

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

XXVI CICLO DEL DOTTORATO DI RICERCA IN

GEOSCIENZE

**MONITORAGGIO DI DISSESTI FRANOSI CON METODOLOGIA INTEGRATA BASATA SULL'USO
DI SISTEMA RADAR INTERFEROMETRICO TERRESTRE (GBSAR)**

Settore scientifico disciplinare: GEO/11 Geofisica Applicata

DOTTORANDO
ANTONIO BRATUS

COORDINATORE
PROF. GIOVANNI COSTA

SUPERVISORE DI TESI
PROF. EMANUELE FORTE

ANNO ACCADEMICO 2013/2014

I rigori li sbaglia solo chi ha il coraggio di tirarli (D. A. Maradona)

Sommario

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Premessa..... | 1 |
| 2 | Il concetto di monitoraggio in campo geologico..... | 2 |
| 3 | Analisi del contesto regionale e scelta dei siti | 3 |
| 4 | Il metodo radar interferometrico..... | 6 |
| 4.1 | L'interferometria..... | 11 |
| 4.2 | L'interferometria differenziale | 12 |
| 4.3 | L'interferogramma e la mappa di deformazione..... | 12 |
| 4.4 | Il GBSAR..... | 14 |
| 4.5 | La tecnica GBSAR..... | 17 |
| 4.6 | Misura continua e misura discontinua..... | 20 |
| 4.7 | Caratteristiche dell'immagine radar ad apertura sintetica..... | 21 |
| 4.8 | Immagini acquisite..... | 22 |
| 4.9 | Processing e analisi del dato GBSAR..... | 23 |
| 4.10 | Valutazione di fattibilità delle misure | 25 |
| 4.11 | Un precedente bibliografico | 30 |
| 5 | Progettazione del monitoraggio e risultati attesi..... | 32 |
| 5.1 | Il progetto..... | 33 |
| 6 | La strumentazione utilizzata..... | 39 |
| 6.1 | Sistema GBSAR..... | 40 |
| 6.2 | Sistema di monitoraggio GPS..... | 40 |
| 6.3 | La stazione meteo..... | 41 |
| 6.4 | Sistema di controllo e trasferimento dati da remoto | 42 |
| 6.5 | I corner reflector | 42 |
| 6.6 | Il processo di elaborazione dei dati interferometrici..... | 43 |
| 7 | Fase preparatoria all'acquisizione..... | 43 |
| 7.1 | Ligosullo..... | 43 |
| 7.2 | Cimolais | 44 |
| 7.3 | La Pineda..... | 45 |
| 8 | Acquisizione ed elaborazione dei dati..... | 48 |
| 8.1 | Ligosullo..... | 48 |
| 8.1.1 | Caratteristiche di backscattering del versante | 50 |
| 8.1.2 | Misure di spostamento della prima campagna | 53 |

| | | |
|-------|--|----|
| 8.1.3 | Misure di spostamento nel corso della seconda, terza e quarta campagna | 59 |
| 8.1.4 | Monitoraggio GPS..... | 60 |
| 8.2 | Cimolais | 61 |
| 8.2.1 | Caratteristiche di backscattering del versante | 64 |
| 8.2.2 | Misure di spostamento | 68 |
| 8.2.3 | Analisi a scala di versante..... | 68 |
| 8.2.4 | Analisi alla scala locale (metodo PtoP) | 73 |
| 8.2.5 | Monitoraggio GPS..... | 75 |
| 8.3 | La Pineda..... | 76 |
| 8.3.1 | Caratteristiche di backscattering del versante | 79 |
| 8.3.2 | Prima campagna di monitoraggio..... | 81 |
| 8.3.3 | Seconda campagna di monitoraggio | 85 |
| 8.3.4 | Monitoraggio discontinuo..... | 90 |
| 8.3.5 | Rilievo laser scanning terrestre a La Pineda | 92 |
| 8.3.6 | Monitoraggio GPS..... | 93 |
| 9 | Risultati del monitoraggio GBSAR..... | 94 |
| 9.1 | Ligosullo..... | 94 |
| 9.2 | Cimolais | 95 |
| 9.3 | La Pineda..... | 96 |
| 10 | Conclusioni..... | 97 |
| 10.1 | Considerazioni finali | 97 |
| 10.2 | Contributi innovativi | 98 |
| 10.3 | Sviluppi futuri di ricerca | 99 |
| 11 | Bibliografia..... | 99 |

1 Premessa

L'analisi critica del monitoraggio di frane con l'utilizzo dell'interferometria radar da terra è lo scopo di questa tesi di dottorato di ricerca in geoscienze. Il progetto prende lo spunto dalla possibilità di poter coniugare le esigenze di una struttura preposta al monitoraggio di dissesti franosi, la disponibilità di tecnologie innovative non invasive e la loro fattibilità nel contesto regionale. L'idea di poter utilizzare ed analizzare criticamente i risultati di una serie di monitoraggi è stata quindi presa come linea guida per questo ciclo di dottorato di ricerca in geoscienze. L'interferometria radar da terra (GBSAR) è una tecnologia innovativa che sta trovando impiego anche nel monitoraggio di versanti, poiché è in grado di fornire elevata accuratezza ed affidabilità dei risultati.

Nell'ambito delle opere di prevenzione da calamità naturali, il Servizio geologico della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, di cui l'autore è un componente, ha ritenuto di attivare il monitoraggio di tre frane ubicate nel territorio di competenza con l'utilizzo di misure di superficie eseguite con tecnologie basate sull'uso del sistema radar interferometrico con lo scopo di identificare delle zone caratterizzate da movimenti di versante, così da:

- integrare le conoscenze pregresse sulla determinazione della forma ed estensione della massa in movimento nonché della distribuzione di pressioni e sforzi;
- determinare gli spostamenti differenziali dell'area di frana;
- stimare il campo di velocità e la sua interrelazione con fattori esterni quali piogge o temperatura;

I siti individuati per questo piano di monitoraggio sono caratterizzati da diverse tipologie di dissesto e di condizioni al contorno. La loro designazione è stata fatta seguendo questo criterio guida. Considerando l'eterogeneità del territorio regionale sono stati scelti:

- Ligosullo (UD): il sito in oggetto è rappresentato dal centro urbano di Ligosullo, caratterizzato da un fenomeno di instabilità generalizzato con tassi di deformazione dell'ordine di alcuni cm/anno;
- Cimolais (PN): il sito in oggetto è rappresentato una parete rocciosa, caratterizzata da fenomeni localizzati di crollo;
- Erto e Casso, località La Pineda (PN): il sito in oggetto è rappresentato da una parte dell'accumulo di una paleo frana del monte Salta. Caratterizzato da una zona calanchiva in evoluzione, caratterizzata da frane superficiali diffuse.

Le ragioni che hanno individuato il radar interferometrico terrestre come principale metodo di monitoraggio sono legati alle principali caratteristiche della tecnica, ovvero:

- sistema remoto che consente di misurare spostamenti del fronte instabile senza la necessità teorica di installare riflettori artificiali e quindi di accedere direttamente alla zona instabile;
- capacità di fornire mappe di spostamento dell'intero versante;
- misure in near real time: è possibile elaborare i dati acquisiti in maniera automatica e fornire i risultati in tempo quasi reali (con pochi minuti di ritardo rispetto all'acquisizione);
- misure in qualsiasi condizione meteorologica, sia di giorno che di notte grazie all'uso di un sistema radar;
- misure ad elevata accuratezza (tra il decimo di millimetro ed il millimetro in funzione della distanza) nate dall'applicazione della ricerca spaziale, che consente di determinare l'entità dello spostamento di un oggetto confrontando le informazioni di fase delle onde elettromagnetiche riflesse dall'oggetto in diversi istanti di tempo.

2 Il concetto di monitoraggio in campo geologico

I monitoraggi per il controllo di rischi idrogeologici consentono di approfondire la conoscenza del fenomeno per la definizione delle azioni che possono ridurre gli effetti indotti in modo da definire le procedure per la mitigazione del rischio. Ogni monitoraggio di dissesto richiede una progettazione dedicata: una rete di monitoraggio deve derivare da una attività progettuale che trovi riscontri dalle verifiche geologiche, geotecniche, impiantistiche, informatiche, gestionali, ma anche autorizzative e normative. Il risultato di un monitoraggio di fenomeni di instabilità è una fonte di informazioni per comprenderne l'estensione e la potenzialità e quindi per stimare il pericolo connesso.

I risultati che un sistema di monitoraggio riesce a fornire sono fondamentalmente quattro:

- la comprensione dei meccanismi in atto
- l'area e la profondità interessata
- l'iterazione dei diversi fattori che incidono sul dissesto (precipitazioni, temperature, attività sismica, azioni antropiche)
- l'efficacia delle eventuali opere di presidio

La decisione di quali risultati ottenere è funzione della conoscenza dei fattori predisponenti ed innescanti di un fenomeno franoso per:

- individuare i parametri di maggiore rilevanza
- scegliere la strumentazione da installare
- definire la modalità di esecuzione delle misure
- definire la suscettibilità del territorio, per la valutazione del rischio.

L'attivazione di un efficace intervento di monitoraggio si articola in tre fasi distinte e successive.

- inquadramento dei fenomeni, dove vengono raccolte tutte le informazioni necessarie alle successive fasi di approfondimento e realizzazione del progetto di monitoraggio; viene definito cosa monitorare, con che scala, con quale frequenza e durata, con quali costi e risultati;
- affinamento conoscenze e progettazione, nella quale entra in gioco uno specialista che effettua i primi rilevamenti e misure in situ, nonché approfondisce le caratteristiche geologico tecniche della situazione;
- realizzazione della rete di monitoraggio, che comporta l'installazione ed il mantenimento in esercizio della rete di monitoraggio e definisce quali sono i parametri da misurare e dove e come misurarli.

I parametri da misurare possono essere raggruppati in due tipologie:

- parametri diretti: grandezze che descrivono in modo diretto il comportamento del fenomeno franoso, movimenti verticali e orizzontali, deformazioni, rotazioni;
- parametri indiretti: grandezze che rappresentano le condizioni al contorno del fenomeno franoso o che devono essere analizzate in correlazione con altre grandezze per fornire valutazioni utilizzabili dal progettista (pressioni neutre, livelli di falda, parametri meteorologici, idrologia, sismicità, etc.).

Lo scopo per cui viene promosso un monitoraggio influenza il tipo di progettazione ed i parametri da monitorare, in genere un monitoraggio si attiva per scopi di:

- sicurezza di centri abitati, infrastrutture, opere ed impianti;
- studio;
- protezione civile.

La frequenza dei rilievi è funzione di:

- scopo del monitoraggio;
- responsabilità connesse all'analisi delle misure;
- evoluzione dei fenomeni;
- periodi di osservazione.

Il tipo di raccolta dei dati, che definisce la tipologia del sistema di monitoraggio può essere:

- manuale;
- automatica (con trasmissione o con raccolta manuale);
- mista;
- con utenti e centri remoti.

Il sistema di monitoraggio deve rispondere a particolari requisiti, soprattutto in condizioni di crisi, è quindi fondamentale che il sistema sia in grado di offrire:

- affidabilità, il sistema deve produrre informazioni significative e immediate utilizzabili in modo da ridurre al minimo le incertezze nell'interpretazione dei dati e nella comprensione degli effetti associati all'evoluzione del fenomeno;
- robustezza e l'utilizzabilità in ogni condizione meteorologica, climatica ed ambientale, in modo da ridurre al minimo onerose operazioni di manutenzione e da evitare l'interruzione del funzionamento proprio nei momenti critici in cui i dati sono necessari;
- flessibilità e la maneggevolezza, in modo da poter essere predisposto rapidamente all'approssimarsi di condizioni potenzialmente rischiose o per controllarne l'evoluzione in caso di evento già accaduto;
- prontezza nel produrre informazioni in tempo reale, immediatamente utilizzabili per l'interpretazione e la definizione degli scenari.

Il monitoraggio può essere quindi definito come un "intervento non strutturale di mitigazione del rischio", in altre parole è un'azione che consente di approfondire le conoscenze di un fenomeno e della sua pericolosità, mettendo in atto attività che possono ridurre gli effetti indotti.

3 Analisi del contesto regionale e scelta dei siti

Nell'ambito del progetto denominato "Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia" (progetto IFFI), promosso dal Comitato dei Ministri per la difesa del Suolo ai sensi della legge 183/89, il Servizio Geologico della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, ha rilevato, considerando l'anno 2006, 5253 frane.

Il territorio della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia appartiene all'unità sudalpina ed è caratterizzato prevalentemente da litologie sedimentarie, con subordinati episodi effusivi testimoniati da ridotte sequenze vulcanoclastiche e vulcaniti. Limitati affioramenti metamorfici sono presenti solo nella parte Nord occidentale (Alpi Carniche) e sono rappresentati per lo più dalle litologie basso-metamorfiche del basamento ercinico, quali i marmi e le metaclasiti. Questi sono i termini più antichi presenti in Regione (Ordoviciano inf.), i quali lasciano posto, da nord verso sud, a terreni sempre più recenti. Le rocce affioranti nella regione rappresentano quasi l'intera scala dei tempi geologici, fatta eccezione per alcune lacune, di cui le più significative sono determinate dalle compressioni erciniche prima (Carbonifero sup. e Permiano inf-sup) e da quelli nealpine dopo (Pliocene) (Manca, 2006).

Escludendo la pianura alluvionale, la litologia predominante è quella carbonatica caratterizzata soprattutto dalle potenti sequenze triassiche e giurassiche della zona alpina e prealpina, nonché quelle cretatiche del Carso e della zona pedemontana (Carulli, 2006).

Da un punto di vista sismotettonico il Friuli Venezia Giulia si inserisce in un contesto geodinamico particolarmente attivo, determinato soprattutto dalla collisione tra la microplacca adriatica e quella europea. I lineamenti sismicamente più attivi sono identificabili con quelli ad orientamento E-W della fascia pedemontana (linea Barcis - Staro Selo ed associate) con attività principalmente inversa, nonché con quelli ad andamento NW-SE, con attività trascorrente destra ed inversa (Manca, 2006).

La regione si estende dall'arco alpino fino al Mar Adriatico e presenta dal punto di vista geomorfologico un territorio quanto mai articolato e diversificato (Figura 3.1). Si possono riconoscere infatti diverse unità morfologiche, decisamente influenzate dall'assetto strutturale ed orientate pertanto lungo fasce est-ovest. Procedendo da Nord verso Sud vengono identificate quindi una zona montana, una zona pedemontana (o collinare), la pianura, la fascia costiera ed infine la laguna (Manca, 2006).

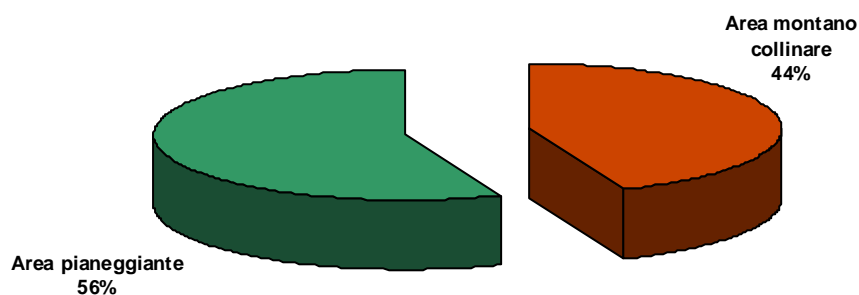


Figura 3.1 Percentuale di area montano-collinare, rispetto alla superficie totale regionale (Manca, 2006).

Il clima della Regione Friuli Venezia Giulia (Figura 3.2) è caratterizzato da valori di piovosità molto alti che, sebbene siano concentrati in aree ridotte, presentano valori medi annui tra i più elevati d'Italia. Spesso come dimostrato anche dalle recenti alluvioni le precipitazioni avvengono con intensità superiori a 40mm/h, determinando l'innescio dei fenomeni di dissesto idrogeologico (Manca, 2006).

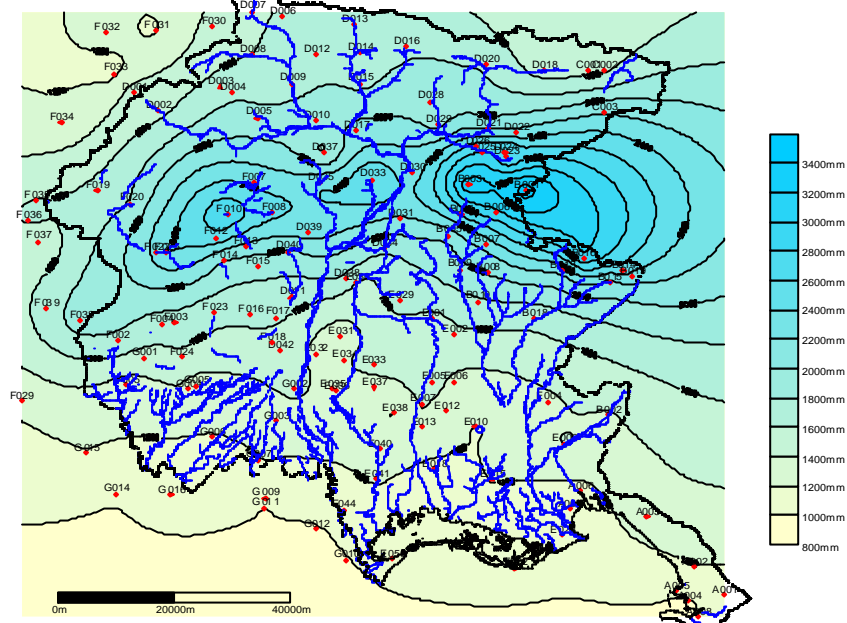


Figura 3.2 Media annua delle precipitazioni in mm, calcolata in base ai dati mensili del ventennio 1950-1970, forniti da 137 stazioni di monitoraggio (Manca, 2006).

I fattori geologici, morfologici e meteorologici fanno sì che il territorio regionale sia particolarmente suscettibile ai fenomeni franosi. Nel 2006 sono stati individuati e perimetrati 5253 fenomeni franosi, dei quali 265 con geometria puntuale e 4988 con geometria areale. La Figura 3.3 indica la loro distribuzione per provincia.

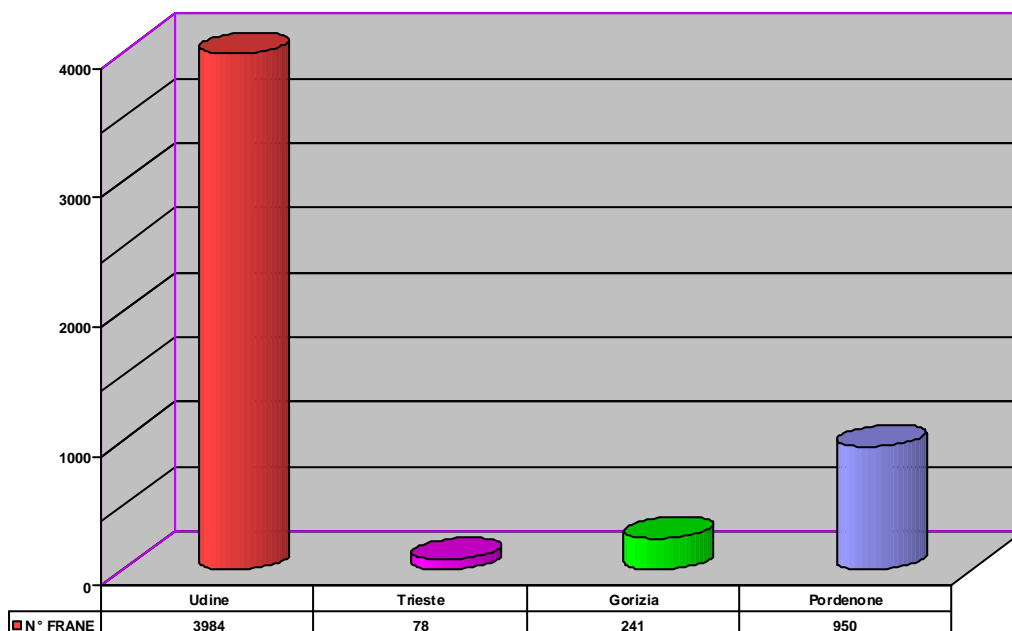


Figura 3.3 Distribuzione delle frane per provincia (Manca, 2006)

Relativamente alle tipologie di frana (Figura 3.4) definite partendo dalla classificazione di Cruden & Varnes (1996), emerge che le tipologie prevalenti sono risultate essere le aree soggette a crolli/ribaltamenti diffusi (1559 eventi corrispondenti al 29.68%) associate a i 708 fenomeni di crollo e ribaltamento relativi ad aree isolate (pari al 13.48%), seguite dagli scivolamenti rotazionali e traslativi (1432 fenomeni, pari al 27.26%) e dalle aree soggette a frane superficiali diffuse (502 dissesti corrispondenti al 9.56%). I colamenti veloci (813 fenomeni censiti) sono concentrati in alcuni particolari bacini idrografici.

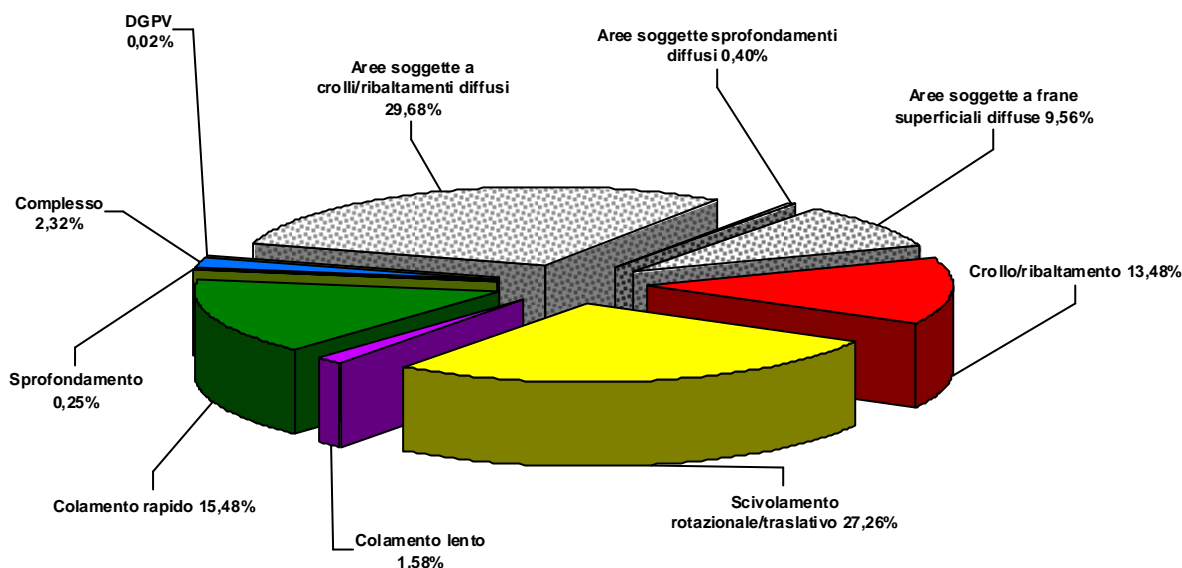


Figura 3.4 Numero di frane censite sul territorio regionale raggruppate per tipologia di movimento (Manca, 2006).

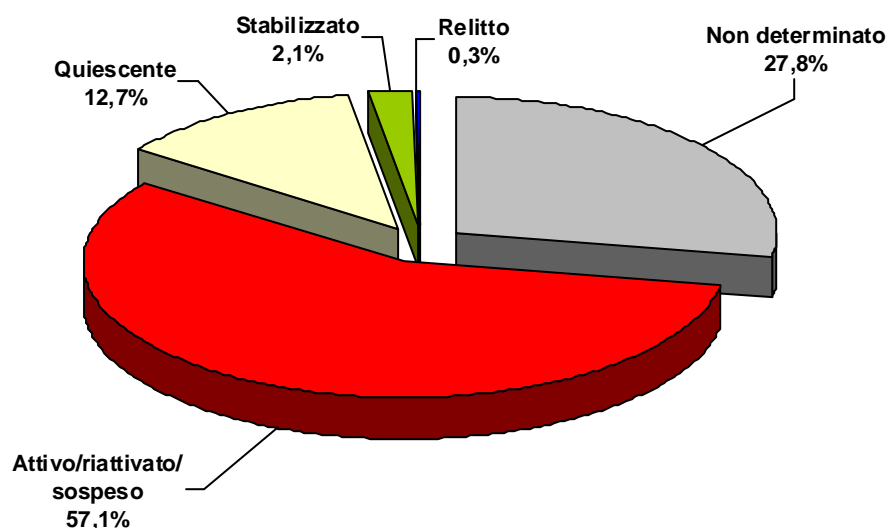


Figura 3.5 Stato di attività delle frane regionali (Manca, 2006).

Lo stato di attività dei fenomeni franosi, valutato distinguendo la condizione di stato attivo, quiescente, stabilizzato e relitto, è rappresentato in Figura 3.5.

Per dare valore di significatività allo studio è stato quindi scelto di monitorare tre diverse tipologie di frana, scegliendo tra quelle più diffuse sul territorio regionale.

Sono state individuate quindi una zona a soggetta a potenziali crolli e ribaltamenti una zona soggetta a frane di scivolamento ed una zona interessata da frane superficiali, (capitolo 7).

4 Il metodo radar interferometrico

Con il termine SAR o Radar ad Apertura Sintetica si definisce un radar che prevede un'antenna montata su di una piattaforma mobile. Il principio di funzionamento di un sistema SAR è il medesimo di tutti i sistemi radar (Radio Detection And Ranging). Un apparecchio trasmittente (antenna) irraggia lo spazio circostante con un'onda elettromagnetica che incide sugli oggetti che incontra subendo un fenomeno di riflessione (o di back-scattering). Una parte dell'onda diffusa torna verso l'antenna dove viene misurata. In questo modo il radar è in grado di individuare oggetti (detection) e, misurando il ritardo temporale tra l'istante di trasmissione e quello di ricezione, è possibile calcolare la distanza (slant-range) di tali oggetti dall'antenna, una volta note le velocità di propagazione dell'onda elettromagnetica nei mezzi attraversati (Figura 4.1).

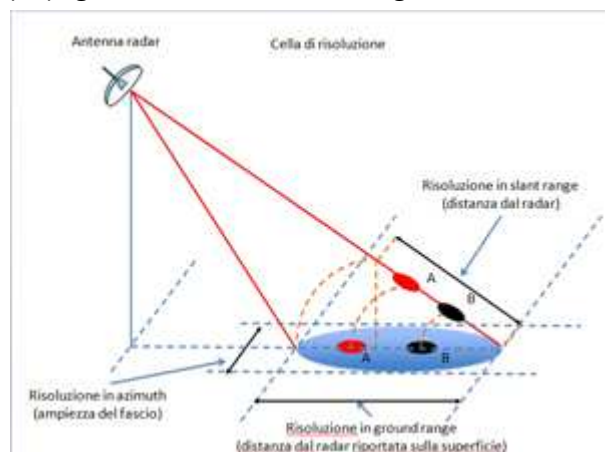


Figura 4.1 Cella di risoluzione SAR (www.pcn.minambiente.it/GN/progetto_psi).

Più in particolare, ogni antenna radar è caratterizzata da un valore di direttività, che contraddistingue l'apertura del fascio d'illuminazione nello spazio circostante. Antenne a elevata direttività possiedono un fascio localizzato e di conseguenza la loro impronta (foot print) è più piccola per cui il bersaglio è meglio localizzato, ciò però avviene a scapito dell'estensione dell'area illuminata.

In questo modo l'ampiezza di un fascio d'antenna determina la risoluzione in azimuth di un'immagine radar, ma per avere una risoluzione dell'ordine del metro sarebbe necessario usare un'antenna di dimensioni chilometriche, il che è evidentemente logisticamente e operativamente irrealizzabile.

L'idea alla base del SAR consente di superare questa limitazione, raggiungendo un compromesso tra risoluzione ed estensione dell'area osservata. Con il termine radar ad apertura sintetica ci si riferisce a una tecnica usata per "sintetizzare" un'antenna di dimensioni chilometriche combinando gli echi radar ricevuti da un'antenna reale a posizioni diverse (Figura 4.2) In particolare in un sistema SAR, ogni volta che un'antenna radar emette un impulso, in virtù del moto della piattaforma su cui è montata, riceve indietro la relativa eco in una diversa posizione. In questo modo gli echi raccolti a posizioni diverse possono essere intesi come derivati da porzioni diverse di una medesima antenna "sintetica" di grandi dimensioni (Figura 4.3) (www.pcn.minambiente.it/GN/progetto_psi).

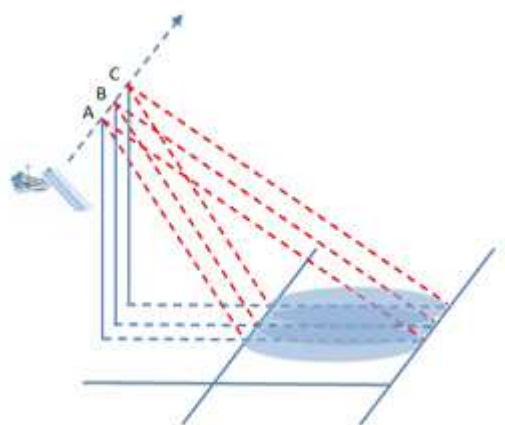


Figura 4.2 Geometria d'acquisizione SAR (www.pcn.minambiente.it/GN/progetto_psi).

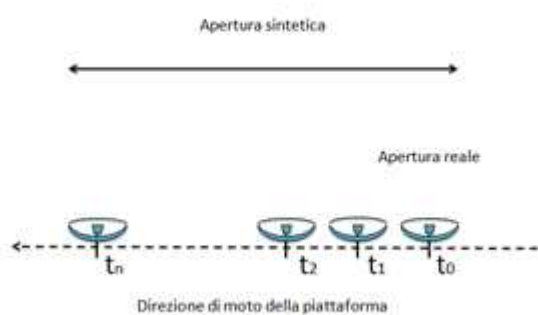


Figura 4.3 Confronto tra apertura d'antenna sintetica ed apertura d'antenna reale (www.pcn.minambiente.it/GN/progetto_psi).

Analogamente alle distorsioni che avvengono quando si usa una fotocamera le immagini radar sono soggette a delle distorsioni geometriche legate alla topografia del terreno (Figura 4.4), ne conseguono tre differenti tipi di deformazione che sono funzione della pendenza del terreno:

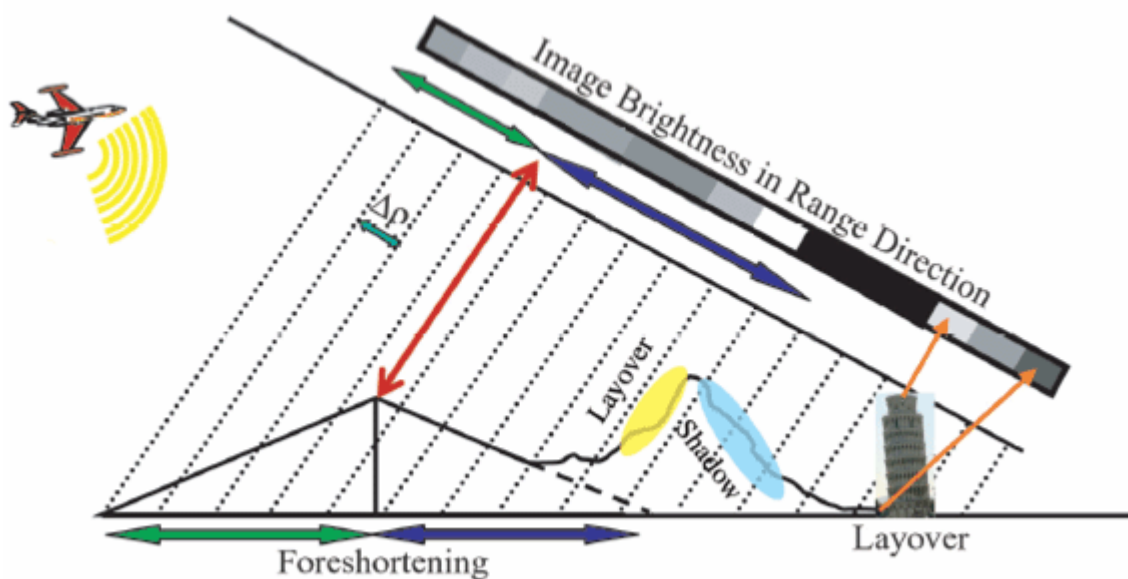


Figura 4.4 Distorsioni topografiche, dovute al fatto che il mondo reale in tre dimensioni viene collassato in due dimensioni dalle immagini SAR convenzionali (www.nrcan.gc.ca)

foreshortening (Figura 4.5): si verifica quando la pendenza del terreno tende ad essere perpendicolare alla linea congiungente sensore-bersaglio, in questi casi il contributo di più punti si concentra in poche celle producendo pixel molto luminosi nell'immagine di ampiezza, il massimo della distorsione si ha quando il beam radar è perpendicolare al suolo, come nel caso dei punti C e D di Figura 4.5;

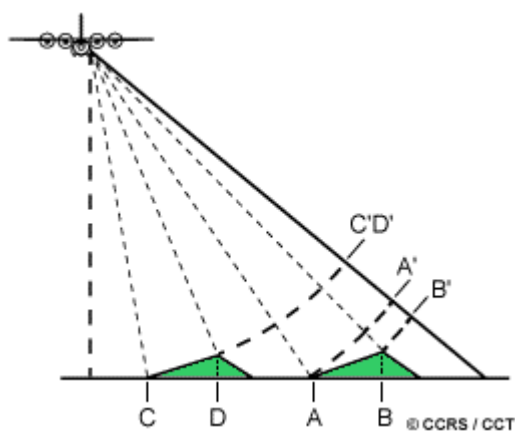


Figura 4.5 Esempio di foreshortening (www.nrcan.gc.ca).

layover (Figura 4.6): si verifica quando il segnale radar raggiunge per primo la cima di un rilievo, piuttosto che la sua base. Il segnale riflesso dalla cima raggiunge quindi il sensore prima di quello riflesso dalla base, generando quindi un'immagine distorta in cui la cima di una montagna si sovrappone "lays over" alla sua base; questo produce una forte distorsione dell'immagine che impedisce la corretta interpretazione del segnale e ogni analisi quantitativa;

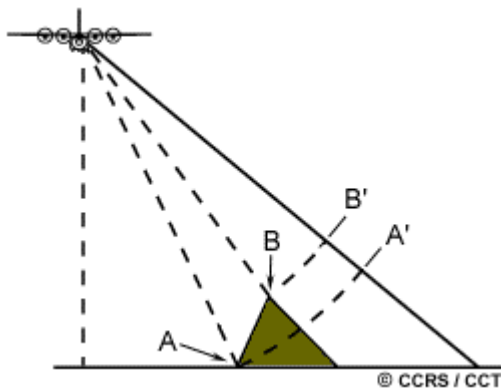


Figura 4.6 Esempio di layover (www.nrcan.gc.ca).

shadowing (Figura 4.7) : si verifica quando alcune zone non possono essere illuminate dall'impulso radar perché schermate da altri oggetti; si producono quindi nell'immagine di ampiezza aree molto scure (in ombra).

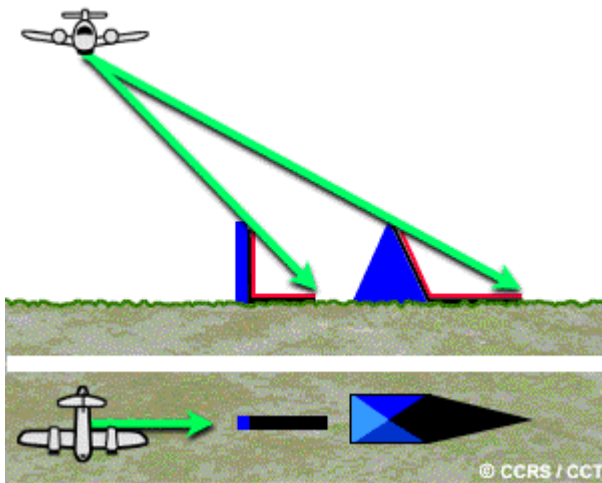


Figura 4.7 Esempio di shadowing (www.nrcan.gc.ca).

Un'immagine SAR è formata da una matrice di pixel ognuno dei quali è associato ad una cella di risoluzione (Figura 4.8). Inoltre un'immagine SAR si dice essere complessa, cioè contiene sia l'informazione d'intensità, o ampiezza, che l'informazione di fase (legata alla distanza tra bersaglio e radar).

Da notare che due oggetti sono distinguibili tra loro solamente se la distanza che intercorre tra le rispettive posizioni è maggiore della risoluzione spaziale, come nel caso dei punti C e D di Figura 4.8. Al contrario, se due riflettori sono contenuti nella stessa cella di risoluzione, essi saranno indistinguibili nell'immagine radar (caso dei punti A e B nello Figura 4.8).

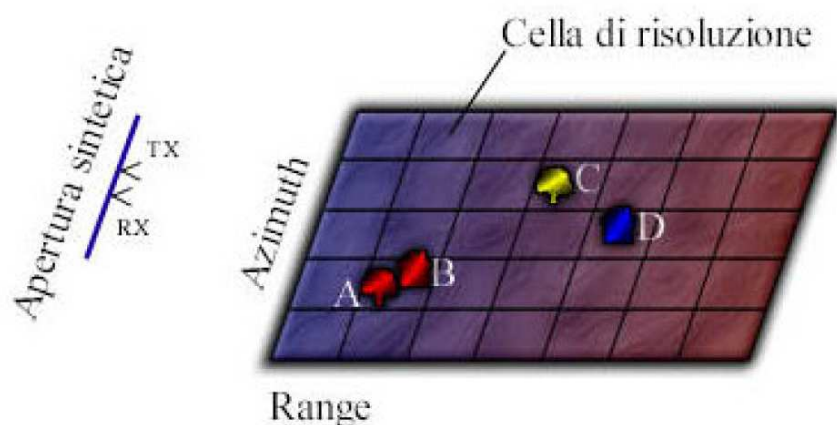


Figura 4.8 Descrizione di un'immagine SAR (Ellegi, 2009).

L'ampiezza è strettamente legata all'energia del segnale riflesso e rilevato dall'antenna del sensore: tutti gli impulsi che vengono emessi hanno la stessa energia, quelli riflessi presentano livelli di energia anche molto diversi (e comunque sempre inferiori all'energia dell'impulso trasmesso). Generalmente i metalli e gli oggetti solidi quali manufatti e rocce esposte, presentano una elevata capacità di riflessione del fascio radar illuminante (in termini tecnici, questi elementi sono associati a valori elevati della cosiddetta Radar Cross Section RCS) e sono pertanto ben visibili in un'immagine radar. Al contrario, materiali quali, ad esempio, legno, campi coltivati e foreste, hanno assai minore capacità di riflettere il segnale radar verso il sensore e, conseguentemente, generano dati SAR di bassa ampiezza. L'ampiezza è una caratteristica delle immagini SAR di facile visualizzazione, ma non di immediata interpretazione a causa dell'inevitabile rumore di speckle. Lo speckle appare visivamente nella forma di un rumore "sale e pepe" che affligge l'immagine SAR, ma non è sintomo di bassa qualità della stessa, bensì è una caratteristica inevitabile indotta dall'interazione dell'impulso elettromagnetico con il terreno. Infatti ogni cella di risoluzione può contenere molti elementi riflettenti, ciascuno dei quali reagisce in modo indipendente con l'impulso proveniente dal radar. I contributi dei vari elementi si sommano ora in modo costruttivo, ora in modo distruttivo, dando luogo a valori molto diversi di riflettività, anche per pixel che appartengono ad una stessa tipologia di superficie. Risulta quindi possibile ridurre l'effetto dello speckle mediante opportune tecniche di filtraggio dei dati SAR, la più semplice delle quali, se si dispone di una serie di immagini della stessa area acquisite dallo stesso sensore in istanti diversi, consiste nel mediane i valori di ampiezza. L'immagine media così ottenuta è comunemente detta Multi-image Reflectivity (Ketelaar, 2009).

La seconda proprietà essenziale del segnale SAR è la fase, che è la grandezza fisica alla base dell'interferometria. Infatti, ad ogni pixel di una immagine SAR oltre al valore di ampiezza, è associato un dato di fase con valori compresi tra 0 e 2π (oppure tra $-\pi$ e $+\pi$).

La fase è determinata dal tempo di volo dell'impulso radar ed è perciò legata alla distanza tra il sensore e l'oggetto che riflette l'impulso radar. Va osservato che è anche la caratteristica più difficile da interpretare a causa della sua natura matematica. Si può semplificare un segnale SAR come ad un'onda sinusoidale monocromatica: un ciclo completo di seno coincide con la lunghezza d'onda (indicata usualmente con il simbolo λ) corrispondente alla frequenza a cui opera il radar. La distanza tra sensore e bersaglio a terra può sempre essere espressa in un numero intero di cicli, più un segmento pari ad una frazione di lunghezza d'onda. La fase associata ad ogni pixel dell'immagine SAR descrive proprio questa frazione di ciclo, descrivibile con un numero da 0 a 2π . Più precisamente, tenendo conto del fatto che il segnale radar percorre due volte la distanza sensore-bersaglio (two way path), il parametro-chiave che determina il valore di fase del segnale radar è pari a due volte la distanza sensore-bersaglio. Ad esempio, avendo un radar che operi in banda C con lunghezza d'onda pari a 6 cm e che

illuminati un oggetto puntiforme distante e 60 m, la distanza sensore-bersaglio sarà esattamente pari a 1000 lunghezze d'onda e, anche considerando i due percorsi di andata e ritorno, la fase del pixel dell'immagine radar corrispondente al bersaglio sarà pari a 0: infatti, esattamente 2000 lunghezze d'onda, coprono il percorso dell'impulso radar. Se ora allontaniamo l'oggetto di 1 cm dal radar, la situazione è radicalmente diversa perché, sempre considerando l'andata e il ritorno, servirà un terzo di lunghezza d'onda in più per coprire il cammino dell'impulso illuminante. Questo fa sì che il valore di fase sia ora pari a $2\pi/3$.

Analogamente si possono calcolare i valori di fase per tutte le posizioni intermedie dell'oggetto comprese tra 0 (posizione iniziale) e 3 cm che andranno a coprire tutto l'intervallo compreso tra 0 e 2π . Si noti come, portando l'oggetto a 3 cm dalla posizione iniziale, il parametro chiave (considerando sempre l'andata e il ritorno) diventi pari a $2 \times 60.03 \text{ m} = 120 \text{ m} + 6 \text{ cm}$, ovvero ancora un numero intero di lunghezze d'onda (in questo secondo caso pari a 2001). Da questo esempio deduciamo perciò che qualsiasi spostamento del bersaglio di multipli di $\lambda/2$ (ovvero metà della lunghezza d'onda del segnale radar) non darà luogo a variazioni di fase: fase 0 e fase 2π corrispondono esattamente alla stessa configurazione.

4.1 L'interferometria

Quando un sistema SAR rivisita una porzione di superficie terrestre già monitorata, la fase dovrebbe essere identica a quella già acquisita in precedenza. Se ciò non avviene vuol dire che c'è stato uno spostamento del bersaglio o del terreno. In questo modo, combinando due o più immagini SAR è possibile misurare l'entità e il verso di questo spostamento. Questa tecnica è detta interferometria differenziale. L'interferogramma è la matrice di dati ottenuta dal confronto tra le due distinte acquisizioni della stessa area e racchiude in sé le informazioni relative ai vari contributi che generano il valore di fase. La fase racchiude l'informazione sulla distanza sensore-bersaglio e può però essere influenzata, oltre che dalla deformazione topografica anche da disturbi atmosferici (clutter).

L'obiettivo della tecnica interferometrica è quello di isolare gli effettivi contributi di fase dovuti al movimento del bersaglio e non imputabili a disturbi, ovvero di stimare accuratamente la differenza di travel path dell'onda elettromagnetica trasmessa in due successive acquisizioni e retrodiffusa dal bersaglio a terra. La fase di una singola immagine SAR non è di fatto utilizzabile, perché risulta impossibile discriminare un contributo dall'altro.

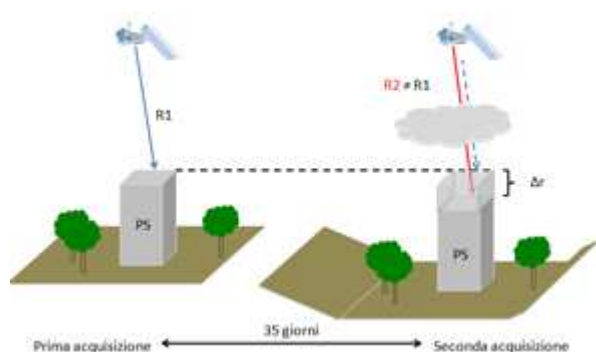


Figura 4.9 Principio alla base della tecnica interferometrica: combinando due o più immagini SAR è possibile misurare l'entità dello spostamento di un bersaglio (www.pcn.minambiente.it/GN/progetto_psi).

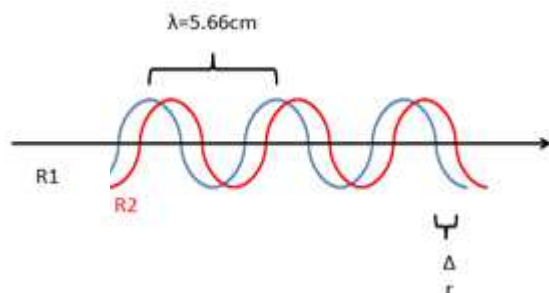


Figura 4.10 Differenza di fase dovuta ad uno spostamento di un bersaglio (www.pcn.minambiente.it/GN/progetto_psi).

4.2 L'interferometria differenziale

Se si hanno, però, due acquisizioni relative alla stessa area, accuratamente registrate sulla stessa griglia di riferimento, è possibile utilizzare l'informazione contenuta in esse e confrontarla. In questo caso, infatti, sottraendo la fase di un'immagine a quella dell'altra (interferometria differenziale - DInSAR), si genera un interferogramma.

La differenza dei valori di fase tra due acquisizioni distinte di uno stesso bersaglio può essere indicata in termini analitici, come somma di tre contributi:

- l'effetto legato all'eventuale moto del bersaglio radar;
- l'effetto indotto dall'atmosfera, la quale introduce ritardi spuri nel tempo di volo;
- il rumore indotto da eventuali variazioni di riflettività (o "risposta radar") del bersaglio e dagli apparati costituenti il sistema SAR.

Ogni contributo evidenziato presenta caratteristiche specifiche. Tralasciando qui la trattazione matematica, si evidenziano qui i fattori fondamentali. Il contributo atmosferico nasce dalle variazioni dell'indice di rifrazione nell'atmosfera causato dalle sensibili variazioni della composizione della stessa, soprattutto in termini di percentuale di vapor acqueo. Pertanto, le nubi, provocano una variazione di fase del segnale tanto più grande quanto maggiore è la loro densità, ovvero il contenuto d'acqua che provoca una significativa diminuzione della velocità di propagazione dell'onda elettromagnetica.

Il contributo legato alla distanza sensore-bersaglio è un effetto geometrico, legato alla componente di spostamento del bersaglio lungo la direzione di puntamento dell'antenna. E' questa la componente più importante nelle applicazioni InSAR volte alla stima degli spostamenti del terreno.

Il contributo legato al rumore di fase varia moltissimo in funzione del tipo di oggetto che viene illuminato dal radar. Il basso livello di segnale retro-diffuso fa sì che la potenza di rumore di fase sia molto elevata. Si può avere un elevato rumore di fase anche per oggetti con buona riflettività, ma che variano significativamente la loro "firma radar" nel tempo.

Nella fase interferometrica si ricavano le informazioni sulla topografia dell'area osservata e sul possibile movimento dei bersagli radar, ovvero l'interferometria è una base che permette di creare strumenti di misura per la generazione di mappe digitali del terreno e/o per misurarne spostamenti.

4.3 L'interferogramma e la mappa di deformazione

A questo punto è possibile introdurre la definizione di interferogramma radar, ovvero la mappa (Figura 4.11) che mostrando la differenza tra i valori di fase del segnale radar tra due acquisizioni di una stessa area, contiene informazioni relative ad eventuali deformazioni superficiali del terreno. In quanto differenza tra valori di fase, l'interferogramma è una matrice di valori numerici sempre compresi tra $-\pi$ e $+\pi$.

