

# ANALISI INTERFEROMETRICA STORICA E RELAZIONE PRELIMINARE

## APPENDICE E PARTE 1 DEL SIA

### IMPIANTO SMALL SCALE LNG PLANT

Collesanto gas field

-	01	04/12/2023	EMISSIONE PER ENTI	Geoservizi srl	Engea Consulting srl	ITF Cosmep
-	00	24/11/2023	EMISSIONE PER ENTI	Geoservizi srl	Engea Consulting srl	ITF Cosmep
Status	Rev. n.	Data	Descrizione	Elaborato	Verificato	Approvato

## Indice

<b>1</b>	<b>Principi teorici dell'interferometria SAR satellitare .....</b>	<b>3</b>
1.1	L'Interferometria SAR Satellitare.....	3
1.2	Generalità sui sistemi SAR (Synthetic Aperture Radar).....	3
1.3	Le immagini SAR satellitari .....	5
1.4	La costellazione COSMO-SkyMed dell'Agenzia Spaziale Italiana (ASI).....	7
1.5	Analisi con metodologia Advanced DInSAR.....	9
<b>2</b>	<b>Analisi storica delle deformazioni superficiali mediante interferometria SAR satellitare differenziale avanzata (A-DInSAR).....</b>	<b>12</b>
2.1	Attività svolte.....	13
2.2	Selezione ed acquisizione delle immagini SAR satellitari e dei dati di base.....	13
<b>3</b>	<b>Elaborazione immagini SAR con Interferometria SAR Satellitare .....</b>	<b>16</b>
<b>4</b>	<b>Post-elaborazione e validazione dei risultati.....</b>	<b>17</b>
<b>5</b>	<b>Risultati ottenuti .....</b>	<b>20</b>
5.1	Aree di focus.....	27
<b>6</b>	<b>European Ground Motion Service (EGMS).....</b>	<b>40</b>
6.1	Risultati post elaborazione EGMS .....	40
<b>7</b>	<b>Considerazioni conclusive.....</b>	<b>44</b>
<b>8</b>	<b>Glossario.....</b>	<b>45</b>
<b>9</b>	<b>Bibliografia .....</b>	<b>46</b>

## 1 Principi teorici dell'interferometria SAR satellitare

### 1.1 L'Interferometria SAR Satellitare

L'InSAR (Interferometric Synthetic Aperture RADAR) (Hanssen, 2001; Massonnet D. & Feigl, 1998), che si basa sul confronto di immagini RADAR acquisite in tempi diversi, rappresenta la principale metodologia di telerilevamento satellitare impiegata ad oggi per la misura degli spostamenti della superficie terrestre e delle strutture presenti su di essa. Il principio alla base delle metodologie Multi-Image InSAR o Advanced DInSAR (A- DInSAR) è costituito dalla combinazione delle informazioni provenienti da un elevato numero di immagini, che permette la ricostruzione di serie temporali di spostamento di oggetti a terra ben visibili dal satellite nell'intero periodo analizzato. Tale approccio viene condiviso da diverse metodologie di analisi che hanno in comune l'obiettivo di ottimizzare le informazioni di spostamento racchiuse nel segnale delle immagini SAR acquisite in tempi diversi su una medesima area.

L'utilizzo delle tecniche A-DInSAR permette, non solo di individuare un dato processo deformativo, passato o in atto, ma anche di stimarne l'evoluzione nel tempo e nello spazio. Di seguito sono presentati con maggior dettaglio alcuni approfondimenti tecnici sui sistemi InSAR satellitari e sulla metodologia A-DInSAR, adottata in questo lavoro.

### 1.2 Generalità sui sistemi SAR (Synthetic Aperture Radar)

Per RADAR (Radio Detection And Ranging) si intende un sistema in grado di emettere un impulso di energia elettromagnetica e di registrarne il segnale di ritorno (eco), prodotto a seguito della riflessione di un oggetto al suolo (target). Tale impulso si propaga come segnale elettromagnetico avente lunghezza d'onda  $\lambda$  nel dominio delle microonde. I sistemi RADAR rappresentano strumenti di telerilevamento attivi poiché non è richiesta illuminazione solare e le frequenze utilizzate sono in grado di attraversare la copertura nuvolosa. Con tale sistema si è quindi in grado di determinare la presenza e la distanza degli oggetti presenti sulla scena. Le capacità di riflessione degli oggetti presenti sulla superficie osservata assumono un'importanza fondamentale così come le proprietà dielettriche (capacità di condurre/trasmettere) di tali superfici.

Il sistema SAR (Synthetic Aperture Radar) è una particolare tipologia di radar la cui caratteristica è di sfruttare il moto lungo una traiettoria predefinita (come, ad esempio, l'orbita di un satellite su cui è montato il sensore) per osservare la stessa area da più angoli di vista, "simulando" quindi un'antenna di grandi dimensioni, al fine di incrementare la risoluzione al suolo. Questa particolare geometria di acquisizione è schematizzata in Figura 1-1.

