI;
- elencare la tipologia di dati utile, quando sono disponibili, a valutare il miglior scenario operativo;
- riordinare le fasi operative nella maniera più efficiente.

#### 1) Influenze ambientali sul sistema di monitoraggio

Se lo scopo dell'elaborazione PSI è il monitoraggio delle deformazioni del terreno per apprezzare le dinamiche stagionali, o l'evolversi del grado di pericolosità del fenomeno, è importante che almeno alcuni dei punti di misura ottenuti dalla PSI ricadano nelle zone dinamicamente più significative e che le misure di velocità di spostamento risultino affidabili e interpretabili il più chiaramente possibile nel contesto della dinamica generale del movimento di massa.

Per raggiungere questo scopo, nell'analisi di fattibilità sviluppata prima della progettazione e della installazione della rete di CRs, sono stati esaminati:

- i problemi di visibilità geometrica dei versanti in esame - *shadowing, layover e foreshortening* -, tenendo conto delle possibili geometrie che poteva assumere il sensore SAR per ottimizzare la geometria di acquisizione;
- le direzioni e le velocità di spostamento dei diversi settori che compongono la frana, rispetto alla *line of sight*, tenendo conto della loro significatività rispetto alle indicazioni di maggiore pericolo potenziale meglio descritte dalle eventuali indagini di sottosuolo;
- la distribuzione e lo stato di oggetti che possono risultare PS dall'analisi multi-interferometrica, per evitare di avere lacune di PSs dove sono più necessari o che manufatti precari o instabili "inquinano" le informazioni sul tasso di deformazione del terreno;
- l'entità e la durata della copertura nevosa, per evitare che i CRs rischino di essere coperti dalla neve al passaggio del sensore;
- le attività economiche e l'uso del suolo durante le diverse stagioni dell'anno, per non creare conflitti o condizioni di pericolo con l'installazione dei CRs, ed evitare che questi vengano danneggiati durante il periodo di monitoraggio;
- le difficoltà di spostamento nell'area della frana durante i diversi periodi dell'anno e le possibili soluzioni per agevolare i sopralluoghi di manutenzione dei CRs;
- la possibilità di ancorare i CRs a basi utilizzate per altri tipi di monitoraggio realizzati precedentemente, come quello GPS, per garantire almeno una parziale continuità e sovrapposizione con serie di misure storiche e indipendenti.

#### 2) Anche dati utili per l'analisi di fattibilità e la progettazione del sistema di monitoraggio

Per l'area della frana di Corvara esiste una consistente mole di dati prodotta da studi precedenti e dalla Provincia di Bolzano, che è stata utilizzata in parte per l'esame delle problematiche elencate sopra. Per definire lo scenario operativo ottimale, consistente nella definizione della geometria di acquisizione e nella selezione dei punti di installazione dei CRs, sono risultati utili o necessari:

- il DEM di risoluzione comparabile con quella dell'immagine SAR elaborata con tecnica PSI;
- la perimetrazione dell'area soggetta a movimento;
- la serie (georiferita) di misure di spostamento;
- eventuali dati geologici ancillari sulle caratteristiche del fenomeno, quali dati di sottosuolo o sezioni;

- la localizzazione e la caratterizzazione, in termini di stabilità strutturale, di manufatti o altri oggetti che possono avere un comportamento radiometrico da PS;
- eventuali elaborazioni (multi-)interferometriche di dati SAR precedenti, tenendo conto dell'orbita e dei parametri geometrici, oltre che radiometrici.

### 3) Flusso di lavoro per la progettazione e la realizzazione del monitoraggio

Il progetto LAWINA è stato sviluppato con lo scopo di sperimentare non solo l'applicazione civile e scientifica del CSK al monitoraggio di movimenti di massa lenti, ma anche la fattibilità di un sistema di monitoraggio basato su questo sensore, che fosse in grado di sostituirsi almeno parzialmente ai tradizionali sistemi terrestri di superficie. Il doppio livello di sperimentazione ha suggerito il seguente ordine logico e funzionale delle attività da svolgere per l'implementazione di simili sistemi:

- Raccolta dei dati geologici e geomorfologici disponibili, fra cui rilievi e monitoraggi degli spostamenti del corpo in frana
- Elaborazioni derivate da DEM dell'area di interesse per minimizzare le distorsioni geometriche rispetto alla possibile *line of sight* di acquisizione
- Analisi delle componenti di spostamento dei diversi settori che compongono l'area instabile risultanti dalle misure di archivio, in relazione alla possibile *line of sight* di acquisizione
- Analisi di elaborati (multi-)interferometrici derivati da archivi di immagini SAR "storiche" del versante interessato dal movimento
- (se in zona naturale, con limitata presenza di potenziali scatteratori) Censimento dei manufatti che possono riflettere il segnale radar
- Stima della quantità, significatività e attendibilità dei potenziali scatteratori
- (se reso possibile dal *budget* di immagini disponibili) Acquisizione preliminare di poche immagini (3-4) secondo la geometria selezionata, per la verifica delle distorsioni geometriche e dei PS-candidates
- Pianificazione dell'eventuale installazione di CRs tenendo conto delle influenze ambientali
- Avvio dell'acquisizione dello *stack* di immagini per l'analisi multi-interferometrica
- Avvio delle attività di controllo e manutenzione dei CRs
- (dopo aver acquisito le prime 18-20 scene SAR) Individuazione degli eventuali "sites" di elaborazione PSI e avvio della fase di restituzione del monitoraggio, con successive, periodiche, rielaborazioni della crescente serie di immagini
- Periodiche (1-2 per anno) campagne di misura indipendente (GPS o sistemi topografici tradizionali) per la verifica e la validazione dei tassi di deformazione ottenuti dalla PSI.