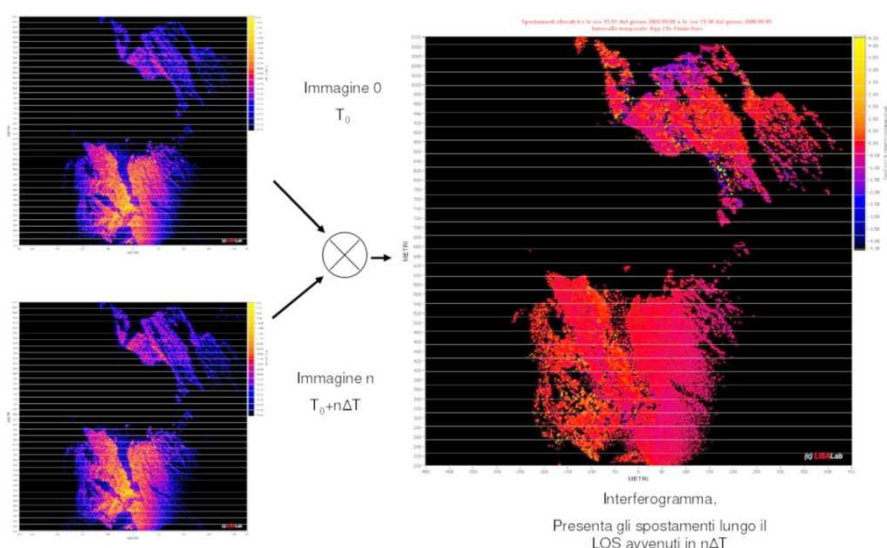


Figura 4.11 Schema ideale di elaborazione di un interferogramma ottenuto a partire da due immagini della stessa scena acquisite a due tempi diversi, T_0 e $T_0 + \Delta T$ (Ellegi, 2009)

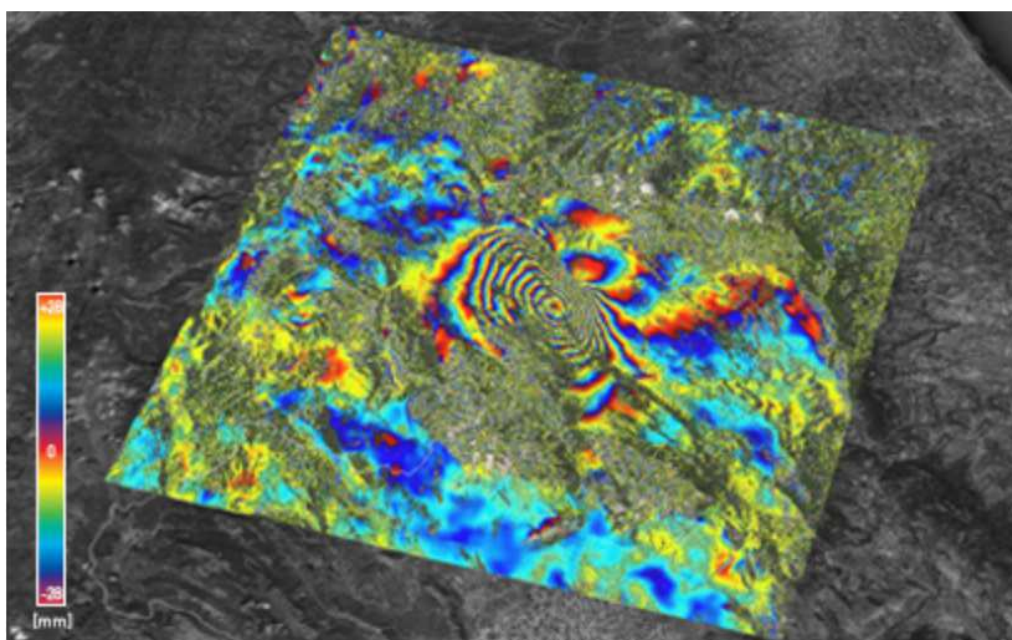


Figura 4.12 Interferogramma tra due acquisizioni SAR aeree, raffigurante le deformazioni superficiali indotte dal sisma de L'Aquila (febbraio 2009 la prima, aprile 2009 la seconda). I valori di fase variano tra $- \pi$ e $+\pi$. L'interferogramma è stato sovrapposto ad una immagine ottica solo per favorire l'ubicazione a livello visivo del dato (Colombo et al. 2012).

Nella Figura 4.12 appaiono in grande evidenza una serie di bande colorate concentriche: queste bande sono frange interferometriche e sono l'indicatore principale, nonché il più immediato da osservare, che tra le due acquisizioni vi è stato un sensibile movimento della superficie del terreno. Per quanto già detto nei paragrafi precedenti una frangia corrisponde ad una variazione di fase pari a 2π radianti che si traduce in uno spostamento del bersaglio pari a metà della lunghezza d'onda del radar utilizzato; nel caso Figura 4.12 ad ogni frangia corrisponde uno spostamento di 28 mm (dati in banda C).

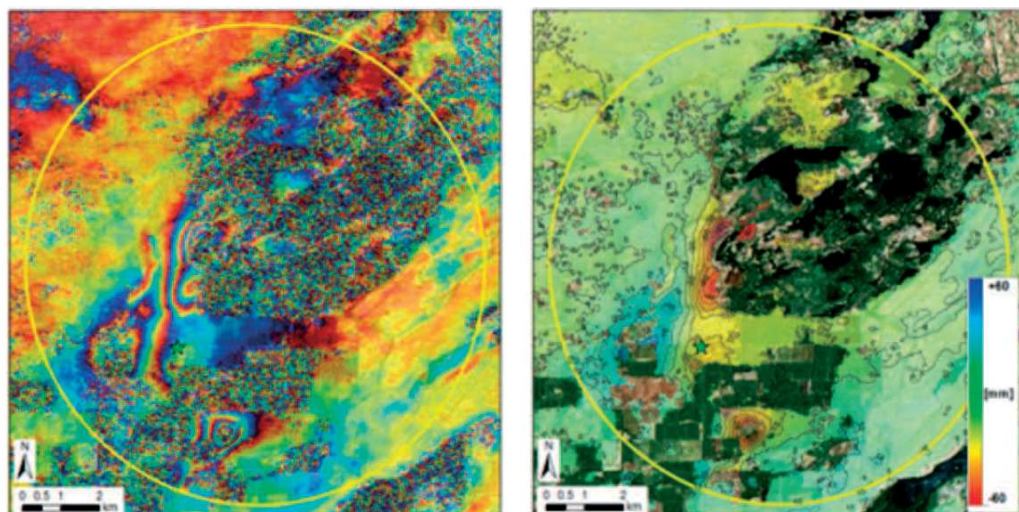


Figura 4.13 Esempio di mappa di deformazione in millimetri (a destra) e, a sinistra, l'interferogramma che l'ha originata (Colombo et al. 2012).

L'interferogramma può essere convertito in una mappa di deformazione, ovvero una rappresentazione di come, nell'arco temporale compreso tra le due acquisizioni utilizzate per costruire l'interferogramma, il terreno si è mosso, lungo la direzione di vista delle antenne (ovvero, come sono variate le distanze sensore-bersaglio). La conversione da interferogramma a mappa di deformazione semplifica grandemente l'interpretazione dei dati interferometrici da parte dell'utente finale, infatti, data la natura ambigua dei valori di fase, che sono sempre compresi tra $-\pi$ e $+\pi$, l'interpretazione corretta delle frange interferometriche non è immediata. In Figura 4.13 viene mostrato un esempio di mappa di deformazione del terreno ottenuta mediante la conversione di un interferogramma SAR. Sempre con riferimento alla Figura 4.13, nella parte sinistra è riportato un interferogramma che presenta buona coerenza su oltre metà della scena elaborata, nella parte coerente si notano delle frange interferometriche che denotano la presenza di fenomeni di spostamento del terreno, nella Figura 4.13 a destra lo stesso interferogramma viene mostrato convertito in mappa di deformazione con range di spostamento tra -60 e +60 millimetri. L'aspetto cruciale della conversione non è l'unità di misura, ovvero il passaggio dalla fase ad una misura di distanza solitamente espressa in millimetri, bensì la soluzione dell'ambiguità dei valori di fase, che sono ciclicamente ripetuti, il cui effetto visivo è proprio la frangia interferometrica.

4.4 Il GBSAR

Il GBSAR (Ground Synthetic Aperture Radar) impiega la tecnica dell'interferometria radar e consente di determinare l'entità dello spostamento di un oggetto confrontando le informazioni di fase delle onde elettromagnetiche riflesse dall'oggetto in diversi istanti di tempo.

L'interferometria radar terrestre è infatti una tecnologia basata sull'utilizzo di sensori operanti nell'intervallo delle microonde (frequenza compresa tra 300 MHz e 300 GHz), capaci di fornire immagini radar ad alta risoluzione dello scenario illuminato, ossia il segnale retro diffuso dallo scenario delle onde emesse dal sensore. Per poter ottenere tali immagini è necessario ricorrere alla tecnica SAR (Synthetic Aperture Radar), ossia far sì che il sistema radar acquisisca l'immagine dello scenario da differenti angoli di vista, muovendo il modulo sensore del sistema lungo un binario di movimentazione. Per questo motivo i sistemi SAR interferometrici terrestri consistono generalmente in una slitta di movimentazione sulla quale sono installate due antenne (una trasmittente ed una ricevente) che vengono fatte muovere durante la singola acquisizione lungo un binario della

lunghezza di 1-2 m. Al termine della “scansione” del sensore radar lungo il binario si ottiene una singola immagine radar dello scenario illuminato, ovvero di tutti i punti bersaglio raggiunti dall'onda elettromagnetica.

Una singola apertura orizzontale produce delle immagini bidimensionali (2D), mentre la combinazione di due aperture (orizzontale e verticale) consente la creazione di mappe radar tridimensionali (3D). Contrariamente ai sensori avio trasportati, il sensore del GBSAR investiga solo un'apertura limitata di pochi metri a causa del limite fisico imposto dall'apertura sintetica. Una limitata lunghezza dell'apertura riduce la risoluzione nella direzione di azimuth in confronto a quella ottenuta da un sensore aereo trasportato. Comunque, considerando la tipica distanza sensore-scena e le ridotte dimensioni delle aree investigate (dell'ordine di alcuni chilometri quadrati), con un sensore terrestre, le aperture tipicamente usate consentono di avere una risoluzione in azimuth confrontabile a quella ottenuta con un sensore trasportato da un aereo.

Le Figura 4.14 e Figura 4.15 mostrano l'installazione del sistema di fronte ad una frana, l'immagine ottica e l'immagine radar bidimensionale della frana.



Figura 4.14 Installazione IBIS-L di fronte alla frana (IDS Corporation)

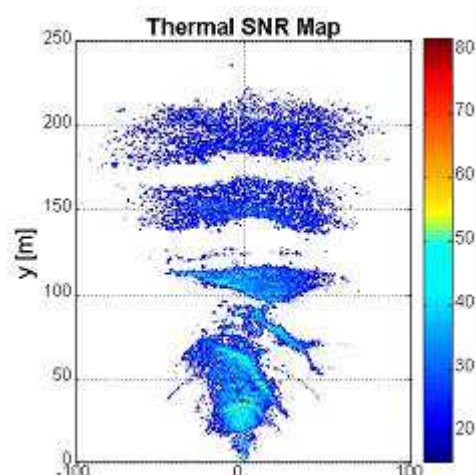


Figura 4.15 Foto ed immagine radar in potenza di una frana (IDS corporation)

Se si confrontano nel tempo, pixel per pixel, il contenuto in fase del segnale elettromagnetico retrodiffuso dallo scenario nelle diverse immagini acquisite dal sensore dalla stessa posizione, è possibile effettuare delle misure molto accurate dello spostamento eventualmente occorso tra le varie acquisizioni sullo scenario. In generale,

infatti, le onde elettromagnetiche riflesse da un oggetto differiscono, almeno nell'informazione relativa alla fase, al variare della posizione dell'oggetto rispetto alla fonte di emissione e ricezione dell'onda elettromagnetica. La misura di spostamento (d) dell'oggetto sotto indagine è ricavata dalla informazione della variazione della fase (λ) misurata dal sensore radar nei diversi istanti di acquisizione. La misura di spostamento e la misura della variazione di fase sono legate dalla seguente relazione:

$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \Delta\varphi$$

La Figura 4.16 illustra il principio di funzionamento della tecnica interferometrica.

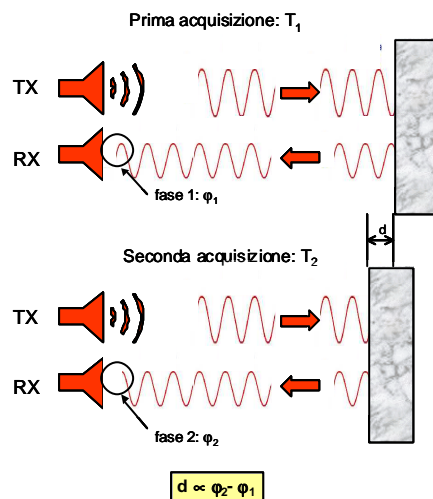


Figura 4.16 Tecnica interferometrica (IDS Corporation).

E' importante sottolineare che i sistemi interferometrici sono in grado di misurare spostamenti nella direzione di vista del sistema (direzione radiale), cioè lo spostamento nella direzione che congiunge il sistema radar ed il pixel sotto indagine. Lo spostamento nella direzione di vista del radar è calcolato attraverso il confronto delle informazioni di fase delle differenti immagini acquisite dal sistema. Nella Figura 4.17 viene mostrata una mappa di spostamento ottenuta mediante interferometria radar terrestre.

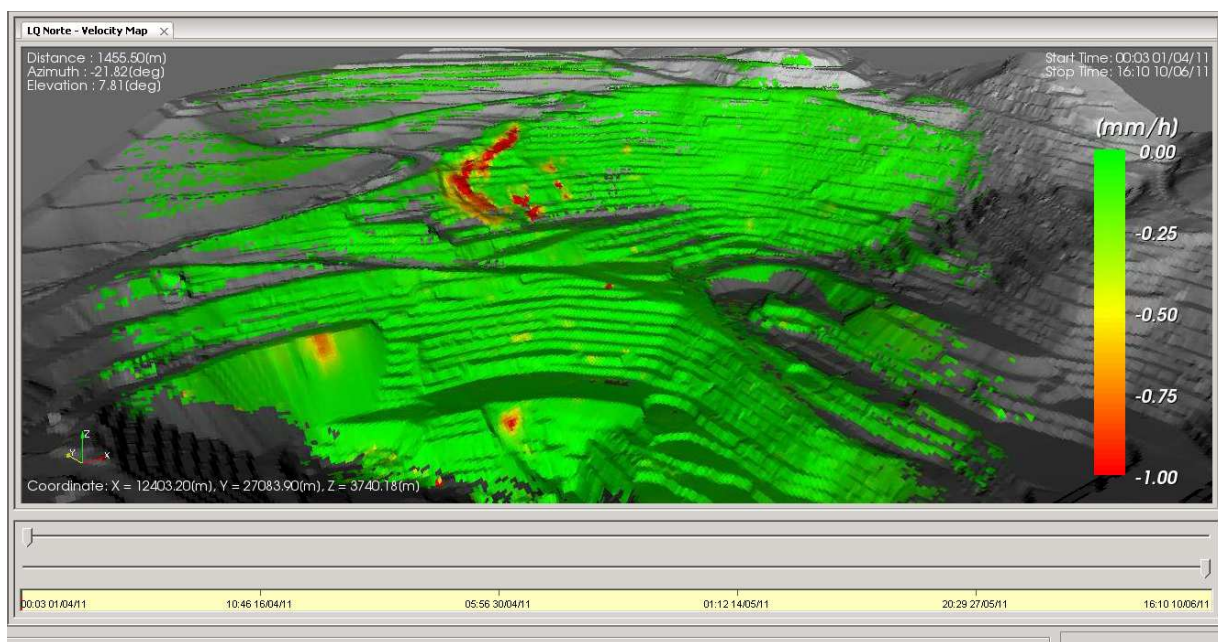


Figura 4.17 Esempio di mappa di spostamento radar di un'area in frana (IDS Corporation).

Rispetto ai sistemi di monitoraggio frane convenzionali, il GBSAR offre i seguenti vantaggi:

- permette all'operatore di effettuare il monitoraggio delle strutture da remoto, senza la necessità di accedere allo scenario per installare sensori o mire ottiche. Nei soli casi in cui la riflettività dello scenario non sia sufficiente al monitoraggio (ad esempio frana vegetata) oppure laddove interessa monitorare gli spostamenti di punti specifici dello scenario è possibile applicare dei semplici riflettori radar passivi, leggeri e veloci da installare, detti "corner reflector";
- fornisce una mappa pressoché continua degli spostamenti dell'intero scenario. Il sistema misura contemporaneamente gli spostamenti di tutta l'area illuminata dal fascio d'antenna;
- misura in modo diretto gli spostamenti in tempo reale dello scenario, con accuratezze comprese fra 0.1 ed 1 di millimetro (in funzione della distanza);
- fornisce un'elevata risoluzione temporale (un'immagine dell'intero scenario ogni 5 minuti).

4.5 La tecnica GBSAR

Il radar è un sensore attivo che invia impulsi elettromagnetici a microonde verso la scena osservata, registra il segnale retrodiffuso e consente di ricavare l'informazione sulla distanza dei diversi oggetti presenti nella scena dal calcolo del ritardo temporale tra segnale inviato ed eco ricevute.

Il radar trova ottimale impiego nelle misure in telerilevamento, ovvero nelle applicazioni nella quale le informazioni e le misure siano ottenute per via remota, senza la necessità di accedere o avvicinarsi all'oggetto da misurare.

Nelle attività finalizzate all'osservazione dell'ambiente nelle quali l'oggetto di studio è una scena complessa, è generalmente desiderabile distinguere quanti più dettagli possibile, quindi diviene fondamentale la capacità del sistema utilizzato di collocare esattamente i diversi oggetti nello spazio e di discriminare fra oggetti vicini. Tale caratteristica viene definita come risoluzione spaziale.

In un sistema radar avente un'antenna reale la sua risoluzione spaziale dipende dalle dimensioni dell'antenna in rapporto alla lunghezza d'onda della radiazione utilizzata (Tabella 4.1).

Poiché le onde elettromagnetiche comunemente utilizzate nei sistemi radar hanno lunghezze comprese tra il metro ed il centimetro l'aumento della risoluzione spaziale comporta la realizzazione di antenne molto grandi, con grandezze che variano da metro a qualche decina di metri.

| Banda | Frequenza | Lunghezza d'onda (media) |
|-------|--------------|--------------------------|
| P | 0.25/0.5 GHz | 100 cm |
| L | 1.0/2.0 GHz | 30 cm |
| S | 2.0/4.0 GHz | 10 cm |
| C | 4.0/8.0 GHz | 6 cm |
| X | 8.0/12 GHz | 3 cm |
| K | 12/40 GHz | 1 cm |
| Q | 40/50 GHz | 0.5 cm |

Tabella 4.1 Bande dello spettro elettromagnetico. Le lunghezze d'onda sono riferite alla propagazione in un'atmosfera media.

Tale soluzione spesso risulta impraticabile per cui una valida alternativa è rappresentata dalla tecnica SAR (Radar ad Apertura Sintetica), che è utilizzata per ottenere immagini radar ad elevata risoluzione spaziale.

Il sensore, costituito da un sistema radar classico, si muove lungo una direzione usualmente rettilinea puntando in direzione perpendicolare rispetto a quella di movimento ed effettuando misure radar ad opportuni intervalli spaziali. È fondamentale che le misure siano coerenti, vale a dire che abbiano un comune riferimento di fase

come se fossero emesse in contemporanea da un'unica sorgente. A tali condizioni il successivo trattamento dell'insieme dei dati raccolti consente di produrre un'immagine con risoluzione spaziale approssimativamente pari a quella ottenibile con un'antenna reale di dimensione uguale alla lunghezza del segmento percorso dal sensore.

L'apertura sintetica indica quel segmento, lungo la traiettoria di movimento, in cui si raccoglie ad opportuni intervalli spaziali l'energia riflessa dallo scenario per formare l'immagine radar dello stesso.

Una caratteristica del SAR è che il trattamento dei dati può portare all'ottenimento di un'immagine complessa. Ogni cella di risoluzione (pixel), corrispondente ad una determinata porzione della scena osservata, sarà pertanto caratterizzata non solo da un'ampiezza radiometrica, che esprime la riflettività dell'oggetto, ma anche da una fase che dipende dalla distanza sensore-oggetto e dalle caratteristiche dielettriche di quest'ultimo.

Nelle immagini SAR tali tecniche sono utilizzate per estrarre l'informazione di posizione contenuta e quindi per misurare gli eventuali spostamenti che hanno avuto luogo nella scena in esame.

L'interferometria differenziale applicata alle immagini SAR consente, attraverso il confronto tra le fasi di due acquisizioni separate temporalmente ed acquisite con i medesimi parametri, di ricavare una terza immagine definita interferogramma.

L'interferogramma contiene, per i vari pixel della scena in esame, l'informazione quantitativa sullo spostamento eventualmente avvenuto nell'intervallo trascorso tra le due acquisizioni originarie e lungo la linea di vista (LOS) del sistema di antenne.

L'interferometria differenziale permette di misurare spostamenti dell'ordine della metà della lunghezza d'onda della radiazione utilizzata con accuratezza pari ad una piccola frazione della stessa.

La differenza di fase elettromagnetica presente nei prodotti di un sistema radar interferometrico purtroppo possiede sempre valori compresi tra $-\pi$, e $+\pi$, pertanto le immagini risultanti dall'analisi contengono in generale numerose frange d'interferenza che caratterizzano un'ambiguità tipica delle immagini SAR, detta ambiguità di fase. Tale ambiguità può essere parzialmente risolta quando lo spostamento relativo corrispondente ad ogni pixel non supera la mezza lunghezza d'onda. D'altra parte tale criterio deve applicarsi a pixel adiacenti. Sostanzialmente spostamenti anche di molte lunghezze d'onda sono correttamente misurabili purché abbiano una distribuzione spaziale sufficientemente "morbida" da riguardare un certo numero di pixel.

I sistemi SAR da terra o Ground Based Interferometric SAR (GBSAR) possono avere risoluzioni da centimetriche se posizionati a qualche decina di metri a metriche se posizionati a qualche kilometro di distanza. Essi di solito sono composti da una componente a microonde, che genera, trasmette e riceve il segnale retrodiffuso dallo scenario osservato e da una componente meccanica che produce il movimento necessario a realizzare l'apertura sintetica.

La componente che emette le microonde è costituita da uno scatterometro ad onda continua ed a scansione di frequenza che agisce anche da sintetizzatore del segnale a microonde inviato all'antenna trasmittente. La seconda antenna, identica alla prima, è utilizzata per ricevere il segnale retrodiffuso e convogliarlo all'opportuno ingresso che provvede alla misura vera e propria. L'antenna sintetica è realizzata muovendo il sistema delle due antenne lungo una traiettoria rettilinea costituita dal binario di appoggio (la cosiddetta parte meccanica).

Il metodo di acquisizione utilizzato consiste nel posizionare il sistema ad opportuni intervalli spaziali lungo la traiettoria definita dal binario ed effettuare una misura radar ad ogni passo.

Solitamente un sistema interferometrico terrestre può osservare aree contenute all'interno di un cono simmetrico il cui angolo minimo di apertura al vertice può variare dai 30° ai 60° , l'antenna sintetica solitamente ha dimensioni massime di 3 m al fine di consentire una facile movimentazione della strumentazione.

Uno dei presupposti di base per l'efficacia dell'analisi interferometrica è che il processo di elaborazione confronti la fase di due acquisizioni separate temporalmente, ma acquisite dallo stesso luogo e con gli stessi parametri di misura. In questo modo è possibile ricavare, per i vari pixel utili che formano lo scenario, lo spostamento, lungo la

direzione della linea di vista (LOS) dell'elemento misurato, nel tempo trascorso tra le due acquisizioni. Quindi il prodotto finale dell'interferometria differenziale GBSAR può essere rappresentato da mappe di spostamento che in generale possiedono le seguenti caratteristiche:

- gli spostamenti misurati si riferiscono alla componente dello spostamento reale proiettata lungo la direzione di vista (LOS) del sistema SAR e sono relativi all'intervallo di tempo compreso tra le due acquisizioni utilizzate per produrre la mappa di spostamento. Il dato rilevato possiede segno negativo se la distanza misurata si riduce, positivo se la distanza aumenta;
- la risoluzione spaziale delle mappe di deformazione è uguale a quella delle immagini SAR di partenza, ma tale risoluzione può degradarsi se vengono applicate delle medie spaziali durante le operazioni di elaborazione dei dati;
- la precisione nella misura degli spostamenti è pari ad una frazione della lunghezza d'onda elettromagnetica, solitamente arriva a valori inferiori al millimetro.

Il sistema misura la proiezione dello spostamento reale che interessa il punto osservato lungo la LOS: più la LOS e lo spostamento reale sono paralleli maggiore sarà la componente dello spostamento reale misurata dal radar; chiaramente se lo spostamento reale è perpendicolare alla LOS il sistema GBSAR misura spostamenti nulli.

Le misure GBSAR ottenute da un unico punto di osservazione non sono in grado di ricavare il vettore di spostamento reale. Per poterlo ricavare è necessario avere almeno due misure GBSAR acquisite nello stesso intervallo di tempo e da due differenti punti di osservazione: in questo modo si hanno due proiezioni dello spostamento reale lungo due diverse LOS tali per cui è possibile ricavare il vettore reale di spostamento. Questa condizione è sicuramente difficile da ottenere nella normalità per cui spesso si usa abbinare la misura GBSAR con altre misure topografiche.

Le immagini ottenute con un sistema GBSAR sono immagini in due dimensioni di un oggetto solitamente tridimensionale e sono riferite ad un sistema di coordinate proprio del sistema (Figura 4.18). Solitamente le coordinate sono centrate sulla mezzeria del binario del sistema GBSAR i cui assi sono l'uno perpendicolare (asse y) e l'altro parallelo (asse x) all'asse del binario stesso. Il terzo asse (asse z) è normale al piano formato dai due assi precedenti. L'asse perpendicolare al binario (asse y) è usualmente chiamato "range", l'asse parallelo al binario è chiamato "azimut". "r" è la linea di vista o LOS ed è la linea immaginaria che unisce il centro del sistema ad uno specifico punto osservato P, localizzato nell'area osservata.

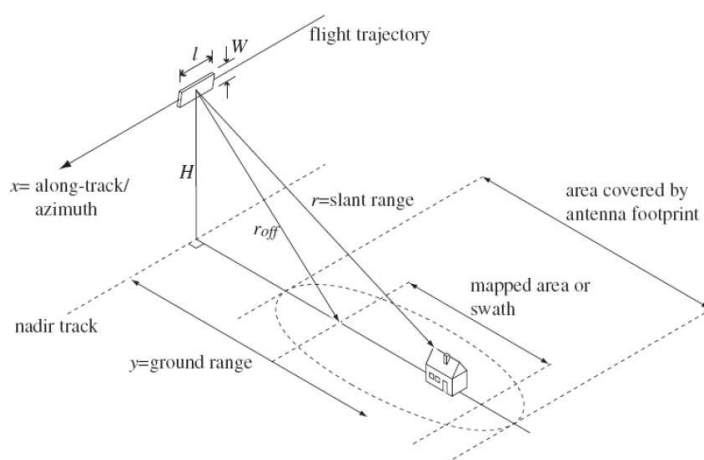


Figura 4.18 Geometria del GBSAR, come si osserva le direzioni x e y dell'immagine assumono varie denominazioni nella letteratura scientifica. (Mohr, 2005)

L'immagine in due dimensioni di uno scenario tridimensionale è pertanto affetta da deformazioni di cui si deve tener conto nell'interpretazione dei risultati. Tali deformazioni sono analoghe a quelle riscontrate nei sistemi SAR con piattaforma satellitare e quindi riconducibili agli effetti descritti nel capitolo 3:

- *foreshotting*: si verifica quando la pendenza del terreno tende ad essere perpendicolare alla congiungente sensore bersaglio; in questi casi il contributo di più punti si concentra in poche celle producendo pixel molto luminosi nell'immagine di ampiezza. Nei casi di impegno del sistema GBSAR questo fenomeno è tipico nelle pareti ad andamento sub-verticale;
- *layover*: si concretizza in una distorsione dell'immagine tale per cui alcuni oggetti vengono focalizzati in posizioni sovrapposte od addirittura ribaltate;
- *shadowing*: si verifica quando alcune zone non possono essere illuminate dall'impulso radar perché schermate da altri oggetti posti tra il sensore e l'area in ombra.

Avendo a disposizione un modello digitale del terreno (DTM) oppure un modello digitale di elevazione (DEM) dell'area osservata, l'immagine risultante può essere georiferita su tale modello riassorbendo direttamente le deformazioni. Per DTM si intende un modello digitale del terreno che è la rappresentazione della distribuzione delle quote di un territorio, in formato digitale. Il modello digitale del terreno viene in genere prodotto in formato raster associando a ciascun pixel l'attributo relativo alla quota assoluta. Il modello digitale del terreno (DTM, dall'inglese Digital Terrain Model), a differenza del DEM, è ottenuto dall'interpolazione delle curve di livello. Esso è spesso confuso con il DEM e la principale differenza tra i due modelli risiede nel fatto che il DEM tiene conto di tutti gli oggetti insistenti sul terreno (vegetazione, edifici ed altri manufatti) mentre il DTM riproduce l'andamento della superficie geodetica.

4.6 Misura continua e misura discontinua

Le modalità di acquisizione dei dati sono di due tipi: continua e discontinua.

La modalità continua è la più semplice in quanto prevede un'unica campagna di misura la cui durata sarà impostata in funzione del target da misurare, solitamente il tempo minimo di acquisizione per una serie efficace di misure è stimabile in una settimana. Il tempo massimo viceversa è legato a fattori logistici quali costo ed efficienza nel tempo del sistema di misura. Questa modalità è anche indicata in letteratura come C-GBSAR (Monserrat et al., 2014).

La modalità discontinua prevede una serie di campagne di misura separate nel tempo, in questo caso i vincoli da superare per l'ottenimento di un buon risultato sono tanto logistici quanto intrinsecamente legati alla ciclicità del segnale misurato. Questa modalità è anche indicata in letteratura come D-GBSAR (Monserrat et al., 2014).

Risulta evidentemente fondamentale riposizionare sempre la strumentazione nella medesima situazione, in tal senso è necessario attrezzare adeguatamente il punto di installazione, al fine di ridurre al minimo gli errori dell'origine del sistema di misura.

Il secondo vincolo è riferito alla possibilità di confrontare le immagini di due serie di misure differenti, taluni autori suggeriscono di acquisire delle immagini di riferimento da confrontare con quelle delle campagne precedenti, tuttavia tale metodo risulta essere afflitto dal problema dell'ambiguità di fase. In tal senso risulta utile abbinare la misura GBSAR ad una serie di misure topografiche tradizionali realizzate su una rete fissa che consentono un confronto immediato tra le immagini delle due serie di misure.

4.7 Caratteristiche dell'immagine radar ad apertura sintetica

Le caratteristiche di ogni singola immagine acquisita con il GBSAR (Figura 4.19) ed in particolare la risoluzione spaziale, sono legate ai parametri della strumentazione, in particolare la frequenza di acquisizione e la lunghezza del binario, alle caratteristiche dell'installazione ed alla distanza delle antenne dalla scena. Le risoluzioni in range, y (distanza) e azimut, x (direzione) (Figura 4.20, Figura 4.2.1) sono definite dalle seguenti equazioni:

$$\Delta r = c/2B$$

$$\Delta a = cR/2Lfc$$

L'estensione totale del tratto percorso lungo il binario dalle antenne (L) e la frequenza centrale del segnale trasmesso (f_c) influiscono in maniera inversamente proporzionale sulla dimensione longitudinale (azimut) della cella di risoluzione, mentre la larghezza della banda di frequenze trasmessa (B) ha effetto solo sulla seconda dimensione (range), sempre in modo inversamente proporzionale. E' bene anche sottolineare che, diversamente dalla tecnica SAR tradizionale, la risoluzione non solo dipende dalla distanza ma ha anche una dipendenza con la posizione in azimut della cella rispetto alla collocazione del sensore.

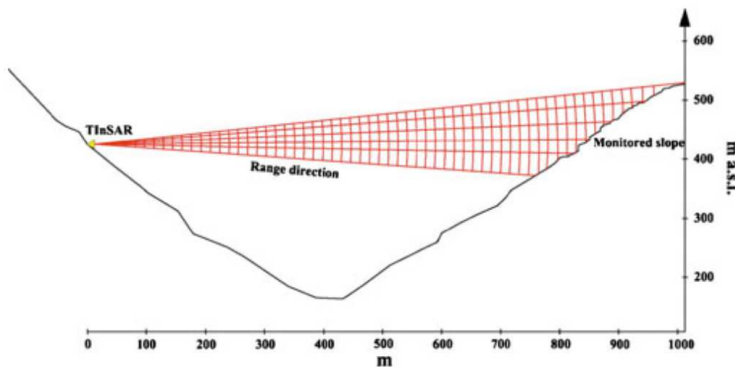


Figura 4.19 Schema rappresentante la geometria di acquisizione (Mazzanti et al., 2014).

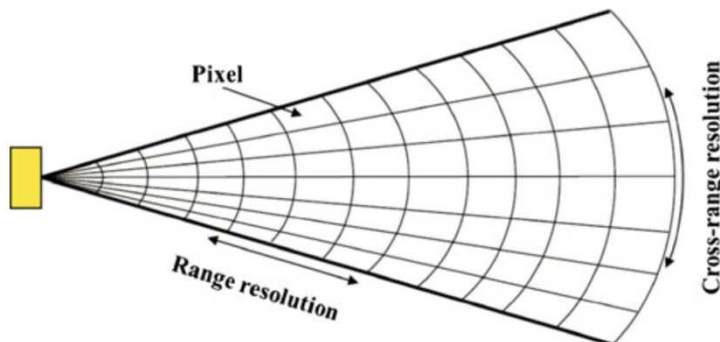


Figura 4.20 Geometria del sistema di acquisizione GBSAR con indicati i parametri range e azimut (definito cross range nell'immagine) (Mazzanti et al., 2014).

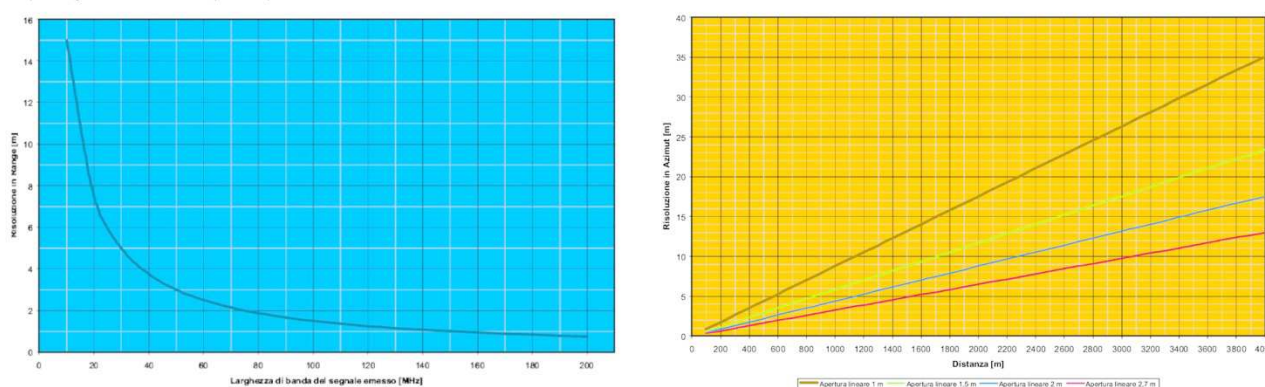


Figura 4.21 Grafici utili ad ottenere un valutazione della risoluzione delle celle: il grafico a sinistra rappresenta la dimensione della cella di risoluzione in range in funzione della banda del segnale emesso, il grafico a destra mostra la dimensione della cella di risoluzione in azimuth, in funzione della distanza e dell'apertura lineare (Ellegi, 2010)

4.8 Immagini acquisite

Essendo il segnale radar un segnale complesso, ogni pixel dello scenario contiene due informazioni, una relativa all'ampiezza del segnale, l'altra relativa alla fase. In questa maniera è possibile ottenere le caratteristiche dei materiali in termini di contrasto elettromagnetico, sia sulle distanze rispetto alla posizione delle antenne..

Quest'ultima informazione è chiaramente sintetizzata dalle mappe di spostamento.

Per stimare le caratteristiche dei materiali presenti sulla scena, si valutano le caratteristiche di backscattering dello scenario: per definire il grado di attendibilità dei dati di spostamento, vengono analizzate in dettaglio le tre mappe dei parametri radaristici di coerenza temporale di fase, SNR termico e SNR stimato.

La mappa di Coerenza temporale di fase rappresenta una misura della correlazione dell'informazione di fase di due o più segnali successivi; questa si esprime come un numero puro variabile tra 0 e 1. Valori prossimi a 1 indicano aree perfettamente in fase mentre valori prossimi a 0 rappresentano zone in cui i segnali non sono in fase e quindi non analizzabili.

La mappa di SNR termico rappresenta un'informazione definita come il rapporto tra la potenza del segnale riflesso da ogni pixel e ricevuto dal radar (backscattering) e la potenza del rumore termico strumentale. Tale parametro viene espresso in dB e per una serie di acquisizioni successive viene calcolato come la media dei vari valori di SNR su ogni pixel.

La mappa di SNR stimato rappresenta, per un certo dataset di acquisizioni, il rapporto tra la media e la deviazione standard dei valori di backscattering (riflettività) considerati per ogni singolo pixel.

Il SNR stimato solitamente è il parametro con più peso, perché è una misura di quanto la riflettività (o ampiezza del segnale) sia rimasta stabile nel tempo, sebbene è altresì necessario che anche la media della riflettività sia alta (SNR termico).

I parametri radaristici sopra descritti stabiliscono quindi delle soglie che consentono di eliminare i pixel affetti da artefatti che ne pregiudichino qualità ed accuratezza nella misura degli spostamenti, selezionando, pertanto, solo punti affidabili e validati sui quali poi verrà effettuata l'analisi degli spostamenti.

4.9 Processing e analisi del dato GBSAR

Derivare una stima delle deformazioni dall'analisi delle fasi interferometriche acquisite con il GBSAR non è certo cosa triviale, così esordiscono Monserrat et al. (2014) in un capitolo del loro recente lavoro sul tema. Il processo di elaborazione è differente a seconda che si tratti di misure continue e discontinue, (vedi 4.6).

I medesimi autori descrivono così le diverse fasi di processing del dato GBSAR

- Co-registrazione dell'immagine: l'interferometria può essere realizzata solo se le immagini sono co-registrate, ovvero i pixels con la stessa ubicazione in due diverse immagini devono colpire lo stesso bersaglio della scena, Monserrat (2012) descrive diversi algoritmi di co-registrazione.
- Generazione dell'interferogramma e della mappa di coerenza: partendo dallo stack di n immagini coregistrate, vengono generati l'interferogramma e le mappe di coerenza associate.
- Selezione dei pixel: la fase interferometrica può essere ricavata solo da quei pixel che presentano un basso rumore in frequenza: esistono due diversi criteri di selezione, uno basato sulla coerenza (Berardino et al., 2012), l'altro sull'ampiezza (Ferretti et al., 2001). Entrambi i criteri usano una soglia appropriata, che solitamente viene fissata aggiustando lo scambio tra la qualità della fase e la densità dei pixels selezionati. Un criterio empirico per verificare la bontà di questa soglia è di valutare i risultati del processo di phase unwrapping (Monserrat, 2012).
- 2D phase unwrapping (srotolamento della fase): in questo passo, le fasi ripetute degli N-1 interferogrammi generati, vengono srotolate. Poiché questa operazione è realizzata interferogramma per interferogramma, senza sfruttare la componente temporale è chiamata 2D phase unwrapping.
- Integrazione della fase: in questo passo, partendo dal set di interferogrammi, viene stimata la fase in corrispondenza di ogni singola immagine acquisita, questo è possibile assumendo che la fase della prima immagine equivale a 0, le altre N-1 fasi conteranno l'incremento di fase accumulato rispetto alla prima (Monserrat, 2012). È importante notare come la fase della prima immagine contenga tre componenti: il movimento, il rumore di fase atmosferico ed il rumore di fase geometrico.
- Stima della componente atmosferica nella fase (APS): in questo passo le componenti atmosferiche e geometriche della fase vengono stimate e separate dalle componenti di deformazione. Va osservato come queste due componenti di fase sono sempre considerate insieme, poiché hanno caratteristiche statistiche simili: entrambe variano senza scosse nello spazio. La letteratura propone differenti approcci al tema Luzi et al. (2004) e Noferini (2005) assumono che la componente atmosferica sia funzione del range e usano uno o due punti della scena, ritenuti stabili, per stimare un termine lineare o quadratico, rispettivamente; Rodelsperger (2011) e Iannini e Guarnieri (2011) stimano la componente atmosferica della fase utilizzando dati meteorologici (temperatura, umidità e pressione) Luzi et al. (2010) usano dei polinomi-2D i cui coefficienti sono stimati con aggiustamenti ai minimi quadrati, utilizzando aree stabili della scena misurate già note a priori. In ogni caso la APS stimata viene sottratta alla fase originale in modo da ottenere solo l'informazione sullo spostamento. Va fatto notare come che la stima della componente atmosferica di fase non è un fatto influente nelle misure, soprattutto nelle zone con topografia non omogenee.
- Valutazione dello spostamento e geocodifica: questo passo è fondamentale per l'utilizzo e l'interpretazione del dato GBSAR. In primo luogo le fasi interferometriche, che si riferiscono alla linea congiungente il sensore e l'oggetto misurato (la linea di vista, LOS), sono trasformate in spostamenti lungo la LOS. A questo punto una geocodifica è possibile; questa avviene trasformando lo spazio immagine, in cui ogni pixel è individuato dalla sua posizione nell'immagine, in uno spazio oggetto assegnando delle coordinate ad ogni punto.

L'output strumentale ottenuto dall'acquisizione è una mappa bidimensionale degli spostamenti dello scenario lungo la linea di vista dello strumento (line of sight). Gli spostamenti vengono calcolati confrontando il valore di fase di tutti i pixel che costituiscono mappe acquisite in tempi diversi (principio dell'interferometria), con accuratezza massima nell'ordine del centesimo di mm in condizioni ideali (elevati valori di rapporto segnale rumore); tuttavia, a causa dei disturbi atmosferici, l'accuratezza in condizioni reali può variare da alcuni decimi di mm fino ad alcuni mm.

Gli spostamenti vengono espressi mediante una scala cromatica che, di solito, segue la seguente convenzione:

- pixel di colore ciano o blu: spostamenti in avvicinamento al sensore;
- pixel di colore giallo o rosso: spostamenti in allontanamento dal sensore;
- pixel di colore verde: spostamenti assenti o di entità non rilevabile.

E' possibile, infine, ottenere la serie temporale di spostamento di ogni singolo pixel che costituisce la mappa SAR ed integrarla con eventuali altri dati (dati meteo, dati acquisiti da altre strumentazioni di monitoraggio ecc.)

Le elaborazioni sono condotte sia attraverso l'utilizzo di software commerciali che attraverso algoritmi specificatamente sviluppati da centri di ricerca per un'analisi completa ed esaustiva dei dati disponibili e per la ridondanza di informazioni.

Nei dati acquisiti all'interno del progetto, in particolare nelle aree dove si volevano monitorare dei crolli in roccia, sono state condotte due differenti tipologie di indagine:

- Analisi alla scala del versante: ricerca di spostamenti unidirezionali (con trend lineari) alla scala del versante finalizzata alla valutazione di possibili fenomeni di instabilità gravitativa in atto durante il periodo di monitoraggio;
- Analisi alla scala locale (metodo PtoP): ricerca di spostamenti unidirezionali (con trend lineari) e ciclici (con trend reversibili nel tempo) alla scala dei singoli blocchi finalizzata all'analisi di suscettibilità.

In particolare, dal momento che gli spostamenti precursori attesi in caso di crolli in roccia possono essere di entità molto modesta (talvolta inferiore al mm), le indagini a scala locale sono state condotte attraverso l'analisi avanzata PtoP (Point to Point), un'innovativa tecnica di analisi del dato GBSAR, specificamente ideata e sviluppata da Mazzanti e Brunetti (2010) e successivamente implementata da Martino e Mazzanti (2014), per l'analisi di scarpate in roccia. La tecnica PtoP consente infatti di analizzare spostamenti differenziali tra pixel SAR adiacenti, assumendo, di volta in volta, punti di riferimento (GCP) in zone diverse dell'ammasso ed analizzando gli spostamenti dei pixel limitrofi. Attraverso questo approccio metodologico è possibile ridurre considerevolmente i disturbi indotti dagli artefatti atmosferici (che inficiano sulla qualità del dato) e misurare quindi spostamenti con accuratezza sub-millimetrica.

Nel caso di misure discontinue (D-GBSAR) invece, al fine di correlare i dati acquisiti nell'ambito delle differenti campagne di misura (consentendo pertanto di fornire continuità al dato di monitoraggio) si adotta un metodo rigoroso basato sui seguenti assunti fondamentali:

- metodo di installazione: la piattaforma di monitoraggio GBSAR è installata su un sistema di riposizionamento esatto del sensore, che consente di ridurre al minimo gli artefatti indotti dalla movimentazione della strumentazione;
- metodo di elaborazione: la correlazione tra i dati della prima e della seconda campagna di misura è ottenuta attraverso un processo di coregistrazione degli interferogrammi (mappe radar) basato sull'analisi dei valori di ampiezza dei singoli pixel delle mappe.

In particolare, il modello di elaborazione viene applicato secondo la procedura di seguito descritta:

1) accoppiamento delle immagini: una coppia di immagini GBSAR (acquisite, rispettivamente, nell'ambito della prima e della seconda campagna di monitoraggio) è stata analizzata al fine di identificare le coordinate radar di

punti comuni, sulla base dei valori di SNR (ampiezza del segnale). In questo modo, è stato possibile definire la miglior funzione di cross-correlazione tra le due immagini della coppia;

2) stima della trasformazione: identificazione, per ogni singolo pixel, dei valori di range e cross-range (scarti) da applicare al fine di rimuovere gli effetti residui del riposizionamento

3) campionamento: applicazione della funzione di correzione degli scarti (di cui al punto precedente) e coregistrazione degli interferogrammi GBSAR;

4) analisi degli spostamenti: analisi degli interferogrammi per l'identificazione di eventuali spostamenti verificatisi nel periodo compreso tra le campagne di misura. In particolare, le analisi sono volte all'identificazione di:

- a. eventuali frange interferometriche, riconducibili a spostamenti diffusi di entità maggiore di 5 mm;
- b. variazioni dei valori di differenza di fase di singoli pixel, riconducibili a spostamenti localizzati di entità minore di 5 mm.

Pur applicando un processing accurato del dato, va sempre ricordato che il monitoraggio periodico discontinuo limita fortemente la tecnica GBSAR e non è possibile ottenere, pertanto, risultati caratterizzati dalla medesima accuratezza e precisione del monitoraggio in continuo.

4.10 Valutazione di fattibilità delle misure

Non sempre sussistono le condizioni affinché sia possibile acquisire un dato GBSAR. Esistono alcuni criteri fondamentali da rispettare nella scelta dell'ubicazione della postazione di monitoraggio:

- il sito deve essere lontano da elementi metallici in grado di generare interferenze (almeno nella zona compresa tra il sensore e lo scenario da monitorare);
- la strumentazione deve essere installata in una zona stabile (non affetta da fenomeni di dissesto, non costituita da terreni sciolti che possano essere soggetti a cedimento, ecc.);
- la strumentazione va installata in modo quanto più ortogonale possibile allo scenario da monitorare;
- la strumentazione va installata in modo che la linea di vista del sensore sia più parallela possibile alla direzione degli spostamenti attesi;
- tra il sensore e lo scenario non devono esserci ostacoli (alberi, edifici, ecc.);
- il sito deve essere ragionevolmente accessibile per il trasporto dei componenti.

I bersagli e le tipologie di dissesto monitorabili sono analoghi a quelli descritti nel capitolo introduttivo sull'interferometria SAR da satellite. Di fatto la tecnica è applicabile a movimenti lenti che avvengono in situazioni in cui sono presenti bersagli ad elevata coerenza, quali affioramenti rocciosi, edifici ed infrastrutture, mentre non è applicabile su versanti vegetati e caratterizzati da superfici boschive. In questo caso la possibilità di monitorare è legata al posizionamento sul terreno di appositi riflettori di segnali definiti "corner reflector".