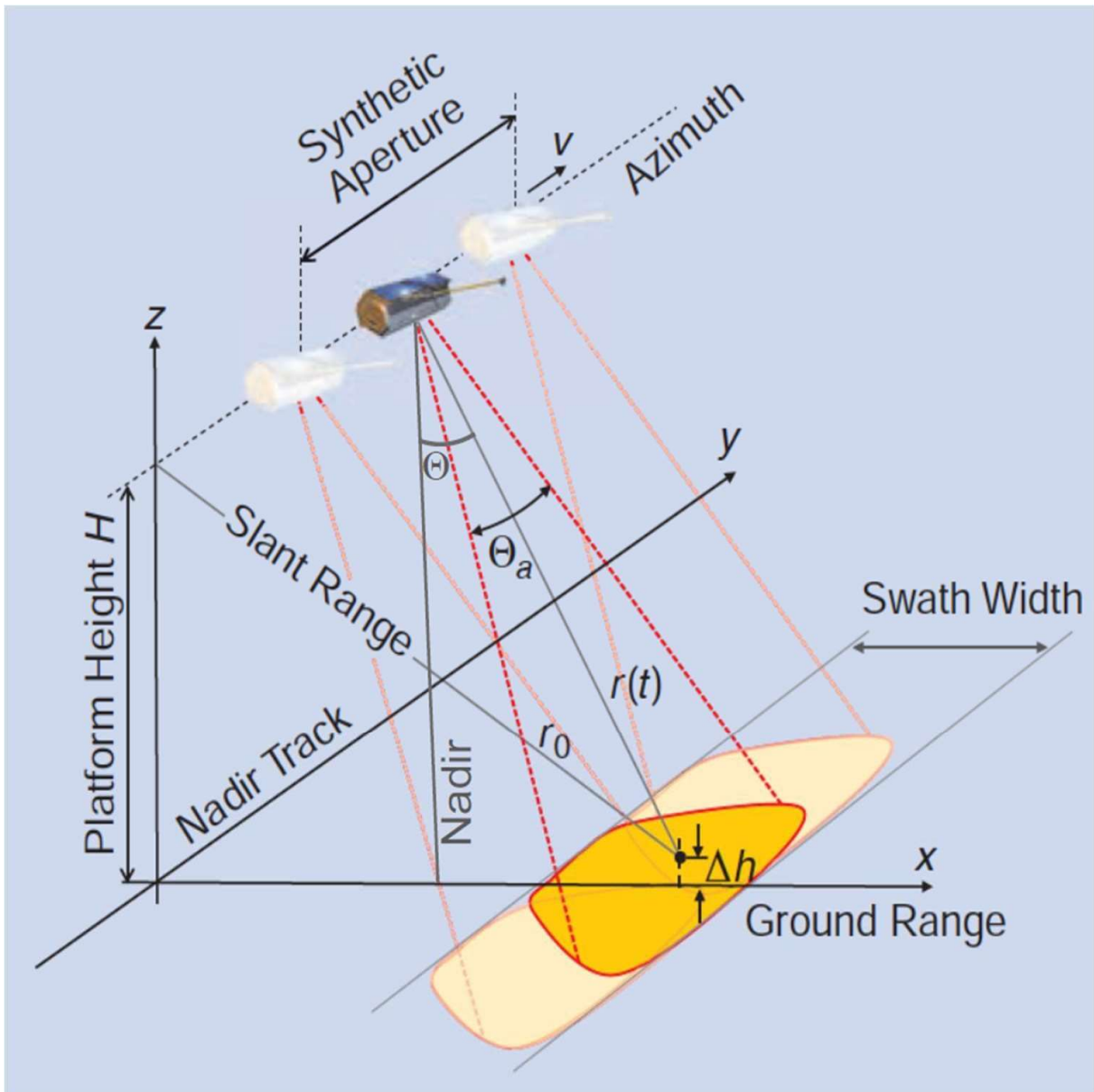


Figura 1-1 - Geometria di acquisizione SAR (Moreira A., 2013). Le immagini acquisite, rilevate lungo la congiungente sensore-bersaglio (LOS, Line of Sight), sono caratterizzate da una risoluzione in Slant Range e in Azimuth.

La prima (Slant Range) si riferisce alla risoluzione lungo la direzione di propagazione del segnale, perpendicolare all'orbita e inclinata di un angolo  $\vartheta$  - detto off-nadir - rispetto alla normale al suolo.

La seconda (Azimuth) si riferisce alla risoluzione lungo la direzione di volo del satellite, che, in prima approssimazione, può essere considerata quasi Nord-Sud.

### 1.3 Le immagini SAR satellitari

L'immagine SAR satellitare è composta, quindi, da una matrice di pixel disposti lungo le direzioni di azimuth (parallela al movimento del satellite) e di slant range (perpendicolare a quest'ultima).

Ogni pixel contiene le informazioni di ampiezza e fase del segnale retrodiffuso dagli oggetti presenti sulla superficie osservata.

Mentre l'ampiezza individua l'energia del segnale riflesso verso il sensore, la fase racchiude l'informazione più importante ai fini delle applicazioni interferometriche, ovvero il percorso compiuto dal segnale lungo il tragitto sensore-target.

I satelliti possono acquisire in due geometrie diverse: il passaggio del satellite su una stessa area avviene in direzione circa Nord-Sud (geometria discendente) ed in direzione circa Sud-Nord (geometria ascendente) (Figura 1-2). A causa della configurazione side- looking dei satelliti, la stessa area, quindi, viene rilevata da due angoli di vista quasi complementari.