### Ringraziamenti

Lo studio è stato realizzato con il finanziamento dell'Agenzia Spaziale Italiana ASI. L'installazione dei riflettori e i sopralluoghi nell'area di monitoraggio durante il periodo invernale sono stati resi possibili attraverso i mezzi da neve della Soc. Pralongià, del Carosello Ski di Corvara in Badia. Si ringraziano il Sindaco e il Segretario del Comune di Corvara in Badia per la raccolta delle autorizzazioni necessarie all'installazione dei riflettori in proprietà private.

### Bibliografia

Agenzia Spaziale Italiana ASI (2007), "COSMO-SkyMed Announcement of Opportunity. Doc. N°. ASI-CSM-ENG-RS-090-A. 30 April 2007", (On-line Publication:

<https://eopi.asi.it/asi/asi?type=file&ts=1314880013841&table=aotarget&cmd=image&id=107>)

Allievi J., Ambrosi C., Cerini M., Colesanti C., Crosta G.B., Ferretti A., Fossati D. (2003), "Monitoring slow mass movements with the Permanent Scatterers technique," *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS '03. Proceedings. 2003 IEEE International*, 1: 215- 217

Belitz K., Corsini A., Mair V., Strozzi T., Wegmüller U., Zilger J., (2004) *Support of Satellite Radar to Hazard Zone Mapping in the Italian Alps*. FRINGE 2003 workshop SP550 Proceedings. ESA-

ESRIN Frascati (Italy) 1-5 December 2003. European Space Agency CD ISBN 92-9092-861-1  
(On-line Publication:

[http://earth.esa.int/workshops/fringe03/participants/467/paper\\_Belitz\\_etal\\_FRINGE2003.pdf](http://earth.esa.int/workshops/fringe03/participants/467/paper_Belitz_etal_FRINGE2003.pdf),

European Space Agency CD-rom ISBN 92-9092-861-1)

Colesanti C., Ferretti A., Prati C., Rocca F. (2003a), "Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique", *Engineering Geology*, 68: 3-14

Colesanti C., Ferretti A., Novali F., Prati C., Rocca F., (2003b), "SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the Permanent Scatterers technique", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41: 1685–1700.

Colesanti C., Wasowski J. (2006), "Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar. (SAR) interferometry", *Engineering Geology*, 88: 173-199

Corsini A., Marchetti M., Soldati M. (2001), "Holocene slope dynamics in the area of Corvara in Badia (Dolomites, Italy): chronology and paleoclimatic significance of some landslides", *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, 24: 127-139

Corsini A., Pasuto M., Soldati A., Zannoni A. (2005), "Field monitoring of the Corvara landslide (Dolomites, Italy) and its relevance for hazard assessment", *Geomorphology*, 66(1-4): 149-165

Crosetto M., Crippa B., Biescas E., Monserrat O., Agudo M., Fernández P. (2005), "Land deformation monitoring using SAR interferometry: state-of-the-art", *Photogramm. Fernerkundung Geoinformation*, 6: 497-510

Ferretti A., Fumagalli A., Novali F., Prati C., Rocca F., Rucci A. (2010), "A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 49(9): 3460-3470

Hanssen R.F. (2005), "Satellite radar interferometry for deformation monitoring: a priori assessment of feasibility and accuracy", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 6(3-4): 253-260

Meisina C., Zucca F., Fossati D., Ceriani M., Allievi J. (2006), "Ground deformation monitoring by using the Permanent Scatterers Technique: The example of the Oltrepo Pavese (Lombardia, Italy)", *Engineering Geology*, 88(3-4): 240-259

Panizza, M., Silvano, S., Corsini, A., Soldati, M., Marchetti, M., Borgatti, L., Ghinoi, A., Piacentini, D., Pasuto, A., Zannoni, A., Marcato, G, Mantovani, M., Tagliavini, F. & Moretto, S. 2006. *Definizione della pericolosità e di possibili interventi di mitigazione della frana di Corvara in Badia*. Provincia Autonoma di Bolzano – Alto Adige. Open File Report. [http://www.provincia.bz.it/opere-idrauliche/download/Download\\_Corvara\\_RelazioneFinale\\_10-4-06\\_inviato.pdf](http://www.provincia.bz.it/opere-idrauliche/download/Download_Corvara_RelazioneFinale_10-4-06_inviato.pdf)

Schneiderbauer S., Iasio C., Mair V., Strada C. (2010), "The analysis of X-band SAR data for slow moving landslide detection and monitoring", *Proceedings of the "Mountain Risks" International Conference*, Firenze, Italy, 24-26 November 2010, 193-199

Strozzi T., Farina P., Corsini A., Ambrosi C., Thüning M., Zilger J., Wiesmann A., Wegmüller U., Werner C., (2005). *Survey and monitoring of landslide displacements by means of L-band satellite SAR interferometry*. *Landslides* (Springer) 2 (3), 193 – 201