La Tabella 4.2 riporta in modo schematico i principali vantaggi e svantaggi dell'uso del GBSAR per monitorare l'evoluzione di versanti in frana.

| Vantaggi | Svantaggi |
|--|--|
| <p>Versatilità e rapidità di installazione del sistema.</p> <p>Genera mappe di spostamento georeferenziate che riescono a coprire qualche km² utile sia a un monitoraggio "stand alone" sia a testare, progettare o implementare reti di sensori tradizionali.</p> <p>Funziona totalmente in remoto e presenta assoluta indipendenza da punti di riferimento presenti nello</p> | <p>L'utilizzatore finale delle informazioni deve possedere una sensibilità nell'interpretazione dei risultati, perché il dato GBSAR misura la proiezione degli spostamenti reali lungo la LOS, per cui i risultati rappresentano solo uno degli elementi che concorrono alla comprensione ed alla caratterizzazione del fenomeno.</p> <p>Si rileva solo una componente dello spostamento</p> |

| | |
|---|--|
| <p>scenario di misura, ciò significa che non si deve accedere all'area instabile, a vantaggio della sicurezza degli operatori.</p> <p>Possibilità di eseguire le misure anche in totale assenza di luce o in presenza di nebbia ed in condizioni climatiche averse.</p> <p>Passo di campionamento basso, che consente di acquisire le serie di misure a breve distanza una dall'altra.</p> <p>Il risultato finale delle misure è areale e non puntuale.</p> | <p>reale.</p> <p>La variazione degli spostamenti misurati può essere influenzata anche dalla distribuzione dell'orientazione delle LOS sull'area osservata, pertanto uno spostamento omogeneo potrebbe essere rilevato come differenziale a causa delle diverse orientazioni e proiezioni di questo lungo la LOS.</p> <p>Non tutto il territorio è idoneo al rilevamento: le aree vegetate presentano fenomeni di de correlazione che non rendono possibile la corretta misurazione degli spostamenti, mentre in regioni innevate si potrebbe misurare la variazione del livello nevoso piuttosto che i movimenti del terreno.</p> <p>Fenomeni con velocità elevate, superiori ai 600 mm/giorno, generalmente non sono misurabili a causa dell'elevata de correlazione sulle immagini radar a causa del movimento.</p> <p>Fenomeni che avvengono e che si esauriscono all'interno del tempo di acquisizione di una singola immagine, tipicamente pari a circa da 5 minuti, non sono misurabili, anche se spesso se ne possono rilevare le conseguenze.</p> |
|---|--|

Tabella 4.2 Schema riassuntivo dei principali vantaggi e svantaggi legati all'utilizzo del GBSAR (modificata da Ellegi, 2009).

La società Ellegi S.r.l. proprietaria del marchio LiSALab, in un documento tecnico-scientifico (Ellegi, 2010), ha messo a punto un procedimento di autovalutazione utile per definire a livello preliminare l'applicabilità della metodologia interferometrica radar terrestre nel monitoraggio di un dissesto. Il procedimento si articola in una serie di schemi che devono essere utilizzati come una lista di controllo con risposte affermative o negative. Il processo è diviso in tre fasi, la cui consecutività deve essere sempre rispettata: preparazione, valutazione, definizione.

Nella fase di preparazione si raccolgono una serie di informazioni morfologico-tecniche sul dissesto da monitorare compilando i campi della Tabella 4.3.

| | | | |
|---|---|-----------------------------------|--|
| Ubicazione | | Tipologia di movimento | Crollo Ribaltamento Scivolamento Colamenti o flussi |
| Tipologia di materiale coinvolto | | Velocità di movimento | |
| Dimensioni | Lunghezza Larghezza Estensione areale Quota coronamento (m slm) Quota piede (m slm) | Stato | Attiva Sospesa Riattivata Inattiva |
| Copertura | Non vegetata Vegetata Parzialmente vegetata Strutture antropiche | Cause destabilizzanti | Fattori litologici strutturali morfologici Fattori idrogeologici e meteorologici Fattori antropici |
| Condizioni climatiche | | Cartografia | |
| Direzione del movimento | | Documentazione fotografica | |
| Dati bibliografici | | Elementi a rischio | |

Tabella 4.3 Fac simile della scheda da compilare nella prima fase del percorso di autovalidazione (modificata da Ellegi, 2010).

Nella fase di validazione, si elaborano i dati raccolti nella Tabella 4.3, ed in base alle risposte affermative o negative ottenute dalla validazione si opta o meno per decidere se adottare la tecnologia di monitoraggio. I tre “step” da superare vanno affrontati rispettando la sequenza presentata.

Il primo step è quello riferito all’analisi dell’area da monitorare; in primo luogo va verificata la copertura dell’area:

- se la copertura è prevalentemente costituita da roccia affiorante, massi, suolo, o presenta strutture antropiche stabili (manufatti in cemento o laterizio) distribuite omogeneamente e che coprano superfici superiori a 600 m², allora è possibile passare al punto successivo;
- se la copertura è prevalentemente costituita da vegetazione, alberi, prato e presenta solo disomogenee e piccole porzioni di aree non vegetate e antropizzate, allora la tecnologia GBSAR non è utilizzabile.

Il secondo step riguarda l’analisi delle aree non vegetate presenti:

- se la frana si evolve con deformazioni e spostamenti continui e lenti nel tempo o che avvengono con modalità tali da preservare, tra le acquisizioni, la struttura geometrica della superficie da osservare, allora è possibile passare al punto successivo;
- se la frana si evolve con movimenti di tipo impulsivo e caotico, caratterizzato ad esempio da crolli improvvisi oppure improvvisi frane superficiali che causano notevoli variazioni della morfologia del terreno osservato, allora la tecnologia GBSAR non è utilizzabile.

Il terzo step riguarda la logistica del punto di osservazione:

- se è possibile individuare un punto di osservazione che abbia le seguenti caratteristiche:
 - sia accessibile agevolmente in luogo stabile;
 - sia possibile costruire il basamento per la strumentazione e sia possibile un facile sistema di alimentazione elettrica;
 - offra un’ampia visione dell’area da osservare senza generare zone d’ombra o effetti distorsivi nell’immagine radar;
 - offra una linea di vista dei punti di interesse prossima alla direzione attesa di movimento;
 - si distanti al massimo 2000 m dal punto di osservazione;
 - la probabile dimensione in azimuth dell’immagine radar sia maggiore dell’estensione stimata delle aree in movimento;

allora la valutazione preliminare è stata positiva ed è possibile passare alla fase 3

- se la maggior parte delle caratteristiche sopra esposte non è presente, allora la tecnologia GBSAR non è utilizzabile.

L’ultima fase, quella di definizione, individua le modalità operative e i tipi di dati che si desidera ottenere in funzione delle finalità del monitoraggio.

Se si tratta di un monitoraggio con finalità di studio, sarà la velocità del movimento a definire la modalità operativa, con velocità superiori a 0.2 mm/giorno è preferibile eseguire una sola campagna di misura (la cosiddetta misura continua) della durata che varia da qualche giorno a qualche settimana. Se le velocità invece sono inferiori è preferibile pianificare una serie di misure separate temporalmente (le cosiddette misure discontinue) di qualche mese spalmate lungo un intervallo di tempo prolungato, in questo caso sarà opportuno anche prevedere un’analisi delle serie temporali.

Se si tratta di un monitoraggio con finalità di sicurezza le modalità operative mirano a definire la possibile evoluzione del fenomeno, piuttosto che la sua velocità. Per esempio, è possibile prevedere dei monitoraggi continui di pareti rocciose interessate da lavori per valutare l’influenza di questi sulla stabilità dello stesso, oppure prevedere dei monitoraggi periodici per osservare se vi siano deformazioni di estese aree della parete come precursori di crolli o ribaltamenti.

Se si tratta di un monitoraggio con finalità di Protezione Civile, è preferibile prevedere l'installazione di un sistema GBSAR dedicato e permanente, con frequenza variabile delle acquisizioni delle misure e trasferimento dei dati in tempo reale; l'elaborazione e la trasformazione del dato in informazioni utili ai fini della sicurezza dovrà avvenire nel minor tempo possibile.

Il GBSAR, a prescindere dall'apertura sintetica impiegata, è in grado di osservare solo le aree contenute all'interno del cono di emissione delle antenne. In genere si utilizzano delle antenne a tromba (dette anche a trombino o Horn antennas Figura 4.22). Tali antenne sono particolarmente capaci di concentrare il campo elettromagnetico emesso o ricevuto in una data direzione all'interno di un cono simmetrico il cui angolo minimo di apertura al vertice può variare dai 30° ai 60°.



Figura 4.22 Dettaglio delle antenne del radar, si osserva la loro forma a tromba.

L'area che costituisce l'intersezione del cono radiante e lo scenario osservato è l'area teorica che può essere misurata dal sistema. La sua estensione dunque varia con la distanza del sensore, un grafico di questo comportamento è rappresentato in Figura 4.23

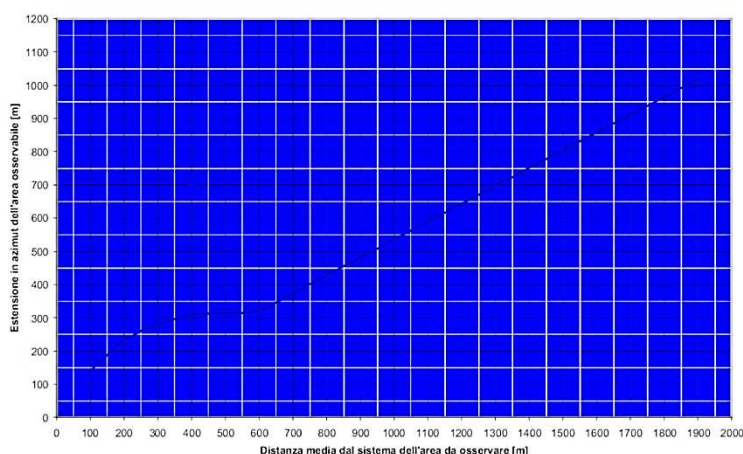


Figura 4.23 Grafico per ottenere una valutazione approssimativa delle dimensioni in azimuth dell'area osservata dal sistema in funzione della distanza media della regione che si vuole osservare (Ellegi, 2010).

La frequenza delle misure GBSAR può essere molto variabile, infatti questo parametro può essere scelto liberamente dall'operatore. Tuttavia è fondamentale avere una frequenza di acquisizione che sia svincolata dal rischio di risentire dell'ambiguità di fase. Il limite superiore della frequenza di misura è costituito dal tempo

necessario per ottenere una singola immagine percorrendo l'intera apertura sintetica selezionata. Ad esempio per aperture di 2 m le acquisizioni awengono in circa 5 minuti, mentre per aperture di 3 m l'immagine viene acquisita in circa 8 minuti.

La schema di Figura 4.24 modificato da Crosta su proposta di Hungr, riporta una classificazione generale dei fenomeni franosi in funzione del proprio movimento; la parte inferiore indica anche i potenziali provvedimenti da mettere in atto per approfondire le conoscenze sul dissesto. Ellegi (2010) ha individuato i campi di applicabilità ordinaria e straordinaria del GBSAR. Viene indicato come risultino agevolmente misurabili fenomeni con velocità stimate fino a 219 m/anno, corrispondenti a 0.6 m/giorno, viene altresì indicato come in particolari condizioni sia possibile misurare fenomeni con velocità fino a 0.04 m/sec.

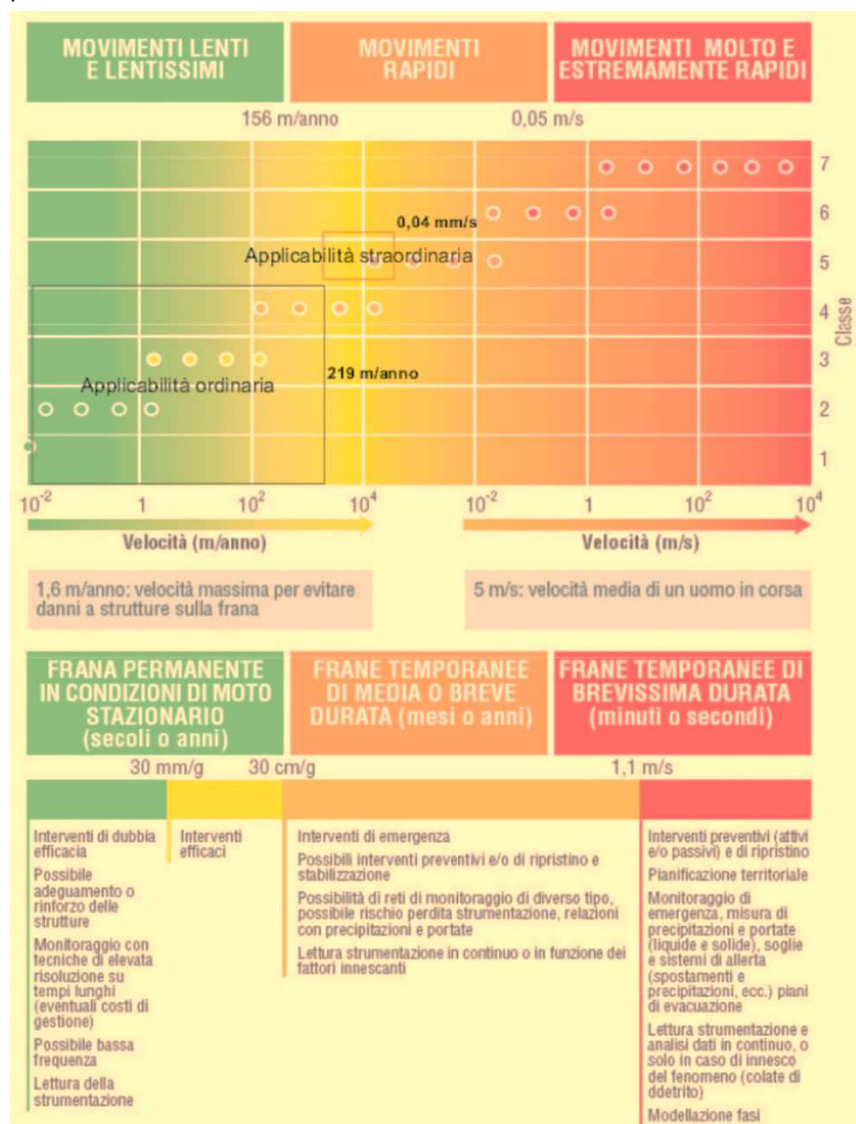


Figura 4.24 Classificazione di frane, modificata da Crosta, in funzione della velocità di movimento. All'interno dello schema sono indicati i campi di velocità in cui è applicabile in GBSAR (Ellegi, 2010).

Verificati tutti i vincoli operativi, prima di pianificare una campagna di monitoraggi, deve essere tenuto presente che il monitoraggio con GBSAR non è una metodologia economica, che ha lo svantaggio di fornire solo una serie di informazioni, importanti ma non sufficienti a definire completamente il comportamento di un versante in frana.

4.11 Un precedente bibliografico

Un interessante caso di studio, che ha spinto alla realizzazione delle indagini oggetto della presente tesi, è quello riportato nel documento “Analisi combinata Laser Scanner ed Interferometri SAR Terrestre per l’analisi dei crolli in roccia: un caso di studio nella città di Bolzano” di P. Mazzanti et al. presentato alla 13.a conferenza nazionale ASITA del 2009.

Nello specifico, a partire dal Maggio 2008 la Provincia ed il Comune di Bolzano hanno promosso una serie di monitoraggi con l’obiettivo di investigare attraverso l’utilizzo dell’interferometria SAR terrestre e il laser Scanning terrestre, una scarpata in roccia soggetta a crolli che insiste su alcuni edifici di civile abitazione.

La scarpata (Figura 4.25) è caratterizzata dalla presenza di ignimbriti, masse rocciose dall’aspetto massiccio, con un aspetto ed uniformità che rimane macroscopicamente costante per centinaia di metri di spessore. La parete monitorata presenta un’altezza massima di 100 m ed una marcata fessurazione verticale con giunti molto netti e persistenti che conferiscono all’ammasso roccioso il tipico aspetto colonnare prismatico.

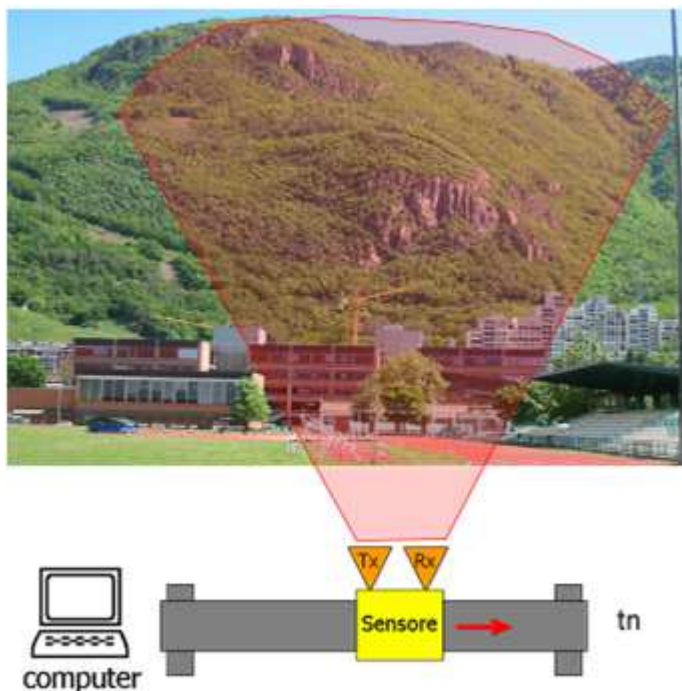


Figura 4.25 Vista della scarpata da monitorare cui è sovrapposto il cono visivo del GBSAR (Mazzanti et. al., 2009).

Le metodologie impiegate prevedono una teorica misura in “remoto”, owerosia senza alcun posizionamento di strumenti sulla parte; l’approccio metodologico è articolato in quattro fasi:

- esecuzione del rilievo laser scanning terrestre per la creazione di un modello dettagliato 3D;
- esecuzione del monitoraggio GBSAR
- identificazione dei punti comuni tra rilievo laser scanning e mappe radar
- georeferenziazione delle mappe radar e dei rilievi laser scanning.

Il laser scanning è una metodologia ormai comunemente usata per rilevare le coordinate spaziali 3D di numerosi punti dello scenario osservato, owero nuvole di punti tridimensionali che costituiscono poi la base per ottenere DTM (Digital Terrain Models) molto accurati, la precisione del dettaglio è di circa 0,5- 1 cm da una distanza di

misura di 1 km. Solitamente il sensore di misura è abbinato ad una fotocamera digitale attraverso la quale è possibile associare ad ogni cella che costituisce il DTM il vero colore del versante.

Per integrare il dato laser scanning con quello radar sono stati posti dei target noti sulla parete, rilevati con misure topografiche tradizionali eseguite con una stazione totale che hanno consentito anche di georiferire con certezza il DTM generato.

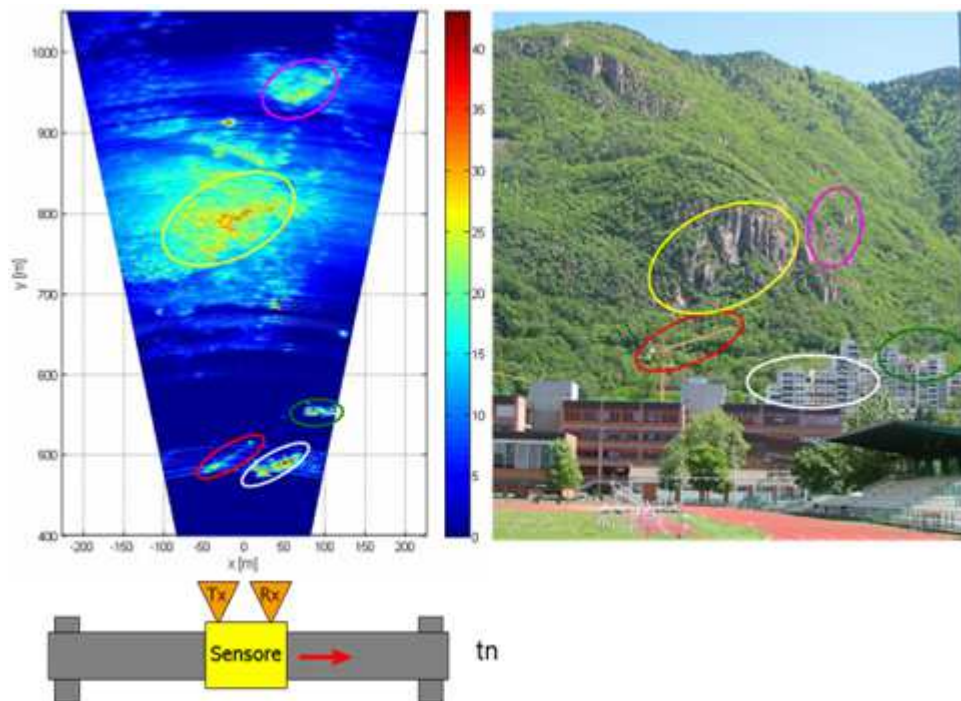


Figura 4.26 A sinistra, mappa bidimensionale di spostamento del versante con evidenziate le zone che forniscono informazioni utili; a destra, immagine del versante su cui sono riportate le medesime zone (Mazzanti et al., 2009).

Il prodotto del monitoraggio con interferometria radar terrestre fornisce mappe bidimensionali di spostamento dell'areale monitorato (Figura 4.26) con accuratezza anche di alcuni decimi di mm. Le mappe SAR sono costruite da pixel di dimensioni variabili tra pochi decimetri a pochi metri (in funzione della distanza dello scenario) e sono riferite ad un sistema di coordinate locali del sensore, dove la direzione range corrisponde alla distanza radiale strumento target e quella cross-range alla direzione normale a quest'ultima (quindi la direzione parallela al binario).

Nella campagna oggetto della pubblicazione è stato eseguito un monitoraggio discontinuo con cadenza di misura bimestrale.

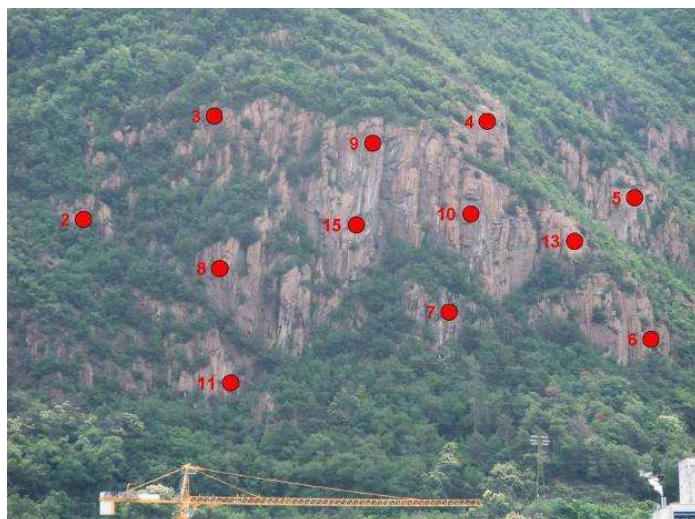


Figura 4.27 Punti comuni identificati sul versante (Mazzanti et al., 2009).

Per combinare le due tipologie di misura è stato fondamentale individuare dei punti comuni di misura in modo da poter “spalmare” le mappe bidimensionali sul dato 3D del rilievo laser-scanning (Figura 4.27). Questo è stato possibile posizionando sulla parete dei corner reflectors sulla parete – per questo motivo precedentemente la tecnica è stata definita “teoricamente remota” – identificati nel rilievo SAR, successivamente nella medesima posizione sono stati posizionati dei prismi topografici, le cui posizioni sono state rilevate con un rilievo topografico eseguito con stazione totale.

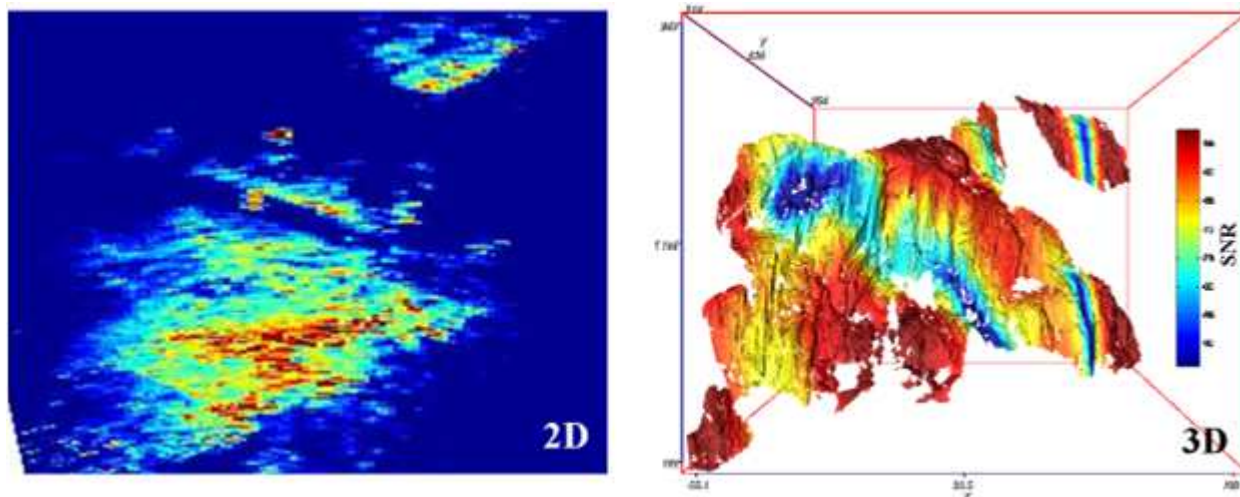


Figura 4.28 La mappa di spostamento bidimensionale (a sinistra) è stata spalmata sul dato tridimensionale ottenuto dal rilievo laserscanning (a destra) (Mazzanti et al., 2009).

In questo modo è stato possibile georeferenziare e sovrapporre le mappe laser scanning e SAR con una precisione indicata dagli autori di circa 1 m. Tale modalità di visualizzazione consente una più chiara lettura ed interpretazione delle mappe SAR, grazie ad una visualizzazione tridimensionale (Figura 4.28).

Il risultato dell'indagine è stato che nel periodo monitorato nessun settore della scarpata è stato affetto da deformazioni permanenti superiori a 1-2 mm, tuttavia l'integrazione delle misure eseguite con i dati meteo acquisiti in loco ha consentito di identificare dei cunei di roccia con comportamento elastico più evidente, specialmente in corrispondenza di eventi meteorici particolarmente intensi.

5 Progettazione del monitoraggio e risultati attesi

Sulla base delle informazioni preliminarmente raccolte sulla metodologia si è deciso di procedere nella realizzazione di una campagna di monitoraggi in tre siti sperimentali situati nel territorio della regione Friuli Venezia Giulia aventi ognuno diverse peculiarità geomorfologiche. Sono stati scelti quindi: un sito antropizzato, con edifici, caratterizzato da movimenti lenti, un sito caratterizzato da un parete rocciosa, con possibilità di crolli e ribaltamenti ed un sito caratterizzato da un versante in materiale sciolto, privo di vegetazione. Scopo di questa scelta diversificata è stato da un lato ottenere informazioni utili in termini di protezione civile e pianificazione territoriale, ma soprattutto ricavare tramite un confronto critico dei risultati ottenuti informazioni di carattere metodologico. La ricerca, infatti è stata indirizzata sia all'ottenimento di risultati di indubbia utilità applicativa, sia all'ottimizzazione della progettazione dei rilievi e alla verifica delle procedure ottimali di elaborazione dei dati applicabili nei diversi contesti.

La possibilità di poter reperire i dati tramite un monitoraggio promosso da una Pubblica Amministrazione ha visto l'attivazione dell'iter burocratico stabilito dalle vigenti normative in materia per cui si è reso necessario redigere uno speciale capitolato d'appalto sull'argomento. La difficoltà principale è stata quella di poter inserire dei contenuti di elevato livello tecnico che nel contempo fossero in grado di descrivere compiutamente tutte le attività richieste, considerando anche possibili problematiche che sarebbero potute insorgere nel corso della realizzazione del progetto.

5.1 Il progetto

Il punto di partenza per dare l'avvio al progetto è stata la stesura di un capitolato tecnico dedicato, per permettere l'acquisizione e l'elaborazione dei dati GBSAR, che comprende inoltre tutta una serie di opere accessorie fondamentali nella riuscita della campagna di misure.

Realizzazione di un sistema di monitoraggio di dissesti franosi presenti sul territorio della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia con metodologia integrata basata sull'uso di sistema radar interferometrico terrestre (GBInSAR) e da satellite (A-DInSAR), in abbinamento a misure di rilevamento topografico tradizionali.

Art. 1. OGGETTO

Oggetto dell'appalto è l'attivazione di un sistema di monitoraggio di tre frane ubicate nel territorio della Regione Friuli Venezia Giulia, mediante l'utilizzo di misure di superficie eseguite con tecnologie basate sull'uso del sistema radar interferometrico per identificare le zone caratterizzate da movimenti di versante millimetrici, da abbinarsi a sistemi di misure topografiche convenzionali, con le seguenti finalità:

- determinazione degli spostamenti differenziali dell'area di frana;
- stima del campo di velocità e sua interrelazione con fattori esterni quali piogge o temperatura.

I siti individuati a tal fine sono i seguenti:

- Ligosullo (UD): il sito in oggetto è collocato nel centro urbano di Ligosullo, caratterizzato da un fenomeno di instabilità generalizzato con tassi di deformazione dell'ordine di alcuni cm/anno;
- Cimolais (PN): il sito in oggetto si trova su una parete rocciosa, caratterizzata da fenomeni localizzati di crollo;
- Erto e Casso, località La Pineda (PN): il sito in oggetto è collocato su un accumulo di una paleofrana che interessa le località La Pineda e Casere Prada.

La tipologia delle singole reti di monitoraggio deve essere ottimizzata in base alle caratteristiche dei siti; d'obbligo rimane, comunque, acquisire misure con il sistema radar interferometrico terrestre (GBInSAR) in tutti e tre i siti, in quanto si necessita di:

- un sistema remoto che consente di misurare spostamenti del fronte instabile senza la necessità di installare riflettori artificiali e quindi di accedere direttamente alla zona instabile;
- mappe di spostamento dell'intero versante;
- misure in near real time (dati acquisiti in maniera automatica e risultati in tempo quasi reali);
- misure in qualsiasi condizione meteorologica, sia di giorno che di notte;
- misure ad elevata accuratezza (tra il decimo di millimetro ed il millimetro in funzione della distanza) dell'entità di spostamento, date dal confronto delle informazioni di fase delle onde elettromagnetiche riflesse dall'oggetto in diversi istanti di tempo.

Il sistema di monitoraggio deve prevedere inoltre l'integrazione con capisaldi GPS appoggiati alla rete di posizionamento GPS regionale, nei punti in cui sarà posizionata la strumentazione GBInSAR.

Per il sito di Ligosullo, in particolare, si prevede di implementare lo studio al fine di verificare la dinamica storica dei movimenti, con il metodo A-DInSAR (Advanced Differential SAR Interferometry), utilizzando la tecnica denominata "multi stacking", che rappresenta un valido metodo per la misura ed il controllo delle deformazioni in estese aree anche difficilmente accessibili.

Inoltre, in relazione alla presenza di aree abitate nella zona instabile, si deve pianificare la resa operativa di un punto fisso di misura, in prossimità della stazione di misura GBInSAR, sul quale posizionare ad intervalli almeno bimestrali una stazione

totale che consenta la verifica degli spostamenti di almeno venti capisaldi, costituiti da prismi retroriflettenti, da posizionare su edifici particolarmente a rischio.

Art. 2. DURATA

L'appalto ha una durata di 24 mesi

Art. 3. CARATTERISTICHE GENERALI DEL MONITORAGGIO CON SISTEMA RADAR INTERFEROMETRICO TERRESTRE (GBInSAR)

a. Descrizione strumentazione

La strumentazione radar interferometrica terrestre richiesta per la campagna di monitoraggi deve rispondere a specifici requisiti che ne garantiscano l'efficienza in termini di:

- affidabilità: il sistema deve produrre informazioni significative ed immediate, in modo da ridurre al minimo le incertezze nell'interpretazione dei dati e nella comprensione degli effetti associati all'evoluzione del fenomeno;
- robustezza ed utilizzabilità in ogni condizione meteorologica, climatica ed ambientale, in modo da ridurre al minimo onerose operazioni di manutenzione e da evitare l'interruzione del funzionamento nei momenti critici in cui i dati sono necessari;
- flessibilità e maneggevolezza, in modo da poter essere predisposto rapidamente all'approssimarsi di condizioni potenzialmente rischiose.

Il sistema di misura dovrà essere composto dai seguenti moduli:

- modulo sensore, deputato alla generazione, trasmissione e ricezione del segnale elettromagnetico. Il modulo è installato sopra il modulo di posizionamento che permette al sensore di illuminare la struttura sotto indagine da differenti angoli di vista e permette poi di poter sfruttare la tecnica SAR per ottenere una immagine bidimensionale dello scenario. Tale modulo presenta un'interfaccia USB per il collegamento al PC di controllo ed un'interfaccia verso il modulo di posizionamento.
- modulo di posizionamento, collocato su un supporto stabile, solidale al terreno, che presenti particolari accorgimenti per garantire il riposizionamento periodico per la ripetizione nel tempo delle misure;
- computer di controllo, sul quale è installato il software di gestione del sistema. Tramite il computer di controllo è possibile configurare i parametri dell'acquisizione, gestire la misura e visualizzare i primi risultati in real-time.
- modulo di alimentazione che consente sia di alimentare il sistema tramite il collegamento alla rete elettrica sia di renderlo autonomo dal punto di vista energetico tramite l'utilizzo di pannelli fotovoltaici e/o di un generatore.

b. Requisiti tecnici minimi della strumentazione

Le prestazioni della strumentazione dipendono dal tipo di configurazione impiegata e, in parte, dalla condizione operativa di misura (legata soprattutto alla riflettività della zona indagata); è tuttavia possibile definire le seguenti prestazioni di massima:

- massima distanza operativa: 4000 m
- risoluzione dell'immagine in direzione di range: 50 cm
- risoluzione angolare: 4.5 mrad
- tempo di installazione dello strumento: circa 2 h
- risoluzione temporale minima dello scenario: 5 minuti
- autonomia energetica a lungo termine per poter operare in località remote non collegate alla rete elettrica;
- marchiatura CE ed utilizzo delle frequenze stabilite dall'Unione Europea per gli strumenti GBInSAR.

c. Piano del monitoraggio con sistema radar interferometrico terrestre (GBInSAR)

Per ognuno dei siti proposti viene definito un piano di monitoraggio discontinuo basato su brevi campagne di misura (periodical check), approvato dalla stazione appaltante, alle quali l'aggiudicatario dovrà attenersi.

Al fine di eliminare il fenomeno di ambiguità di fase, all'inizio di ogni singola campagna di misura è richiesta l'attivazione di un processo di "phase unwrapping" finalizzato a ricostruire una continuità delle misure degli spostamenti anche per i periodi non monitorati, ricollegando ogni campagna di misure alla precedente. Eventuali modifiche dovranno essere preventivamente concordate con la stazione appaltante.

Ligosullo (UD)

Il sito è collocato nel centro urbano del capoluogo, caratterizzato da un evento franoso attivo, di probabile origine post-glaciale, di natura complessa, con movimento prevalentemente stagionale connesso agli eventi meteorologici- idrogeologici locali e con una superficie di scivolamento che si colloca nel sottosuolo dell'abitato fino alla profondità di 70 m. Il corpo di frana si estende su una superficie di 25 ettari, coinvolgendo circa sette milioni di metri cubi di ammasso roccioso. Le misure di deformazione inclinometrica effettuate con continuità sin dal 1998 hanno permesso di determinare che la frana si muove lungo l'asse di massima pendenza del versante con un modulo medio annuo di 18 mm e con azimuth medio di 195° Nord. Le misure topografiche di livellazione geometrica, composte da 8 cicli di misura effettuati fra il 2001 ed il 2007, hanno permesso di rilevare considerevoli deformazioni verticali nell'area dell'abitato di Ligosullo.

L'attività prevista è definita in tre campagne di misura radar interferometriche da terra all'anno, della durata di 10 giorni ciascuna. Il radar dovrà essere installato su una postazione stabile per consentire il riposizionamento dello strumento alla successiva campagna.

L'area da monitorare è racchiusa all'interno del perimetro di frana catalogato nel Sistema geografico Informativo Difesa Suolo (SIDS) della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia con l'identificativo frana 0300500100000.

Cimolais (PN)

Il sito si trova su una parete rocciosa sovrastante l'abitato di Cimolais, facente parte della guglia calcarea denominata Crep Savath, e caratterizzata da fenomeni localizzati di crolli e ribaltamenti. La principale causa dei crolli è, unitamente alla morfologia del versante, la situazione strutturale dell'ammasso roccioso. Lo scopo del monitoraggio con radar interferometrico terrestre è quello di identificare le zone caratterizzate da movimenti differenziali premonitori di eventuali crolli.

L'attività prevista è definita in tre campagne di misura radar interferometriche da terra all'anno, della durata di 10 giorni ciascuna. Il radar dovrà essere installato su una postazione stabile per consentire il riposizionamento dello strumento alla successiva campagna.

L'area da monitorare è racchiusa all'interno del perimetro di frana catalogato nel Sistema geografico Informativo Difesa Suolo (SIDS) della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia con l'identificativo frana 0930140100000.

Erto e Casso, località La Pineda (PN)

Il sito è collocato su un accumulo di paleofrana. I movimenti registrati in località La Pineda e Casere Prada, al di fuori della più nota frana del Monte Toc già movimentata, sono da tenere sotto controllo e da comprendere in maniera più dettagliata.

La località La Pineda è un'area con isolati edifici abitativi ad uso residenziale in locazione, alcuni permanenti altri saltuaria, posta su un terrazzo collocato in sinistra idrografica del lago residuo del Vajont il cui livello di invaso è regolamentato da sfioratoi che impediscono sicuramente oscillazioni repentine del livello del lago.

L'attività prevista è definita in tre campagne di misura radar interferometriche da terra all'anno, della durata di 10 giorni ciascuna. Il radar dovrà essere installato su una postazione stabile per consentire il riposizionamento dello strumento alla successiva campagna.

L'area da monitorare non è catalogata nel Sistema geografico Informativo Difesa Suolo (SIDS) della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia.

Art. 4. IMPLEMENTAZIONE DI OPERE E SERVIZI NECESSARI AL MONITORAGGIO CON TECNOLOGIA RADAR INTERFEROMETRICA TERRESTRE

a. Principi generali:

In ogni sito di monitoraggio, la scelta dell'ubicazione e la predisposizione della postazione di misura devono essere concordate con la stazione appaltante e sono a carico dell'aggiudicatario. La postazione di misura dovrà comprendere tutte le specifiche di installazione dei vari accessori necessari al sistema GBInSAR quali strumenti, collegamenti e sistemi di trasferimento dati. Essa dovrà tenere conto di tutti gli aspetti connessi alla sicurezza nelle aree di lavoro, con particolare riguardo alle vigenti norme di legge.

Le richieste di cui ai successivi commi b, c, d ed e sono da intendersi obbligatorie in tutti i tre siti di monitoraggio.

b. Opere civili a supporto della strumentazione

Le opere civili da realizzarsi a supporto della strumentazione sono finalizzate a consentire il riposizionamento dello strumento alla successiva campagna. Esse devono rispettare i vincoli presenti sul territorio ma nel contempo dovranno tener conto delle esigenze di efficacia ed efficienza delle misure.

Le strutture devono assicurare qualità e ripetibilità delle misure e comunque devono evitare la presenza di qualsiasi oggetto ad una distanza frontale di 4 m e laterale di 2 m dalle antenne, per evitare interferenze e zone d'ombra dei risultati.

c. Necessità di protezioni

Dopo aver valutato le condizioni al contorno, le condizioni operative e le interazioni con gli altri componenti del sistema deve essere definito il grado di protezione di concerto con la stazione appaltante, tuttavia dovrà tener conto considerando sia gli aspetti strumentali (quali ad esempio sovratensioni, fulminazioni, condizioni ambientali, ecc.) sia possibili interferenze esterne, quali atti vandalici, presenza di animali, sviluppo di vegetazione.

d. Opere accessorie

Deve essere garantita l'autonomia energetica della strumentazione; anche se qualora l'aggiudicatario lo ritenesse opportuno, la strumentazione potrà essere allacciata alla rete elettrica. Tutti gli impianti dovranno essere eseguiti e dimensionati secondo normativa vigente.

e. Criticità dell'installazione

L'aggiudicatario deve essere in grado di fronteggiare la criticità dell'installazione, intesa quale ponderazione delle conseguenze in caso di insuccesso dell'installazione ovvero di non funzionamento, cattivo funzionamento, inefficacia dello strumento a causa dell'installazione stessa.

f. Caposaldo GPS

In corrispondenza delle opere civili a supporto della strumentazione GBInSAR deve essere realizzato un caposaldo GPS per verificare la stabilità di ogni postazione. Le misure GPS devono essere acquisite in contemporanea alle campagne di misurazione interferometriche, con modalità di rilievo di tipo relativo statico con intervallo di campionamento non superiore a 15"; i tempi misura saranno espressi in minuti primi non inferiori a 40; in presenza di cycle slip o di ostacoli superiori a 15 gradi sull'orizzonte dell'antenna o comunque in presenza di problemi che facciano supporre una carenza di precisione, la durata della sessione di misura viene convenientemente aumentata. La durata deve comunque garantire la possibilità di fissare le ambiguità ed ottenere una soluzione FIX. I ricevitori GPS di tipo geodetico utilizzati devono essere in grado di ricevere ed elaborare sia la fase dei codici che delle portanti L1 (1575MHz) ed L2 (1227MHz) su minimo 12 canali.

Al fine di raffinare l'informazione sul dato di posizione, le misure GPS devono trovare appoggio alla rete GPS regionale (maggiori informazioni sul sito: <http://www.regione.fvg.it/rafvfg/cms/RAFVG/AT9/ARG14/>).

g. Consegna documentazione relativa ai caposaldi GPS

La documentazione relativa all'elaborazione, interpretazione e restituzione dei dati delle misure GPS, deve essere fornita in duplice copia cartacea e su supporto informatico in dati nativi e formato pdf. In particolare si richiedono:

- file .shp o .dwg dei caposaldi georiferiti in coordinate Gauss Boaga;
- cartografia con ubicazione della rete di caposaldi in scala 1:5000;
- file ASCII dei calcoli delle basi dei rilievi (eventuale anche formato .doc);
- file Rinex dei rilievi;
- relazione descrittiva delle elaborazioni.

Per ogni successiva misura successiva alla prima:

- file ASCII dei calcoli delle basi dei rilievi. (eventuale anche formato doc);
- file Rinex dei rilievi;
- file dei libretti di misura dei rilievi con tavola grafica delle rete di punti relativa;
- elaborato di sintesi in scala 1:5000 con eventuali vettori di movimento proporzionali agli spostamenti cumulativi registrati delle sessioni di misura;
- relazione descrittiva delle elaborazioni e dei risultati del monitoraggio (formato .doc);
- grafico scostamento delle misure totale.

h. Consegna documentazione relativa alle opere a supporto

La documentazione relativa al posizionamento di ogni postazione di misura GBInSAR deve essere fornita in due copie cartacee e su supporto informatico in dati nativi e formato pdf, fornendo inoltre:

- file .shp o .dwg dei caposaldi georiferiti in coordinate Gauss Boaga
- cartografia con ubicazione delle postazioni in scala 1:5000
- monografie delle nuove postazioni comprendenti stralcio cartografico, coordinate Gauss Boaga, descrizione, ubicazione, data di materializzazione, documentazione fotografica.

Art. 5. ATTIVITA' COMPLEMENTARI AL PIANO DI MONITORAGGIO CON SISTEMA RADAR INTERFEROMETRICO TERRESTRE (GBInSAR)**a. Principi generali**

L'aggiudicatario deve eseguire una ricognizione sulle informazioni disponibili presso la stazione appaltante, interfacciandosi se del caso con altri soggetti terzi.

b. Dati meteorologici

L'aggiudicatario deve servirsi dei dati storici validati della rete idrometeorologica regionale forniti dall'Unità Operativa Idrografica del Servizio idraulica della Direzione Centrale ambiente, energia e politiche per la montagna della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia.

c. Analisi in tre dimensioni georiferite

Al fine di poter procedere alla successiva analisi in tre dimensioni georiferite delle aree indagate, il punto di installazione e la direzione dell'apertura sintetica del sistema GBInSAR devono essere riferiti in coordinate Gauss Boaga e, comunque, nelle medesime coordinate del DEM che verrà fornito dalla stazione appaltante.

d. Indagini aggiuntive

Nel sito di Ligosullo, vista la presenza di aree abitate nella zona instabile, si richiede la messa in funzione di un punto fisso di misura, in prossimità della stazione di misura GBInSAR, su cui posizionare, ad intervalli almeno bimestrali, una stazione totale per la misura degli spostamenti di almeno venti capisaldi costituiti da prismi retroriflettenti, da posizionare su edifici particolarmente a rischio. L'ubicazione della rete di misura deve essere concordata con la stazione appaltante; il punto più distante è ubicato a circa 950 m dalla stazione di misura.

Il teodolite elettronico utilizzato per le misure deve avere un precisione angolare non superiore a 0.3 mgon ed una precisione sulla determinazione della distanza di 2 mm + 2 ppm; gli angoli azimutali e zenitali devono essere rilevati almeno due volte sia nella posizione diritta che in quella capovolta; le distanze devono essere misurate sia in andata che in ritorno.

L'aggiudicatario deve provvedere a tutte le opere accessorie necessarie alle misurazioni, in analogia a quanto descritto all'art. 4 per la strumentazione GBInSAR.

e. Consegna documentazione rilievo topografico

La documentazione relativa all'elaborazione, interpretazione e restituzione dei dati deve essere fornita in duplice copia cartacea e su supporto informatico in dati nativi e formato pdf:

- materializzazione dei nuovi caposaldi per rilievo tradizionale e misura di zero:
 - file .shp o .dwg dei caposaldi georiferiti in coordinate Gauss Boaga;
 - cartografia con ubicazione della rete di caposaldi in scala 1:5000;
 - monografie dei nuovi capisaldi comprendenti stralcio cartografico, coordinate Gauss Boaga, descrizione, ubicazione, data di materializzazione, documentazione fotografica (da fornire su supporto cartaceo e file pdf);
 - file dei libretti di misura dei rilievi con tavola grafica della rete di punti relativa;
 - relazione descrittiva delle elaborazioni.
- Per ogni sessione di misura successiva:
 - elaborato di sintesi in scala 1:5000 con eventuali vettori di movimento proporzionali agli spostamenti registrati per ogni sessione di misura;
 - elaborato di sintesi in scala 1:5000 con eventuali vettori di movimento proporzionali agli spostamenti registrati cumulativo delle sessioni di misura;
 - file dei libretti di misura dei rilievi con tavola grafica della rete di punti relativa;
 - relazione descrittiva delle elaborazioni e dei risultati del monitoraggio;
 - grafico scostamento delle misure totale.

Art. 6. ELABORAZIONE, INTERPRETAZIONE E RESTITUZIONE DEI DATI GBInSAR

Il risultato del monitoraggio GBInSAR deve portare all'elaborazione di mappe e analisi degli spostamenti nei siti oggetto d'indagine.

Nell'esecuzione dell'analisi si deve tenere conto di tutti i parametri acquisiti collegati all'attività di rilevamento ed illustrati ai paragrafi 4, 5 e 7.

Si deve descrivere la modalità di attuazione del processo di eliminazione dell'ambiguità di fase (phase unwrapping) al fine di correlare tra loro le serie di dati ottenuti nelle diverse fasi di misura discontinue e ricostruire una continuità temporale nell'evoluzione degli spostamenti.

Si deve attivare un processo di validazione dei dati basato sull'analisi del segnale, in modo da consentire di valutare la rappresentatività dei dati acquisiti, eliminando i dati anomali e riportando tutte le informazioni relative alla caratterizzazione del rapporto segnale/rumore (di seguito SNR). Si richiedono, per ogni sito, mappe del SNR termico per valutare la riflettività media dello scenario oggetto del monitoraggio, mappe del SNR stimato per misurare la stabilità dello scenario oggetto del monitoraggio nel tempo e mappe di coerenza per misurare la stabilità del segnale di fase.

Le conclusioni devono riportare un'analisi critica delle diverse condizioni di monitoraggio nei diversi siti.

a. Consegna documentazione relativa all'elaborazione, interpretazione e restituzione dati GBInSAR

La documentazione relativa all'elaborazione, interpretazione e restituzione dei dati delle misure GBInSAR deve essere fornita in duplice copia cartacea e su supporto informatico in dati nativi e formato pdf; in particolare si richiedono:

- elaborato di sintesi in scala 1:5000 con eventuali vettori di movimento proporzionali agli spostamenti registrati per ogni sessione di misura;
- elaborato di sintesi in scala 1:5000 con eventuali vettori di movimento proporzionali agli spostamenti cumulativi registrati dalle sessioni di misura;
- relazione descrittiva delle elaborazioni e dei risultati del monitoraggio con interpretazione geomorfologica dei dati con particolare riferimento agli aspetti geologici e geomeccanici

Art. 7. MONITORAGGIO CON IL METODO A-DInSAR (Advanced Differential SAR Interferometry)

Nel sito di Ligosullo è chiesto uno studio per verificare la dinamica storica dei movimenti, con il metodo A-DInSAR (Advanced Differential SAR Interferometry), utilizzando la tecnica denominata "multi-stacking" (l'interferometria radar rappresenta un valido metodo per la misura ed il controllo delle deformazioni in estese aree anche difficilmente accessibili). Deve essere eseguita l'elaborazione interferometrica di almeno 50 immagini radar satellitari (ERS1, ERS2 ed ENVISAT) appartenenti ad una lunga serie temporale (1992-2010).

L'analisi, svolta mediante l'impiego di software dedicati, deve permettere di ricostruire con precisione millimetrica la storia deformativa di bersagli radar naturali caratterizzati da una firma elettromagnetica particolarmente stabile (parti di edifici, rocce esposte o strutture metalliche esistenti).