È bene osservare che la geometria di acquisizione, anche in funzione delle orbite dei sensori SAR, può determinare delle difficoltà oggettive nel rilevamento degli spostamenti con determinate caratteristiche. Ad esempio, in aree caratterizzate da elevata energia di rilievo o con geometria speculare rispetto all'inclinazione di misura del satellite sul piano orizzontale si possono presentare problemi di distorsione dell'immagine (layover) o addirittura zone d'ombra (shadowing) che possono rendere difficoltosa l'analisi dei dati (Figura 1-3).

Inoltre, sotto determinate condizioni di movimento (es. spostamenti a forte componente orizzontale con prevalente direzione N-S o con determinate inclinazioni), può risultare possibile l'analisi del dato ma non la misura accurata del movimento. In questi ultimi casi, se non analizzati attentamente, si possono determinare interpretazioni errate o non congruenti con il fenomeno indagato.

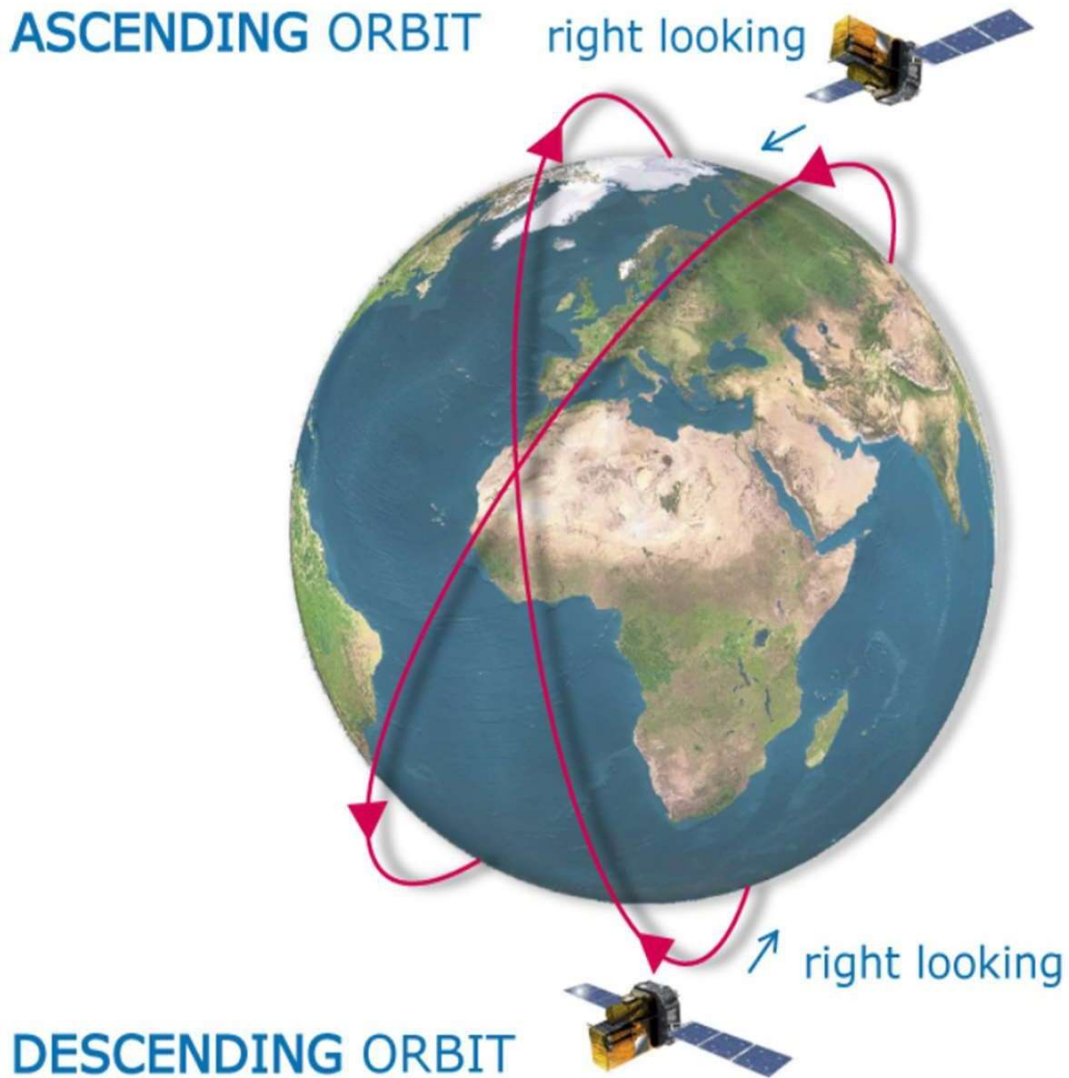


Figura 1-2 -Geometrie di acquisizione delle immagini SAR.

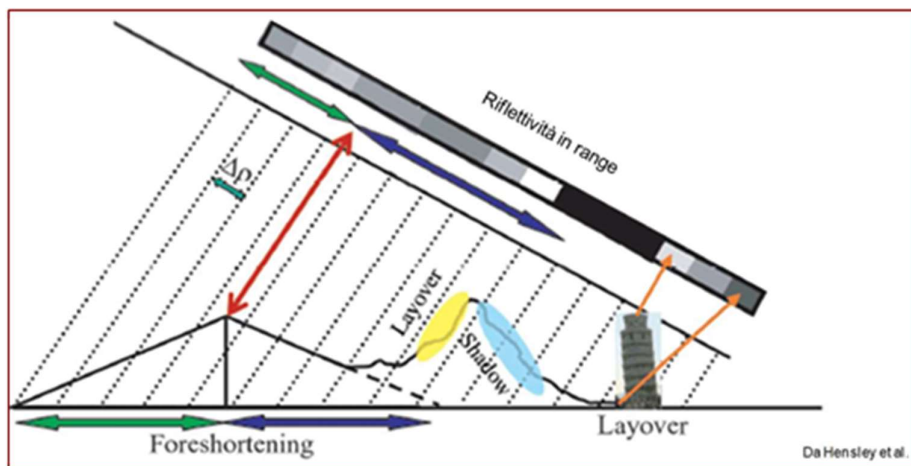


Figura 1-3 -Principali distorsioni geometriche.

## 1.4 La costellazione COSMO-SkyMed dell’Agenzia Spaziale Italiana (ASI)

La costellazione COSMO-SkyMed è un sistema composto da quattro satelliti “gemelli”. Il primo satellite è stato lanciato nel giugno 2007, mentre la costellazione è stata completata nel novembre 2010 con il lancio del quarto satellite.

Tutti i satelliti sono dotati di sensori RADAR ad apertura sintetica (SAR) ad alta risoluzione in banda X (con lunghezza d’onda pari a 3,1 cm), in grado di osservare attraverso la copertura nuvolosa e in assenza di luce solare.

Il sistema è stato concepito con scopi duali, ovvero civili e militari, mediante una condivisione regolamentata della risorsa.

Il sensore può acquisire con diverse risoluzioni (inversamente proporzionale all’estensione areale dell’osservazione), a seconda delle configurazioni impostate: “Spotlight” (risoluzione metrica su un’area di pochi km quadrati), “Stripmap” (risoluzione di 3 m per l’acquisizione di una striscia continua di superficie terrestre larga 40 km) e “scanSAR” (risoluzione di 100 m per l’acquisizione di un’area di 200 km<sup>2</sup>).

Principi di base dell’Interferometria SAR differenziale (DInSAR)

La tecnica tradizionale per la derivazione di informazioni di spostamenti da dati SAR è l’Interferometria differenziale (DInSAR), che si basa sull’analisi della variazione del valore di fase tra due distinte acquisizioni e permette di calcolare gli spostamenti della superficie terrestre.

L’informazione sulla differenza di fase viene ricavata dal cosiddetto Interferogramma, che costituisce l’elemento basilare della metodologia.

In particolare, la fase di ogni pixel è formata dalla somma di due termini:

$$\varphi = \varphi_s + \varphi_r \quad [1]$$

Il primo ( $\varphi_s$ ) è legato ai retrodiffusori presenti nella scena, il secondo ( $\varphi_r$ ) dipende dal doppio percorso **Satellite – Punto di misura** e dalla lunghezza d’onda dell’impulso elettromagnetico inviato e successivamente registrato dal sensore stesso:

$$\varphi_r = 4 \cdot \pi \cdot r \cdot \lambda \quad [2]$$

dove  $r$  è la distanza satellite-punto di misura valutata nella direzione di range e  $\lambda$  è la lunghezza d’onda. Tuttavia, la fase di una singola immagine SAR è inutilizzabile in quanto:

è casuale;

contiene decine di milioni di angoli giro (poiché le  $\lambda$  sono di pochi centimetri e  $r$  di qualche centinaio di chilometri).

Infatti, l’onda elettromagnetica, per il generico pixel, viene inviata verso la superficie terrestre dall’antenna SAR e, durante il percorso Satellite – Punto di misura, l’onda compie milioni di cicli e successivamente colpisce tale porzione di territorio con una determinata fase. Successivamente viene quindi retrodiffusa dai vari oggetti (componente

casuale a causa delle riflessioni multiple) e ritorna al satellite che, con opportuni sistemi di acquisizione, registra l’informazione.

Considerando invece la differenza di fase fra due immagini SAR, il termine

$\varphi_s$   
 si annulla, nell'ipotesi che le caratteristiche di retrodiffusione siano rimaste immutate e la fase interferometrica

sia uguale a:  
 $\Delta\phi$

$$\Delta\phi = 4 \cdot \pi \lambda \cdot \Delta R \quad [3]$$

è caratterizzata dai seguenti contributi principali:

$$\Delta\phi = \Delta\phi_f + \Delta\phi_{\text{topo}} + \Delta\phi_{\text{displ}} + \Delta\phi_{\text{atm}} + \Delta\phi_{\text{err}} \quad [4]$$

La

$\Delta\phi_f$   
 è detta fase di terra piatta (flat earth) ed è dovuta ai differenti angoli di vista dei satelliti al momento dell'acquisizione dell'immagine. Rappresenta un contributo di disturbo facilmente rimovibile.

La

$$\Delta\phi_{\text{topo}}$$

topo è la componente di fase che contiene l'informazione topografica, ovvero la relazione tra fase e quote. Questo contributo di fase viene stimato mediante l'utilizzo di un DEM (Digital Elevation Model).

La

$$\Delta\phi_{\text{atm}}$$

rappresenta un disturbo causato dal contributo di fase interferometrica generata al variare delle condizioni atmosferiche tra le diverse acquisizioni delle immagini SAR.