Al fine di determinare la distribuzione spaziale delle velocità medie di deformazione del terreno riferibili a fenomeni di subsidenza, deve essere predisposta un'adeguata cartografia di riferimento di tutto il territorio indagato su cui poter verificare l'interazione del fenomeno studiato con le principali forme antropiche presenti sul territorio.

Le conclusioni riportate in una specifica relazione illustrativa di tutto lo studio devono permettere di stimare nel dettaglio l'evoluzione dei movimenti e devono consentire di definire spazialmente le aree maggiormente interessate.

a. Consegna documentazione relativa all'indagine A-DInSAR

A conclusione del lavoro deve essere consegnata alla Stazione appaltante, in doppia copia ed in formato digitale, una dettagliata relazione tecnica illustrativa dei risultati ottenuti, supportata da adeguata cartografia atta a rappresentare graficamente le aree interessate da fenomeni di abbassamento.

Art. 8. RELAZIONE ED ELABORATI FINALI

Nel rapporto tecnico finale devono essere riportate le metodologie di indagine adottate, i metodi di elaborazione e di interpretazione, i processi di validazione dei dati ed i risultati ottenuti integrando tutte le informazioni acquisite. Laddove l'integrazione dei dati acquisiti lo consenta, è richiesta la costruzione di modelli di spostamento tridimensionali. E' richiesta un'analisi dei parametri geomorfologici correlati ed integrati dagli aspetti geologici ed idrogeologici, orientata a valutare la dinamica degli stessi ed all'identificazione dei tempi con cui i parametri si evolvono o subiscono variazioni significative; in particolare, si richiede una determinazione degli spostamenti in area di frana, una stima del campo di velocità e sua interrelazione con fattori esterni, quali piogge e temperatura, e la definizione di eventuali soglie critiche nell'evoluzione delle situazioni.

L'approfondimento delle conoscenze dei fenomeni franosi monitorati è finalizzata alla definizione del tipo di evoluzione possibile, alla definizione delle azioni che potranno ridurre gli effetti indotti ed alla mitigazione della pericolosità.

a. Consegna documentazione relativa all'indagine A-DInSAR

La relazione e gli elaborati cartografici finali dovranno essere consegnati in duplice copia cartacea ed in formato digitale, sia in formato nativo che in formato .pdf.

Art. 9. TEMPISTICHE, FASI DI MONITORAGGIO E CONSEGNA ELABORATI

Ferme restando le cadenze periodiche di misura indicate nel piano di monitoraggio indicato all'articolo 3, lett. c., devono essere consegnati i dati e le relative elaborazioni come definiti agli articoli 4, lett. g. e h., 5, lett. e., 6, lett. a., 7, lett. a., 8, lett. a., secondo le seguenti tempistiche:

1. prima fase: entro quattro mesi dall'affidamento dei lavori e comunque ad avvenuta materializzazione dell'implementazione di opere e servizi necessari al monitoraggio con tecnologia radar interferometrica terrestre nei tre siti della rete di monitoraggio e del posizionamento della rete di monitoraggio topografico tradizionale a Ligosullo, con consegna di una relazione dettagliata delle attività svolte;
2. seconda fase: ad avvenuta esecuzione, in ogni sito, del primo anno di misure con consegna dei relativi elaborati e degli eventuali primi risultati delle attività di monitoraggio;
3. terza fase: ad avvenuta esecuzione dello studio con il metodo A-DInSAR (Advanced Differential SAR Interferometry) per la misura ed il controllo delle deformazioni nel sito di Ligosullo, con consegna dei relativi elaborati;
4. quarta ed ultima fase: ad avvenuta esecuzione in ogni sito del secondo anno di misure con consegna dei relativi elaborati, dei risultati delle attività di monitoraggio e del rapporto finale.

6 La strumentazione utilizzata

In tutti i tre siti si è utilizzata una stazione di misura complessa composta da una postazione di misura GBSAR, un sistema di posizionamento GPS, una stazione meteorologica ed una unità di trasferimento dati e controllo remoto.

La strumentazione è stata installata attraverso il sistema QUIB (Quick Installation Basement) (Mazzanti, 2013), un basamento di appoggio modulare specificatamente sviluppato per eseguire installazioni rapide in condizioni di emergenza, garantendo al contempo il ripristino delle condizioni originarie di sito al termine delle attività di monitoraggio. Il sistema QUIB impiegato, realizzato specificatamente per le attività in oggetto, presenta un ingombro in pianta di 280 x 60 cm, ed un'altezza variabile in funzione delle necessità sito specifiche (Figura 6.1).



Figura 6.1 Postazione di misura GBSAR, completa di tutte le sue componenti.

La struttura è completamente chiusa attraverso pannelli di legno (e in PVC nel lato frontale) garantendo così la protezione delle strumentazioni dagli agenti atmosferici. In corrispondenza dei lati corti della struttura sono stati installati dei sistemi di supporto per l'antenna GPS e per la stazione meteo (Figura 6.2).



Figura 6.2 Aspetto della struttura con pannello frontale chiuso.

6.1 Sistema GBSAR

La piattaforma di monitoraggio GBSAR (Figura 6.3) installata è costituita dal sensore interferometrico IBIS-L (IDS Corporation), composto dalle seguenti strumentazioni:

- Sensore radar IBIS: si tratta di un sensore attivo dotato di due antenne per l'emissione e la ricezione del segnale elettromagnetico in banda Ku. Il sensore, che ha un raggio d'azione di circa 4 km, può essere regolato in altezza attraverso un'apposita base basculante. Il radar viene alimentato dal modulo alimentatore e controllato attraverso un computer dedicato.
- Binario di posizionamento: si tratta di un binario lungo 2,70 m su cui viene fatto muovere il sensore IBIS su una lunghezza utile massima di 2 m al fine di ottenere una immagine SAR (Synthetic Aperture Radar).
- Modulo di alimentazione: contiene il quadro elettrico di alimentazione dell'intero sistema ed è dotato di due batterie tampone che garantiscono un'autonomia di circa 12-24 ore.

La piattaforma di monitoraggio è stata alimentata da rete elettrica 220V.



Figura 6.3 Sistema a moduli della piattaforma di monitoraggio GBSAR IBIS-L, analoga a quella utilizzata nelle misure

La Tabella 6.1 riassume i parametri tecnici dello strumento utilizzato.

| | |
|---|--|
| Frequenza centrale di emissione | 16.75 GHz |
| Guadagno antenna | 20 dB |
| Lunghezza binario | 2 m |
| Numero di singole scansioni che costituiscono l'immagine SAR | 401 |
| Larghezza di banda | 300 MHz |
| Distanza max | 3.000 m |
| Inter scan delay (tempo di attesa tra la fine di una scansione e l'inizio della successiva) | 6 sec |
| Ripetività temporale | ~ 12 minuti |
| Range resolution | 0.5 m |
| Cross range resolution | 4.5 mrad (circa 4 m a 1.000 m di distanza) |

Tabella 6.1 Parametri tecnici della strumentazione impiegata.

6.2 Sistema di monitoraggio GPS

Il sistema di monitoraggio GPS installato è costituito da un ricevitore Leica GMX902 con antenna GNSS (GPS L1/L2 + GLONASS) a 28 canali (Figura 6.4). Il ricevitore è collegato ad una master unit contenente il pc di gestione e controllo del sistema e una batteria tampone (Figura 6.5).



Figura 6.4 Dettaglio dell'antenna e del ricevitore GPS utilizzato nei monitoraggi.



Figura 6.5 Sistema di controllo del GPS, utilizzato nel corso delle acquisizioni.

Va ricordato che l'accuratezza della misura GPS è di gran lunga inferiore rispetto a quella del radar, quindi nel caso fosse rilevato, dai dati GPS, uno spostamento importante del punto di misura GBSAR, non avrebbe senso elaborare il dato GBSAR vincolandolo al dato GPS, ottenendo una sorta di spostamento "relativo.

In questi casi la procedura da attuare è simile a quella che si utilizza nei monitoraggi periodici, con la co-registrazione delle mappe radar basate sui segnali di ampiezza dello scenario per riallineare le mappe di spostamento. Questo tuttavia induce delle forti perdite di accuratezza nelle misure. Di fatto se il punto di misura GBSAR si sposta, questo viene immediatamente evidenziato dalle mappe radar.

6.3 La stazione meteo

Al fine di incrementare l'accuratezza dei dati relativi ai principali parametri atmosferici (utili per la correzione e l'interpretazione dei dati di monitoraggio GBSAR) è stata installata una stazione meteo professionale modello Vantage Pro 2 (Figura 6.6) in corrispondenza della postazione di monitoraggio GBSAR. La stazione meteo è costituita da un gruppo di sensori esterni wireless (termometro, anemometro, pluviometro ed igrometro) con alimentazione autonoma e pannello solare. La consolle, ubicata all'interno della struttura QUIB, è stata equipaggiata con un datalogger per il salvataggio periodico dei dati acquisiti.



Figura 6.6 Dettaglio dei componenti la stazione meteo utilizzata durante le acquisizioni.

6.4 Sistema di controllo e trasferimento dati da remoto

Al fine di verificare il corretto funzionamento del sistema di monitoraggio GBSAR e GPS, la piattaforma di monitoraggio è stata equipaggiata con un sistema di collegamento remoto. In particolare, è stato installato un router 3G modello Digicom 8E4488 al quale sono stati collegati i computer di controllo ed acquisizione dei sistemi per l'accesso e le verifiche del caso da remoto. Inoltre, è stato possibile trasferire in remoto alcuni dati di monitoraggio al fine di crearne una copia di sicurezza.

6.5 I corner reflector

I corner reflector sono triedri metallici di circa 40 cm di lato in grado di concentrare e riflettere il segnale radar (Figura 6.7). Sono utilizzati per creare dei riferimenti certi all'interno dello scenario e sono fondamentali per la georeferenziazione delle mappe GBSAR. Solitamente nel corso della prima campagna di rilievo si procede al posizionamento provvisorio (circa 10 minuti) di corner reflector in un numero di punti variabile all'interno dello scenario irradiato dal sensore, in modo da garantire l'esatta identificazione di tali punti sulle mappe di spostamento. Un raffinamento di tale tecnica consiste nell'eseguire un rilievo laser scanning ad alta risoluzione, installando nei punti di georeferenziazione del GBSAR, delle mire ottiche che consentano di identificare chiaramente tali punti nel modello 3D ottenuto dal rilievo Laser Scanning terrestre.



Figura 6.7 Corner reflector posizionato in parete sul Crep di Savath

6.6 Il processo di elaborazione dei dati interferometrici

Comunemente, la strumentazione GBSAR viene commercializzata con un software dedicato all'elaborazione dei dati. Per questa ricerca sono stati utilizzati sia software commerciali sviluppati dalla IDS S.p.A. (IBIS-Guardian e IBIS-DV) (IDS, 2013) sia specifici applicativi (Mazzanti et al. 2013). Le fasi di elaborazione di un dato GBSAR che portano all'ottenimento di mappe di spostamento, mappe di velocità di spostamento e serie temporali di spostamento sono:

- rimozione delle immagini SAR terrestri che dovessero presentare anomalie particolari (presenza di ostacoli temporanei, drastiche mutazioni dello scenario, condizioni meteo sfavorevoli) o comunque di qualità bassa al punto da compromettere l'intero processo di analisi. Tale filtraggio è stato effettuato sia tramite procedure automatizzate sia tramite operazioni manuali basate sul giudizio dell'operatore esperto addetto: di fondamentale importanza è stato confrontare i dati acquisiti in contemporanea dalla stazione meteo;
- identificazione dei pixel dell'immagine aventi caratteristiche di riflettività media (Rapporto Segnale Rumore Termico), stabilità di riflettività nel tempo (Rapporto Segnale Rumore Stimato) e coerenza di fase sufficienti a garantire l'affidabilità della misura di spostamento e le prestazioni attese;
- applicazione di metodi di unwrapping bidimensionali e tridimensionali;
- rimozione dell'eventuale disturbo sul dato determinato dall'eventuale movimento della piattaforma di monitoraggio (tramite l'utilizzo di misure GPS);
- selezione di alcuni punti ricadenti all'esterno dell'area di frana, in zona stabile, ed aventi buone caratteristiche di riflettività (se presenti) da utilizzare come Ground Control Point, ovvero come punti di riferimento per la correzione dei disturbi atmosferici;
- rimozione del disturbo atmosferico attraverso apposti logaritmi di calcolo basati sul Ground Control Point, sull'uso dei dati atmosferici (in particolare temperatura pressione, umidità) e su approcci basati su modelli di evoluzione predefiniti (lineari e/o polinomiali);
- applicazione di appositi filtri alle mappe di spostamento per la rimozione di disturbi residui sulla base dell'analisi di dati meteo e del giudizio esperto dell'operatore.

Al fine di correlare i dati acquisiti nell'ambito di diverse campagne di misura (ovvero caratterizzati da elevati intervalli temporali di misura), si sono utilizzati metodi di unwrapping basati principalmente sull'utilizzo dei risultati degli spostamenti ottenuti con il monitoraggio topografico tradizionale, facendo riferimento ad appositi riflettori comuni posti sullo scenario: in pratica i dati ottenuti dal monitoraggio topografico tradizionale sono stati utilizzati per eliminare/ridurre l'ambiguità di fase del dato.

Metodi di rimozione dell'ambiguità di fase indipendenti dall'utilizzo dei dati topografici sono stati applicati solamente al termine dell'intera attività di misura, ovvero nel momento in cui sono state disponibili un numero di immagini SAR sufficienti a garantire analisi multi-stacking simili ai metodi utilizzati nell'interferometria satellitare.

7 Fase preparatoria all'acquisizione

Preventivamente al progetto di monitoraggio è stata fatta una verifica della loro fattibilità, seguendo lo schema del paragrafo 4.10. Tutti i siti proposti sono risultati idonei alle misure e di conseguenza sono stati fatti dei sopralluoghi preventivi mirati ad evidenziare le problematiche logistiche di ciascun sito.

7.1 Ligosullo

Tale sito è rappresentato dal centro urbano del capoluogo, caratterizzato da un evento franoso attivo, di probabile origine post-glaciale, di natura complessa, caratterizzato da un movimento prevalentemente stagionale connesso con gli eventi meteorologici e idrogeologici locali con una superficie di scivolamento che si

colloca nel sottosuolo dell'abitato fino alla profondità di 70 m. Il corpo di frana si estende su una superficie di 25 ettari, coinvolgendo circa sette milioni di metri cubi di ammasso roccioso. Le misure inclinometriche effettuate con continuità sin dal 1998 dall'Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale – OGS, per conto del Servizio geologico della Regione FVG, hanno permesso di determinare che la frana si muove lungo l'asse di massima pendenza del versante con un modulo medio annuo di 18 mm e con azimut medio di 195° Nord. Le misure topografiche di livellazione geometrica, composte da 8 cicli di misura effettuati fra il 2001 ed il 2007, hanno permesso di rilevare considerevoli deformazioni verticali nell'area dell'abitato di Ligosullo.

L'area da monitorare è racchiusa all'interno del perimetro di frana catalogato nel Sistema geografico Informativo Difesa Suolo (SIDS) della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia con l'identificativo frana 0300500100000.

Nel sito di Ligosullo è stato individuato un sito idoneo all'installazione della postazione GBSAR in località Murzalis: la distanza tra il punto di vista e l'obiettivo è stimata in circa 900 m, tuttavia sarà necessario monitorare con attenzione la stabilità del punto di vista con una serie di misure GPS (Figura 7.1).

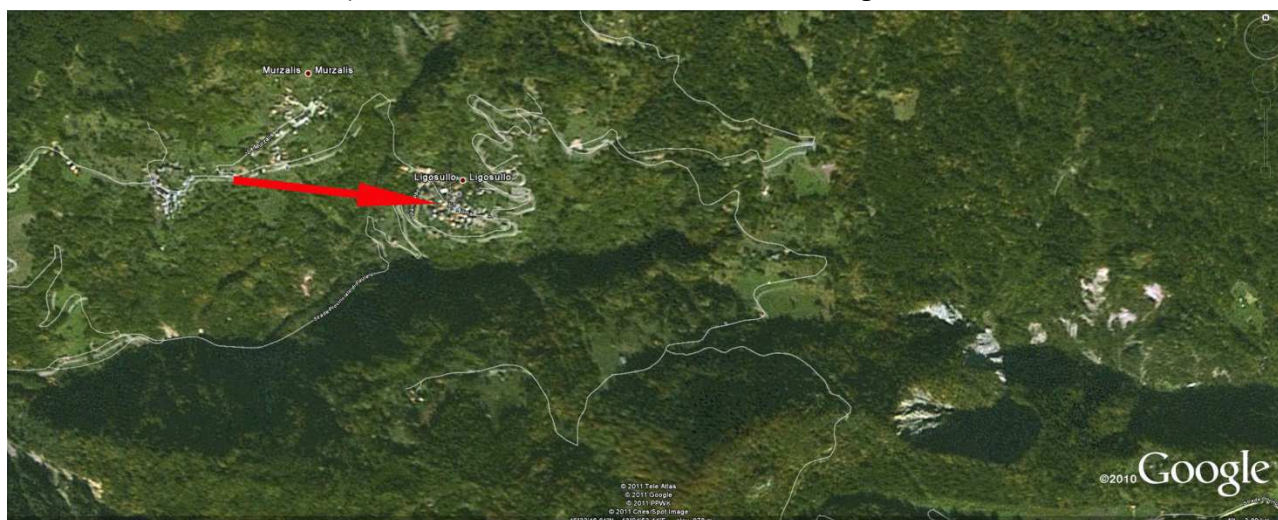


Figura 7.1 Estratto cartografico della zona da monitorare, la freccia rossa evidenzia l'ipotetica LOS del GBSAR.

7.2 Cimolais

Tale sito è rappresentato da una parete rocciosa sovrastante l'abitato di Cimolais, facente parte della guglia calcarea denominata Crep Savath, caratterizzata da fenomeni localizzati di crolli e ribaltamenti. La principale causa dei crolli è, unitamente alla morfologia del versante, la situazione strutturale dell'ammasso roccioso. Lo scopo del monitoraggio con radar interferometrico terrestre è quello di identificare le zone caratterizzate da movimenti differenziali premonitori di eventuali crolli (Figura 7.2).

L'area da monitorare è racchiusa all'interno del perimetro di frana catalogato nel Sistema geografico Informativo Difesa Suolo (SIDS) della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia con l'identificativo frana 0930140100000.

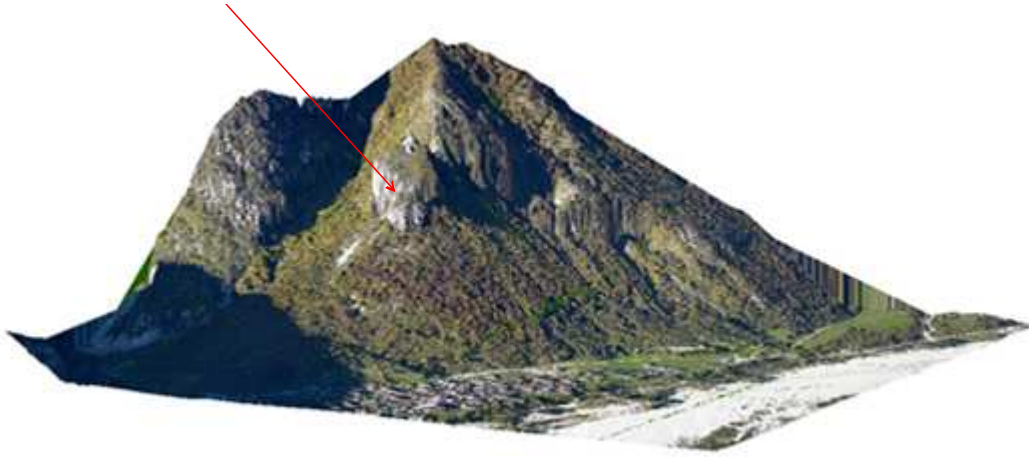


Figura 7.2 Modello morfologico tridimensionale del sito da monitorare in località Cimolais, la freccia rossa indica la posizione del diedro da monitorare.

Nella fase ricognitiva erano stati individuati due potenziali siti per l'installazione della strumentazione. La fase esecutiva ha individuato un terzo sito più prossimo al target situato all'interno del centro abitato.

7.3 La Pineda



Figura 7.3 Vista della scarpata che si intende monitorare in località La Pineda.

Tale sito è rappresentato da una parte dell'accumulo di una paleo frana. I movimenti registrati in località La Pineda e Casere Prada, al di fuori della più nota frana del Monte Toc già movimentata, richiedono una particolare attenzione (Figura 7.3).

La località La Pineda è un'area caratterizzata da isolati edifici, di cui alcuni ad uso continuativo ed altri ad uso discontinuo, che insiste su un terrazzo collocato in sinistra idrografica del lago residuo del Vajont il cui livello di invaso è regolamentato da sfiatoi che impediscono sicuramente oscillazioni repentine del livello del lago. Il bordo del terrazzo è caratterizzato da una morfologia calanchiva dove le frane superficiali sono diffuse.

L'area da monitorare non è catalogata nel Sistema geografico Informativo Difesa Suolo (SIDS) della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia.

Nella fase di preparazione sono stati individuati due potenziali siti per il posizionamento del GBSAR

Il sito 1 (Figura 7.4) è posizionato su un tetto di un edificio a servizio del cimitero di Erto dove è presente un caposaldo della rete GPS creata dal Servizio Geologico per monitoraggi geodetici.

- Pregi: facile accesso, buona visuale, facile connessione alla rete elettrica, sito protetto
- Difetti: non è possibile vedere la zona calanchiva posta a Ovest dell'abitato di Pineta (Figura 7.5).



Figura 7.4 Cartografia su cui è riportata l'ipotetica LOS dello strumento nell'ipotesi di installazione nel sito 1.



Figura 7.5 Vista sull'area da monitorare dall'ipotetico punto di misura "sito 1".

Il sito 2 (Figura 7.6) è situato sul coronamento di un muro di sostegno della strada SR 251, dove tuttavia non è verificata la presenza dell'alimentazione elettrica.

- Pregi: buona visibilità, presenza di un caposaldo della rete GPS del Servizio Geologico (Figura 7.7).
- Difetti: probabile mancanza di collegamento elettrico, difficile accessibilità.



Figura 7.6 Cartografia su cui è riportata l'ipotetica LOS dello strumento nell'ipotesi di installazione nel sito 2.



Figura 7.7 Vista sull'area da monitorare dall'ipotetico punto di misura "sito 2".

Valutate tutte le condizioni logistiche il sito ritenuto più idoneo per il posizionamento della strumentazione è risultato il sito 2.

8 Acquisizione ed elaborazione dei dati

8.1 Ligosullo

Sono state condotte quattro campagne di misura, la prima è stata condotta nel periodo 18 Giugno – 16 Luglio 2013, per un totale di 29 giorni di monitoraggio. Le altre tre campagne sono state condotte nel corso del 2014, secondo quanto indicato in Tabella 8.1. In Tabella 8.2 si riporta la sintesi dei parametri strumentali di acquisizione e le impostazioni sito-specifiche utilizzate per il monitoraggio della frana di Ligosullo.

| Numero di campagna | Data inizio | Data fine | Giorni di acquisizione | Tot. Immagini acquisite |
|--------------------|-------------|------------|------------------------|-------------------------|
| 1 | 18/06/2013 | 16/07/2013 | 29 | 3070 |
| 2 | 16/04/2014 | 29/04/2014 | 14 | 2798 |
| 3 | 22/05/2014 | 29/05/2014 | 8 | 1474 |
| 4 | 02/10/2014 | 29/10/2014 | 28 | 6726 |

Tabella 8.1 Riassunto delle date di acquisizione

| | |
|---|--|
| Frequenza centrale di emissione | 16.75 GHz |
| Guadagno antenna | 20 dB |
| Lunghezza binario | 2 m |
| Numero di singole scansioni che costituiscono l'immagine SAR | 401 |
| Larghezza di banda | 300 MHz |
| Distanza max | 3.000 m |
| Inter scan delay (tempo di attesa tra la fine di una scansione e l'inizio della successiva) | 6 sec |
| Ripetibilità temporale | ~ 12 minuti |
| Range resolution | 0.5 m |
| Cross range resolution | 4.5 mrad (circa 4 m a 1.000 m di distanza) |

Tabella 8.2 Parametri strumentali di acquisizione per il monitoraggio della frana di Ligosullo



Figura 8.1 Stazione di misura in località Murzalis.

La stazione di misura è ubicata presso l'abitato di Murzalis (UD), in corrispondenza dell'area di sosta sulla SP32 (Figura 8.1), in un sito di compromesso con facile logistica ed ottima visuale sull'abitato di Ligosullo ma una direzione di vista leggermente inclinata rispetto alla teorica direzione di movimento della frana (Figura 8.2). Le coordinate Gauss Boaga del punto di misura sono:

| Nord | Est | Quota (m s.l.m.) |
|---------|---------|------------------|
| 5155904 | 2371822 | 943 |

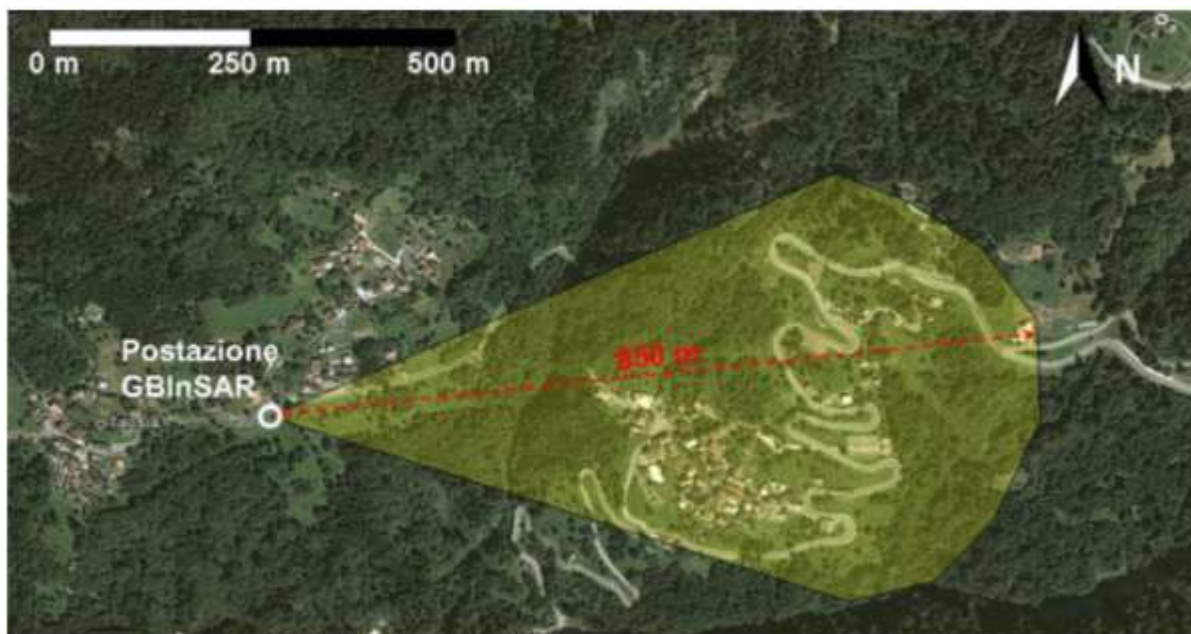


Figura 8.2 Cartografia della stazione di misura di Ligosullo, la linea tratteggiata rossa indica la linea di vista LOS.

La struttura è stata installata direttamente sulla sede stradale in corrispondenza dell'area di sosta sulla SP32 e vincolata a terra mediante barre filettate ancorate al manto stradale con resina bicomponente (Figura 8.3).



Figura 8.3 Dettaglio dell'ancoraggio della Struttura QUIBTM alla sede stradale.

Il 19 Giugno 2013 sono stati provvisoriamente posizionati dei riflettori artificiali (corner reflector) in corrispondenza di tre zone dello scenario (Figura 9 e Figura 10), al fine di acquisirne le coordinate radar ed incrementare l'accuratezza nella georeferenziazione delle mappe SAR.



Figura 8.4 Particolare del corner reflector installato su un'area ritenuta stabile.



Figura 8.5 Mappatura dell'ubicazione dei corner reflector riportata su immagine aerea.

Le misure GPS sono state acquisite in continuo e in concomitanza con il monitoraggio GBSAR, con modalità di rilievo di tipo statico con intervallo di campionamento ad un secondo. Per fronteggiare la presenza di eventuali ostacoli, o un numero di satelliti disponibili insufficiente, in alcuni periodi, i dati delle misure sono stati acquisiti con frequenza di campionamento a 1 secondo. I tempi di misura sono espressi ad un'ora e 24 ore. Tale durata è ritenuta idonea per fissare le ambiguità ed ottenere una risoluzione FIX. In fase di post processing, i dati acquisiti sono stati corretti con la stazione più vicina della rete GPS regionale.

I dati meteo con la stazione Vantage Pro sono stati acquisiti in continuo e in concomitanza con il monitoraggio GBSAR, con una frequenza di acquisizione pari a 30 minuti. In particolare, sono stati acquisiti, tra gli altri, dati relativi ai seguenti parametri:

- pluviometria;
- temperatura;
- umidità;
- pressione;
- velocità del vento.

8.1.1 Caratteristiche di backscattering del versante

Al fine valutare il grado di attendibilità dei dati di spostamento, sono state analizzate in dettaglio le mappe dei parametri radaristici di Coerenza temporale di fase (Figura 8.6), SNR termico (Figura 8.7) e SNR stimato (Figura 8.8) per ogni campagna di misura; rilevato che i valori sono rimasti pressoché invariati nel corso di tutte le misure, si riportano nel testo solo i risultati ottenuti dalle misure fatte nel corso della prima campagna.

I parametri radaristici hanno stabilito delle soglie che hanno consentito di eliminare i pixel affetti da artefatti che pregiudicano qualità ed accuratezza nella misura degli spostamenti, selezionando, pertanto, solo punti affidabili e validati.

Nel complesso si evidenzia come il versante oggetto di indagine manifesti delle buone caratteristiche di riflettività che consentono, pertanto, di condurre delle accurate analisi di spostamento. Si segnalano valori particolarmente elevati di coerenza e SNR soprattutto in corrispondenza delle abitazioni, mentre minore affidabilità può essere attribuita nelle zone circostanti l'abitato prevalentemente a causa della forte presenza di vegetazione.

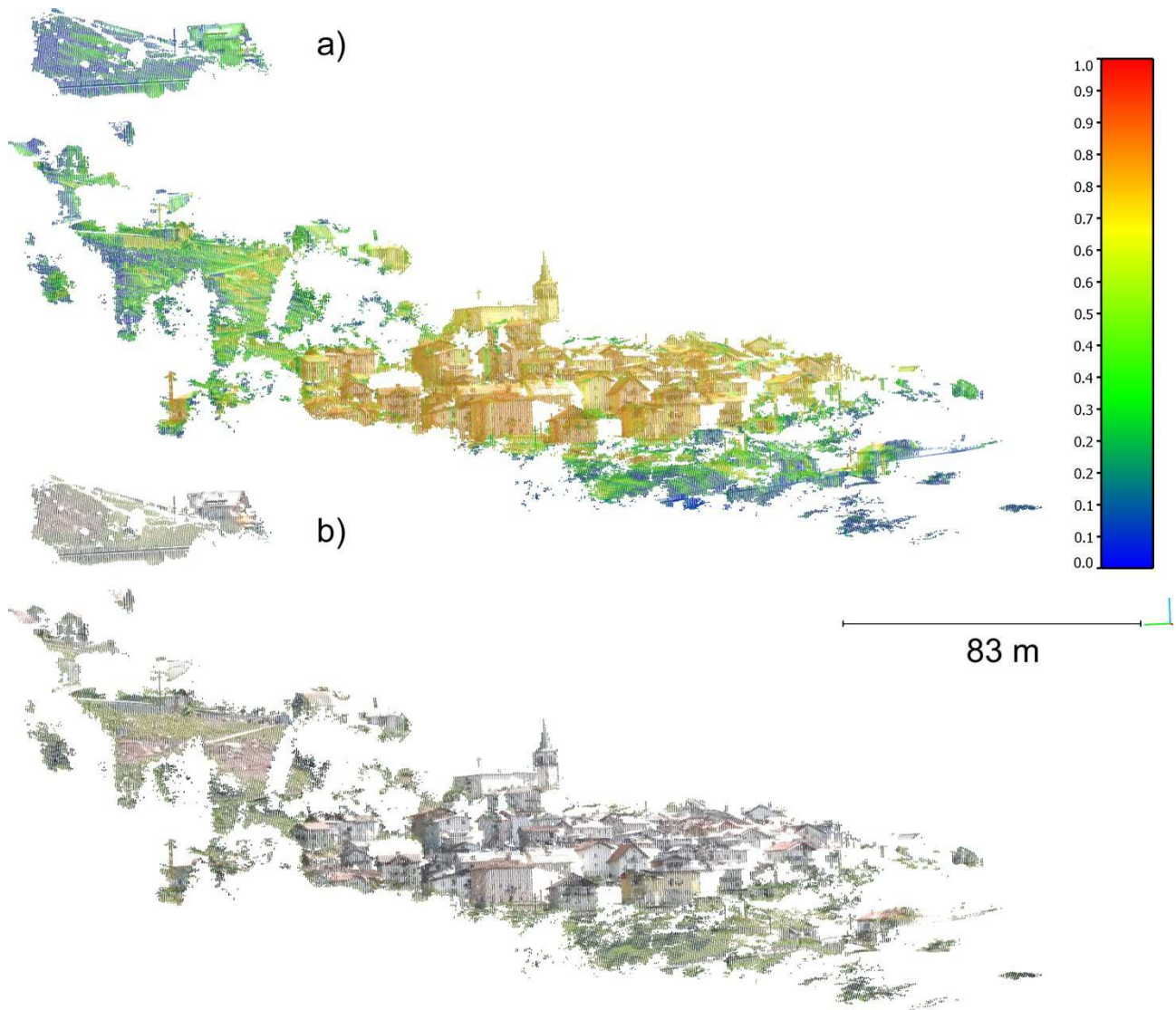


Figura 8.6 Mappa di coerenza temporale di fase, con la lettera a è indicata la mappa con la scala cromatica riferita ai valori di coerenza, con la parte b è riportata la nuvola di punti 3D in colori reali.

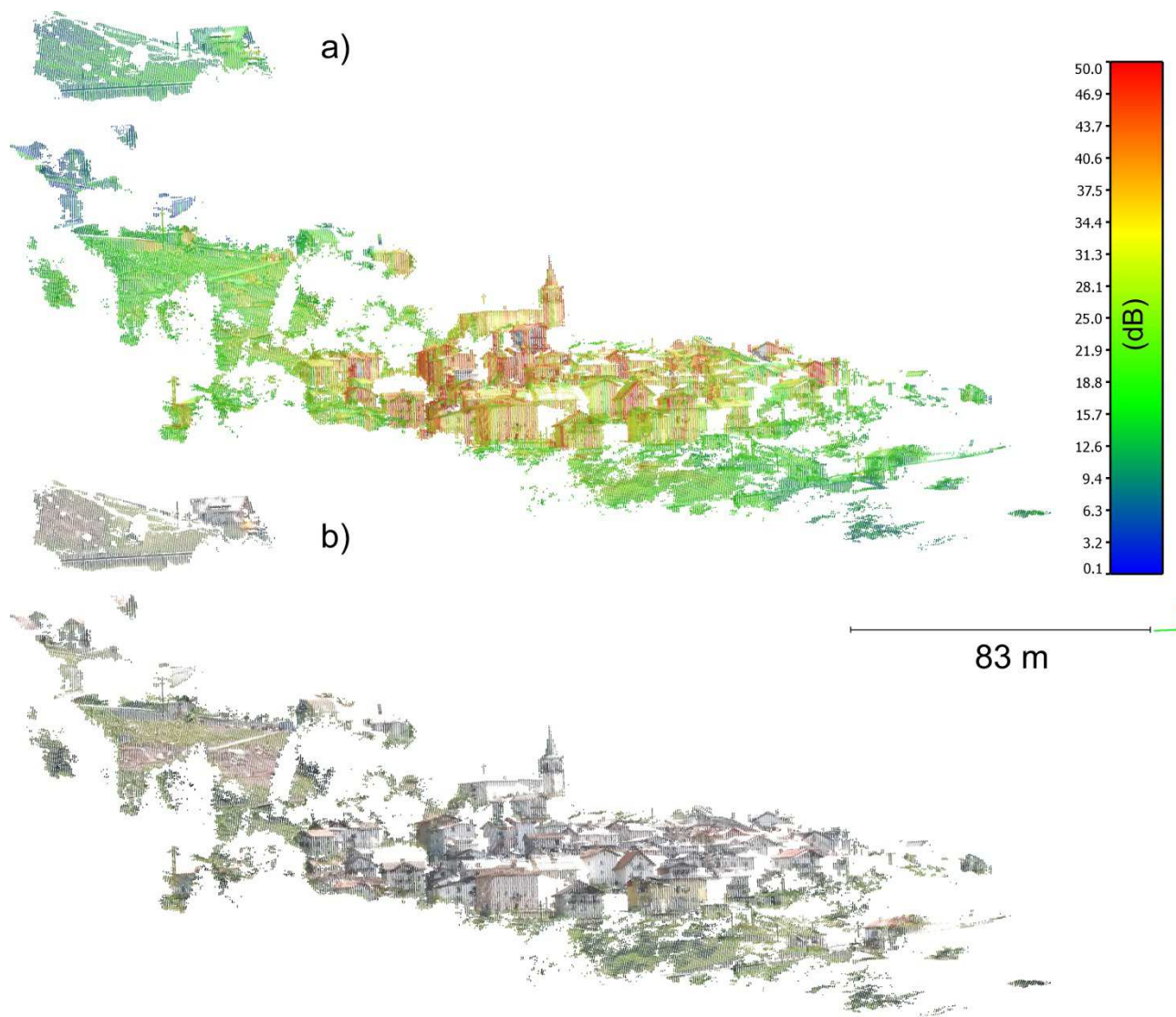


Figura 8.7 Mappa 3D SNR termico, con la lettera a è indicata la mappa con la scala cromatica riferita ai valori di SNR termico, con la parte b è riportata la nuvola di punti 3D in colori reali.

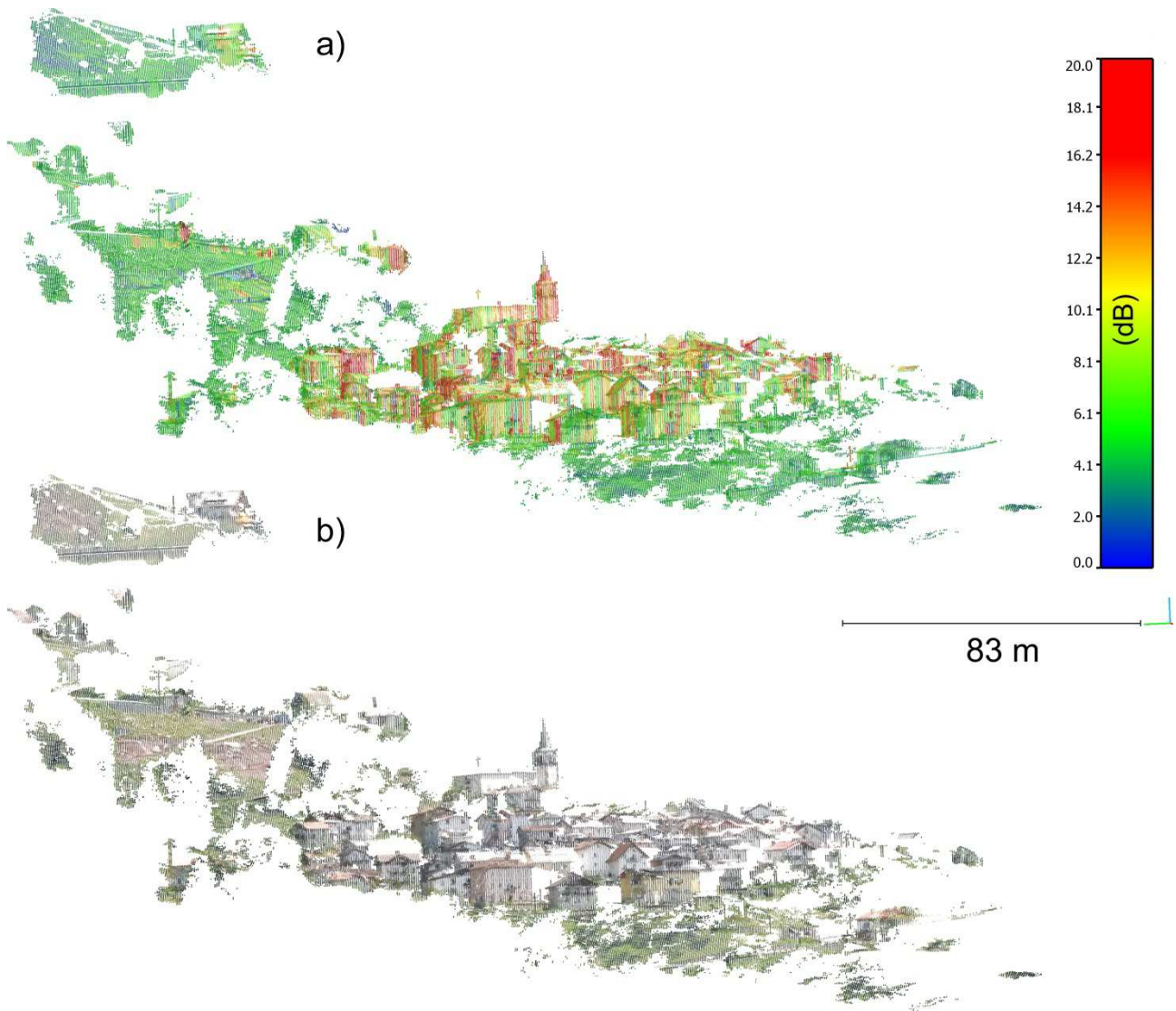


Figura 8.8 *Mappe di SNR stimato, con la lettera a è indicata la mappa con la scala cromatica riferita ai valori di SNR stimato, con la parte b è riportata la nuvola di punti 3D in punti reali.*

8.1.2 Misure di spostamento della prima campagna

I dati di monitoraggio GBSAR acquisiti nell'ambito della campagna di rilievo sono stati trattati ed elaborati al fine di identificare, caratterizzare e perimetrare eventuali spostamenti sul versante oggetto di indagine.

Per un'analisi completa ed esaustiva dei dati disponibili e per la ridondanza di informazioni, le elaborazioni dei dati acquisiti sono state condotte utilizzando il software IBIS Guardian (software ufficiale del sistema GBSAR utilizzato) (IDS, 2013) e degli algoritmi specificatamente implementati dalla società NHAZCA S.r.l. (Mazzanti et al., 2013).

Nell'ambito della campagna di monitoraggio GBSAR condotta non sono stati registrati particolari spostamenti significativi, né a scala locale, né alla scala dell'intero versante. La mappa di spostamento cumulato 2D è riportata in Figura 8.9.

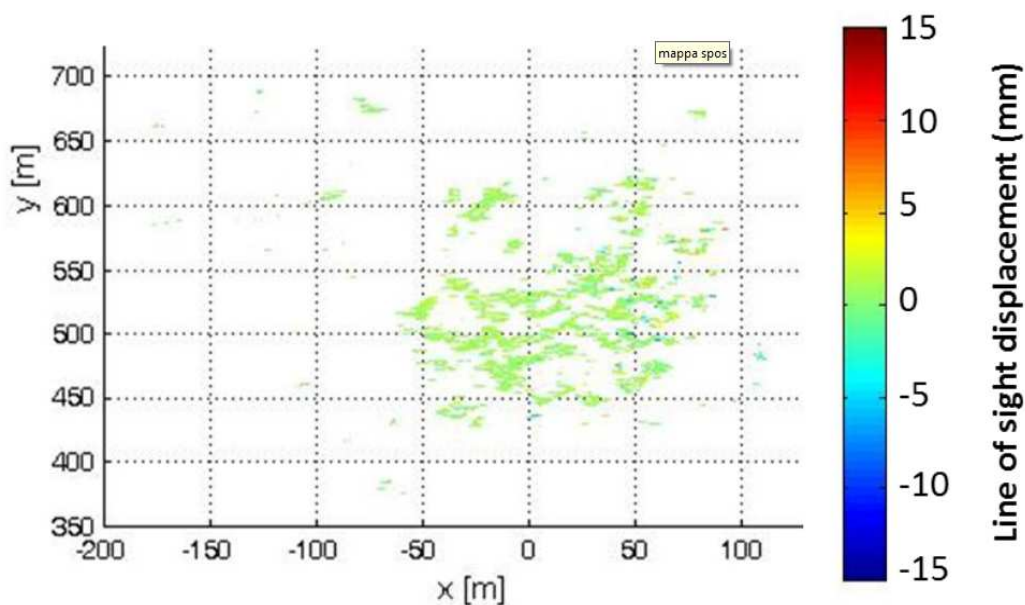


Figura 8.9. Mappa di spostamento cumulato 2D relativa al periodo 18/06/2013 – 16/07/2013.



Figura 8.10 Mappa dello spostamento cumulato su immagine satellitare relativa al periodo 18/06/2013 – 16/07/2013.

La Figura 8.10 illustra la mappa di spostamento cumulato riportata su immagini satellitare, mentre la Figura 8.11 riporta lo spostamento cumulato nel periodo di misura, confrontata con la nuvola di punti 3D in colori reali ottenuta da rilievo laser scanner terrestre.

Si ricorda che, secondo la convenzione assunta nello studio:

- i pixel di colore blu indicano spostamenti in avvicinamento (spostamenti negativi);
- i pixel di colore rosso indicano spostamenti in allontanamento (spostamenti positivi);
- i pixel di colore verde indicano spostamenti assenti o di entità non apprezzabile.

Risulta chiaro che al monitoraggio GBSAR è stato abbinato un rilievo laser scanner terrestre dedicato, le modalità operative di sovrapposizione dei risultati delle due metodologie sono riportate nel capitolo 4.1.1, al quale si rimanda per la descrizione.

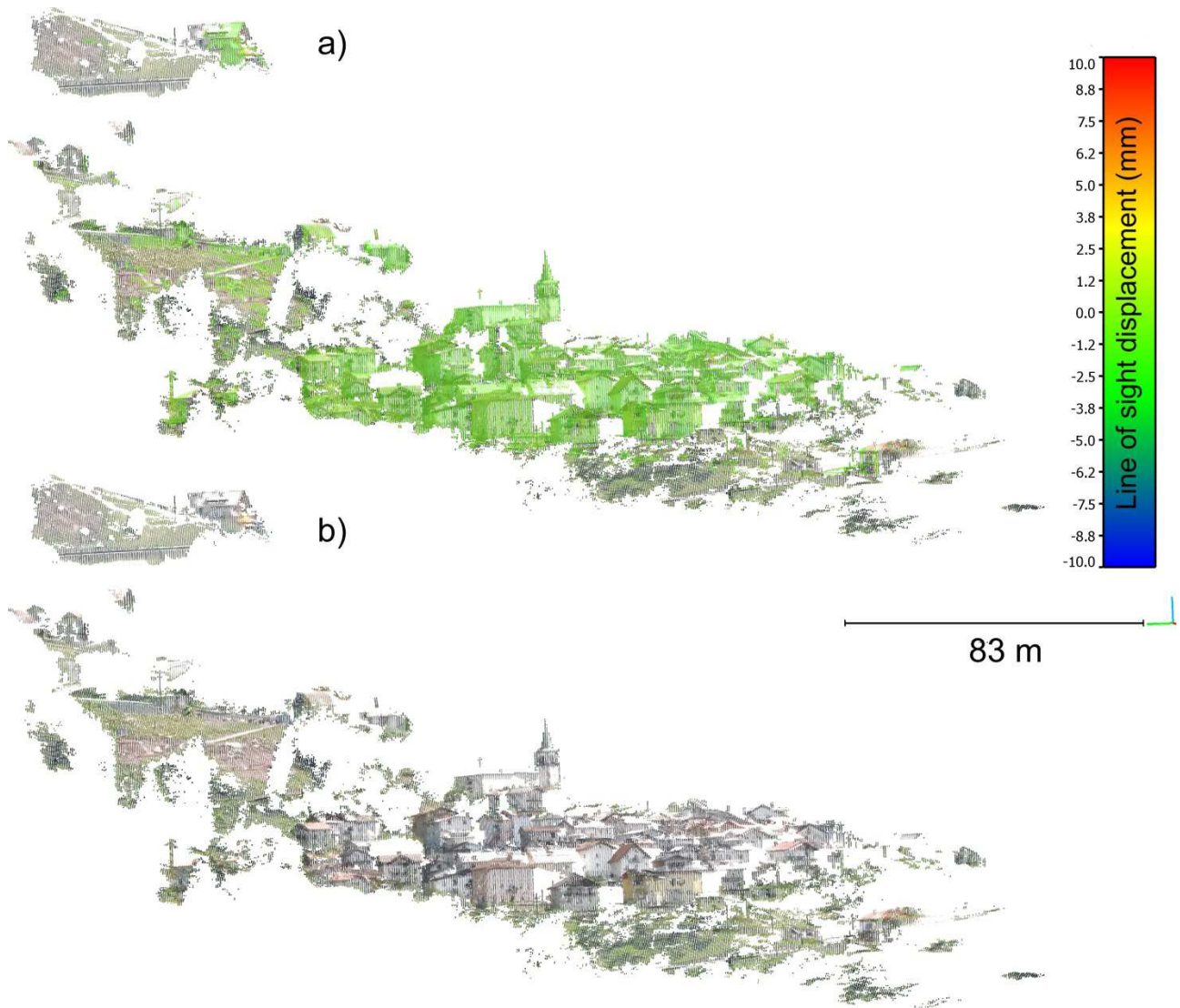


Figura 8.11 Mappa 3D di spostamento cumulate nel periodo di misura, con riportata nella parte b la nuvola di punti in colori reali.