La

$$\Delta\phi_{\text{displ}}$$

è il contributo alla fase interferometrica totale dovuti agli spostamenti della superficie terrestre.

La  $\Delta\phi_{\text{err}}$  è rumore di decorrelazione non direttamente determinabile.

L'interferogramma differenziale è ottenuto a partire dalla (4) dopo aver corretto il contributo di terra piatta ed eliminato la fase topografica, utilizzando un DEM. Alla fase di spostamento restano sommati il contributo atmosferico e gli eventuali errori. Il sistema di acquisizione delle immagini che formano la coppia interferometrica è caratterizzato dalla baseline geometrica (detta baseline normale o perpendicolare) (Figura 1-4) e dalla baseline temporale (ovvero l'intervallo di tempo tra le due acquisizioni), che influenzano e, in taluni casi, compromettono la qualità dei risultati ottenuti con l'analisi DiNSAR.

La baseline normale è legata alla diversa posizione occupata dal satellite durante i vari passaggi lungo la stessa orbita. Questo avviene perché essi si discostano leggermente dalla traiettoria nominale; di fatto, vi sono delle variazioni dell'ordine delle centinaia di metri tra le orbite percorse dal satellite nei passaggi successivi e di



conseguenza la geometria di acquisizione per la stessa zona presenta di volta in volta angoli leggermente diversi.

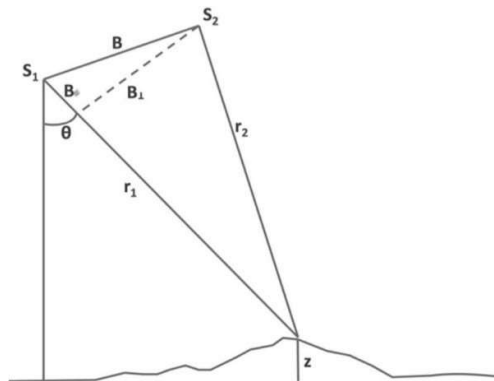


Figura 1-4 - Baseline geometrica. Geometria di acquisizione di due immagini SAR.  $S_1$  e  $S_2$  rappresentano la posizione dei satelliti in tempi diversi;  $\theta$  è l'angolo nadir-off;  $r_1$  e  $r_2$  sono la distanza satellite-bersaglio per le due acquisizioni;  $B$  rappresenta la baseline geometrica (esagerato per chiarezza) mentre  $z$  rappresenta l'altezza topografica rilevata.

La baseline temporale, invece, causa un disturbo noto come temporal decorrelation che diventa più evidente nel caso in cui il tempo intercorso fra le due immagini SAR è molto lungo. Tale degradazione della qualità dipende dal fatto che nell'intervallo temporale, possono avvenire dei cambiamenti delle condizioni che rendono non valida l'eguaglianza dei termini di fase  $\phi_s$  fra le due immagini. Le cause principali di tale variazione sono: variazioni della copertura vegetale (es. incendi o deforestazioni; tipo di vegetazione stagionale), gelate, disgeli, costruzione di opere e strutture o manufatti.

L'interpretazione dei dati interferometrici può essere ulteriormente complicata dalla variazione delle condizioni atmosferiche durante le due acquisizioni. La presenza di disturbo atmosferico rappresenta uno dei principali limiti per l'osservazione delle deformazioni; con una sola coppia di immagini SAR, tuttavia, non è possibile stimare ed eliminare questo disturbo.

## 1.5 Analisi con metodologia Advanced DInSAR

Lo sviluppo delle tecniche interferometriche multi-image (o Advanced DInSAR – A- DInSAR), ha rappresentato un notevole passo in avanti nell'analisi dei fenomeni deformativi della superficie terrestre attraverso l'uso di immagini SAR satellitari. Innanzitutto, l'uso di dataset composti da molte immagini SAR consente la stima e la rimozione del contributo atmosferico, che è in grado di nascondere i processi deformativi. Tali metodologie, inoltre, consentono l'analisi multitemporale dei processi deformativi con la possibilità di ottenere serie temporali di spostamento per molti oggetti sulla scena osservata.

La più nota tecnica A-DInSAR si basa sull'analisi di oggetti molto "stabili", da un punto di vista radaristico, e naturalmente presenti nell'area d'interesse. Tali target, caratterizzati da un'elevata qualità del segnale radar nel tempo, costituiscono dei veri e propri punti di misura (measurement point - MP) interferometrici (Kampes, 2006). Tali "punti di misura" privilegiati, che il satellite identifica sul territorio hanno proprietà tali da consentire stime accurate della loro distanza dal sensore, con la possibilità di individuare e quantificare spostamenti di frazioni di centimetro. Sono buoni riflettori quei punti di misura che presentano una buona e stabile retrodiffusione del segnale radar emesso dal satellite. Tale caratteristica è propria di target come edifici, vie di comunicazione (strade, ferrovie), tralicci e opere quali dighe, ponti ecc. In particolari condizioni, rappresentano dei buoni riflettori anche le rocce esposte.

Questa fitta rete naturale di "punti di misura" permette di conoscere sia lo spostamento locale (es. un singolo edificio), sia di ricostruire, su scala più ampia, l'andamento dei moti superficiali (es. frane, subsidenze, faglie, ecc.).

Alla base dell'individuazione di ogni punto di misura c'è un'analisi statistica di time series di immagini radar.

Le misure di spostamento e di velocità dei punti di misura riguardano solo la componente dello spostamento e della velocità lungo la linea di vista del sensore (LOS). Questo implica che i movimenti misurati sono in realtà la proiezione degli spostamenti del punto lungo la congiungente sensore-bersaglio. In presenza di moti puramente verticali (es. subsidenza), il movimento stimato è facilmente riconducibile alla deformazione lungo la direzione verticale, ma se il bersaglio in analisi presenta anche spostamenti orizzontali, la misura ottenuta è il risultato della combinazione plano-altimetrica degli spostamenti. Utilizzando una sola geometria di acquisizione non è in generale possibile distinguere i due contributi a meno di assunzioni a priori.

Inoltre, le misure di spostamento sono di tipo relativo nel tempo (rispetto all'acquisizione di riferimento, immagine master) e nello spazio (rispetto a un punto di riferimento considerato stabile, detto reference point).

Infatti, l'analisi prevede la scelta di un'immagine master, legata all'esigenza di minimizzare i fenomeni di decorrelazione temporale e geometrica. Si sceglie quindi come master l'immagine del dataset che minimizza la dispersione di baseline temporali e geometriche rispetto alle altre immagini del dataset, definite slave.

Le misure di velocità calcolate sono differenziali: esse non esprimono un valore assoluto di spostamento di un punto a terra ma indicano le velocità del punto di misura in relazione ad uno scelto come riferimento (il reference point). Tale punto è un target radar di misura che per ipotesi è considerato fermo e rispetto al quale tutte le altre velocità vengono calcolate.

A ciascun punto di misura è associato un valore di coerenza temporale che misura l'accordo tra i dati e i modelli di spostamento utilizzati in fase di analisi. Tuttavia, se le caratteristiche dei retrodiffusori cambiano tra un'osservazione e l'altra, la fase interferometrica contiene un rumore casuale che inciderà l'affidabilità dei risultati ottenuti. L'entità di tale rumore viene valutata attraverso l'immagine di coerenza fra le due immagini SAR della coppia interferometrica; in altri termini, la coerenza è una misura indiretta del disturbo della fase interferometrica. Il valore della funzione di coerenza varia fra 0 (assenza di correlazione fra pixel corrispondenti delle due SAR) e 1 (massima correlazione).

Dall'elaborazione con la tecnica A-DInSAR, si ricavano per ciascun punto di misura:

- la posizione (ovvero le sue coordinate geografiche: latitudine e longitudine);
- la velocità media di spostamento (lungo la congiungente sensore-bersaglio, LOS) in mm/anno, con una accuratezza in funzione del numero di immagini disponibili e del sensore utilizzato, che in condizioni ottimali raggiunge valori millimetrici;
- la serie storica di spostamento, a partire dal primo dato disponibile, con un'accuratezza pari a pochi millimetri sulla singola misura per i punti più affidabili.

Numerosi sono i vantaggi che questa tecnica di telerilevamento ha introdotto per l'indagine degli spostamenti:

- i punti di misura formano una "rete geodetica naturale", ovvero sono oggetti già presenti sul territorio, quali edifici, vie di comunicazione (strade, ferrovie), elementi antropici, rocce esposte, per i quali, grazie ai dati acquisiti dai satelliti ERS dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA), è possibile stimare misure di spostamento a partire dal 1992 per l'analisi dei fenomeni di deformazione superficiale (subsidenze, frane, faglie);
- l'estensione delle immagini permette di analizzare vaste aree in tempi ristretti;
- l'accuratezza delle misure è molto elevata, permettendo così l'individuazione di fenomeni lenti su vaste aree altrimenti non rilevabili;
- i risultati sono facilmente integrabili nei sistemi informativi territoriali permettendo così una rapida integrazione con altre tecniche di indagine;
- la doppia geometria di acquisizione migliora la qualità delle informazioni del fenomeno analizzato: infatti, scomponendo i vettori delle velocità nelle loro componenti (orizzontale e verticale) e combinando le due geometrie, è possibile risalire al vettore di spostamento sul piano orizzontale (E-

W) e su quello verticale. La componente lungo la direzione N-S non può essere misurata poiché i sensori attualmente operativi seguono orbite orientate circa N-S.

È opportuno, inoltre, considerare i seguenti aspetti relativi alle analisi A-DInSAR:

- le misure sono possibili solo in corrispondenza dei punti di misura: è necessario, quindi, che l'area oggetto di studio presenti una densità sufficiente di punti (almeno lieve urbanizzazione oppure presenza di rocce esposte); infatti, in aree totalmente vegetate o non visibili dal satellite a causa di deformazioni prospettiche causate dalla topografia del terreno, non è possibile ottenere informazioni;
- l'analisi di fenomeni di deformazione con evoluzione particolarmente rapida è molto difficile e alcuni tentativi sono possibili solo disponendo di informazioni a priori sui fenomeni in atto; anche i fenomeni a cinematica impulsiva non possono essere monitorati con questa tecnica, soprattutto quando movimenti di entità centimetrica sono concentrati in tempi brevi ed in aree ristrette.