Un maggior dettaglio nell'elaborazione del dato ha riguardato la specifica analisi delle serie temporali di spostamento di alcuni particolari settori di versante, la loro posizione è stata indicata in Figura 8.12. Nei diagrammi da Figura 8.13 a Figura 8.17 vengono riportati anche i valori pluviometrici, al fine di poter verificare un'eventuale corrispondenza immediata tra piovosità e spostamenti.

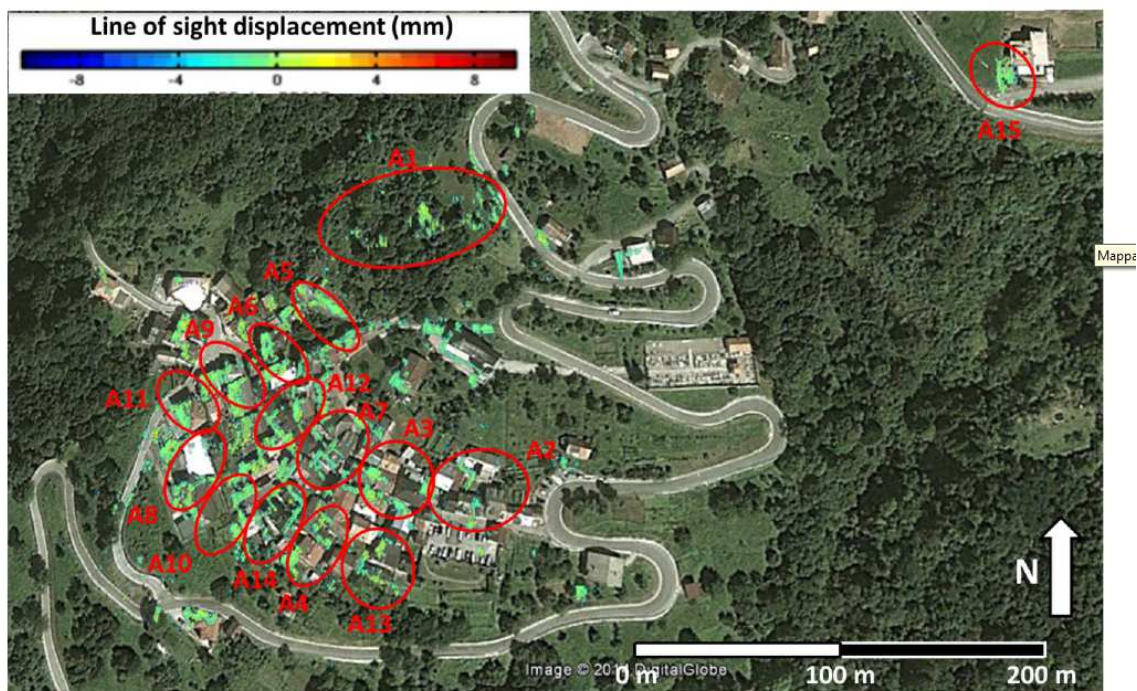


Figura 8.12 Mappa di spostamento cumulato su immagine satellitare relativa al periodo 18/06/2013 - 16/07/2013. In rosso si evidenziano le zone di cui si riportano le serie temporali di spostamento medie.

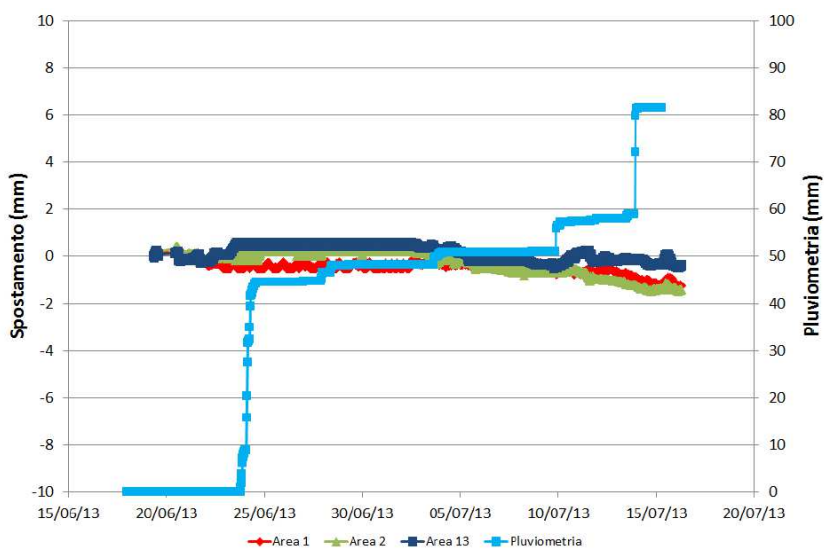


Figura 8.13 Serie temporali di spostamento medio delle zone A1, A2 e A13 (Figura 8.12), correlate con la serie temporale di pluviometria cumulata.

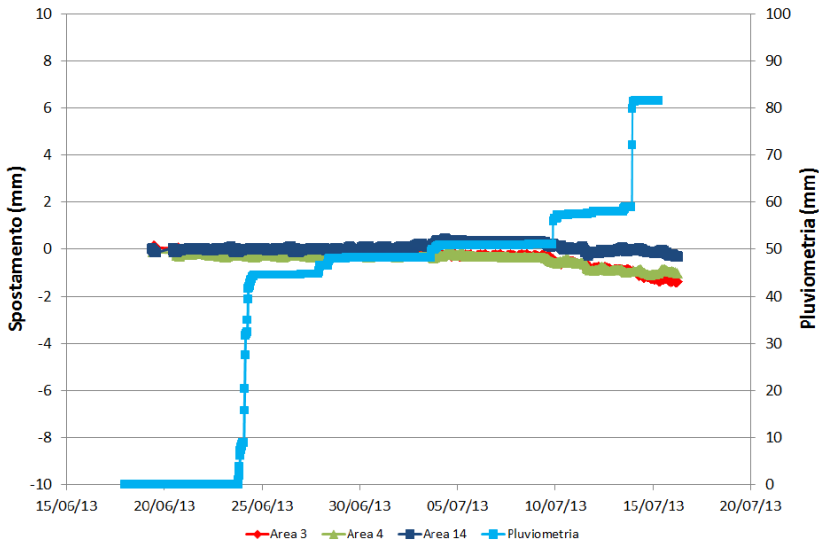


Figura 8.14 Serie temporali di spostamento medio delle zone A3, A4 e A14 (Figura 8.12), correlate con la serie temporale di pluviometria cumulata.

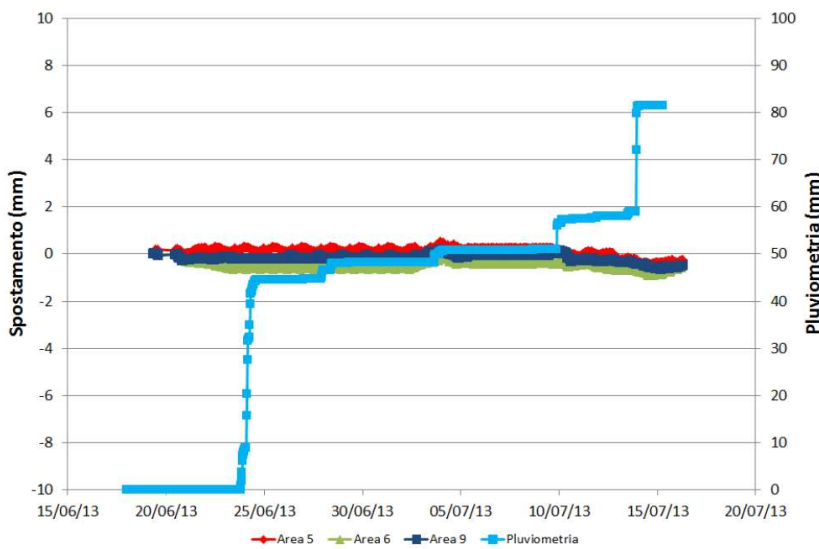


Figura 8.15 Serie temporale di spostamento medio delle zone A5, A6 e A9 (Figura 8.12), correlata con la serie temporale di pluviometria cumulata.

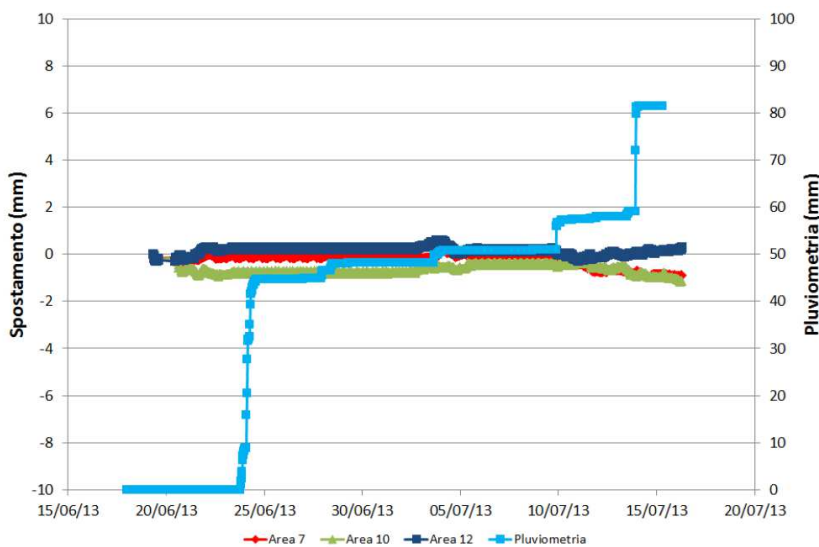


Figura 8.16 Serie temporali di spostamento medio delle zone A7, A10 e A12 (Figura 8.12), correlate con la serie temporale di pluviometria cumulata.

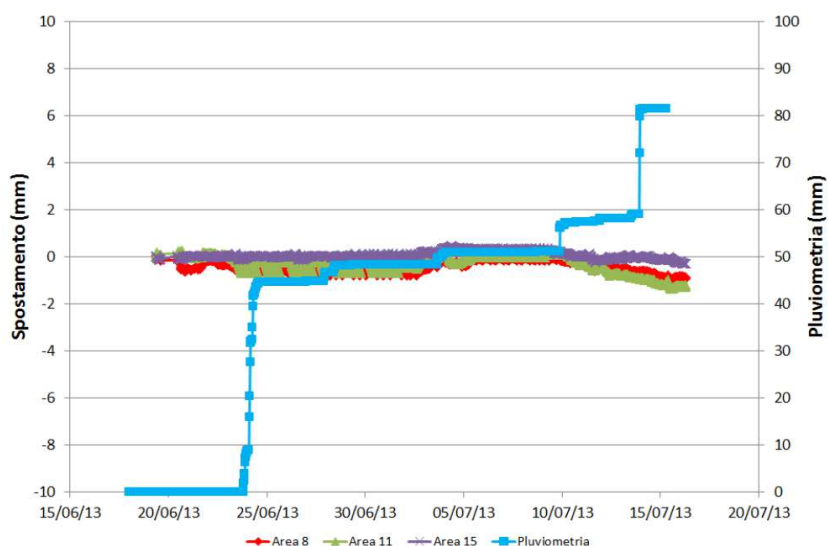


Figura 8.17 Serie temporali di spostamento medio delle zone A8, A11 e A15 (Figura 8.12), correlate con la serie temporale di pluviometria cumulata.

Nel complesso, i dati di monitoraggio con Interferometria SAR Terrestre relativi alla prima campagna hanno fatto registrare una condizione di sostanziale stabilità su tutto lo scenario investigato. Dalle serie di spostamento sopra riportate non si notano, infatti, spostamenti con trend costante nel tempo, né spostamenti a carattere ciclico, ad eccezione dell'ultimo periodo di monitoraggio (dal 9 Luglio al 16 Luglio) in cui sono stati registrati spostamenti in avvicinamento di entità modesta e prossima all'errore strumentale (minori di 2 mm) in corrispondenza dei settori di versante indicati in Figura 8.18. Tali spostamenti sono stati correlati con i valori di pluviometria cumulata registrati dalla stazione meteo installata in corrispondenza della piattaforma di monitoraggio GBSAR (confrontati con i dati meteo validati dalla Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia); dal confronto è emerso come i movimenti abbiano avuto inizio simultaneamente a precipitazioni meteoriche che hanno raggiunto valori di circa 30 mm nel periodo 9-13 Luglio 2013 (circa 7-8 mm/giorno) e non risultino ancora del tutto esauriti al termine del periodo di acquisizione.

Si segnala, inoltre, che, tra il 23 e il 24 Giugno sono state registrate precipitazioni con valori di pluviometria cumulata pari a circa 45 mm (circa 22-23 mm/giorno), in occasione delle quali, i medesimi settori di versante non hanno fatto registrare spostamenti apprezzabili.

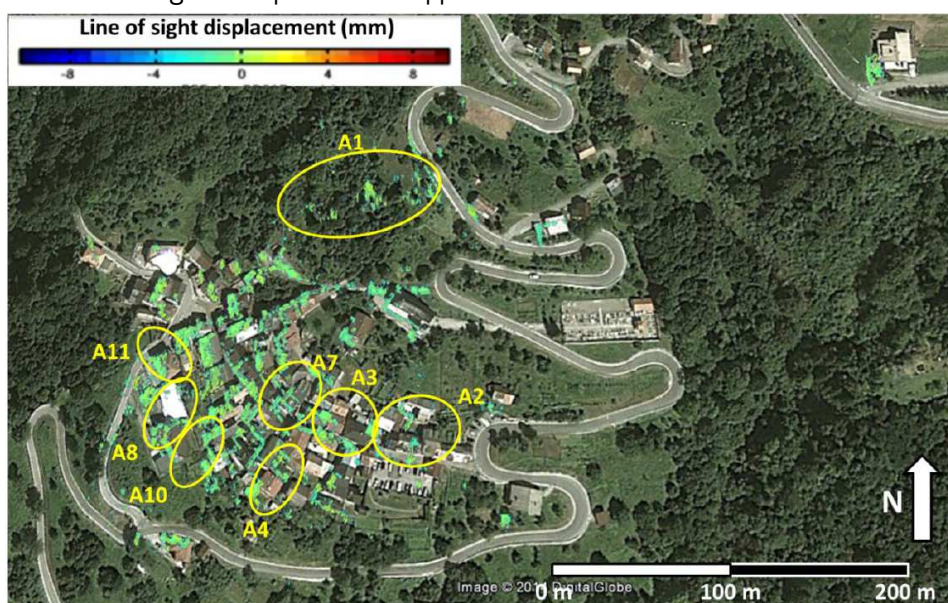


Figura 8.18 Mappa di spostamento cumulato su immagine satellitare relativa al periodo 18/06/2013 - 16/07/2013. In giallo si evidenziano le zone che hanno fatto registrare spostamenti di entità molto modesta e prossima all'errore strumentale

8.1.3 Misure di spostamento nel corso della seconda, terza e quarta campagna

Nel corso delle successive tre campagne di misura non si sono verificati spostamenti significativi ne a scala locale ne alla scala di versante, alcuni esempi di risultati riferiti alle diverse campagne sono riportati in Figura 8.19, Figura 8.21, Figura 8.22 e Figura 8.23

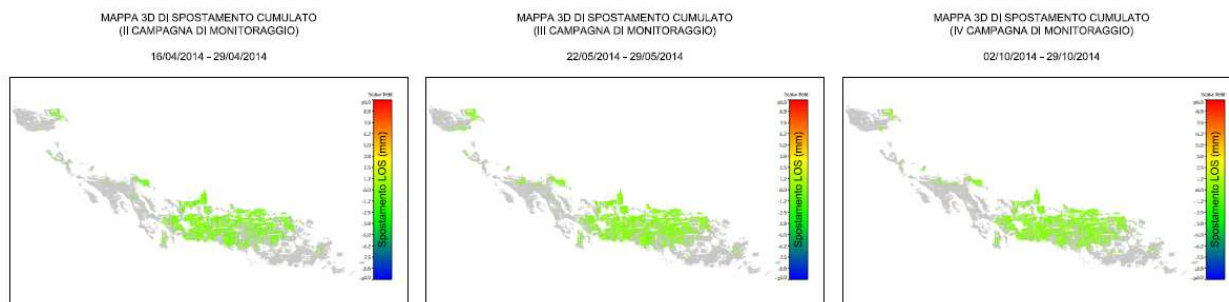


Figura 8.19 Mappe 3D di spostamento cumulato riferite all'intero versante relative alle ultime tre campagne di monitoraggio.

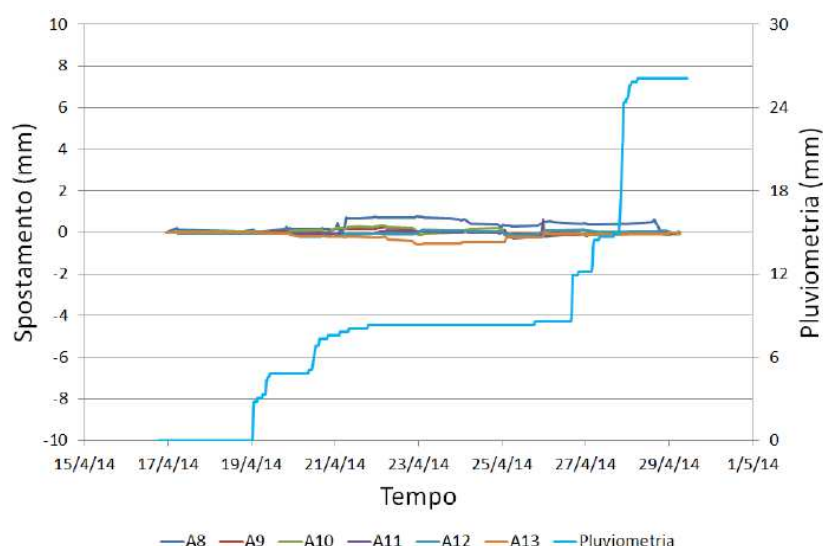


Figura 8.20 Serie temporali di spostamento medio delle zone A8, A9, A10, A11, A12 e A13 ((Figura 8.12), correlate con la serie temporale di pluviometria cumulata nel periodo 16/04/2014 – 29/04/2014

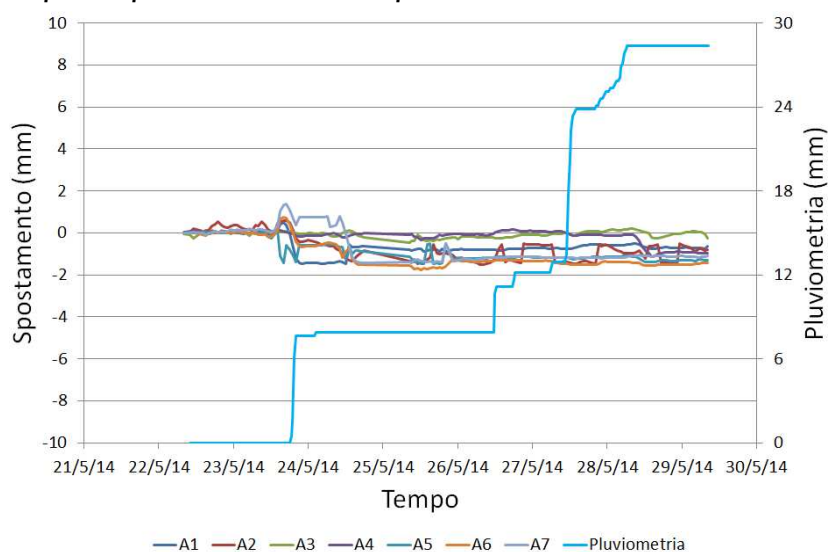


Figura 8.21 Serie temporali di spostamento medio delle zone A1, A2, A3, A4, A5, A6 e A7 (Figura 8.12), correlate con la serie temporale di pluviometria cumulata nel periodo 22/05/2014 – 29/05/2014.

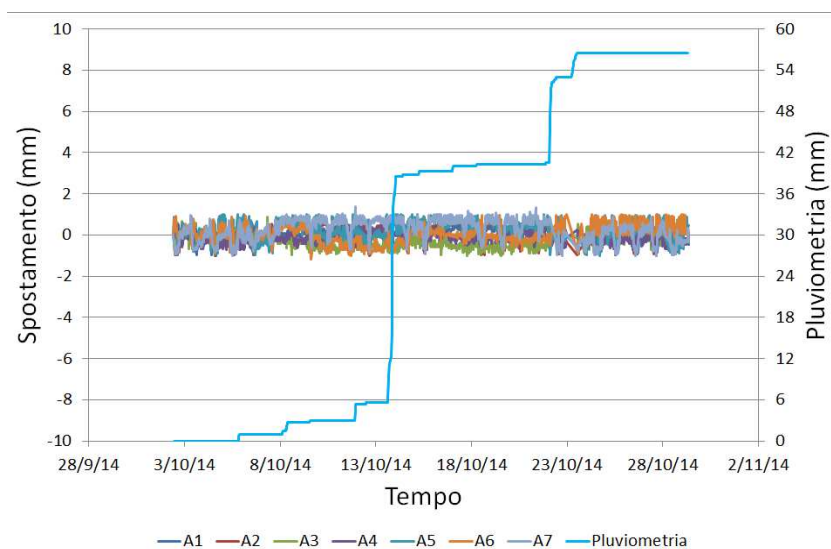


Figura 8.22 Serie temporali di spostamento medio delle zone A1, A2, A3, A4, A5, A6 e A7 (Figura 8.12), correlate con la serie temporale di pluviometria cumulata nel periodo 02/10/2014 – 29/10/2014.

8.1.4 Monitoraggio GPS

La postazione di monitoraggio GBSAR è stata equipaggiata con un caposaldo GPS al fine di verificarne eventuali spostamenti, contestualmente alle misure interferometriche. Per la descrizione dettagliata del sistema di rimanda al paragrafo 6.2 Il rilievo è stato condotto con intervallo di campionamento di 1 secondo. Le misure sono state salvate in file RINEX con cadenza oraria; inoltre, al fine di oviare problemi che potessero indurre carenza nell'accuratezza delle misure, le sessioni di misura sono state salvate anche con cadenza giornaliera (24 ore).

La strumentazione utilizzata è l'antenna Leica AS10 e il ricevitore il geodetico Leica GMX902GG, costituendo un sistema in grado di ricevere ed elaborare sia la fase dei codici che delle portanti L1 (1575MHz) ed L2 (1227MHz). Si riportano, di seguito (Figura 8.23), le serie temporali di spostamento registrate nelle direzioni X, Y e Z (sistema di riferimento geocentrico WGS84) nel periodo 18 Giugno – 17 Luglio 2013, corretti con i dati della stazione di riferimento regionale di Moggio Udinese (la più vicina al sito di monitoraggio), dalle quali non si evincono spostamenti significativi.

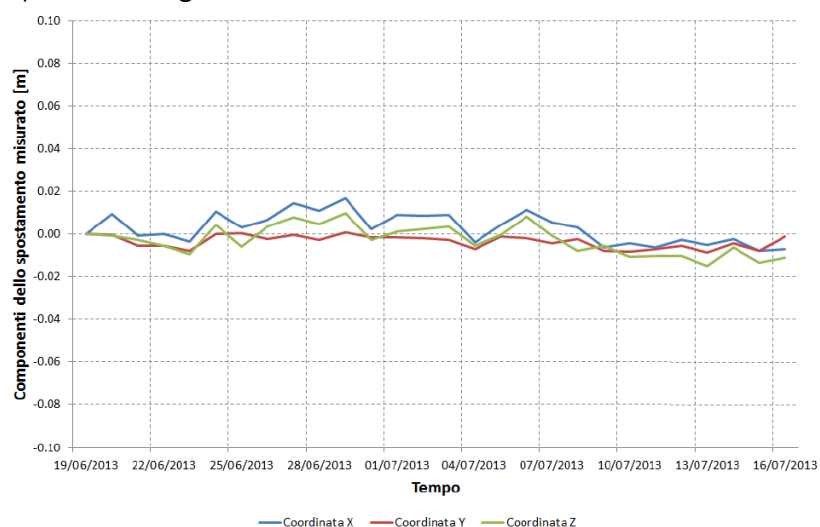


Figura 8.23 Serie temporali di spostamento cumulato lungo le direzioni X, Y e Z (sistema di riferimento geocentrico WGS84) del caposaldo GPS materializzato in corrispondenza della postazione di monitoraggio GBSAR (risultati derivanti dalla correzione con i dati della stazione di riferimento regionale di Moggio Udinese). Dati relativi al periodo 18 Giugno – 17 Luglio 2013.

8.2 Cimolais

La campagna di acquisizione di Cimolais, è stata esemplificativa di come le situazioni cambino tra la fase progettuale e quella esecutiva.

Infatti nel periodo intercorso tra la pubblicazione del capitolato tecnico e la realizzazione delle misure, il Servizio geologico della Regione ha acquisito i dati di uno studio geomeccanico realizzato dal prof. Eugenio Castelli sulla zona da monitorare.

I risultati dello studio, che si sono conclusi con delle simulazioni di caduta massi e con le conseguenti proposte di presidi da mettere in atto per proteggere il sottostante abitato di Cimolais, hanno suggerito di rimodulare le modalità del monitoraggio GBSAR. Infatti se nella fase progettuale si era ipotizzato un monitoraggio discontinuo, la situazione di criticità geomeccanica illustrata nello studio ha suggerito di effettuare un unico monitoraggio continuo protratto per un periodo di 71 giorni.

Sul terreno è stato riconosciuto il sito con migliore visibilità sul diedro roccioso del Crep di Savath, mentre per finalizzare le misure ed avere la certezza di monitorare le dinamiche del diedro roccioso, su quest'ultimo sono stati posizionati due corner reflector.

La postazione di monitoraggio GBSAR è stata quindi ubicata nel centro abitato di Cimolais, in un punto con ottima visibilità sul target le cui coordinate Gauss Boaga sono:

| Nord | Est | Quota (m s.l.m.) |
|---------|---------|------------------|
| 5129302 | 2322563 | 652 |



Figura 8.24 Cartografia della postazione di misura di Cimolais, la freccia rossa indica l'ipotetica linea di vista (LOS)

Al fine di garantire la stabilità della struttura e ridurre effetti di cedimento del terreno per imposizione del carico, sono state realizzate due platee in cemento sulle quali sono state ancorate le gambe di appoggio del QUIB mediante barre filettate (Figura 8.25).



Figura 8.25 Fasi della materializzazione della postazione di misura.

La struttura è stata infine completamente chiusa attraverso pannelli di legno (e in PVC nel lato frontale al fine di non ostacolare la trasmissione delle microonde) garantendo così la protezione delle strumentazioni dagli agenti atmosferici (Figura 8.26).

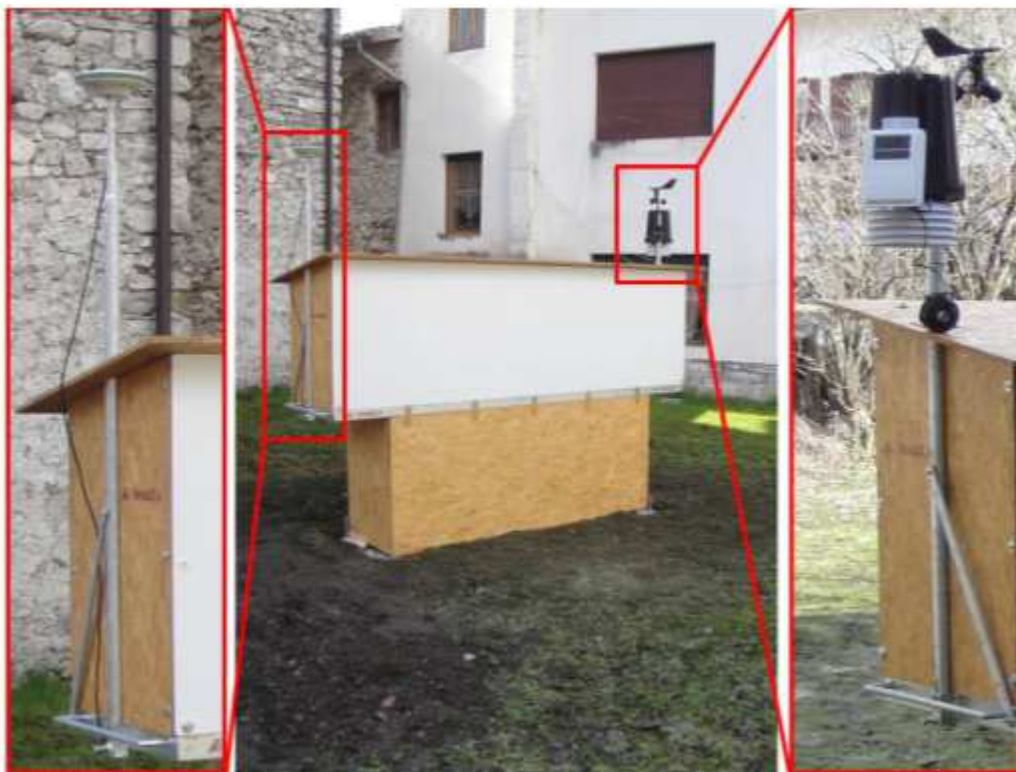


Figura 8.26 Postazione di misura nella sua modalità operative.

Il monitoraggio GBSAR è stato condotto attraverso una singola campagna di misura nel periodo compreso tra l'8 Aprile e il 16 Giugno 2013, per un totale di 71 giorni di monitoraggio.

Le attività di rilievo hanno avuto inizio alle ore 18.50 del 8 Aprile 2013 e sono terminate alle 7.44 del 18 Giugno 2013, acquisendo complessivamente 18.583 mappe SAR. In Tabella 8.3 si riporta la sintesi dei parametri strumentali di acquisizione e le impostazioni sito-specifiche utilizzate per il monitoraggio.

| | |
|---|--|
| Frequenza centrale di emissione | 16.75 GHz |
| Guadagno antenna | 20 dB |
| Lunghezza binario | 2 m |
| Numero di singole scansioni che costituiscono l'immagine SAR | 401 |
| Larghezza di banda | 300 MHz |
| Distanza max | 3.000 m |
| Inter scan delay (tempo di attesa tra la fine di una scansione e l'inizio della successiva) | 6 sec |
| Ripetività temporale | ~ 12 minuti |
| Range resolution | 0.5 m |
| Cross range resolution | 4.5 mrad (circa 4 m a 1.000 m di distanza) |

Tabella 8.3 Sintesi riassuntiva dei parametri utilizzati nelle misure di Cimolais.

Come precedentemente specificato, il giorno 12 Aprile 2013 sono stati installati i due riflettori artificiali (corner reflector) in corrispondenza del blocco svincolato del Crep de Savath al fine di incrementare l'accuratezza dei valori di spostamento in tale settore in quanto ritenuto di particolare interesse.

Per verificare che la postazione di misura risulti stabile per tutta la durata della campagna, le misure GPS sono state acquisite in continuo e in concomitanza con il monitoraggio GBSAR, con modalità di rilievo di tipo statico con intervallo di campionamento ad un secondo. Al fine di fronteggiare la presenza di eventuali ostacoli, o un numero di satelliti disponibili insufficiente in alcuni periodi, i tempi di misura sono stati acquisiti con durata a 1 ora e a 24 ore. Tale durata è ritenuta idonea per fissare le ambiguità ed ottenere una risoluzione FIX. In fase di post processing, infatti i dati acquisiti sono stati corretti con la stazione più vicina della rete GPS regionale.

I dati meteo con la stazione Vantage Pro sono stati acquisiti in continuo e in concomitanza con il monitoraggio GBSAR, con una frequenza di acquisizione pari a 30 minuti. In particolare, sono stati acquisiti, tra gli altri, dati relativi ai seguenti parametri:

- pluviometria;
- temperatura;
- umidità;
- pressione;
- velocità del vento.

Per verificare se eventuali accelerazioni sismiche legate a terremoti di particolare intensità oppure avvenuti a breve distanza dal sito monitorato è stato consultato il database del Centro di Ricerche Sismologiche (CRS) dell'Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale (OGS), la selezione ha riguardato tutti i sismi avvenuti dal 08/04/2013 al 18/06/2013, ubicati tra 45° e 48° gradi di latitudine e 10° e 16° di longitudine; in

totale si sono registrati 126 eventi, di questi solo alcuni si ritiene possano avere delle potenziali influenze significative sulla stabilità del Crep di Savath, E' stato quindi fatto un estratto degli eventi che potenzialmente si ritiene possano avere degli effetti sul diedro roccioso (Tabella 8.4). I dati mostrano tuttavia come durante il periodo di acquisizione non si siano manifestati eventi sismici di particolare importanza che, come risultato dai monitoraggi, non hanno avuto alcun effetto sull'area monitorata.

| ID evento | Data | Lat | Lon | Magnitudo | Località |
|-----------------------|---------------------|---------|---------|-----------|--------------------------------------|
| 72748 | 2013-04-11 23:28:54 | 46.4008 | 13.1472 | 2.6 | 4 km O di Moggio Udinese (Udine) |
| 72876 | 2013-04-12 08:48:40 | 46.1612 | 12.4730 | 1.0 | 6 km NE di Tambre (Belluno) |
| 72877 | 2013-04-12 23:49:14 | 46.2692 | 12.5168 | 0.7 | 0 km NNE di Claut (Pordenone) |
| 73048 | 2013-04-21 23:52:28 | 46.1773 | 12.3900 | 0.7 | 1 km NNE di Chies d'Alpago (Belluno) |
| 73235 | 2013-05-04 15:21:18 | 46.2885 | 12.5062 | 0.5 | 2 km NNO di Claut (Pordenone) |
| 73271 | 2013-05-07 14:00:53 | 46.3002 | 12.5980 | 0.5 | 7 km ENE di Claut (Pordenone) |
| 73410 | 2013-05-13 10:36:03 | 46.2247 | 12.4757 | 1.5 | 6 km SSO di Claut (Pordenone) |
| 73462 | 2013-05-13 10:47:44 | 46.2190 | 12.4863 | 0.5 | 6 km SSO di Claut (Pordenone) |
| 73829 | 2013-05-26 08:14:22 | 46.2828 | 12.5653 | 0.7 | 4 km ENE di Claut (Pordenone) |
| 73921 | 2013-06-02 10:32:31 | 46.2120 | 12.4397 | 0.7 | 6 km NE di Chies d'Alpago (Belluno) |
| 74132 | 2013-06-13 14:37:31 | 46.2630 | 12.2688 | 0.7 | 3 km OSO di Longarone (Belluno) |

Tabella 8.4 Riassunto degli eventi sismici potenzialmente influenti sul Crep di Savath.

8.2.1 Caratteristiche di backscattering del versante

Al fine valutare il grado di attendibilità dei dati di spostamento, sono state analizzate in dettaglio le mappe dei parametri radaristici di Coerenza temporale di fase (Figura 8.27), SNR termico (Figura 8.28) e SNR stimato (Figura 8.29).

Sulla base di questi parametri radaristici nel sono state stabilite delle soglie che hanno consentito di eliminare i pixel affetti da artefatti che ne pregiudichino qualità ed accuratezza nella misura degli spostamenti, selezionando, pertanto, solo punti affidabili e validati.

La regolarità delle fasce cromatiche rilevabile nelle immagini di SNR deriva da un effetto di distorsione geometrica di "allungamento" dei pixel SAR dovuto alla forte verticalità della parete. La natura del fenomeno è riconducibile al fatto che il SAR consente di avere una risoluzione in cross-range (ovvero sul piano orizzontale) grazie alla movimentazione orizzontale del sensore sul binario, ma non sul piano verticale, sul quale la dimensione dei pixel è determinata dalla risoluzione in range (0,5 m). Si generano quindi dei pixel fortemente "allungati" che, messi insieme in una mappa di SNR, generano un tipico effetto a bande.

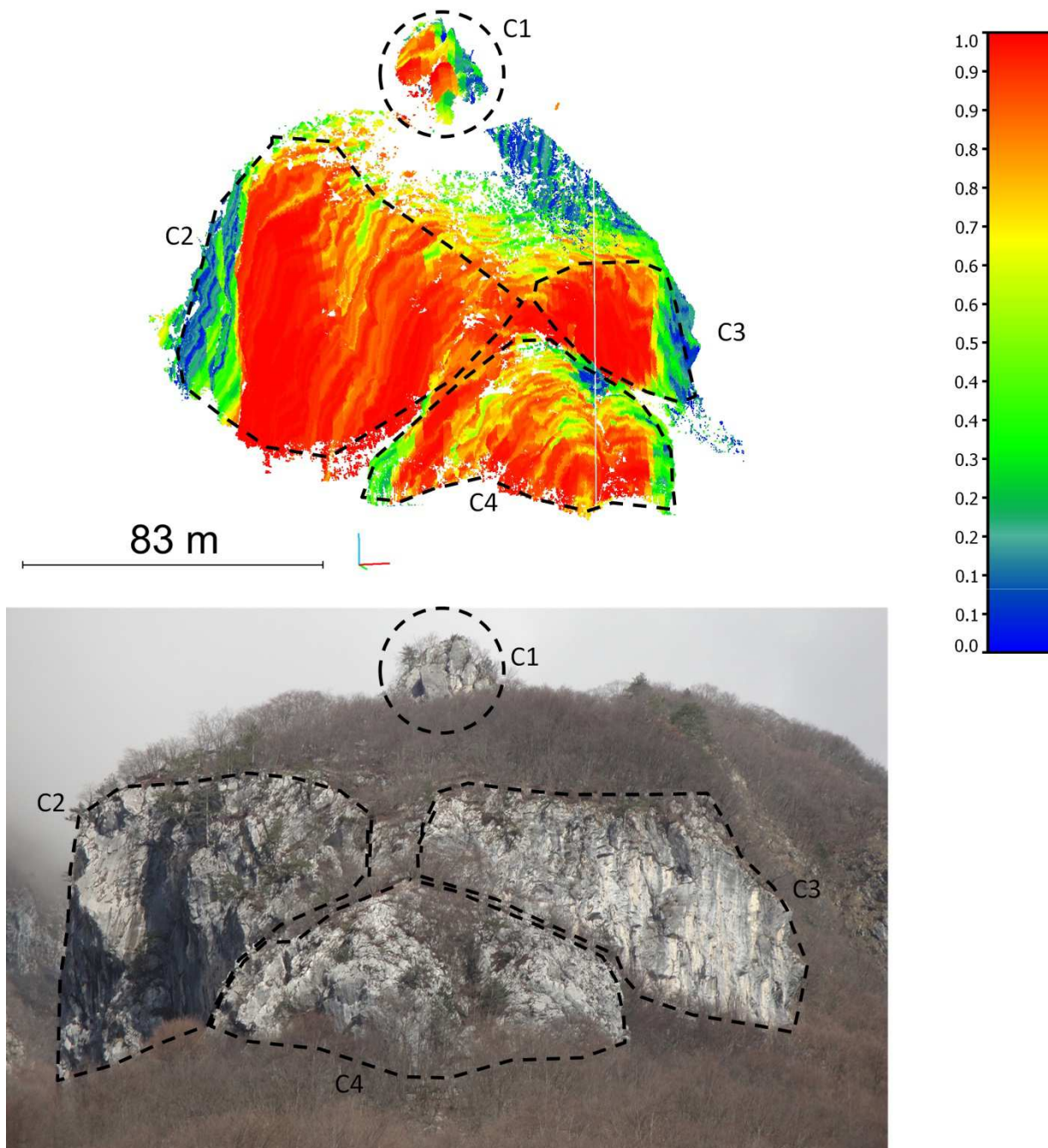


Figura 8.27 Mappa 3D di coerenza temporale in fase, ottenuta utilizzando i dati laserscanning acquisiti nello studio geomeccanico realizzato dal prof. Eugenio Castelli per conto del Servizio Geologico. Nella parte inferiore è riportata l'immagine fotografica del versante sulla quale sono identificate le zone comuni.

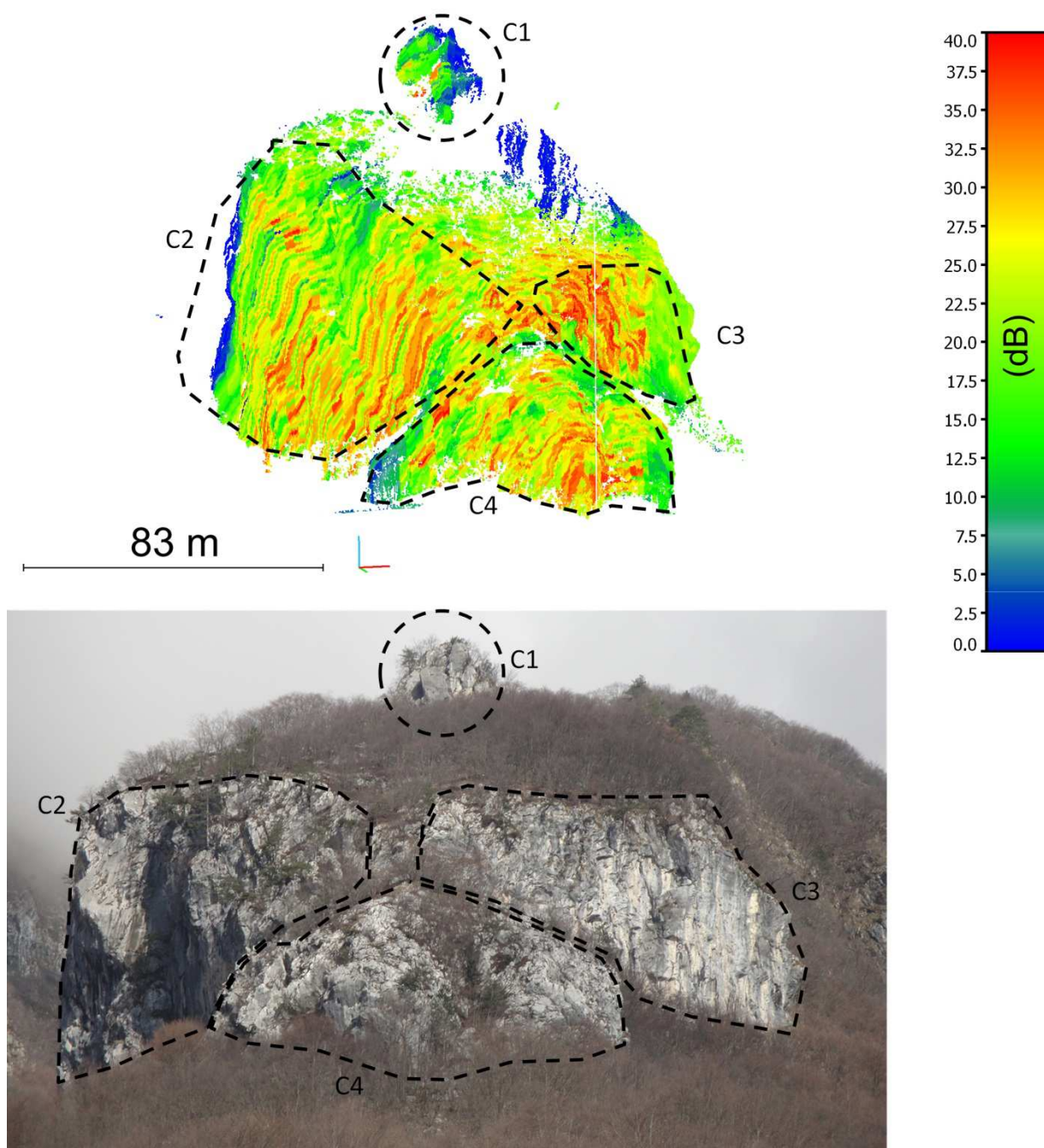


Figura 8.28 Mappa 3D di SNR termico. Nella parte inferiore è riportata l'immagine fotografica del versante sulla quale sono identificate le zone comuni.

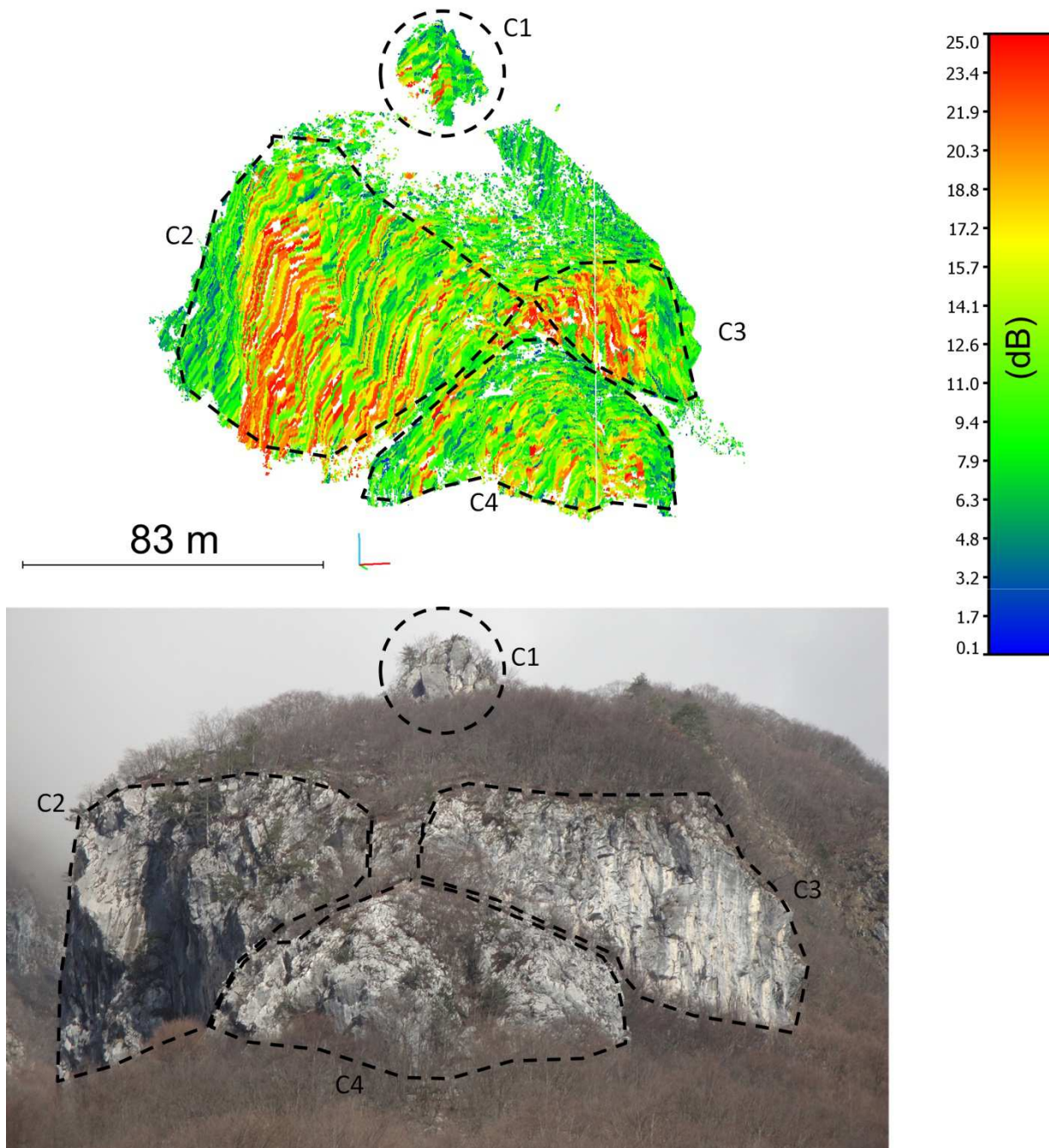


Figura 8.29 Mappa 3D di SNR stimato. Nella parte inferiore è riportata l'immagine fotografica del versante sulla quale sono identificate le zone comuni.

Nel complesso si evidenzia come il versante oggetto di indagine manifesti complessivamente delle ottime caratteristiche di riflettività in corrispondenza degli affioramenti d'ammasso roccioso non coperti dalla vegetazione, mentre minore affidabilità può essere attribuita alle misure nelle zone circostanti, prevalentemente a causa della forte presenza di vegetazione. I corner reflector installati, in abbinamento all'elevata riflettività naturale dell'area, hanno consentito di condurre delle accurate analisi di spostamento anche sul blocco calcareo del Crep de Savath.

8.2.2 Misure di spostamento

I dati di monitoraggio GBSAR acquisiti nell'ambito della campagna di rilievo sono stati trattati ed elaborati al fine di identificare, caratterizzare e perimetrare eventuali spostamenti sul versante oggetto di indagine.