## 2 Analisi storica delle deformazioni superficiali mediante interferometria SAR satellitare differenziale avanzata (A-DInSAR)

Nell'ambito delle attività previste per l'esecuzione dello studio di Valutazione dell'Impatto Ambientale è stata eseguita un'analisi storica mediante tecniche di Interferometria SAR Satellitare Differenziale Avanzata (A-DInSAR) su dati d'archivio ad alta risoluzione acquisite dalla costellazione COSMO-SkyMed (Agenzia Spaziale Italiana) per la stima di eventuali spostamenti subiti dal terreno e dalle strutture ricadenti all'interno di un'area di circa 18 km<sup>2</sup> (riportata nelle figure con la dicitura di "Area giacimento", poligono rosso in Figura 2-1). Le analisi A-DInSAR sono state condotte su dataset in doppia geometria orbitale (ascendente e discendente) acquisiti dalla costellazione COSMO-SkyMed nel periodo compreso tra febbraio 2011 e settembre 2023. Inoltre, per l'analisi delle deformazioni che interessano una zona esterna di circa 337 km<sup>2</sup> (riportata in legenda come "Domini esterni", poligono blu in Figura 2-1), sono stati interpretati i dati acquisiti da febbraio 2015 a novembre 2021 dalla costellazione di satelliti Sentinel-1 forniti dall'European Ground Motion Service (EGMS). È stato così possibile ottenere informazioni diffuse su un'estesa area circostante a quella in cui sono ubicati i pozzi di estrazione Monte Pallano 1 e 2, in prossimità del comune di Bomba (CH).

L'attività è stata condotta con il supporto della società NHAZCA S.r.l. di Roma, che ha curato la scelta delle immagini ed il data processing.

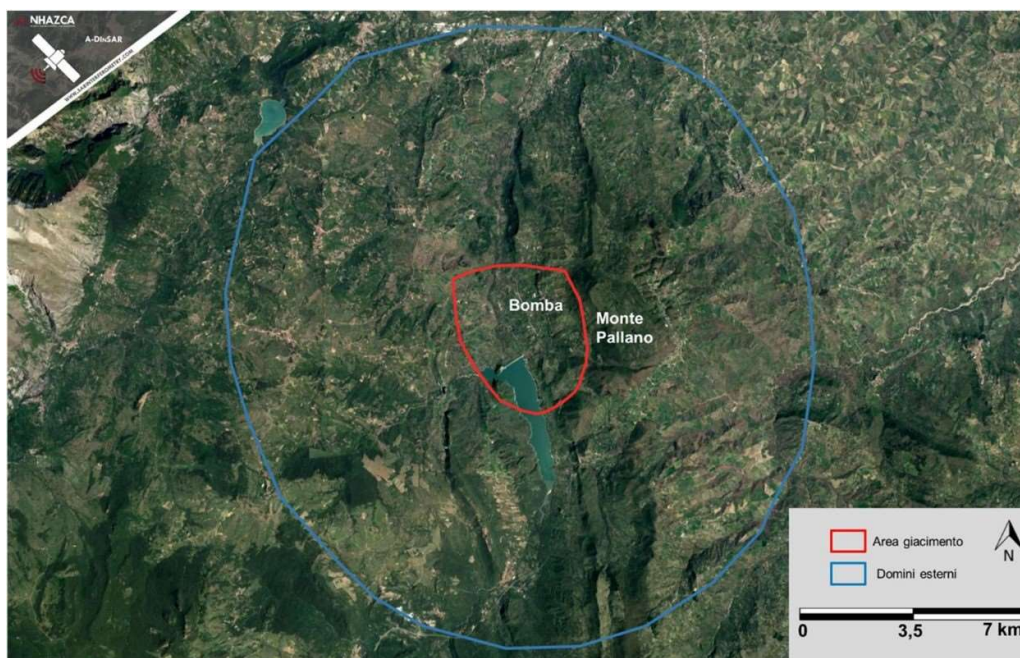


Figura 2-1 - Ubicazione dell'area di studio del Campo di Colle Santo - Monte Pallano (comune di Bomba, CH) analizzata con dati COSMO-SkyMed (poligono rosso) e dell'area su cui è stata condotta l'interpretazione dei dati EGMS (poligono blu).

L'obiettivo delle attività è l'analisi del comportamento deformativo storico, su una base temporale superiore al decennio, delle strutture e delle infrastrutture presenti all'interno delle aree di studio, con particolare attenzione a possibili fenomeni di subsidenza e alle deformazioni del suolo in prossimità dell'area di estrazione di Colle Santo - Monte Pallano; ciò al fine di distinguere le deformazioni già presenti nell'area per dinamiche naturali, da quelle eventuali indotte dalle future attività di estrazione legate alla coltivazione del giacimento.

Si riporta, di seguito, una descrizione delle attività svolte e dei risultati ottenuti.

Per un'adeguata comprensione della tecnica utilizzata nell'ambito della presente analisi si rimanda all'Appendice.

## 2.1 Attività svolte

Nel presente paragrafo vengono descritte le principali attività svolte per l'analisi A-DInSAR con dati COSMO-SkyMed sull'area del giacimento, per il periodo 2011-2023:

- selezione e acquisizione delle immagini SAR satellitari;
- elaborazione immagini SAR con Interferometria SAR Satellitare;
- post-elaborazione e validazione dei risultati;

Inoltre, per ottenere informazioni sulla deformazione di lungo periodo sull'area dei domini esterni, si è ricorsi ai dati dell'European Ground Motion Service (<https://doi.org/10.2909/bef2507a-13cf-44c0-a809-0a1566f27631>).