Per un'analisi completa ed esaustiva dei dati disponibili e per la ridondanza di informazioni, le elaborazioni dei dati acquisiti sono state condotte utilizzando il software IBIS Guardian (software ufficiale del sistema GBSAR utilizzato) (IDS, 2013) e degli algoritmi implementati dalla società NHAZCA S.r.l. (Mazzanti et al., 2013).

Nel caso specifico, relativo al monitoraggio di una parete rocciosa sono state condotte due diverse tipologie di analisi del dato:

- analisi alla scala del versante: ricerca di spostamenti unidirezionali (con trend lineari) alla scala del versante finalizzata alla valutazione di possibili fenomeni di instabilità gravitativa in atto durante il periodo di monitoraggio;
- analisi alla scala locale (metodo PtoP): ricerca di spostamenti unidirezionali (con trend lineari) e ciclici (con trend reversibili nel tempo) alla scala dei singoli blocchi finalizzata all'analisi di suscettibilità.

In particolare, dal momento che gli spostamenti precursori attesi in caso di crolli in roccia possono essere di entità molto modesta (talvolta inferiore al mm), l'analisi avanzata PtoP (Point to Point), un'innovativa tecnica di analisi del dato GBSAR, descritta nel paragrafo 8.2.4, per l'analisi di scarpate in roccia, consente di analizzare spostamenti differenziali tra pixel SAR adiacenti, assumendo, di volta in volta, punti di riferimento (GCP) in zone diverse dell'ammasso ed analizzando gli spostamenti dei pixel limitrofi. Attraverso questo approccio metodologico è possibile ridurre considerevolmente i disturbi indotti dagli artefatti atmosferici (che inficiano sulla qualità del dato) e misurare quindi spostamenti con accuratezza sub-millimetrica.

8.2.3 Analisi a scala di versante

Nell'ambito della campagna di monitoraggio GBSAR non sono stati registrati spostamenti significativi alla scala dell'intero versante.

Si riporta, di seguito, la mappa di spostamento cumulato 2D (Figura 8.30).

Si riportano, inoltre, i seguenti elaborati:

- elaborato di sintesi in scala 1:5.000 con vettori di movimento proporzionali agli spostamenti registrati nella sessione di misura GBSAR (Figura 8.31). Le direzioni dei vettori spostamento sono da intendersi, per ciascun pixel della mappa, coincidenti con la linea di vista strumentale del radar. Il verso, invece, è funzione del colore dei pixel, come da convenzione sopra indicata.
- mappa di spostamento cumulato proiettata su immagine satellitare (Figura 8.32);
- mappa 3D di spostamento cumulato confrontata con l'immagine fotografica del versante per l'individuazione delle zone comuni (Figura 8.33);

Si ricorda che, secondo la convenzione assunta nel presente documento:

- i pixel di colore blu indicano spostamenti in avvicinamento (spostamenti negativi);
- i pixel di colore rosso indicano spostamenti in allontanamento (spostamenti positivi);
- i pixel di colore verde indicano spostamenti assenti o di entità non apprezzabile.

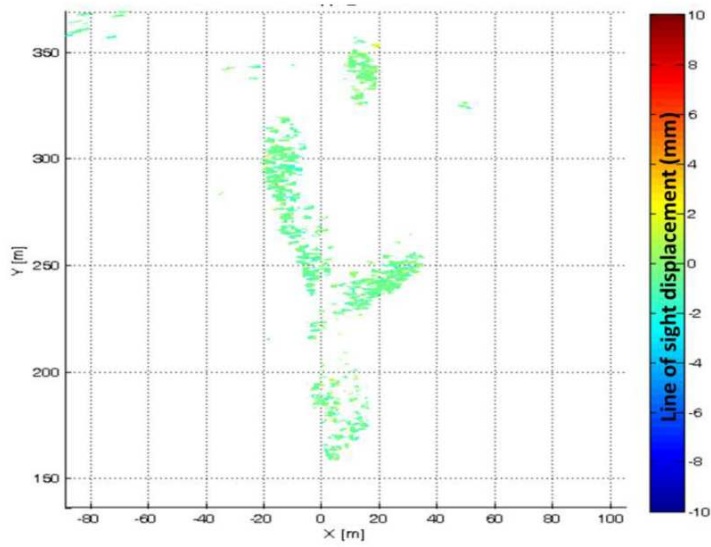


Figura 8.30 Mappa dello spostamento cumulate 2D relative al periodo 08/04/2013 – 17/06/2013.

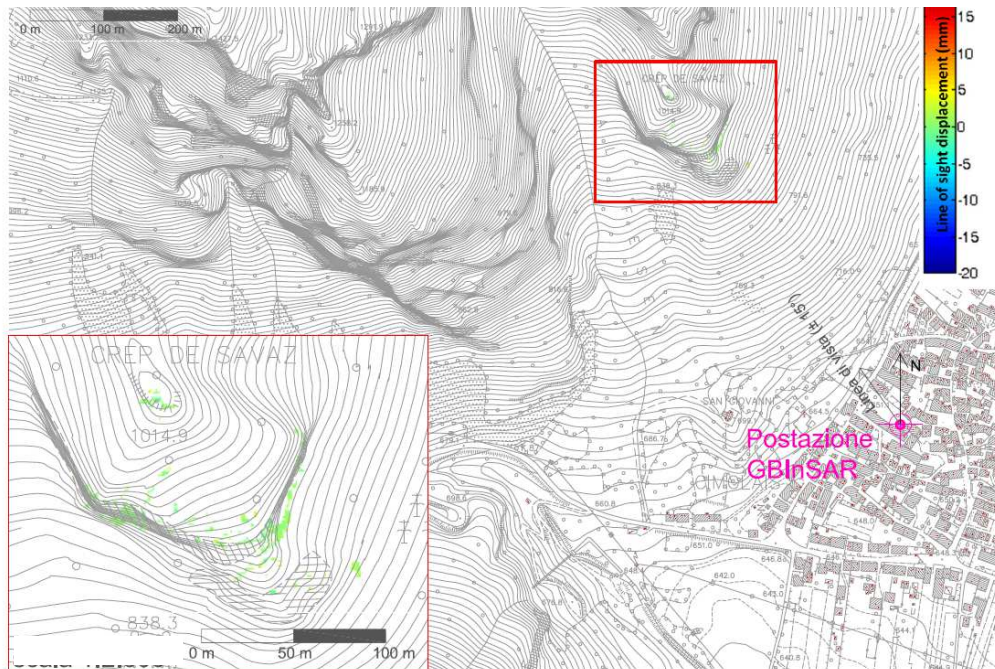


Figura 8.31 Mappa di spostamento cumulate ottenuta dai risultati del monitoraggio GBSAR, proiettata sulla carta topografica.

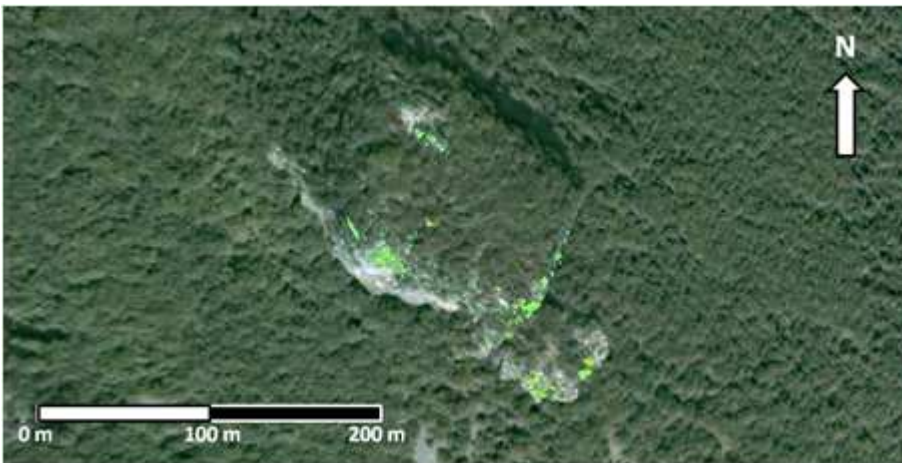


Figura 8.32 Mappa di spostamento totale cumulado proiettato sull'immagine fotografica aerea.

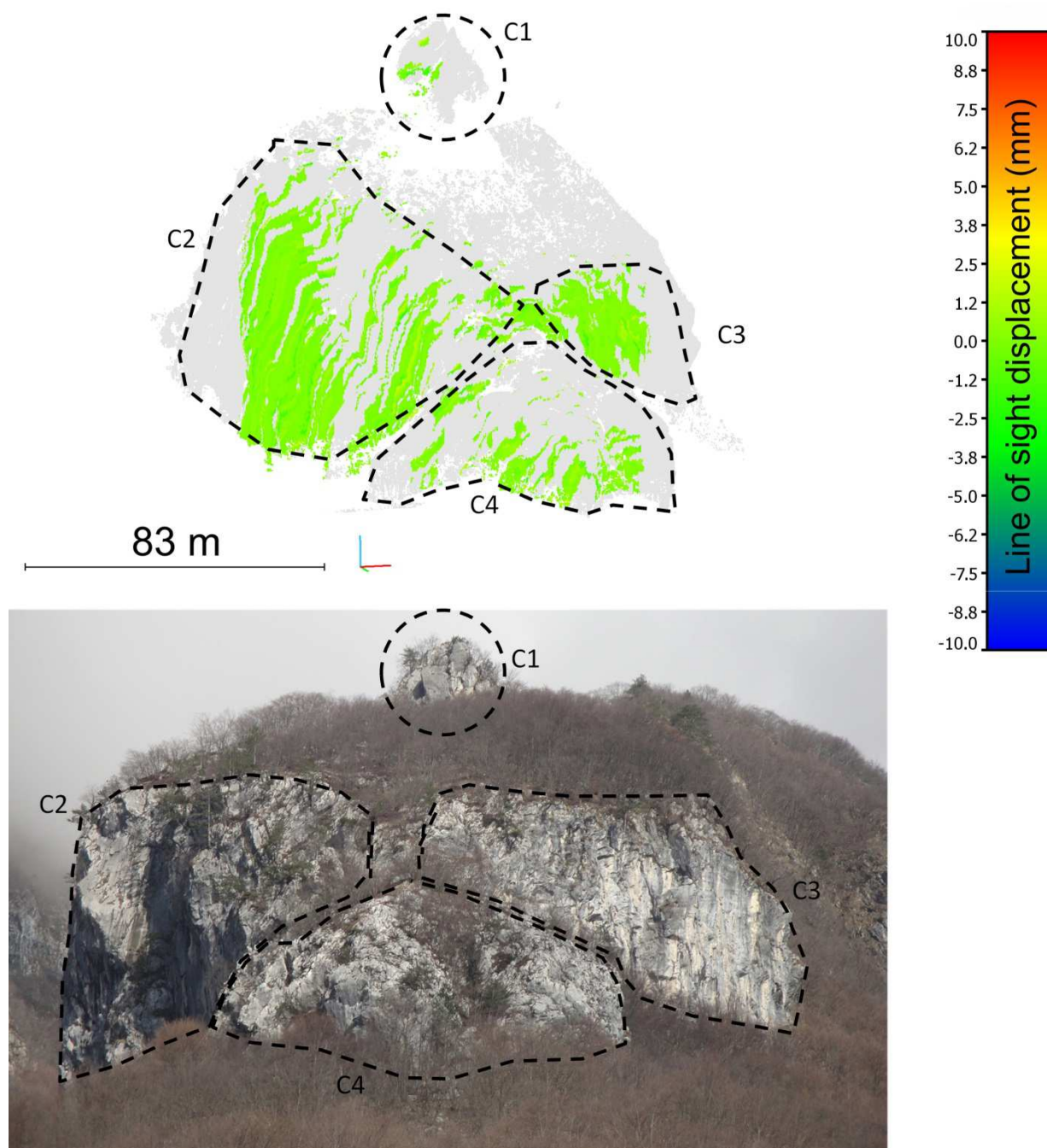


Figura 8.33 Mappa 3D di spostamento cumulato nel periodo di misura, nella parte inferiore le aree investigate sono identificate sull'immagine fotografica.

Analogamente al caso di Ligosullo è stata fatta l'analisi delle serie temporali di spostamento medio di alcuni settori del versante significativi, così come indicati in Figura 8.34.

Dalle serie di spostamento di Figura 8.31, Figura 8.32, Figura 8.33, Figura 8.34 non si notano spostamenti con trend costante nel tempo, né spostamenti a carattere ciclico, nell'intero periodo di monitoraggio e in tutto lo scenario investigato.

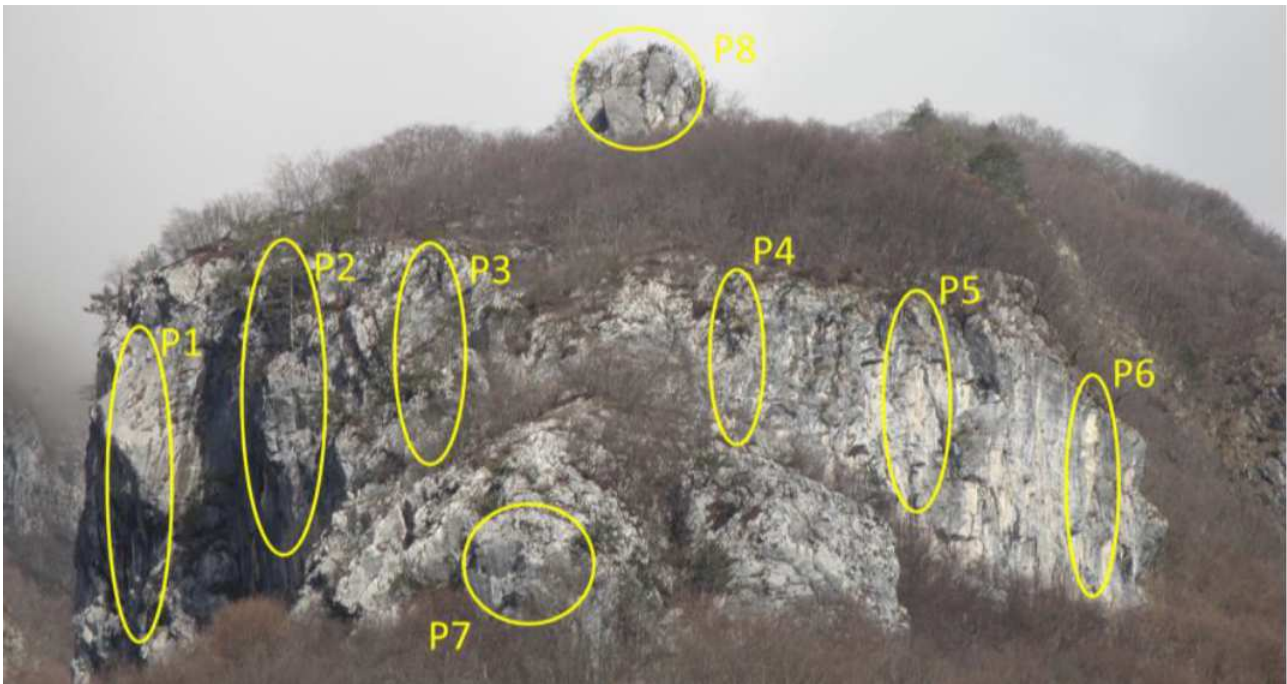


Figura 8.34 Ubicazione dei settori di versante di cui sono state elaborate le serie temporali di spostamento medio.

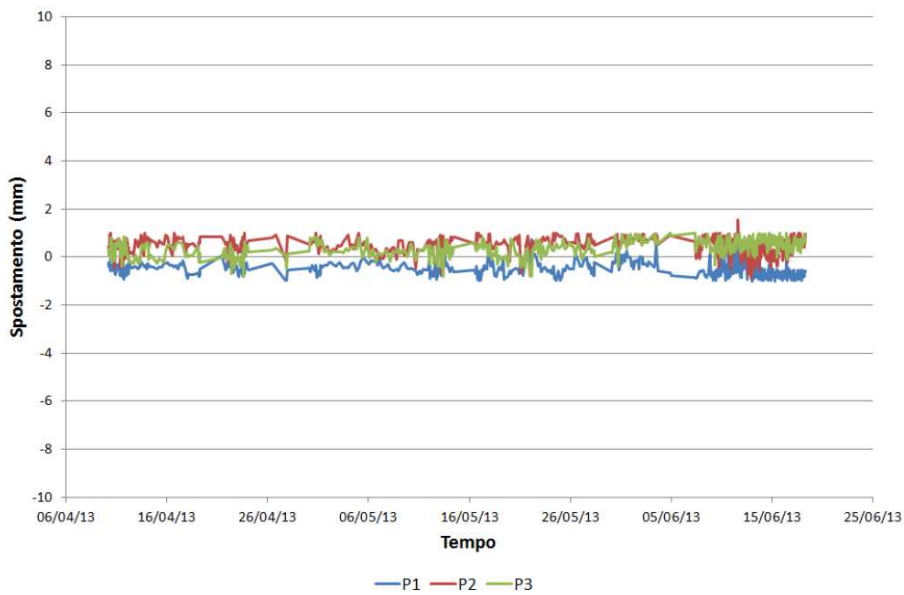


Figura 8.35 Serie temporali di spostamento medio delle zone P1, P2 e P3.

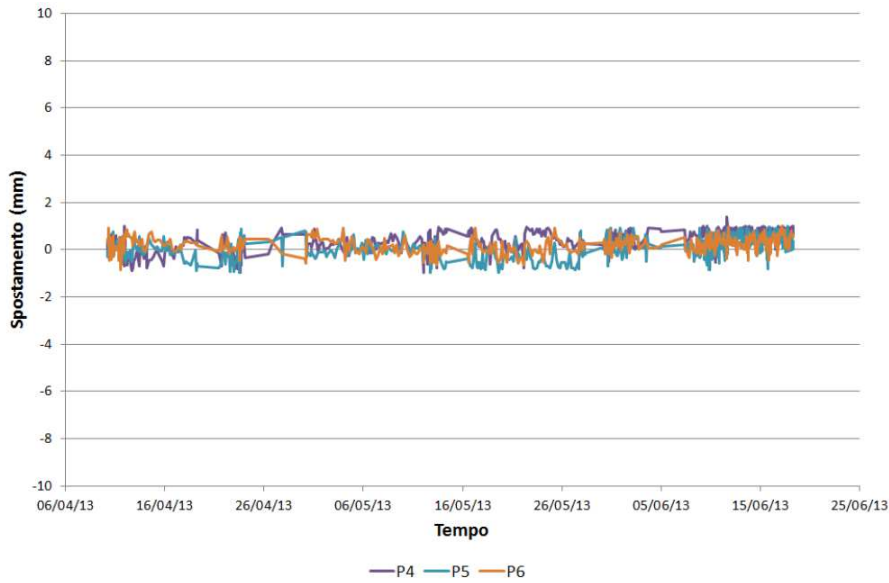


Figura 8.36 Serie temporali di spostamento medio delle zone P4, P5 e P6.

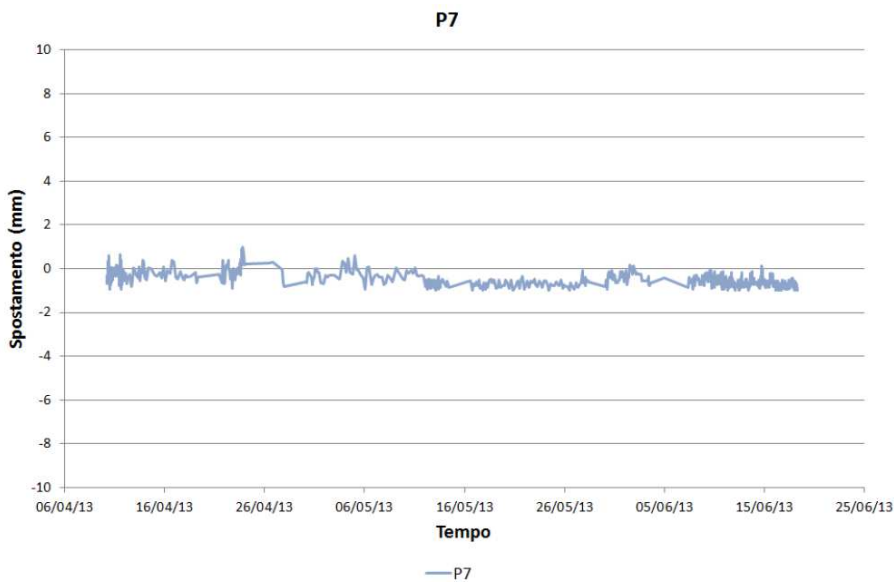


Figura 8.37 Serie temporale di spostamento medio della zona P7.

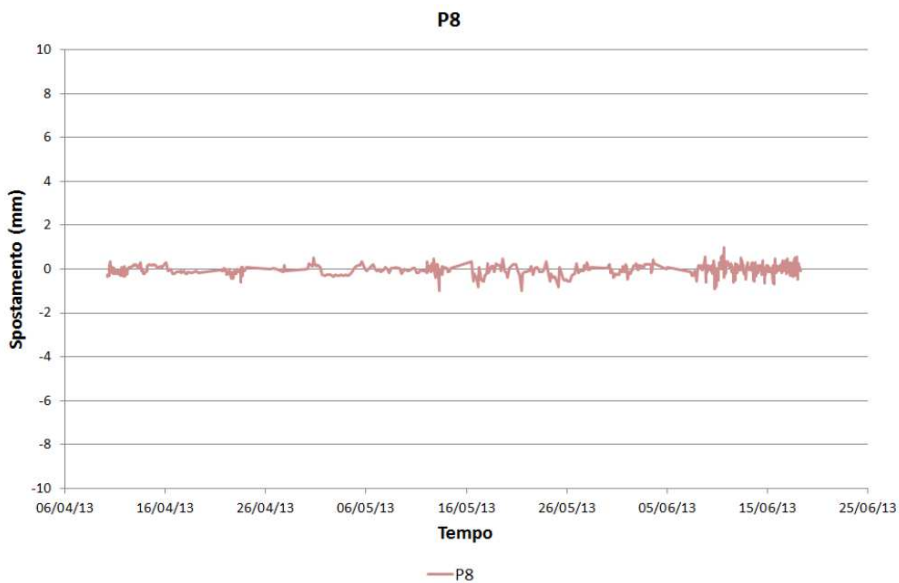


Figura 8.38 Serie temporale di spostamento medio della zona P8

8.2.4 Analisi alla scala locale (metodo PtoP)

Mediante il metodo di analisi avanzato PtoP (che consente di incrementare significativamente l'accuratezza nella misura dello spostamento) è stata confermata la complessiva assenza di spostamenti con trend lineari. Di contro, è stato individuato un settore che ha fatto registrare spostamenti di carattere ciclico, ben correlati con le variazioni di temperatura atmosferica, queste sono concentrate nella zona CR3, che grossomodo corrisponde alla zona P7 di Figura 8.34, ubicata in corrispondenza dell'affioramento di ammasso al piede della scarpata in roccia (Figura 8.39).



Figura 8.39 Ubicazione della zona CR3 sull'immagine fotografica del versante

Gli spostamenti ciclici sono stati registrati in diversi punti dell'area CR3 soprattutto nei primi giorni di monitoraggio (8 Aprile – 17 Aprile), sebbene alcune evidenze di tale fenomeno siano state rilevate anche nel periodo 11-18 Giugno 2013, con temperature mediamente più alte rispetto ai precedenti periodi (dalla Figura 11 alla Figura 14).

I valori di spostamento registrati variano in un intervallo compreso tra circa $\pm 0.5\text{mm}$ e $\pm 1\text{ mm}$; in particolare, spostamenti negativi (in avvicinarsi al sensore) sono stati registrati in concomitanza con l'aumento della temperatura atmosferica giornaliera (nelle ore più calde della giornata); viceversa, spostamenti positivi (in allontanamento dal sensore) sono stati rilevati in concomitanza con la diminuzione della temperatura atmosferica giornaliera.

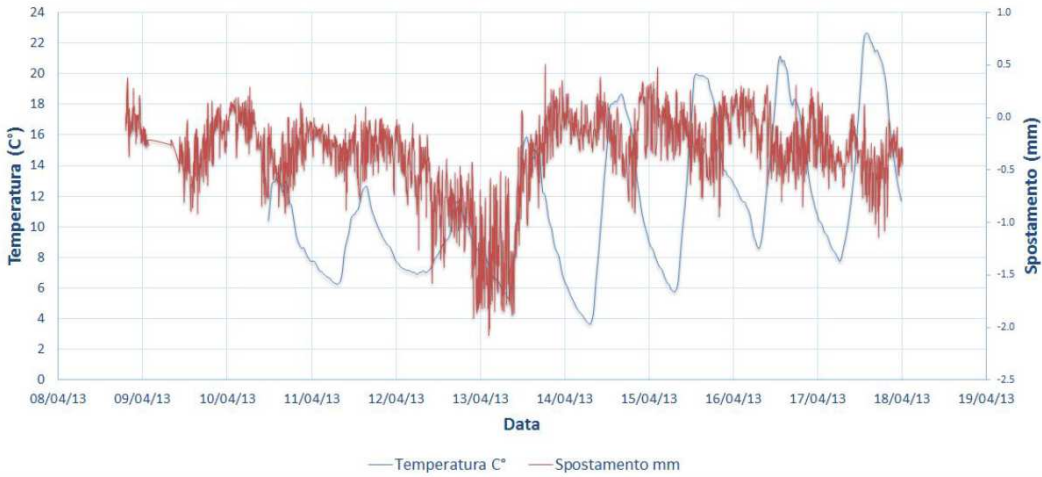


Figura 8.40 Serie temporale di spostamento di un punto in corrispondenza della zona C3 correlata con la serie temporale di variazione di temperatura atmosferica nel periodo 8 Aprile – 17 Aprile 2013.

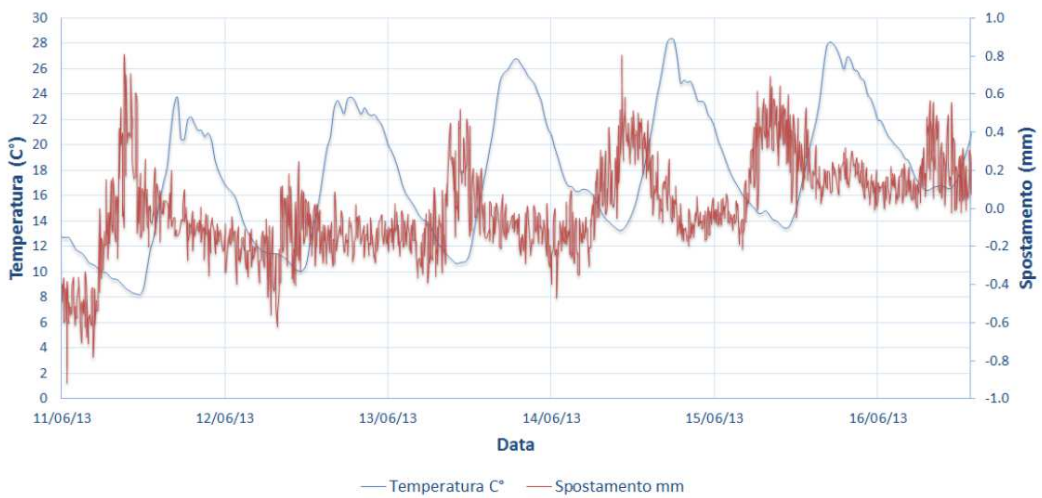


Figura 8.41 Serie temporale di spostamento di un punto in corrispondenza della zona C3 correlata con la serie temporale di variazione di temperatura atmosferica nel periodo 11 Giugno 2013 – 18 Giugno 2013.

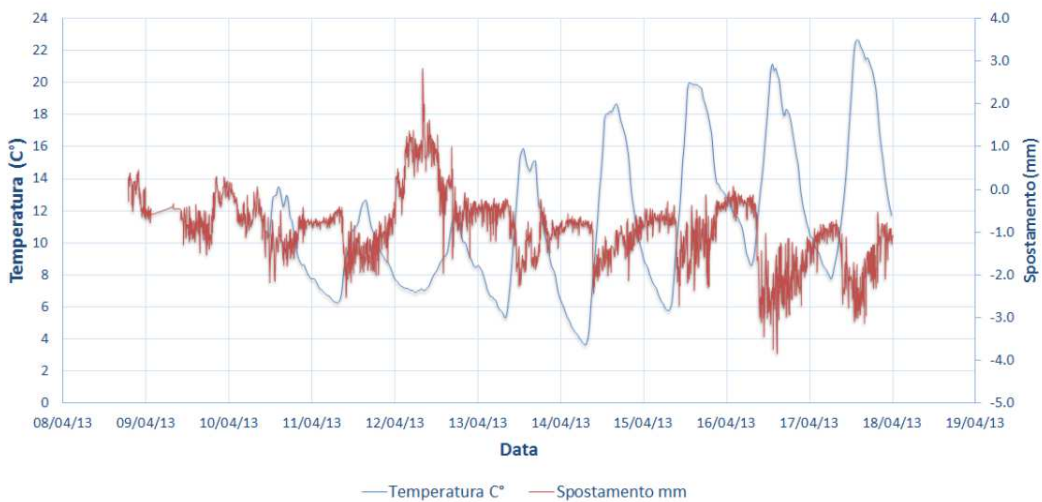


Figura 8.42 Serie temporale di spostamento di un punto in corrispondenza della zona C3 correlata con la serie temporale di variazione di temperatura atmosferica nel periodo 8 Aprile - 17 Aprile 2013.

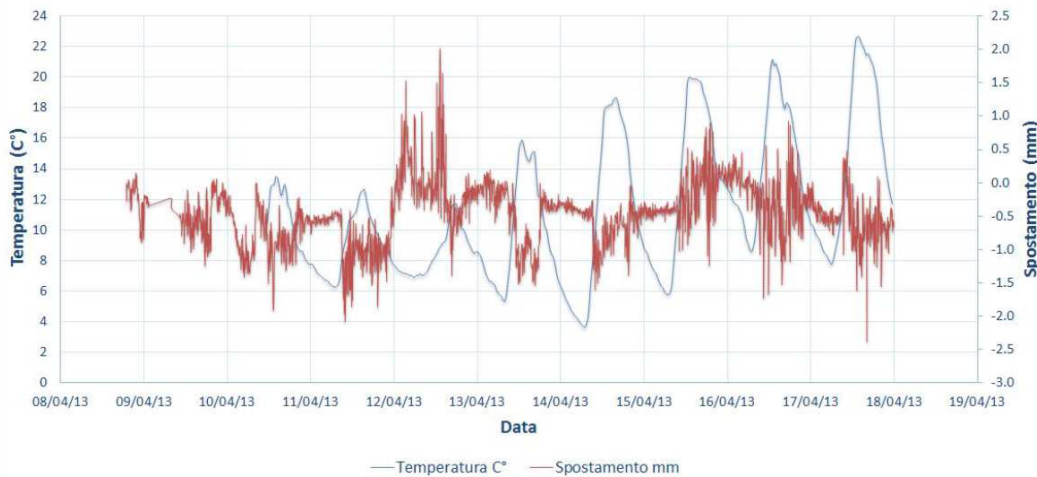


Figura 8.43 Serie temporale di spostamento di un punto in corrispondenza della zona C3 correlata con la serie temporale di variazione di temperatura atmosferica nel periodo 8 Aprile - 17 Aprile 2013.

Dalle analisi PtoP condotte in corrispondenza dell'affioramento calcareo del Crep de Savath e, in particolare, in corrispondenza delle zone CR1 e CR2 (ricadenti all'interno del settore P8, Figura 8.34 e Figura 8.38) caratterizzate da elevata accuratezza grazie ai corner reflector installati, non sono emersi significativi fenomeni di contrazione/dilatazione termica, ad eccezione di spostamenti molto modesti e prossimi all'errore strumentale in corrispondenza della zona CR2.

8.2.5 Monitoraggio GPS

La postazione di monitoraggio GBSAR è stata equipaggiata con un caposaldo GPS al fine di verificarne eventuali spostamenti, contestualmente alle misure interferometriche. Per la descrizione dettagliata del sistema di rimanda al paragrafo 6.2

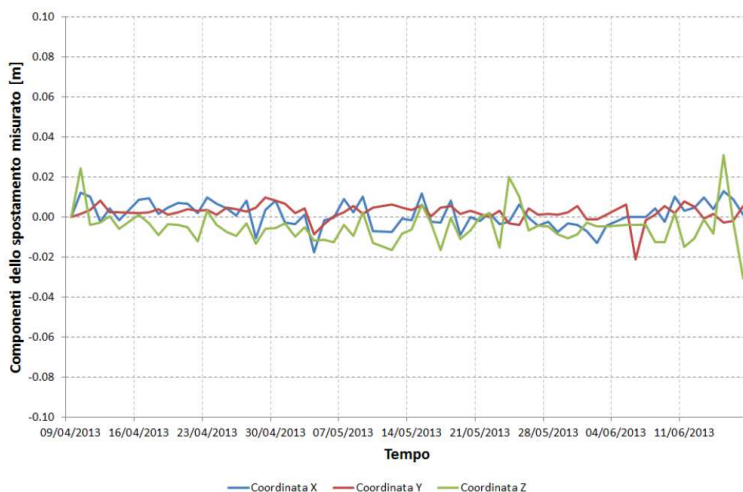


Figura 8.44 Serie temporali di spostamento cumulato lungo le direzioni X, Y e Z (sistema di riferimento cartografico geocentrico) del caposaldo GPS materializzato in corrispondenza della postazione di monitoraggio GBSAR (risultati derivanti dalla correzione con i dati della stazione di riferimento regionale di Barcis). Dati relativi al periodo 8 Aprile - 17 giugno 2013.

Il rilievo è stato condotto con intervallo di campionamento di 1 secondo. Le misure sono state salvate in file RINEX con cadenza oraria; inoltre, al fine di ovviare problemi che potessero indurre carenza nell'accuratezza delle misure, le sessioni di misura sono state salvate anche con cadenza giornaliera (24 ore). La strumentazione utilizzata è l'antenna Leica AS10 e il ricevitore il geodetico Leica GMX902GG, costituendo un sistema in grado di ricevere ed elaborare sia la fase dei codici che delle portanti L1 (1575MHz) ed L2 (1227MHz). Si riportano, in

Figura 8.44, le serie temporali di spostamento registrate nelle direzioni X, Y e Z (sistema di riferimento geocentrico WGS84) nel periodo 9 Aprile – 17 Giugno 2013, corretti con i dati della stazione di riferimento regionale di Barcis (la più vicina al sito di monitoraggio) dalle quali non si identificano spostamenti significativi.

8.3 La Pineda

Il sito di installazione della postazione di monitoraggio GBSAR è ubicato sulla testa del muro di contenimento alla progressiva 95+160 della SR251 (Figura 8.45, Figura 8.46), in Comune di Erto e Casso, in corrispondenza del punto di coordinate Gauss Boaga:

| Nord | Est | Quota (m s.l.m.) |
|---------|---------|------------------|
| 5127505 | 2316134 | 805 |

Pur presentando una logistica d'installazione più complessa, è stato necessario predisporre una linea elettrica dedicata di circa 1 km per alimentare la postazione e l'ausilio di una piattaforma mobile per il movin/movout del sistema, il sito presenta un'ottima visuale sulla scena da monitorare.



Figura 8.45 Cartografia su foto area dell'area del monitoraggio, la freccia rossa indica la LOS.



Figura 8.46 Particolare dell'installazione della piattaforma GBSAR.

In corrispondenza dei lati corti della struttura sono stati installati dei sistemi di supporto per l'antenna GPS e per la stazione meteo (Figura 8.47).



Figura 8.47 Dettaglio dei supporti per la stazione meteo e l'antenna GPS.

Per l'allaccio alla rete elettrica del sistema GBSAR è stata eseguita la stesa di un cavo elettrico dalla postazione di monitoraggio fino alla presa elettrica comunale situata all'altezza del Km 94+500 della SR251 per un tratto della lunghezza complessiva di circa 800 m. Si vuole sottolineare inoltre che per questa postazione è stato necessario acquisire le opportune autorizzazioni: autorizzazione FVG Strade pratica 152/L/13 del 18/04/2013, per il posizionamento dello strumento sul coronamento del muro di sostegno e autorizzazione comunale a firma del Sindaco di Erto e Casso del 12 Giugno 2013 per l'allaccio alla rete elettrica.

Le attività di monitoraggio sono iniziate il 17 luglio 2013 e si sono concluse il 3 dicembre 2013, effettuando un monitoraggio discontinuo, secondo le tempistiche della Tabella 8.5.

| Campagna | Data inizio | Data fine | Giorni di acquisizione | Totale immagini acquisite |
|------------|-------------|------------|------------------------|---------------------------|
| Campagna 1 | 17/07/2013 | 02/09/2013 | 48 | 8617 |
| Campagna 2 | 30/10/2013 | 03/12/2013 | 35 | 6988 |

Tabella 8.5 Quadro temporale dei monitoraggi.

In Tabella 8.6 si riporta la sintesi dei parametri strumentali di acquisizione e le impostazioni sito-specifiche utilizzate per il monitoraggio del versante in Località La Pineda.

| | |
|---|--|
| Frequenza centrale di emissione | 16.75 GHz |
| Guadagno antenna | 20 dB |
| Lunghezza binario | 2 m |
| Numero di singole scansioni che costituiscono l'immagine SAR | 401 |
| Larghezza di banda | 300 MHz |
| Distanza max | 3.000 m |
| Inter scan delay (tempo di attesa tra la fine di una scansione e l'inizio della successiva) | 6 sec |
| Ripetività temporale | ~ 12 minuti |
| Range resolution | 0.5 m |
| Cross range resolution | 4.5 mrad (circa 4 m a 1.000 m di distanza) |

Tabella 8.6 Parametri di acquisizione.

Il giorno 19 Luglio 2013 sono stati installati alcuni riflettori artificiali (corner reflector) a monte dell'area calanchiva del versante (Figura 8.48) e, in particolare:

- 4 corner reflector provvisori per acquisire le coordinate radar di alcuni punti di controllo dello scenario ed incrementare l'accuratezza nella georeferenziazione delle mappe SAR;
- corner reflector permanenti per incrementare l'accuratezza nella misura degli spostamenti in corrispondenza di alcuni settori di particolare interesse. Tali corner sono stati rimossi solo al termine delle attività di monitoraggio GBSAR.

Si precisa che il posizionamento dei corner è stato stabilito anche in funzione delle condizioni logistiche locali e in modo da garantire le condizioni di sicurezza degli operatori.



Figura 8.48 Posizione dei corner reflector sul versante da monitorare.

Le misure GPS sono state acquisite in continuo e in concomitanza con il monitoraggio GBSAR, con modalità di rilievo di tipo statico con intervallo di campionamento ad un secondo. Al fine di fronteggiare la presenza di

eventuali ostacoli, o un numero di satelliti disponibili insufficiente in alcuni periodi, i tempi di misura sono stati acquisiti con durata a 1 ora e a 24 ore. Tale durata è ritenuta idonea per fissare le ambiguità ed ottenere una risoluzione FIX. In fase di post processing, i dati acquisiti saranno corretti con la stazione più vicina della rete GPS regionale.

I dati meteo con la stazione Vantage Pro sono stati acquisiti in continuo e in concomitanza con il monitoraggio GBSAR, con una frequenza di acquisizione pari a 30 minuti. In particolare, sono stati acquisiti, tra gli altri, dati relativi ai seguenti parametri:

- pluviometria;
- temperatura;
- umidità;
- pressione;
- velocità del vento.

8.3.1 Caratteristiche di backscattering del versante

Per valutare il grado di attendibilità dei dati di spostamento, sono state analizzate in dettaglio le mappe dei parametri radaristici di Coerenza temporale di fase (Figura 8.49), SNR termico (Figura 8.50) e SNR stimato (Figura 8.51). Le mappe sono state prodotte per ciascuna campagna di misura.

Sulla base di questi parametri radaristici nel sono state stabilite delle soglie che hanno consentito di eliminare i pixel affetti da artefatti che ne pregiudichino qualità ed accuratezza nella misura degli spostamenti, selezionando, pertanto, solo punti affidabili e validati.

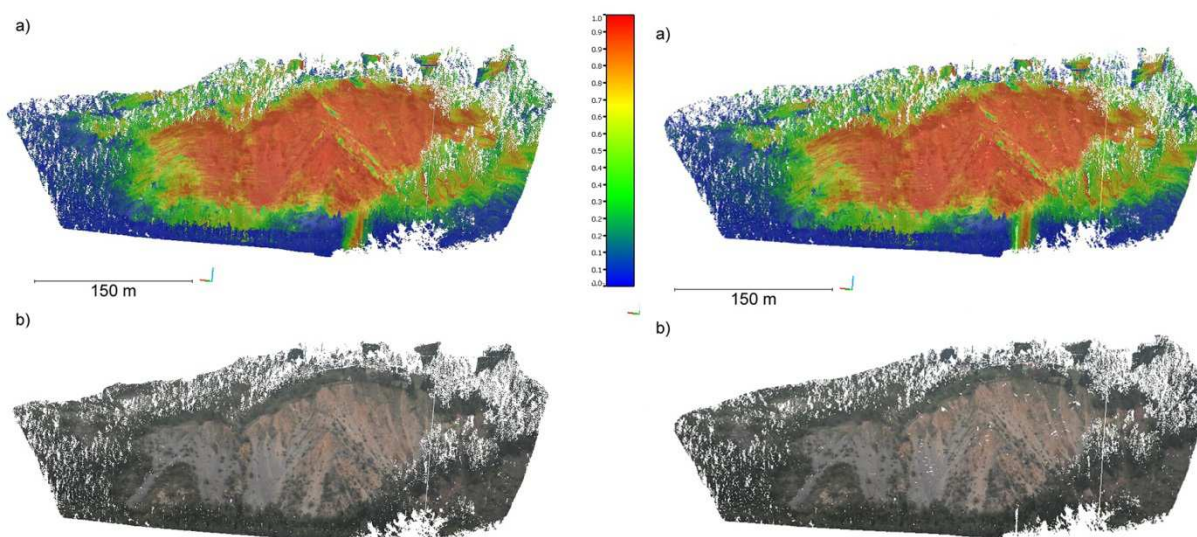


Figura 8.49 Mappa di coerenza temporale di fase, con la lettera a è indicata la mappa con la scala cromatica riferita ai valori di coerenza, con la parte b è riportata la nuvola di punti 3D in colori reali. A sinistra sono riportati i valori misurati nella prima campagna di misura, a destra quelli della seconda.

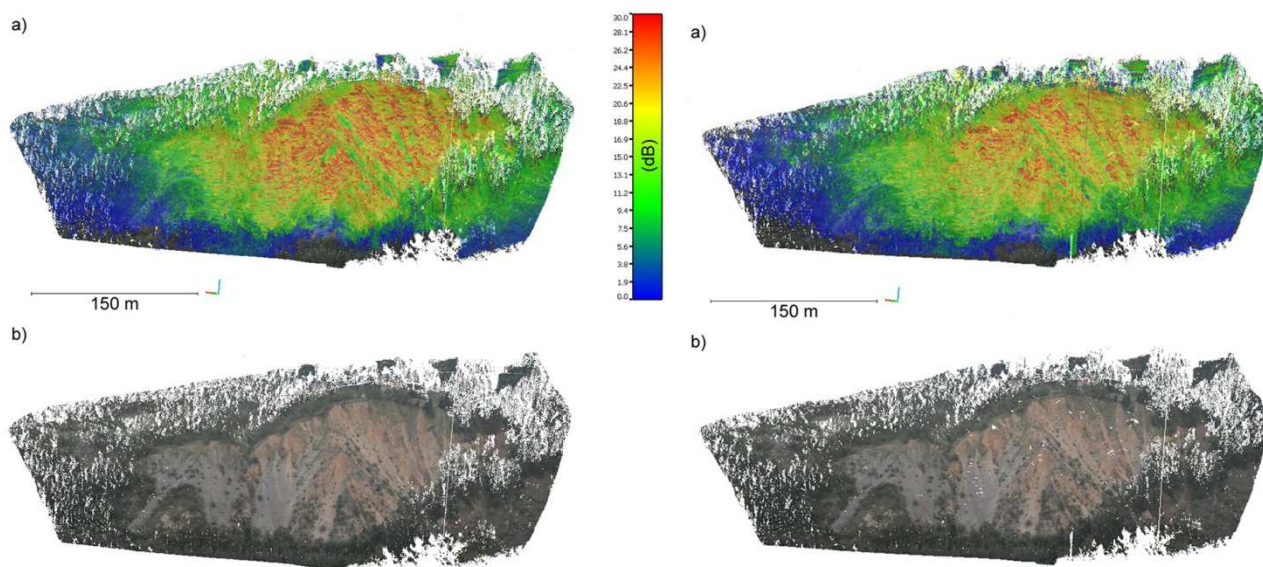


Figura 8.50 Mappa 3D SNR termico, con la lettera a è indicata la mappa con la scala cromatica riferita ai valori di SNR termico, con la parte b è riportata la nuvola di punti 3D in colori reali. A sinistra sono riportati i valori misurati nella prima campagna di misura, a destra quelli della seconda.

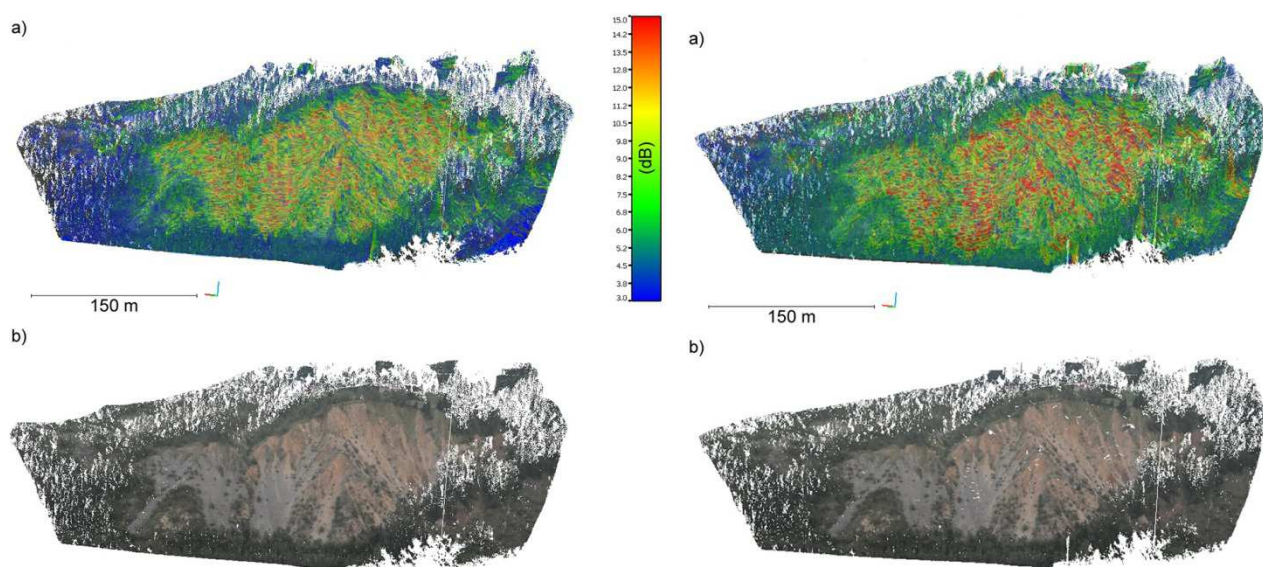


Figura 8.51 Mappa di SNR stimato, con la lettera a è indicata la mappa con la scala cromatica riferita ai valori di SNR stimato, con la parte b è riportata la nuvola di punti 3D in punti reali. A sinistra sono riportati i valori misurati nella prima campagna di misura, a destra quelli della seconda.

Nel complesso si evidenzia come il versante oggetto d'indagine manifesti complessivamente delle buone caratteristiche di riflettività che consentono, pertanto, di condurre delle accurate analisi di spostamento. Si segnalano valori particolarmente elevati di coerenza e SNR soprattutto in corrispondenza dei settori di versante caratterizzati da morfologia calanchiva, mentre minore affidabilità può essere attribuita nella zona a monte di essi, sia per la forte presenza di vegetazione, sia per via della giacitura del versante che risulta pressoché parallelo rispetto alla linea di vista del radar (ad eccezione di particolari strutture antropiche).

8.3.2 Prima campagna di monitoraggio

Nell'ambito della campagna di monitoraggio GBSAR non sono stati registrati spostamenti significativi alla scala dell'intero versante. I risultati sono riportati nelle mappe che seguono:

- mappa di spostamento cumulato 2D (Figura 8.52).
- mappa di spostamento cumulato proiettata su immagine satellitare (Figura 8.53);
- mappa 3D di spostamento cumulato confrontata con l'immagine fotografica del versante per l'individuazione delle zone comuni (Figura 8.54);

Si ricorda, per semplificare la lettura, che secondo la convenzione assunta nel presente lavoro:

- i pixel di colore blu indicano spostamenti in avvicinamento (spostamenti negativi);
- i pixel di colore rosso indicano spostamenti in allontanamento (spostamenti positivi);
- i pixel di colore verde indicano spostamenti assenti o di entità non apprezzabile.

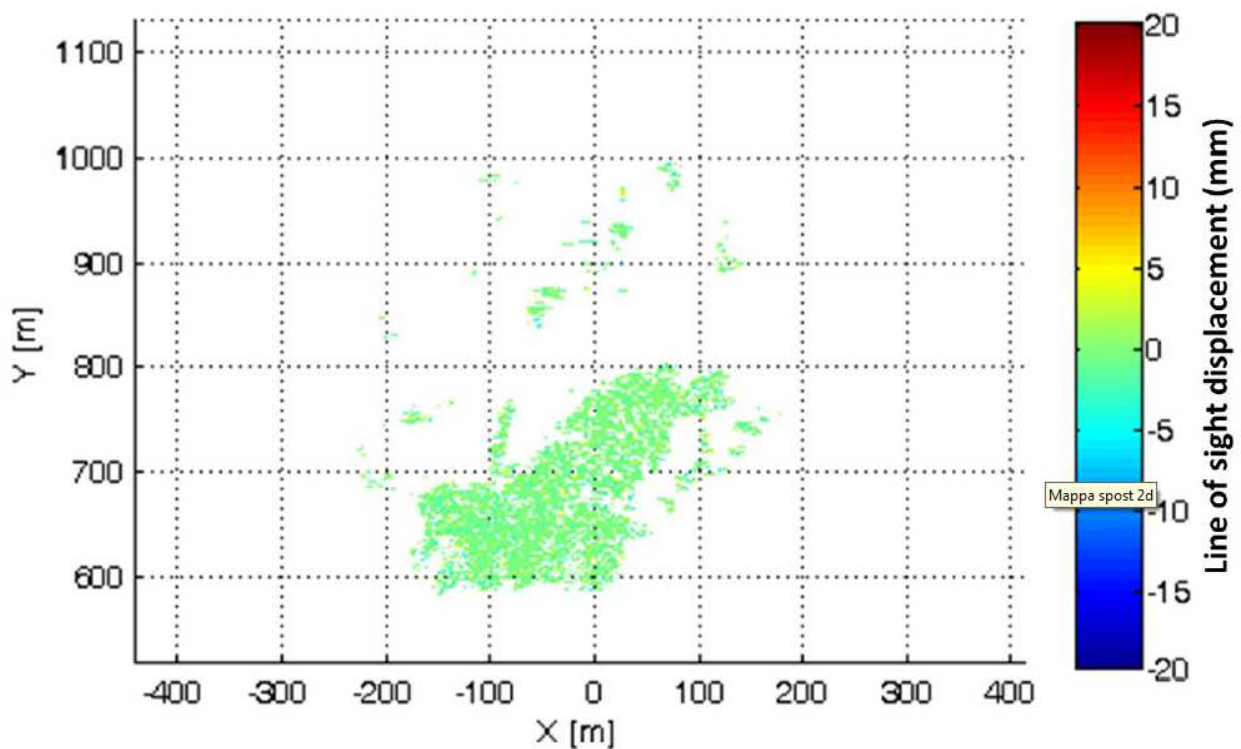


Figura 8.52 Mappa di spostamento cumulato 2D relative al periodo 17/07/2013 – 02/09/2013.

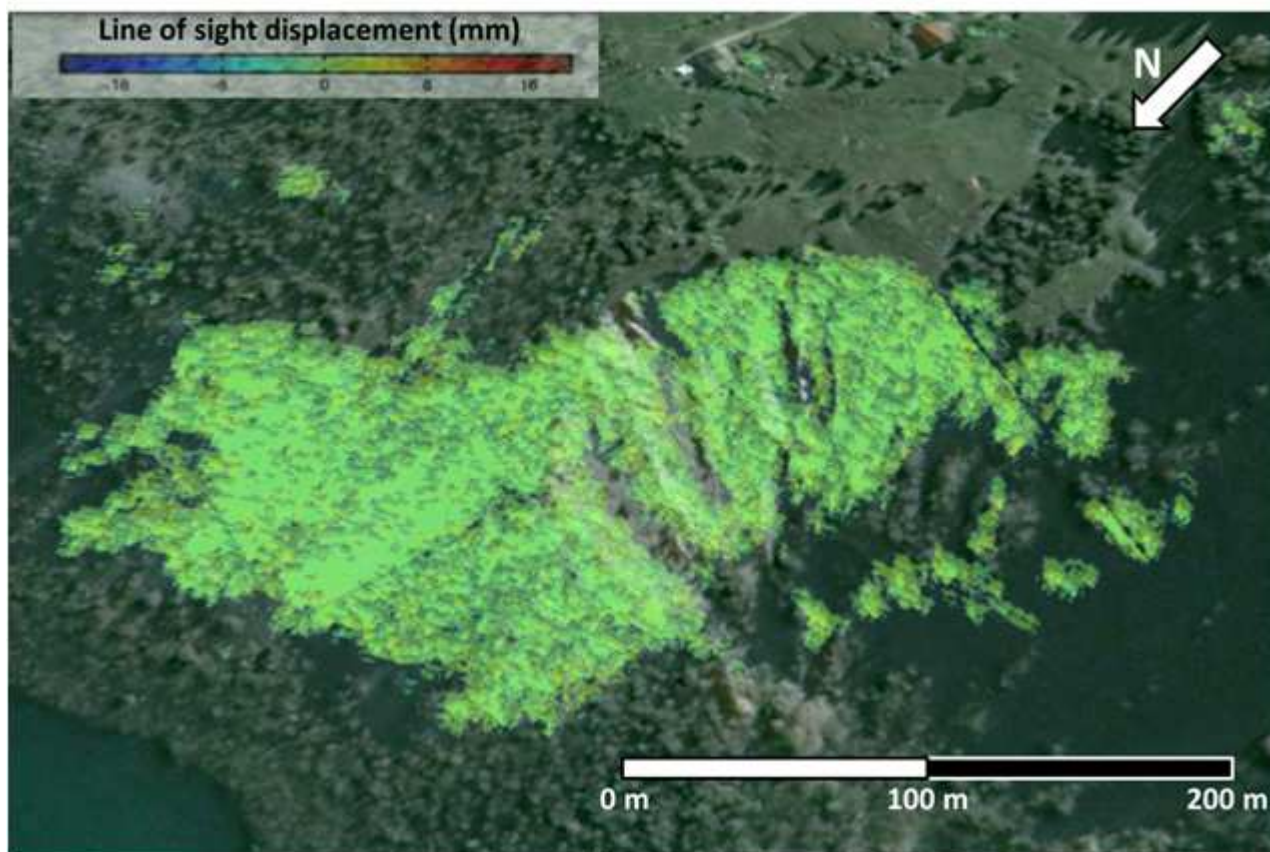


Figura 8.53 Mappa di spostamento cumulate relative al periodo 17/07/2013 – 02/09/2013, proiettato su immagine aerea.

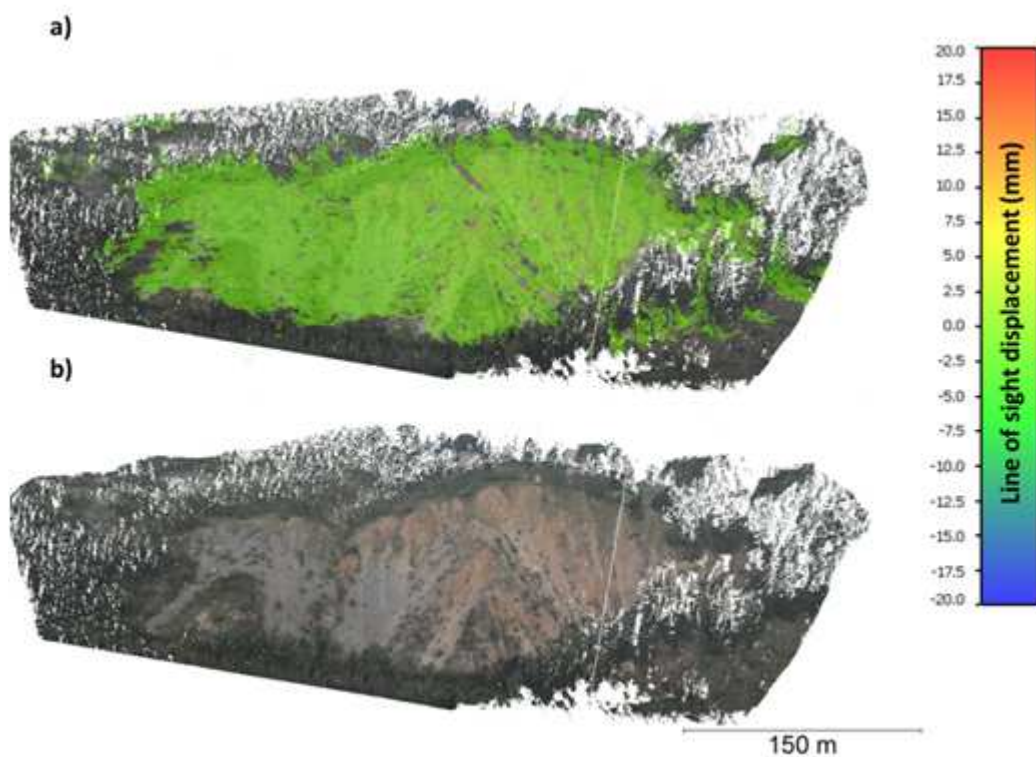


Figura 8.54 Mappa 3D di spostamento cumulate nel periodo 17/07/2013 – 02/09/2013, con riportata nella parte b la nuvola di punti in colori reali.

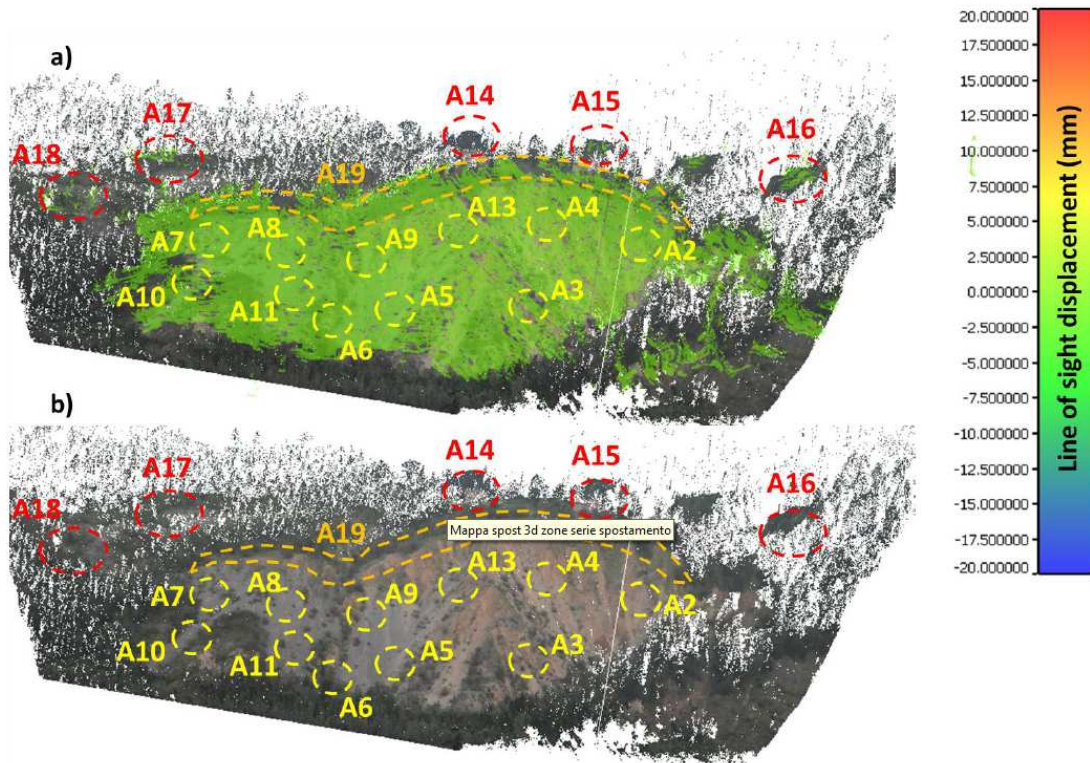


Figura 8.55 Ubicazione delle aree di cui si riporta lo spostamento medio (da Figura 6 a Figura 9). a) mappa di spostamento cumulato 3D relativa al periodo 17/07/2013 – 02/09/2013; b) nuvola di punti in colori reali ottenuta da rilievo laser scanner terrestre.

Per meglio caratterizzare la dinamica del versante, è stata fatta l’analisi delle serie temporali di spostamento medio di alcuni settori del versante significativi, così come indicati in Figura 8.55. Dalle serie di spostamento di Figura 8.56, Figura 8.57, Figura 8.58, Figura 8.59 non si notano spostamenti con trend costante nel tempo, né spostamenti a carattere ciclico, nell’intero periodo di monitoraggio e in tutto lo scenario investigato.

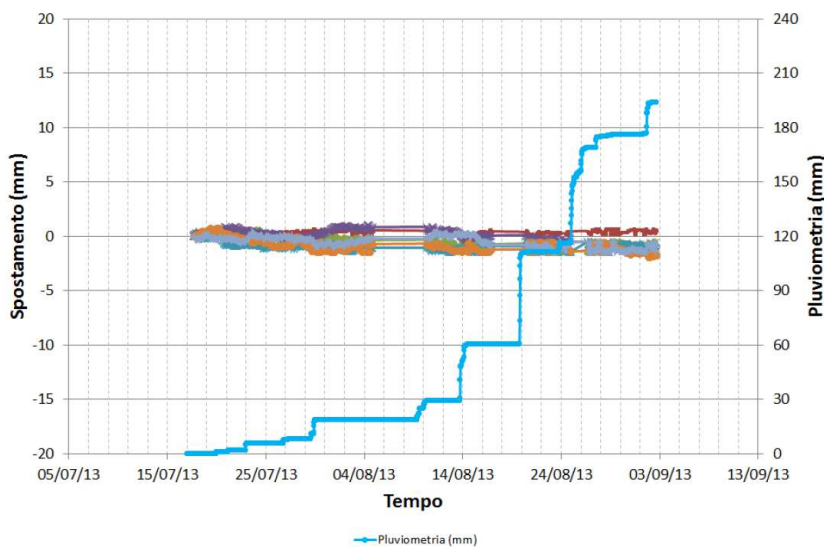


Figura 8.56 Serie temporali di spostamento medio delle zone A2, A3, A4, A5, A6 e A7 (Figura 8.55), correlate con la serie temporale di pluviometria cumulata.

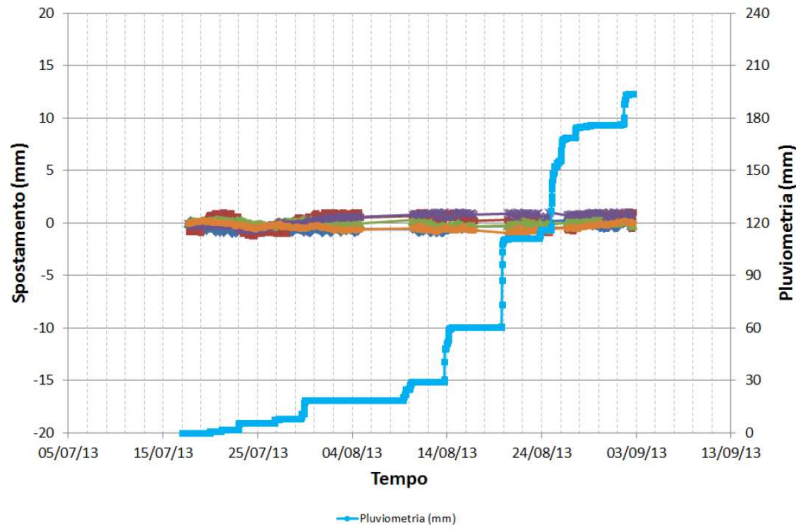


Figura 8.57 Serie temporali di spostamento medio delle zone A8, A9, A10, A11 e A13 (Figura 8.55), correlate con la serie temporale di pluviometria cumulata.

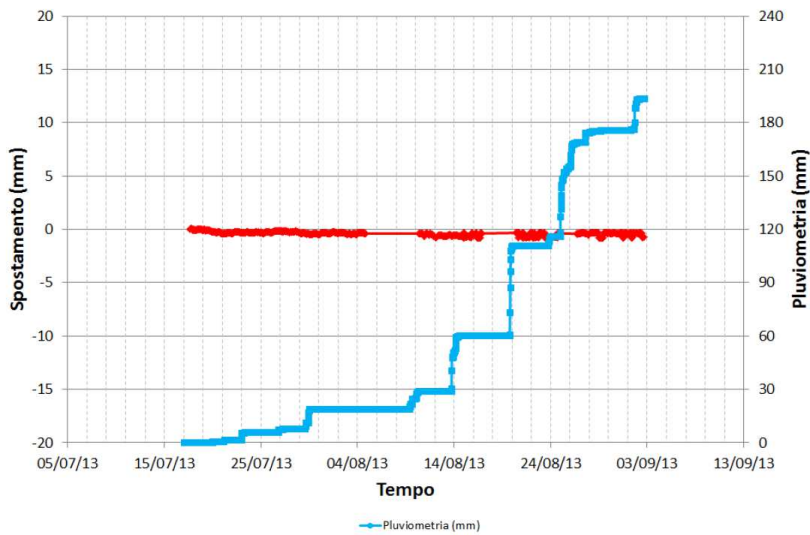


Figura 8.58 Serie temporale di spostamento medio della zona A19 (Figura 8.55), correlata con la serie temporale di pluviometria cumulata.

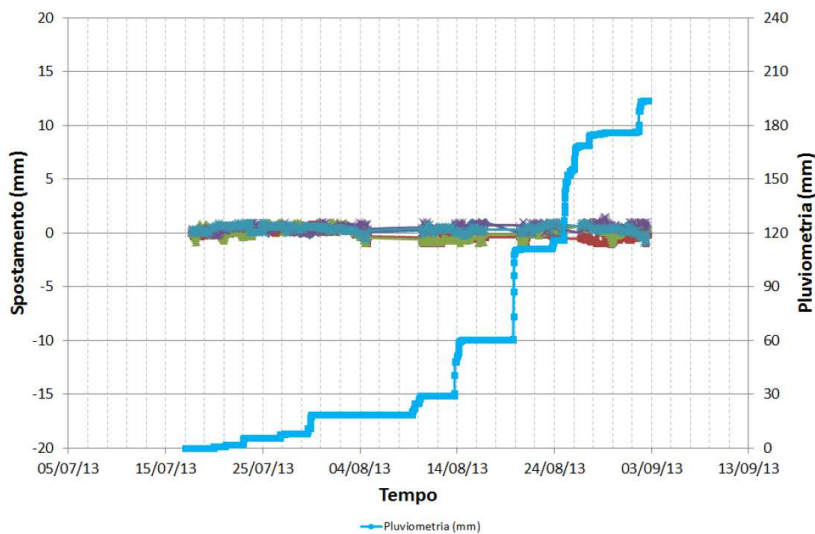


Figura 8.59 Serie temporali di spostamento medio delle zone A14, A15, A16, A17 e A18 (Figura 8.55), correlate con la serie temporale di pluviometria cumulata.

8.3.3 Seconda campagna di monitoraggio

Nell'ambito della seconda campagna di monitoraggio GBSAR non sono stati registrati spostamenti significativi alla scala dell'intero versante. Sono stati rilevati, tuttavia, degli spostamenti localizzati in avvicinamento al sensore, in corrispondenza di alcuni settori dell'area calanchiva del versante; tali spostamenti, la cui entità massima misurata è di circa 30 mm, si sono manifestati prevalentemente nel periodo 25 Novembre 2013 – 3 Dicembre 2013 e non risultano esauriti al termine della campagna di misura.

La lettura dei risultati viene presentata nelle mappe:

- mappa di spostamento cumulato 2D con l'ubicazione dei settori in cui sono stati registrati movimenti localizzati (Figura 10);
- mappa di spostamento cumulato su immagine satellitare;
- mappa di spostamento cumulato 3D, confrontata con la nuvola di punti 3D in colori reali ottenuta da rilievo laser scanner terrestre

Per le quali vale la convenzione cromatica di spostamento utilizzata all'interno di questa relazione.

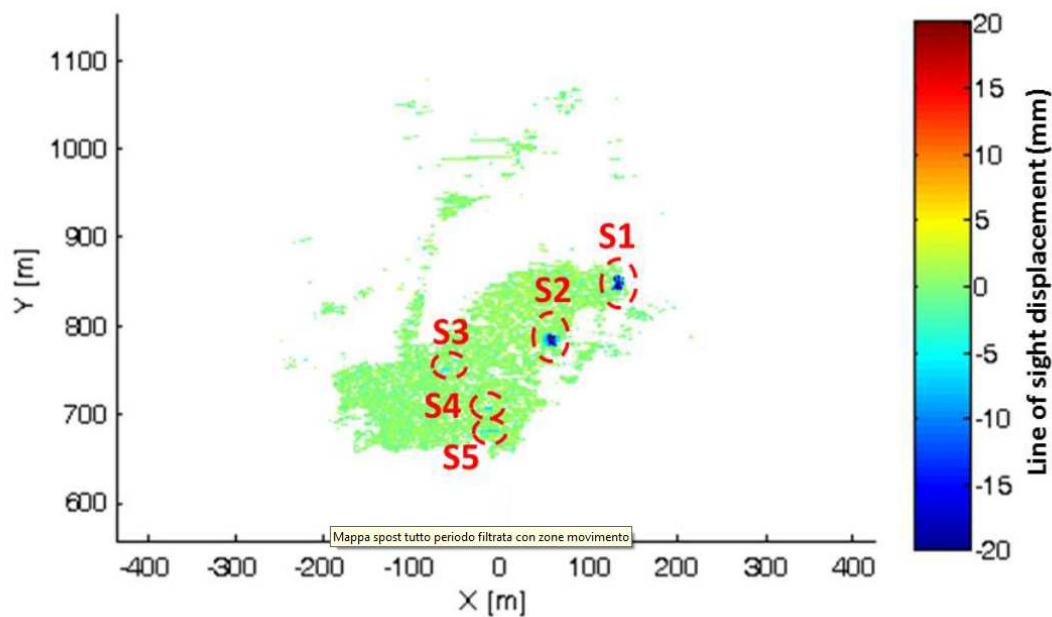


Figura 8.60 *Mapa di spostamento cumulato 2D relativa al periodo 30/10/2013 – 03/12/2013. In rosso vengono evidenziate le zone in cui sono stati rilevati spostamenti.*

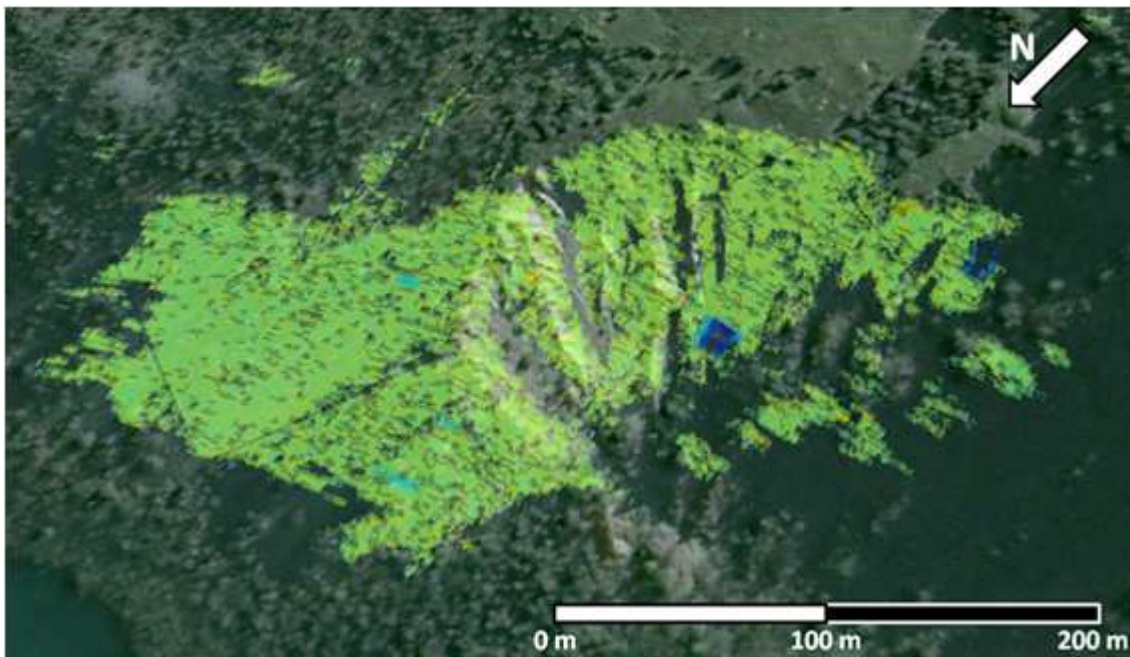


Figura 8.61 Mappa su immagine aerea di spostamento cumulato relativa al periodo 30/10/2013 – 03/12/2013.

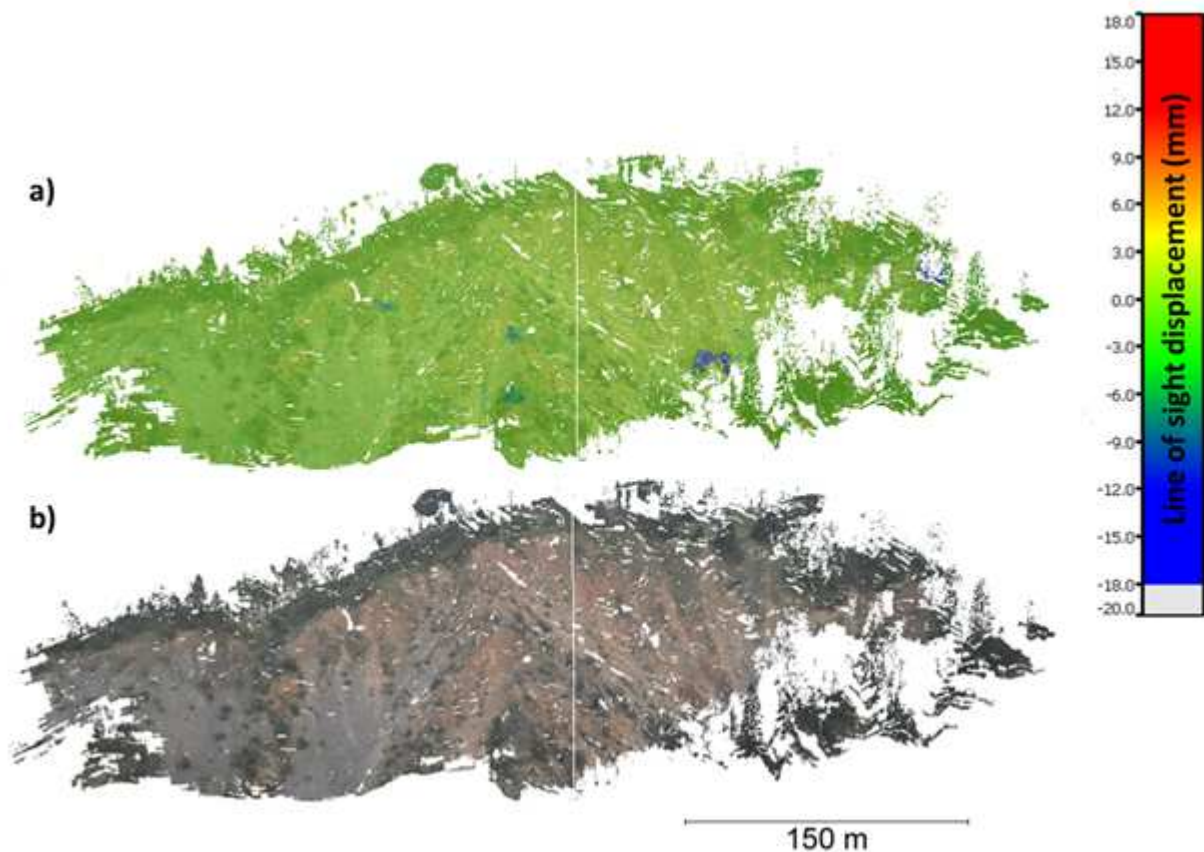


Figura 8.62 Mappa di spostamento cumulato 3D relativo al periodo 30/10/2013 – 03/12/2013, confrontata con la nuvola di punti 3D in colori reali ottenuta da rilievo laser scanner terrestre.

E' stata eseguita un'analisi delle serie temporali nelle aree in cui si sono rilevati dei movimenti localizzati, le aree sono illustrate in Figura 8.63, le analisi degli spostamenti sono illustrate nella immagine da Figura 8.64 a Figura 8.66.

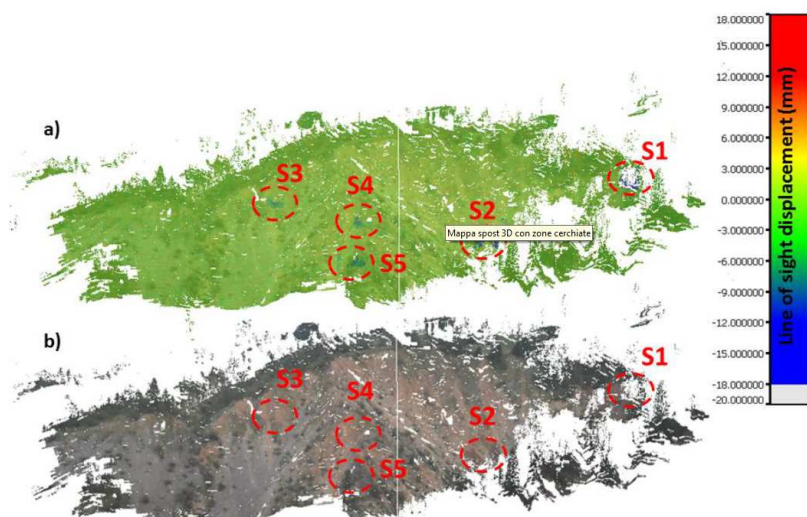


Figura 8.63 a) mappa 3D di spostamento cumulato relativa al periodo 30/10/2013 – 03/12/2013; b) nuvola di punti in colori reali ottenuta da rilievo laser scanner terrestre. In rosso vengono evidenziate le zone in cui sono stati rilevati spostamenti (Figura 8.64, Figura 8.65 e Figura 8.66).

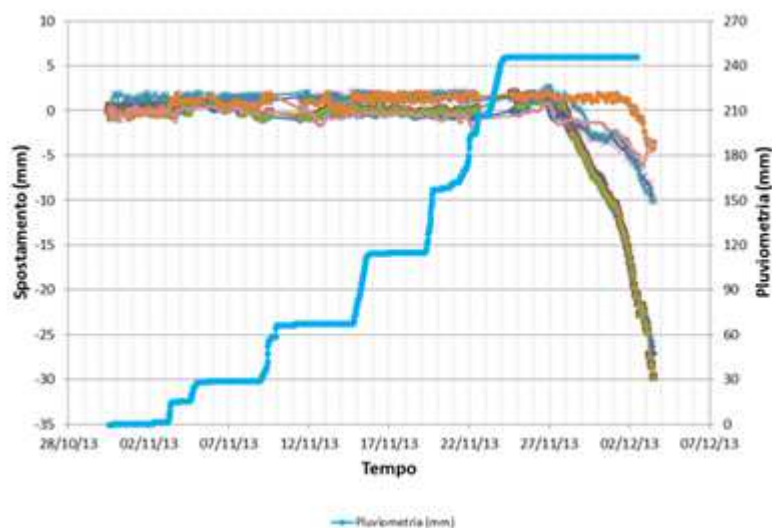


Figura 8.64 Serie temporali di spostamento di alcuni punti in corrispondenza della zona S1 (Figura 8.63), correlate con la serie temporale di pluviometria cumulata.

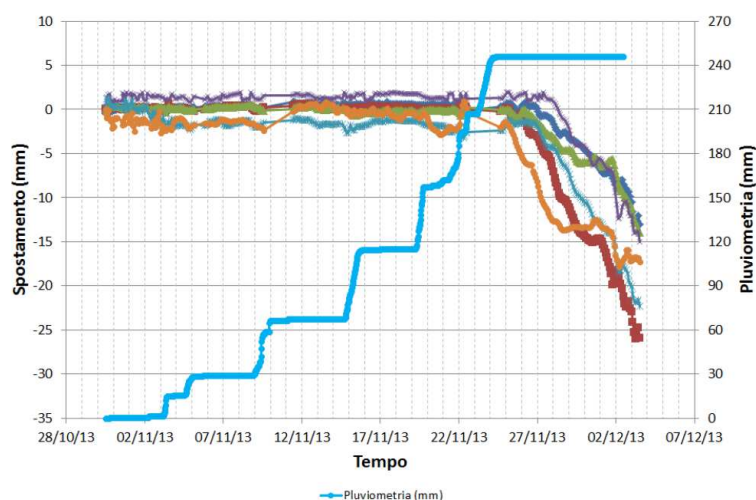


Figura 8.65 Serie temporali di spostamento di alcuni punti in corrispondenza della zona S2 (Figura 8.63), correlate con la serie temporale di pluviometria cumulata.

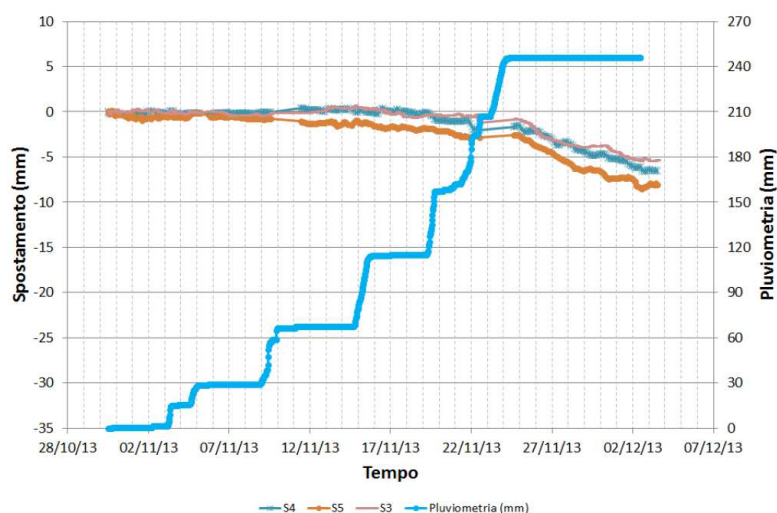


Figura 8.66 Serie temporali di spostamento medie delle zone S3, S4 ed S5 (Figura 8.63), correlate con la serie temporale di pluviometria cumulata.

Considerata le peculiarità morfologica della zona è stata fatta un'analisi delle serie temporali anche in corrispondenza dell'orlo della scarpata per investigare eventuali fenomeni calanchivi in atto ed eventuali modifiche della geometria della zona. Analisi delle serie temporali sono state eseguite anche nei restanti settori dei calanchi e sul versante a monte della zona calanchiva, per verificare eventuali movimenti non rilevati dall'analisi delle mappe di spostamento cumulato.

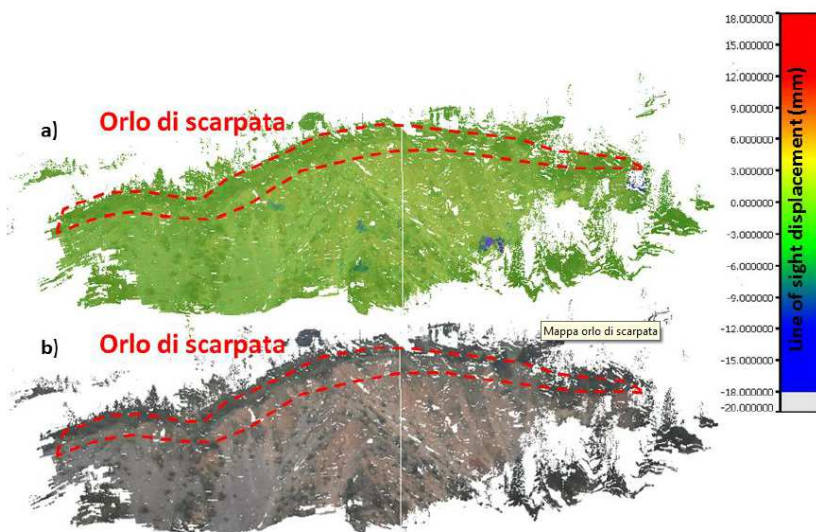


Figura 8.67 a) mappa di spostamento cumulato 3D relativa al periodo 30/10/2013 – 03/12/2013; b) nuvola di punti in colori reali ottenuta da rilievo laser scanner terrestre. In rosso viene indicata la zona in corrispondenza dell'orlo di scarpata per erosione calanchiva di cui si riporta la serie temporale di spostamento medio in Figura 8.68.

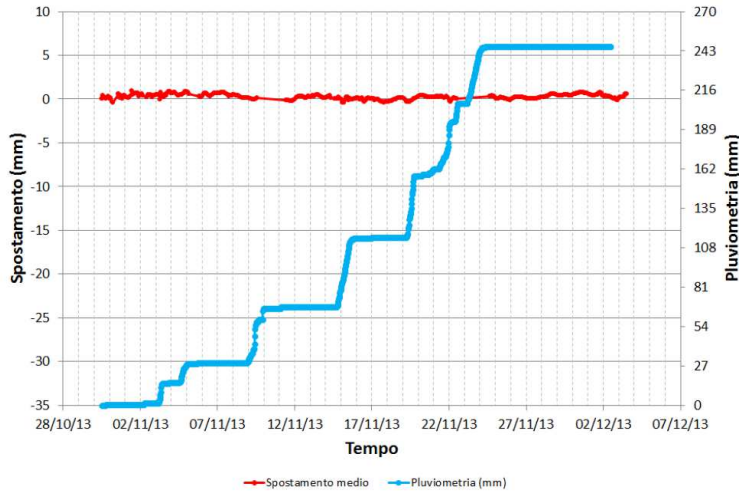


Figura 8.68 Serie temporale di spostamento medio della zona in corrispondenza dell'orlo di scarpata per erosione calanchiva (Figura 8.67), correlata con la serie temporale di pluviometria cumulata.

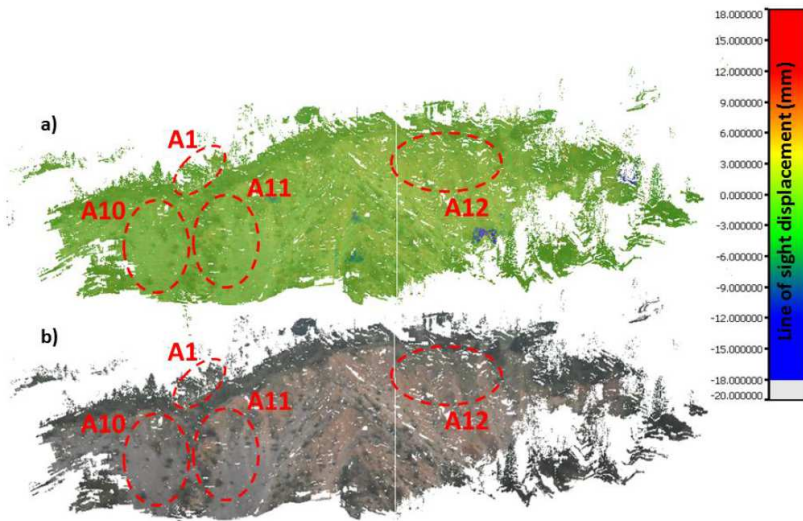


Figura 8.69 a) mappa di spostamento cumulato 3D relativa al periodo 30/10/2013 – 03/12/2013; b) immagine fotografica del versante. In rosso vengono indicati i settori sul versante a monte della zona a calanchi, di cui si riporta la serie temporale di spostamento in Figura 8.72.

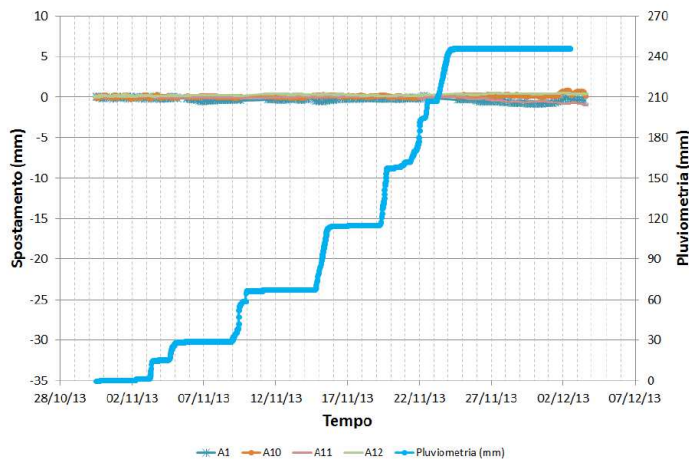


Figura 8.70 Serie temporale di spostamento medio della zona in corrispondenza dell'orlo di scarpata per erosione calanchiva (Figura 8.69), correlata con la serie temporale di pluviometria cumulata.

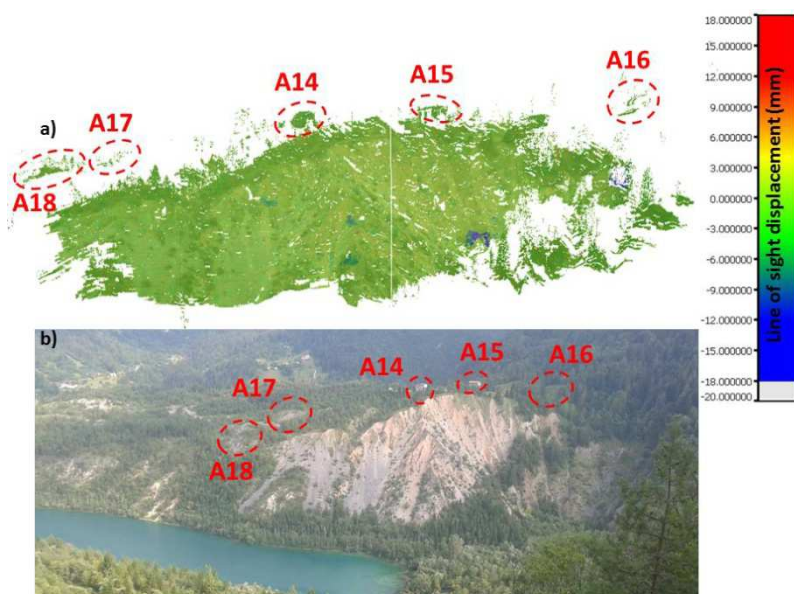


Figura 8.71 a) mappa di spostamento cumulato 3D relativa al periodo 30/10/2013 – 03/12/2013; b) nuvola di punti in colori reali ottenuta da rilievo laser scanner terrestre. In rosso vengono indicati i settori della zona a calanchi, di cui si riporta la serie temporale di spostamento in Figura 8.72.

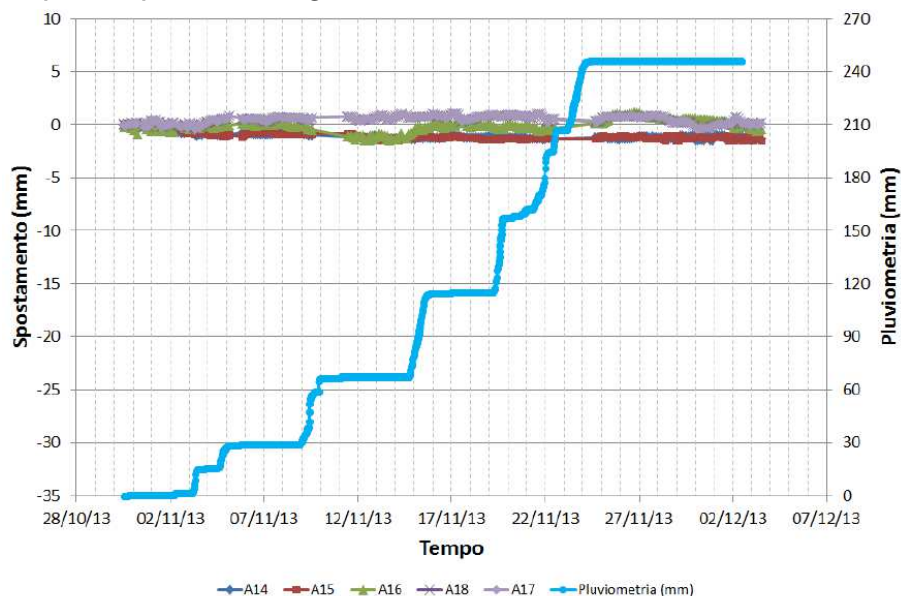


Figura 8.72 Serie temporali di spostamento medie delle zone A14, A15, A16, A17 e A18 (Figura 8.71), correlate con la serie temporale di pluviometria cumulata.

8.3.4 Monitoraggio discontinuo

La possibilità di disporre di due distinte serie temporali di monitoraggio ha reso possibile l'implementazione di un'analisi correlata delle due serie di misure, in modo da testare l'efficacia del sistema nel caso di un monitoraggio discontinuo, ovvero eseguito con differenti sessioni di misura, tuttavia con l'intento finale di fornire continuità al dato di monitoraggio.

In tal senso è stato adottato un metodo rigoroso basato su due assunti fondamentali:

- metodo di installazione: la piattaforma di monitoraggio GBSAR è stata installata su un sistema di riposizionamento esatto del sensore, che consente di ridurre al minimo gli artefatti indotti dalla movimentazione della strumentazione (Figura 8.73);

- metodo di elaborazione: la correlazione tra i dati della prima e della seconda campagna di misura è stata ottenuta attraverso un processo di coregistrazione degli interferogrammi (mappe radar) basato sull'analisi dei valori di ampiezza dei singoli pixel delle mappe.

Mentre il metodo d'installazione appare semplice da realizzare, la procedura relativa all'elaborazione segue la procedura che segue:

1. accoppiamento delle immagini: una coppia di immagini GBSAR (acquisite, rispettivamente, nell'ambito della prima e della seconda campagna di monitoraggio) è stata analizzata al fine di identificare le coordinate radar di punti comuni, sulla base dei valori di SNR (ampiezza del segnale). In questo modo, è stato possibile definire la miglior funzione di cross-correlazione tra le due immagini della coppia;
2. stima della trasformazione: identificazione, per ogni singolo pixel, dei valori di range e cross-range (scarti) da applicare al fine di rimuovere gli effetti residui del riposizionamento;
3. ricampionamento: applicazione della funzione di correzione degli scarti (di cui al punto precedente) e coregistrazione degli interferogrammi GBSAR;
4. analisi degli spostamenti: analisi degli interferogrammi per l'identificazione di eventuali spostamenti verificatisi nel periodo compreso tra le campagne di misura. In particolare, le analisi sono volte all'identificazione di:
 - a. eventuali frange interferometriche, riconducibili a spostamenti diffusi di entità maggiore di 5 mm;
 - b. variazioni dei valori di differenza di fase di singoli pixel, riconducibili a spostamenti localizzati di entità minore di 5 mm.

Come specificato nei capitoli precedenti, il monitoraggio periodico discontinuo limita fortemente la tecnica GBSAR e quindi non è possibile pretendere di ottenere risultati caratterizzati dalla medesima accuratezza e precisione del monitoraggio in continuo.

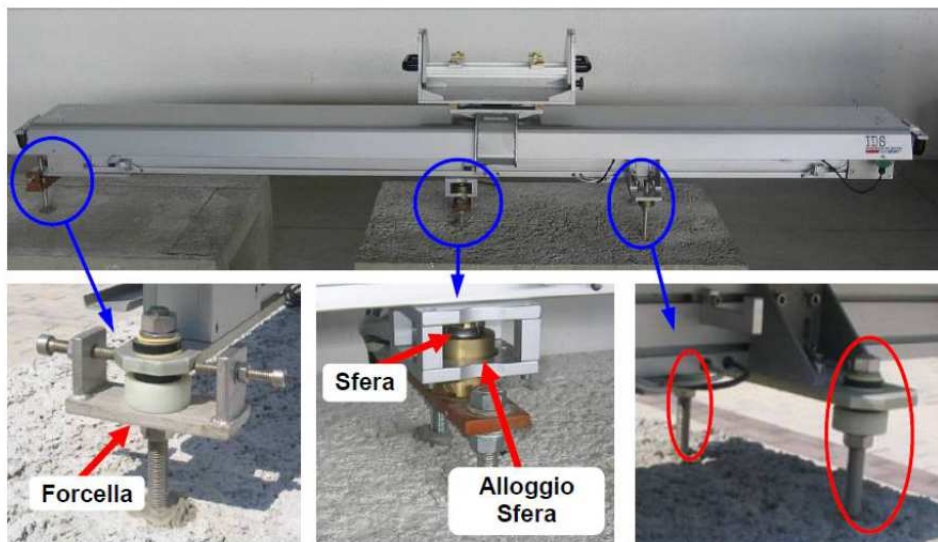


Figura 8.73 Dettaglio del sistema di riposizionamento esatto del sensore GBSAR.

Il risultato ottenuto dal processo di coregistrazione degli interferogrammi nell'ambito del caso di studio è mostrato in Figura 8.74. La scala di colori indica la differenza, per ogni pixel, dei valori di fase grezza misurati (non convertiti ancora, pertanto, in valori di spostamento). Da questa prima informazione si ricava che:

- non si identificano frange interferometriche corrispondenti a spostamenti significativi (maggiori di 5 mm) nell'area oggetto di indagine;
- non si identificano variazioni significative dei valori di differenza di fase, riconducibili a spostamenti minori di 5 mm.

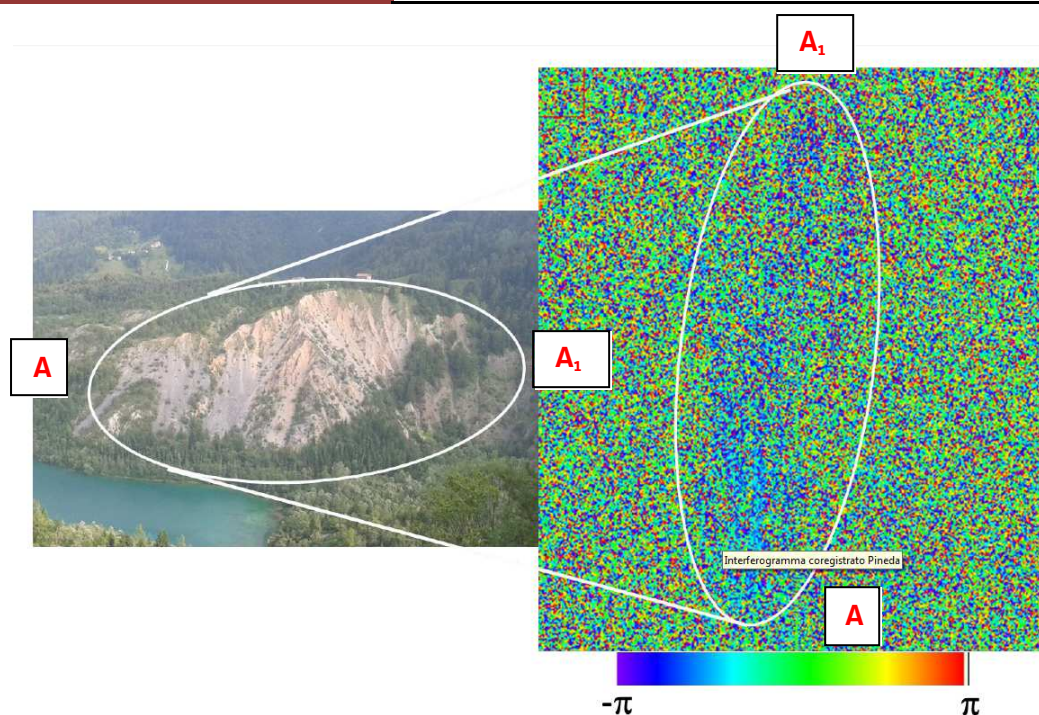


Figura 8.74 Interferogramma ottenuto dalla coregistrazione delle mappe GBSAR della prima e della seconda campagna di misura. Di conseguenza, vista la “staticità” della situazione, si è optato di elaborare solo il dato coregistrato e di conseguenza i valori dell’interferogramma non sono stati trasformati in misure di spostamento.

8.3.5 Rilievo laser scanning terrestre a La Pineda

Il giorno 2 Settembre 2013, la società NHAZCA S.r.l. ha eseguito un rilievo Laser Scanning Terrestre del versante in Località La Pineda con l’obiettivo di ricostruire il modello tridimensionale (nuvola di punti) in colori reali ad elevata risoluzione del versante oggetto di monitoraggio ed applicare quindi la metodologia descritta nel capitolo 4.11.

Il rilievo è stato condotto con un sensore modello Riegl VZ1000 integrato con un’antenna GPS, sensore inclinometrico, bussola e fotocamera ad alta risoluzione Nikon D700, in grado di acquisire immagini ottiche calibrate con il sensore laser.

Per l’esecuzione del rilievo Laser Scanner è stato materializzato un punto di misura (in prossimità della postazione di monitoraggio GBSAR, sul muro di sostegno a monte della SR251) in grado di garantire il riposizionamento esatto del sensore nelle sessioni di misura periodiche previste. La struttura del punto di misura è costituita interamente da elementi componibili che vengono rimossi al termine di ogni rilievo.

La Figura 8.75 e la Figura 8.76 mostrano, rispettivamente, l’ubicazione del punto di misura Laser Scanner su immagine aerea e alcune immagini del punto di misura in occasione del rilievo.



Figura 8.75 Posizione della postazione GBSAR e del laser scanner terrestre riportato su fotografia aerea.



Figura 8.76 Vista della strumentazione laser scanner sulla postazione di misura.

8.3.6 Monitoraggio GPS

Come nelle precedenti stazioni di misura anche nel sito de “La Pineda” la postazione di monitoraggio GBSAR è stata equipaggiata con un caposaldo GPS al fine di verificarne eventuali spostamenti, contestualmente alle misure interferometriche.

Il rilievo è stato condotto con intervallo di campionamento di 1 secondo. Le misure sono state salvate in file RINEX con cadenza oraria; inoltre, al fine di ovviare problemi che potessero indurre carenza nell'accuratezza delle misure, le sessioni di misura sono state salvate anche con cadenza giornaliera (24 ore). La strumentazione utilizzata è l'antenna Leica AS10 e il ricevitore il geodetico Leica GMX902GG, costituendo un sistema in grado di ricevere ed elaborare sia la fase dei codici che delle portanti L1 (1575MHz) ed L2 (1227MHz). In Figura 8.77 e Figura 8.78 sono riportate le serie temporali di spostamento registrate nelle direzioni X, Y e Z (sistema di riferimento geocentrico WGS84), rispettivamente nei periodi 17 Luglio – 2 Settembre 2013 e 30 Ottobre – 2 Dicembre 2013, corretti con i dati della stazione di riferimento regionale di Barcis, dalle quali non si evincono spostamenti significativi.

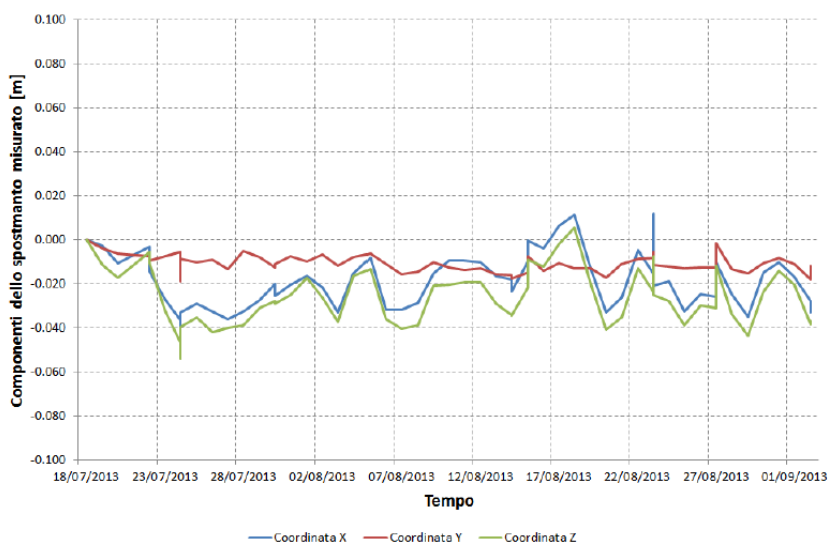


Figura 8.77 Serie temporali di spostamento cumulato lungo le direzioni X, Y e Z (sistema di riferimento cartografico geocentrico) del caposaldo GPS materializzato in corrispondenza della postazione di monitoraggio GBSAR (risultati derivanti dalla correzione con i dati della stazione di riferimento regionale di Barcis). Dati relativi al periodo 17 Luglio – 2 Settembre 2013.

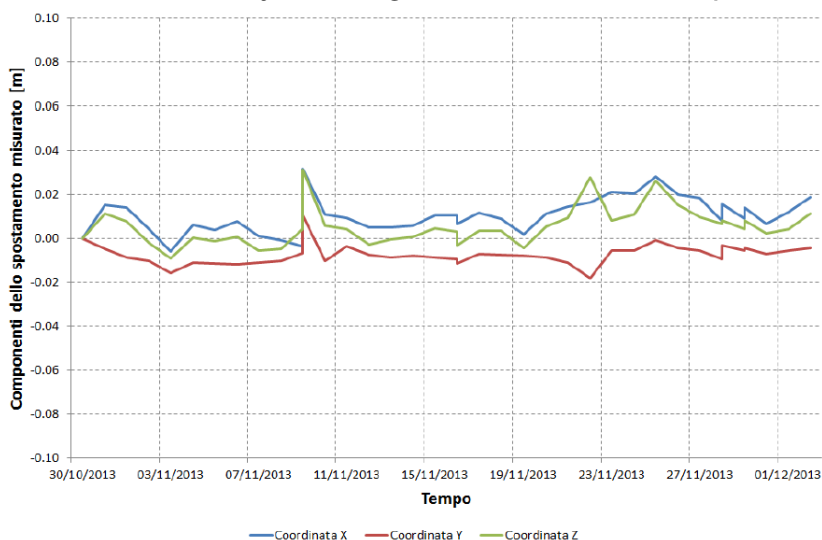


Figura 8.78 Serie temporali di spostamento cumulato lungo le direzioni X, Y e Z (sistema di riferimento cartografico geocentrico) del caposaldo GPS materializzato in corrispondenza della postazione di monitoraggio GBSAR (risultati derivanti dalla correzione con i dati della stazione di riferimento regionale di Barcis). Dati relativi al periodo 30 Ottobre – 2 Dicembre 2013.

9 Risultati del monitoraggio GBSAR

9.1 Ligosullo

Il monitoraggio con Interferometria SAR Terrestre (GBSAR) ha consentito di constatare una condizione di sostanziale assenza di spostamenti significativi sia alla scala locale che dell'intero versante, durante l'intero periodo di acquisizione. Nella prima campagna di misure (18 Giugno 2013 – 16 Luglio 2013) sono state identificate, tuttavia, delle zone, interne all'area del centro abitato, caratterizzate da spostamenti di entità molto modesta (minori di 2 mm lungo la linea di vista strumentale), cumulati prevalentemente nel periodo 10 Luglio – 16 Luglio 2013. Tali fenomeni si sono innescati con l'inizio di precipitazioni meteoriche che, nel periodo 9-13 Luglio 2013 hanno fatto registrare valori di pluviometria cumulata di circa 30 mm. Diversamente, non sono stati registrati spostamenti nel periodo precedente (18 Giugno – 10 Luglio), caratterizzato periodicamente da

precipitazioni anche più intense. Tale trend dinamico non si è tuttavia più registrato nel corso delle misure eseguite durante il 2014.

E' importante a questo punto rimarcare un cambiamento delle situazioni al contorno avvenuto nella fase temporale che va dalla fine della prima campagna all'inizio della seconda.

Il Servizio geologico, per il tramite dell'Amministrazione comunale di Ligosullo ha infatti finanziato delle opere di difesa finalizzate all'allontanamento delle acque dall'area di frana. Sono stati realizzati tre pozzi drenanti di grosso diametro nell'area P di Figura 9.1.

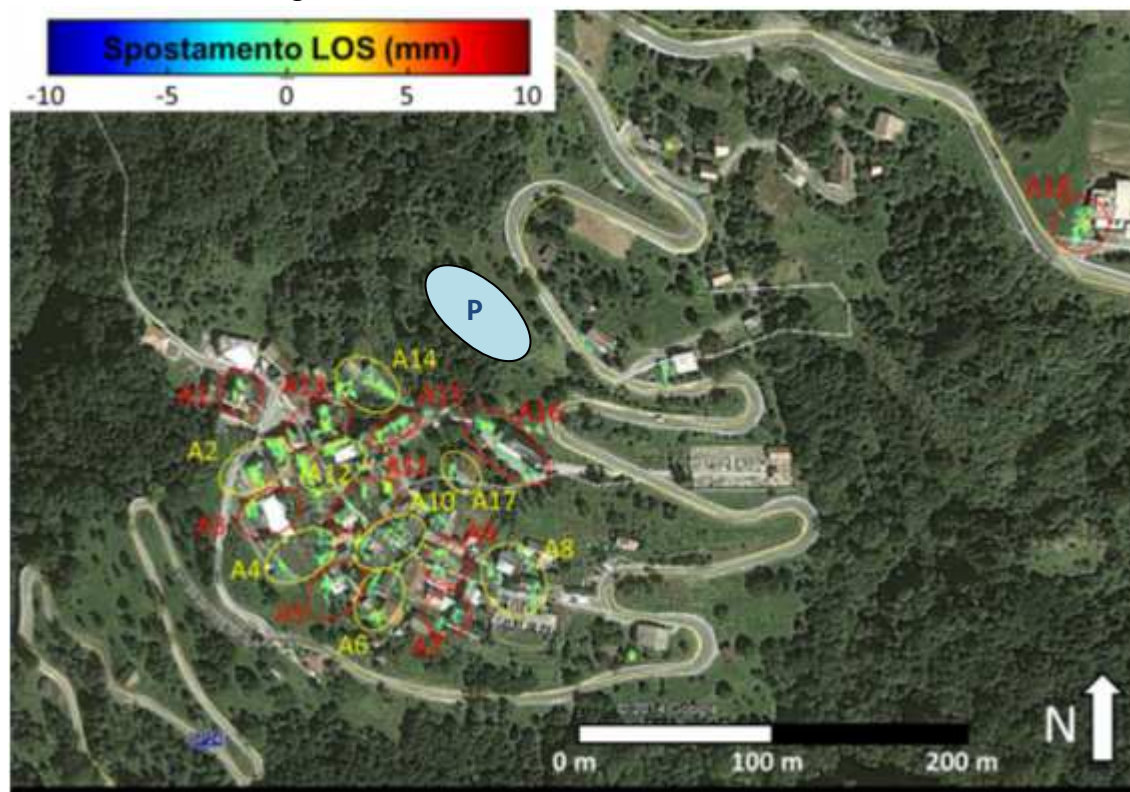


Figura 9.1 La campitura azzurra con al centro la lettera P riporta sulla mappa di Figura 8.12 la zona in cui sono stati realizzati i pozzi drenanti.

I lavori di realizzazione delle opere si sono articolati secondo questo calendario:

- inizio perforazioni 04/06/2013 - conclusione delle perforazioni 23/07/2013

con sospensioni:

- dal 14/06/2013 al 27/06/2013
- dal 04/07/2013 al 15/07/2013.

Appare evidente come le misure fatte nel corso delle campagne del 2014 siano state fatte, contrariamente alla prima fase dell'estate 2013, con il sistema di drenaggio funzionante.

I dati GBSAR forniscono quindi una prima indicazione che induce a valutare l'efficacia delle opere di difesa realizzate, tale dato tuttavia dovrà essere confermato da ulteriori indagini che sono stati già state pianificate e che peraltro non rientrano nei contenuti di questa tesi di dottorato.

9.2 Cimolais

Il risultato del monitoraggio GBSAR ha descritto una condizione di sostanziale assenza di spostamenti significativi alla scala del versante sul quale non sono stati identificati spostamenti con trend lineari nel tempo, riconducibili a possibili instabilità di origine gravitativa in atto durante la sessione di misura.

Dall'analisi a scala locale condotta con il metodo PtoP (Point to Point, paragrafo 6.6) è stato possibile individuare dei settori di massa rocciosa caratterizzati da deformazioni cicliche indotte prevalentemente da variazioni termiche e quindi da considerarsi come caratterizzate da un maggior grado di attività e di conseguenza anche di suscettività, a fenomeni di instabilità nel breve/medio periodo.

Le evidenze si sono manifestate soprattutto nella zona CR3, costituita da Calcare del Vajont (le informazioni litologiche sono tratte dallo studio del prof. Castelli). Questa zona vede degli spostamenti reversibili (con ciclicità giornaliera) in avvicendamento nelle ore più calde della giornata ed in allontanamento nelle ore più fredde. Il fenomeno può essere ricondotto a contrazioni e dilatazioni termiche di parti della massa rocciosa interessate da discontinuità. Va però ricordato che tali evidenze di movimento rientrano in un range molto limitato (± 1 mm), non lontane dai limiti di accuratezza strumentale.

9.3 La Pineda

Il monitoraggio GBSAR ha consentito constatare una condizione di sostanziale assenza di spostamenti significativi alla dell'intero versante, in occasione delle due sessioni di misura condotte, rispettivamente, nei periodi 17 Luglio – 2 Settembre 2013 e 30 Ottobre – 3 Dicembre 2013.

In occasione della seconda sessione di misura (30 Ottobre – 3 Dicembre 2013), tuttavia, sono state identificate delle zone di limitata estensione areale (inferiori a 90 m^2), in corrispondenza della porzione di versante a morfologia calanchiva, che hanno fatto registrare spostamenti in avvicendamento al sensore di entità massima pari a circa 30 mm, cumulati prevalentemente nel periodo 25 Novembre – 3 Dicembre 2013. L'innescò di tali fenomeni si è verificato al termine delle intense precipitazioni meteoriche che, nel periodo 3 Novembre – 24 Novembre, hanno fatto registrare valori di pluviometria cumulata di oltre 240 mm. Tuttavia, la limitata estensione areale dei fenomeni di dissesto e la loro attività impulsiva e limitata nel tempo porta a ritenere che tali fenomeni siano l'evidenza di deformazioni superficiali inquadrabili nella normale dinamica evolutiva di un versante privo di vegetazione costituito da materiale litologicamente poco cementato ed affetto da evidenti processi erosivi.

La correlazione dei dati di monitoraggio acquisiti nell'ambito della prima e della seconda sessione di misura (resa possibile da un rigoroso processo di coregistrazione delle immagini SAR), ha consentito peraltro di escludere spostamenti significativi anche nel periodo compreso tra le due campagne, consentendo, di fatto, di constatare una condizione di sostanziale stabilità alla scala di versante nell'intero periodo di indagine (17 Luglio – 3 Dicembre 2013). Il monitoraggio, eseguito in diverse stagioni dell'anno, ha consentito di valutare la risposta cinematica del versante in diverse condizioni meteorologiche, caratterizzate soprattutto da intense precipitazioni meteoriche; le diverse caratteristiche litologiche e i contatti (tettonici o stratigrafici) delle formazioni affioranti nella zona (che possono generare contrasti di permeabilità) lasciano supporre variazioni delle pressioni interstiziali nell'accumulo di paleofrana indotte da possibili variazioni dei livelli di falda, che potrebbero anche essere effimere, soprattutto in occasione dei periodi più piovosi che, tuttavia non hanno innescato fenomeni di instabilità gravitativa di entità rilevabile dalla strumentazione.

10 Conclusioni

10.1 Considerazioni finali

Il focus della ricerca è stato quello di affinare una specifica metodologia di monitoraggio di dissesti idrogeologici e di confrontare i risultati ottenuti in diversi contesti geologici, anche per fornire informazioni utili a livello metodologico. La tematica relativa a questo genere di monitoraggi è particolarmente sentita dalle Pubbliche Amministrazioni di un territorio molto vulnerabile come quello italiano. Infatti un dato affidabile e preciso consente una pianificazione corretta degli interventi da realizzare sul territorio, siano essi di presidio o di previsione.

Avere delle informazioni spaziali e temporali sull'evoluzione di una versante in frana è un cardine fondamentale del procedimento di supporto alle decisioni. Gli obiettivi proposti nelle premesse dello studio erano chiari, si volevano infatti integrare le conoscenze pregresse sulla definizione della forma ed estensione della massa in movimento, determinare gli eventuali spostamenti differenziali, infine si voleva stimare il campo di velocità correlato a fattori meteorologici esterni.

Sebbene, in tutte e tre le situazioni, le immagini ottenute a scale di versante indichino una sostanziale stabilità delle diverse situazioni, le analisi di dettaglio hanno messo in luce particolari informazioni precedentemente non note. È il caso di Ligosullo dove si sono verificati movimenti peculiari solo in alcune aree, analogamente a Cimolais si è osservato come vi siano alcune zone a maggior suscettibilità negli affioramenti del Calcare di Soccher piuttosto che nella zona del target principale del Crep di Savath, mentre a La Pineda è rilevata la presenza di aree maggiormente soggette a fenomeni gravitativi su un versante comunque apparentemente in evoluzione continua.

Nel caso di Ligosullo il dato assume particolare importanza in quanto le misure sono state acquisite contestualmente alla fine dei lavori di una serie di opere di drenaggio finalizzate all'allontanamento delle acque sotterranee dal versante ed i risultati ottenuti portano a supporre l'efficacia dell'intervento.

L'informazione di generale stabilità rilevata per la situazione di Cimolais è invece un'ulteriore conferma dell'efficacia delle modalità di messa in sicurezza in atto per la difesa del sottostante abitato.

Nella situazione de La Pineda si è osservata l'importante correlazione tra l'attivazione dei fenomeni franosi e l'incremento della piovosità misurata.

L'elevata precisione della misura del dato di spostamento, unitamente all'alto passo di campionamento consentono di ottenere con il GBSAR importanti informazioni anche di dettaglio, sull'evoluzione dinamica di un versante. Le misure da remoto consentono di rilevare, anche da distanze importanti, movimenti di limitata estensione che altre metodologie non sono in grado di identificare.

La considerazione finale è quindi quella che qualsiasi dato acquisito debba essere integrato con altre informazioni. Il caso del GBSAR è particolarmente significativo poiché trattandosi di un monitoraggio non economico, che fornisce informazioni che tutto sommato possono essere definite con il termine di mirate, è necessario sempre integrare il dato con quello di altre metodologie al fine di ottenere un quadro della situazione esaustivo, ma soprattutto utile all'utente finale che è chiamato alla gestione oculata della risorsa pubblica in un'ottica di salvaguardia della vita umana.

10.2 Contributi innovativi

Si tratta del primo caso di monitoraggio realizzato, a livello regionale, con l'utilizzo della tecnica interferometrica terrestre (GBSAR) su tre diversi tipi di dissesti utilizzando differenti metodologie di processing ed acquisizione, in particolare nel sito di Ligosullo è stato eseguita un'acquisizione continua con un'elaborazione del dato sia a scala di versante sia analizzando le serie temporali di spostamenti di singole porzioni del versante correlate con il dato di piovosità registrato nell'area.

Nel sito di Cimolais l'acquisizione è stata di tipo continuo, con la posa in opera di corner reflector, installati sulla parete rocciosa con tecnologie alpinistiche, mentre l'elaborazione ha riguardato oltre la scala generale e l'analisi delle serie temporali correlate al dato pluviometrico anche un'elaborazione dedicata del dato, a scala locale, utilizzando la metodologia d'analisi avanzata PtoP, che ricerca gli spostamenti unidirezionali e ciclici alla scala dei singoli blocchi consentendo anche l'analisi della suscettibilità.

Nel sito di Cimolais il dato interferometrico è stato integrato con la valutazione dell'influenza sismica nel periodo di misura, per verificare l'eventuale effetto dell'accelerazione sismica sulle forze resistenti della massa rocciosa.

La Pineda è stato il sito in cui è stata sperimentata la modalità di acquisizione discontinua, registrando le serie di immagini in due differenti momenti. Il processo di riunione delle due serie temporali è stato rigoroso con l'intento di ricostruire una serie di misure continua partendo da dei dati discontinui.

In tutti i tre siti di misura alle immagini radar sono stati associati dei dati ottenuti da rilevamenti laser-scanning in modo da trasformare i radargrammi bidimensionali in modelli tridimensionali di spostamento georiferiti e opportunamente ubicati sul modello morfologico tridimensionale.

I dati ottenuti contengono una serie di informazioni uniche, sia in termini di accuratezza e precisione delle misure che di continuità nel tempo, che aprono una nuova stagione sul tema del monitoraggio delle frane in lenta evoluzione. Tale tipo di risultati, infatti, non erano mai stati ottenuti in passato, soprattutto per quel che riguarda lo studio a livello esteso della forma del versante; infatti la particolarità intrinseca della metodologia GBSAR che per acquisire il dato illumina una scena e ne misura il segnale complesso riflesso, ha permesso di evidenziare aree in movimento che con le tradizionali metodologie non sarebbero state rilevate. Tale informazione è fondamentale per quel che riguarda i segnali precursori di fenomeni di instabilità.

Un aspetto importante è stato quello di validare il protocollo di autovalutazione descritto nel paragrafo 4.10. Per ogni sito è stata seguita la procedura proposta per la verifica di fattibilità dell'indagine interferometrica; un quarto sito proposto, riferito alla frana del Rio Cercevesa, è stato scartato in quanto il processo di autovalutazione ne aveva escluso la fattibilità. Tale strumento si ritiene essere fondamentale per il raggiungimento di una qualità ottimale dell'informazione.

La bibliografia infine vuole essere una raccolta piuttosto esaustiva sull'argomento, peraltro di recente sviluppo, in modo da poter diffondere ad un uditorio vasto, soprattutto di tecnici specializzati, informazioni fondamentali per consentire l'applicazione ottimale di questa metodologia, in particolare, nei monitoraggi di dissesti idrogeologici.

10.3 Sviluppi futuri di ricerca

I buoni risultati ottenuti con questo lavoro, portano ad ipotizzare la possibilità di eseguire ulteriori monitoraggi di fenomeni franosi sul territorio regionale, previa logica verifica di applicabilità del metodo.

Nel sito di La Pineda è in programma la verifica dell'efficienza del rilievo GBSAR, comparata all'utilizzo del laser scanning. Infatti è in programma l'elaborazione dei dati laser-scanning acquisiti immediatamente dopo la fine della seconda fase di acquisizione dei dati GBSAR, i cui risultati hanno individuato una limitata porzione di versante mobilizzatasi in avvicinamento di circa 30 mm. Questo confronto consentirà di testare, tra l'altro, il limite di una tecnologia ormai matura quale il laser-scanning, che non presenta sicuramente la stessa risoluzione, in termini di entità di spostamento, ottenibile con il GBSAR, ma che di contro è in grado di rilevare dati su quelle porzioni di versante, come ad esempio le aree vegetate, in cui il GBSAR non è in grado di acquisire dati utili allo studio delle sue dinamiche.

Nel sito di Ligosullo, dove risulta particolarmente importante poter essere in grado di confermare il trend dinamico del fenomeno in relazione alle opere di difesa realizzate sono in programma una serie di livellazioni topografiche, misure piezometriche ed inclinometriche, anche per risolvere le incertezze legate alla direzione dello spostamento atteso in rapporto alla LOS.

11 Bibliografia

- AAVV. Progetto Persistent Scatterers Interferometry. Geoportale nazionale. <http://www.pcn.minambiente.it>
- AAVV. <http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/satellite-imagery-air-photos/10782>
- Alba, M., Bernardini, G., Giussani, A., Ricci, P.P., Roncoronia, F., Scaioni, M., Valgoic, P., Zhang, K., 2008. Measurement of dam deformations by terrestrial interferometric techniques. *Int. Arch. Photogramm., Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* 37 (part b1), 133–139.
- Barla, G., Antolini, F., Barla, M., Mensi, E., Piovano, G., 2010. Monitoring of the Beaugard landslide (Aosta Valley, Italy) using advanced and conventional techniques. *Eng. Geol.* 116 (3), 218–235.
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., Sansosti, E., 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 40 (11), 2375–2383.
- Bernardini, G., Ricci, P., Coppi, F., 2007. A ground based microwave interferometer with imaging capabilities for remote measurements of displacements. In: *Proc. GALAHAD Workshop Within the 7th Geomatic Week and the 3rd International Geotelematics Fair (GlobalGeo)*, Barcelona (Spain), 20–23 February.
- Bozzano F., Cipriani I., Esposito C., Mazzanti P., Prestininzi A., 2009. Il contributo dell'interferometria SAR terrestre per il monitoraggio di una colata in terra. *Atti 13a Conferenza Nazionale ASITA – Bari 1-4 Dicembre 2009*, 519–524, ISBN 978-88-903132-2-6.
- Bozzano, F., Cipriani, I., Mazzanti, P., Prestininzi, A., 2011. Displacement patterns of a landslide affected by human activities: insights from ground-based InSAR monitoring. *Nat. Hazards* 59 (3), 1377–1396.
- Bozzano F., Cipriani I., Mazzanti P., Prestininzi, A., 2013. A field experiment for calibrating landslide time-of-failure prediction functions *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol 67, pp. 69-77, DOI: 10.1016/j.ijrmms.2013.12.006.
- Brown, S., Quegan, S., Morrison, K., Bennett, J., Cookmartin, G., 2003. High-resolution measurements of scattering in wheat canopies—implications for crop parameter retrieval. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1602–1610.
- Carulli, G.B., 2006. Carta geologica del Friuli Venezia Giulia alla scala 1:150.000 e Note Illustrative. SELCA (Eds.), Firenze.
- Casagli, N., Farina, P., Leva, D., Nico, G., Tarchi, D., 2003. Ground-based SAR interferometry as a tool for landslide monitoring during emergencies. *Proc. IGARSS 4*, 2924–2926.
- Casagli, N., Catani, F., Del Ventisette, C., Luzi, G., 2010. Monitoring, prediction, and early warning using ground-based radar interferometry. *Landslides* 7 (3), 291–301.

- Colombo A., Poggi F., Triosi C., a cura di. 2012. Le tecniche radarinterferometriche nella pianificazione territoriale. KC Edizioni. ISBN: 978-88-89007-37-2.
- Corsini, A., Berti, M., Monni, A., Pizziolo, M., Bonacini, F., Cervi, F., Truffelli, G., 2013. Rapid assessment of landslide activity in Emilia Romagna using GB-InSAR short surveys. In: *Landslide Science and Practice*. Springer, Berlin, pp. 391–399.
- Crosetto, M., Crippa, B., Biescas, E., Monserrat, O., Agudo, M., Fernández, P., 2005. Land deformation monitoring using SAR interferometry: state-of-the-art. *Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinf.* 6, 497–510.
- Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas, M., Crippa, B., 2011. Spaceborne differential SAR interferometry: data analysis tools for deformation measurement. *Remote Sens.* 3, 305–318.
- Crosetto, M., Monserrat, O., Luzi, G., Cuevas-Gonzalez, M., Devanthery, N., 2014. A non-interferometric procedure for deformation measurement using GB-SAR imagery. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 11 (1), 34–38.
- Cruden D., Varnes D., (1996). *Landslide types and processes*. Landslides. Investigation and Mitigation. Special Report 247. 35-75. Whashington: Transportation Research Borad.
- Del Ventisette, C., Intrieri, E., Luzi, G., Casagli, N., Fanti, R., Leva, D., 2011. Using ground based radar interferometry during emergency: the case of the A3 motorway (Calabria Region, Italy) threatened by a landslide. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 11, 2483–2495.
- Ellegi srl, 2009. Dispense del corso sulla tecnologia LiSALab applicata al monitoraggio dei dissesti idrogeologici. ARPA Piemonte. Rev. 1.
- Ellegi Srl. 2010. Guida alla valutazione e all'impiego della tecnologia GBInSAR LiSALab nel monitoraggio dei dissesti idrogeologici. Rev.3.
- Farina, P., Leoni, L., Babboni, F., Coppi, F., Mayer, L., Ricci, P., 2011. IBIS-M, an innovative radar for monitoring slopes in open-pit mines. In: *Proc., Slope Stability 2011: International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*, Vancouver (Canada), 18–21 September.
- Farina, P., Leoni, L., Babboni, F., Coppi, F., Mayer, L., Coli, N., Thompson, C., 2012. Monitoring engineered and natural slopes by ground-based radar: methodology, data processing and case studies review. In: *Proc. SHIRMS 2012: Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium*, Sun City (South Africa), 15–17 May.
- Farina, P., Coli, N., Yön, R., Eken, G., Ketizmen, H., 2013. Efficient real time stability monitoring of mine walls: the çöllolar mine case study. In: *Proc. International Mining Congress and Exhibition of Turkey*, Antalya (Turkey), 16–19 April, pp.11–117.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 39 (1), 8–20.
- Fortuny, J., Sieber, A.J., 1994. Fast algorithm for a near field synthetic aperture radar processor. *IEEE Trans. Antennas Propagation* 41, 1458–1460.
- Fortuny-Guasch, J., 2009. A fast and accurate far-field pseudopolar format radar imaging algorithm. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 47 (4), 1187–1196.
- Gandolfo, L., Brunetti, A., Bozzano, F., Bratus, A., Busnardo, E., Floris, M., Genevois, R., Mazzanti, P., Saporito, F., 2015. The Ligosullo (UD, Italy) Landslide, Revisiting of Past Data and Prospects from Monitoring Activities. G. Lollino et al. (eds.), *Engineering Geology for Society and Territory*, Volume 5, Springer International Publishing, Switzerland, 171-175.
- Ghiglia, D.C., Pritt, M.D., 1998. *Two-dimensional phase unwrapping: theory, algorithms, and software*. Ed. Wiley, New York (USA).
- Hanssen, R., 2001. *Radar interferometry*. Ed. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (The Netherlands).
- Herrera, G., Fernandez-Merodo, J.A., Mulas, J., Pastor, M., Luzi, G., Monserrat, O., 2009. A landslide forecasting model using ground based SAR data: the Portalet case study. *Eng. Geol.* 105 (3–4), 220–230.

- Hyangsun, H., Hoonyol, L., 2011. Motion of Campbell glacier, east Antarctica, observed by satellite and ground-based interferometric synthetic aperture radar. In: 3rd International Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR) 1 (4), pp. 26–30.
- Iannini, L., Guarnieri, A.M., 2011. Atmospheric phase screen in ground-based radar: statistics and compensation. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 8 (3), 537–541.
- IDS. 2013. IBS Guardian Software v. 02.00 – User Manual. IDS Ingegneria Dei Sistemi S.p.A., Pisa, Italy.
- Iglesias, R., Fabregas, X., Aguasca, A., Mallorqui, J.J., Lopez-Martinez, C., Gili, J.A., Corominas, J., 2013. Atmospheric phase screen compensation in ground-based SAR with a multiple-regression model over mountainous regions. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 99, 1–14.
- Intrieri, E., Di Traglia, F., Del Ventisette, C., Gigli, G., Mugnai, F., Luzi, G., Casagli, N., 2013. Flank instability of Stromboli volcano (Aeolian Islands, Southern Italy): integration of GB-InSAR and geomorphological observations. *Geomorphology* 201, 60–69.
- Jungner, A., 2009. Ground-based synthetic aperture radar data processing for deformation measurement. Master thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Division of Geodesy. Stockholm, Sweden.
- Ketelaar V. B. H. (Gini). 2009. *Satellite Radar Interferometry: Subsidence Monitoring Techniques*. Springer. ISBN-13: 978-9048181254.
- Lee, H., Lee, J.H., Kim, K.E., Sung, N.H., Cho, S.J., 2013. Development of a truckmounted arc-scanning synthetic aperture radar. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* (In press).
- Leva, D., Nico, G., Tarchi, D., Fortuny, J., Sieber, A.J., 2003. Temporal analysis of a landslide by means of a ground-based SAR interferometer. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 41, 745–752.
- Leva, D., Rivolta, C., Binda Rossetti, I., Kuzuoka, S., Mizuno, T., 2005. Using a ground based interferometric synthetic aperture radar (GBinSAR) sensor to monitor a landslide in Japan. *Proc. IGARSS 6*, 4096–4099.
- Lin, Q., Vesecky, J.F., Zebker, H.A., 1992. New approaches in interferometric SAR data processing. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 30, 560–567.
- Lukin, K., Mogyla, A., Palamarchuk, V., Vyplavin, P., Lukin, S., Kozhan, E., 2009. Monitoring of Kiev St. Sophia cathedral using Ka-band ground based noise SAR. In: *Proc. 6th Radar Conference, EURAD2009*, Rome, Italy, pp. 215–217.
- Luzi, G., Pieraccini, M., Mecatti, D., Noferini, L., Guidi, G., Moia, F., Atzeni, C., 2004. Ground-based radar interferometry for landslides monitoring: atmospheric and instrumental decorrelation sources on experimental data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 42 (11), 2454–2466.
- Luzi, G., Pieraccini, M., Mecatti, D., Noferini, L., Macaluso, G., Galgaro, A., Atzeni, C., 2006. Advances in ground based microwave interferometry for landslide survey: a case study. *Int. J. Remote Sens.* 27 (12), 2331–2350.
- Luzi, G., Pieraccini, M., Mecatti, D., Noferini, L., Macaluso, G., Tamburini, A., Atzeni, C., 2007. Monitoring of an alpine glacier by means of ground-based SAR interferometry. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 4 (3), 495–499.
- Luzi, G., Noferini, L., Mecatti, D., Macaluso, G., Pieraccini, M., Atzeni, C., Schaffhauser, A., Fromm, R., Nagler, T., 2009. Using a ground-based SAR interferometer and a terrestrial laser scanner to monitor a snow-covered slope: results from an experimental data collection in Tyrol (Austria). *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 47, 382–394.
- Luzi, G., Monserrat, O., Crosetto, M., Copons, R., Altimir, J., 2010a. Ground-based SAR interferometry applied to landslide monitoring in mountainous areas. In: *Proc. Mountain Risks Conference*, Florence, Italy, 24–26 November.
- Luzi, C., Del Ventisette, C., Casagli, N., 2010b. Monitoring deformation of the sciara del fuoco (Stromboli) through ground-based radar interferometry. *Acta Vulcanologica* 22 (1), 77–84.
- Luzi, G., Crosetto, M., Monserrat, O., 2010c. Advanced Techniques for Dam Monitoring. In: *Proc. II International Congress on Dam Maintenance and Rehabilitation*, Zaragoza, Spain, 23–25 November.
- Manca P. (2006): Il progetto IFFI ed i risultati nella Regione Friuli Venezia Giulia. *Congresso: I fenomeni franosi e gli strumenti per la loro mitigazione*. Trieste 23-24 febbraio 2006.

- Martínez-Vázquez, A., Fortuny-Guasch, J., 2008. A GB-SAR processor for snow avalanche identification. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 46 (11), 3948–3956.
- Martínez-Vázquez, A., 2008. Snow cover monitoring techniques with GB-SAR. PhD thesis, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Martino S. e Mazzanti P., 2014. Integrating geomechanical surveys and remote sensing for sea cliff slope stability analysis: the Mt. Pucci case study (Italy) *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, Vol. 14, pp. 831–848, DOI: 10.5194/nhess-14-831-2014.
- Mazzanti P., Moretti S., Tripoli O., Cipriani I., Carraro C., Sascor E., D’Aria D., Giudici D., 2009. Analisi combinata Laser Scanner ed Interferometria SAR Terrestre per l’analisi dei crolli in roccia: un caso di studio nella città di Bolzano. *Atti 13a Conferenza Nazionale ASITA – Bari 1-4 Dicembre 2009*, 1417-1422, ISBN 978-88-903132-2-6.
- Mazzanti P., Brunetti A., 2010. Assessing rockfall susceptibility by Terrestrial SAR Interferometry. In: Malet J.P., Glade T., Casagli N. (eds), *Proceedings of the Mountain Risks International Conference*, Firenze, Italy, 24-26 November 2010, pp. 109-114.
- Mazzanti P., 2012. Remote monitoring of deformation using Terrestrial SAR Interferometry (TInSAR, GBInSAR).
- Mazzanti P., Bozzano F., Rocca A., 2013. Monitoring natural slopes and man made structures by TInSAR: understanding behavior and forecasting methods. *GEOTECHNICAL DIVISION 33RD ANNUAL SEMINAR “Geotechnical Aspects of Housing Supply and Development”*, Hong Kong, 31 May 2013, pp. 187-192. *Geotechnical News*, Marzo 2012, pp.31, ISSN: 0823-650X.
- Mazzanti P., Bozzano F., Cipriani I., Prestininzi A., 2014. New insights into the temporal prediction of landslides by a terrestrial SAR interferometry monitoring case study *Landslides*, DOI: 10.1007/s10346-014-0469-x.
- Mecatti, D., Macaluso, G., Barucci, A., Noferini, L., Pieraccini, M., Atzeni, C., 2010. Monitoring open-pit quarries by interferometric radar for safety purposes. In: *Proc. European Radar Conference (EuRAD)*, Paris, France, 30 September–1 October, pp. 37–40.
- Meta, A., Trampuz, C., 2009. Metasensing compact, high resolution interferometric SAR sensor for commercial and scientific applications. In: *Proc. of the 7th Radar Conference, EURAD*, Rome, Italy, pp. 21–24.
- Mohr, J.J.(2005). *SAR Light an introduction to Synthetic Aperture Radar*. Version 2.0 August 9, 2005, NB 238 available on <http://www.gfy.ku.dk/~cct/sat07/NB238.pdf>.
- Monserrat, O., 2012. Deformation measurement and monitoring with ground-based SAR. PhD thesis, Technical University of Catalonia.
- Monserrat, O., Moya, J., Luzi, G., Crosetto, M., Gili, J.A., Corominas, J., 2013. Noninterferometric GB-SAR measurement: application to the Vallcebre landslide (eastern Pyrenees, Spain). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 13 (7), 1873–1887.
- Monserrat, O., Crosetto, M., Luzi, G., 2014. A review of ground based SAR interferometry for deformation and measurement. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 93, 40-48.
- Nico, G., Leva, D., Antonello, G., Tarchi, D., 2004. Ground-based SAR interferometry for terrain mapping: theory and sensitivity analysis. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 42 (6), 1344–1350.
- Nico, G., Leva, D., Fortuny-Guasch, J., Antonello, G., Tarchi, D., 2005. Generation of digital terrain models with a ground-based SAR system. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 43 (1), 45–49.
- Noferini, L., 2004. Processing techniques of microwave data acquired by continuous wave stepped frequency radar. PhD thesis, Università degli Studi di Firenze.
- Noferini, L., Pieraccini, M., Mecatti, D., Macaluso, G., Atzeni, C., 2005a. Long term and slide monitoring by ground based SAR interferometer. *Int. J. Remote Sens.* 27, 1893–1905.
- Noferini, L., Pieraccini, M., Mecatti, D., Luzi, G., Tamburini, A., Broccolato, M., Atzeni C., 2005b. Permanent scatters analysis for atmospheric correction in groundbased SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 43 (7), 1459–1471.

- Noferini, L., Pieraccini, M., Mecatti, D., Macaluso, G., Luzi, G., Atzeni, C., 2007. DEM by ground-based SAR interferometry. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 4 (4), 659–663.
- Noferini, L., Takayama, T., Mecatti, D., Macaluso, G., Luzi, G., Atzeni, C., 2008. Analysis of ground-based SAR data with diverse temporal baselines. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 46 (6), 1614–1623.
- Noferini, L., Mecatti, D., Macaluso, G., Pieraccini, M., Atzeni, C., 2009. Monitoring of belvedere glacier using a wide angle GB-SAR interferometer. *J. Appl. Geophys.* 68 (2), 289–293.
- Noon, D., Harries, N., 2007. Slope stability radar for managing rock fall risks in open cut mines. In: *Proc. Large Open Pit Mining Conference Perth, Australia, 10–11 September 2007.*
- Ozdemir, C., Yigit, E., Demirci, S., 2011. A comparison of focusing algorithms for ground based SAR. In: *Proc PIERS. Marrakesh, Morocco, 20–23 March*, pp. 548–553.
- Pieraccini, M., Luzi, G., Atzeni, C., 2001. Terrain mapping by ground-based interferometric radar. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 39 (10), 2176–2181.
- Pieraccini, M., Luzi, G., Mecatti, D., Fratini, M., Noferini, L., Carissimi, L., Franchioni, G., Atzeni, C., 2004. Remote sensing of building structural displacements using a microwave interferometer with imaging capability. *Non Destruct. Test. Eval.* 37 (7), 545–550.
- Pieraccini, M., 2013. Real beam vs. synthetic aperture radar for slope monitoring. In: *Proc. PIERS 2013, Stockholm, Sweden, 12–15 August.*
- Pipia, L., Fabregas, X., Aguasca, A., Lopez-Martinez, C., 2013. Polarimetric temporal analysis of urban environments with a ground-based SAR. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 51 (4), 2343–2360.
- Reale, D., Serafino, F., Pascazio, V., 2009. An accurate strategy for 3-D ground-based SAR imaging. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 6 (4), 681–685.
- Riesen, P., Strozzi, T., Bauder, A., Wiesmann, A., Funk, M., 2011. Short-term surface ice motion variations measured with a ground-based portable real aperture radar interferometer. *J. Glaciol.* 57 (201), 53–60.
- Rödelsperger, S., Becker, M., Gerstenecker, C., Läufer, G., Schilling, K., Steineck, D., 2010. Digital elevation model with the ground-based SAR IBIS-L as basis for volcanic deformation monitoring. *J. Geodyn.* 49 (3–4), 241–246.
- Rödelsperger, S., 2011. Real-time processing of ground based synthetic aperture radar (GB-SAR) measurements. PhD thesis, Technische Universität Darmstadt.
- Schaffhauser, A., Adams, M., Fromm, R., Jörg, P., Luzi, G., Noferini, L., Sailer, R., 2008. Remote sensing based retrieval of snow cover properties. *Cold Reg. Sci. Technol.* 54 (3), 164–175.
- Schulz, W.H., Coe, J.A., Shurtleff, B.L., Panosky, J., Farina, P., Ricci, P.P., Barsacchi, G., 2012. Kinematics of the Slumgullion landslide revealed by ground-based InSAR surveys. In: *Proc. Landslides and Engineered Slopes: Protecting Society through Improved Understanding – the 11th International and 2nd North American Symposium on Landslides and Engineered Slopes, Banff (Canada), 3–8 June*, pp. 1273–1279.
- Severin, J., Eberhardt, E., Leoni, L., Fortin, S., 2011. Use of ground-based synthetic aperture radar to investigate complex 3-D pit slope kinematics. In: *Proc. Slope Stability 2011: International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering, Vancouver, Canada, 18–21 September.*
- Strozzi, T., Werner, C., Wiesmann, A., Wegmuller, U., 2012. Topography mapping with a portable real-aperture radar interferometer. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 9 (2), 277–281.
- Takahashi, K., Matsumoto, M., Sato, M., 2013. Continuous observation of natural disaster- affected areas using ground-based SAR interferometry. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observations Remote Sens.* 6 (3), 1286–1294.
- Tapete, D., Casagli, N., Luzi, G., Fanti, R., Gigli, G., Leva, D., 2013. Integrating radar and laser-based remote sensing techniques for monitoring structural deformation of archaeological monuments. *J. Archaeol. Sci.* 40 (1), 176–189.
- Tarchi, D., Ohlmer, E., Sieber, A.J., 1997. Monitoring of structural changes by radar interferometry. *J. Res. Nondestruct. Eval.* 9 (4), 213–225.
- Tarchi, D., Rudolf, H., Luzi, G., Chiarantini, L., Coppo, P., Sieber, A.J., 1999. SAR interferometry for structural changes detection: a demonstration test on a dam. In: *Proc. IGARSS 1999, Hamburg, Germany, pp. 1522–1524.*

- Tarchi, D., Casagli, N., Fanti, R., Leva, D., Luzi, G., Pasuto, A., Pieraccini, M., Silvano, S., 2003a. Landslide monitoring by using ground-based SAR interferometry: an example of application. *Eng. Geol.* 68 (1–2), 15–30.
- Tarchi, D., Casagli, N., Moretti, S., Leva, D., Sieber, A.J., 2003b. Monitoring landslide displacements by using ground-based radar interferometry: application to the Ruinon landslide in the Italian alps. *J. Geophys. Res.* 108 (10), 1–14.
- Tarchi, D., Antonello, G., Casagli, N., Farina, P., Fortuny-Guasch, J., Guerri, L., Leva, D., 2005. On the use of ground-based SAR interferometry for slope failure early warning: the Cortenova rock slide (Italy). In: *Landslides: Risk Analysis and Sustainable Disaster Management*. Ed. Springer, Berlin Heidelberg, pp. 337–342.
- Tarchi, D., Lukin, K., Fortuny-Guash, J., Mogyla, A., Vyplavin, P., Sieber, A., 2010. SAR imaging with noise. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* 46 (3), 1214–1225.
- Tarchi, D., Olivieri, F., Sammartino, P.F., 2013. MIMO radar and ground-based SAR imaging systems: equivalent approaches for remote sensing. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. Lett.* 51 (1).
- Ulaby, F.T., Moore, R.K., Fung, A.K., 1986. *Microwave Remote Sensing: Active and Passive*. In: *Volume Scattering and Emission Theory, Advanced Systems and Applications*. Artech House Inc, Dedham, Massachusetts, vol. III.
- Voytenko, D., Dixon, T.H., Werner, C., Gourmelen, N., Howat, I.M., Tinder, P.C., Hooper, A., 2012. Monitoring a glacier in southeastern Iceland with the portable terrestrial radar interferometer. *Proc. IGARSS*, 3230–3232.
- Zhou, Z.S., Boerner, W.M., Sato, M., 2004. Development of a ground-based polarimetric broadband SAR system for noninvasive ground-truth validation in vegetation monitoring. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 42 (11), 1803–1810.

Un grazie a Diana, Teo, Sara, Chiara, Emanuele, Antonella, Giorgio, Paolo, Alessandro, Pierpaolo e a tutti quelli che senza saperlo hanno contribuito a questo lavoro