## 2.2 Selezione ed acquisizione delle immagini SAR satellitari e dei dati di base

La scelta delle immagini SAR satellitari è stata guidata dall'esigenza di garantire un'adeguata copertura temporale di dati storici d'archivio e una quantità di immagini (stack) sufficiente per la tipologia di studio richiesta. Nello specifico, al fine di caratterizzare al meglio i processi deformativi nell'area di indagine, sono stati selezionati due stack, uno composto di immagini SAR acquisite in geometria orbitale ascendente e uno in geometria orbitale discendente. L'osservazione in doppia geometria consente di ottimizzare la copertura dell'area di interesse e la stima degli spostamenti attraverso la misura degli stessi da punti di vista differenti, come mostrato in Figura 2-2.

Per il presente studio, sono state utilizzate in totale 288 immagini SAR (Figura 2-3) provenienti dagli archivi dell'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) così distribuite:

- 137 immagini in formato Single Look Complex (SLC) acquisite in geometria orbitale ascendente ad opera dei satelliti COSMO-SkyMed dal 15 ottobre 2012 al 2 settembre 2023 (Figura 2-4 e Figura 2-5);
- 151 immagini in formato Single Look Complex (SLC) acquisite in geometria orbitale discendente ad opera dei satelliti COSMO-SkyMed dal 24 febbraio 2011 al 30 agosto 2023 (Figura 2-4 e Figura 2-5).

Un dato ausiliario, utile all'esecuzione delle analisi interferometriche, è rappresentato dal modello digitale di elevazione del terreno (Digital Elevation Model - DEM) che fornisce le informazioni di base relative alle quote dell'area di indagine e consente la geocodifica dei risultati. Per il presente lavoro, è stato utilizzato il DEM TINITALY/01 (Tarquini S. Isola I., 2007) con 10 m di risoluzione spaziale.



Figura 2-2 - Rappresentazione schematica dell'interazione tra la linea di vista satellitare (LOS) e la topografia locale per un versante con esposizione a Est. In rosso il movimento reale, in blu lo stesso proiettato lungo la LOS satellitare in funzione della geometria orbitale ascendente (sinistra) e discendente (destra).

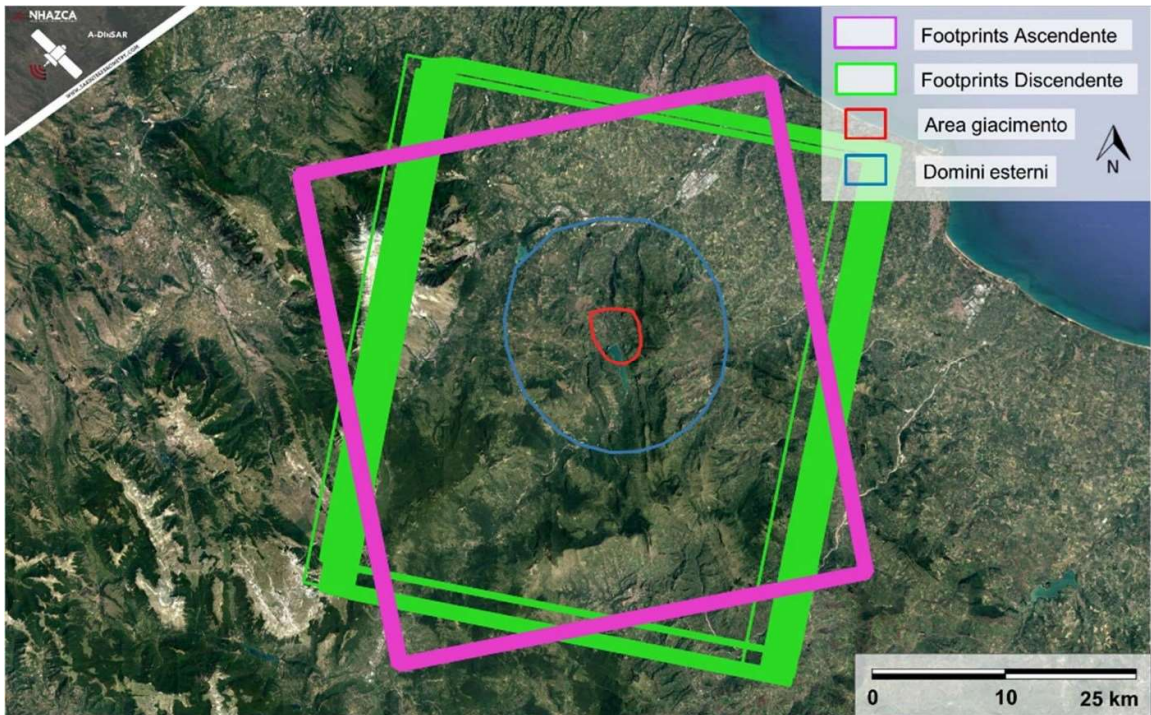


Figura 2-3 - Footprint delle immagini SAR satellitari COSMO-SkyMed utilizzate, in geometria orbitale ascendente e discendente, con ubicazione dell'area di studio.

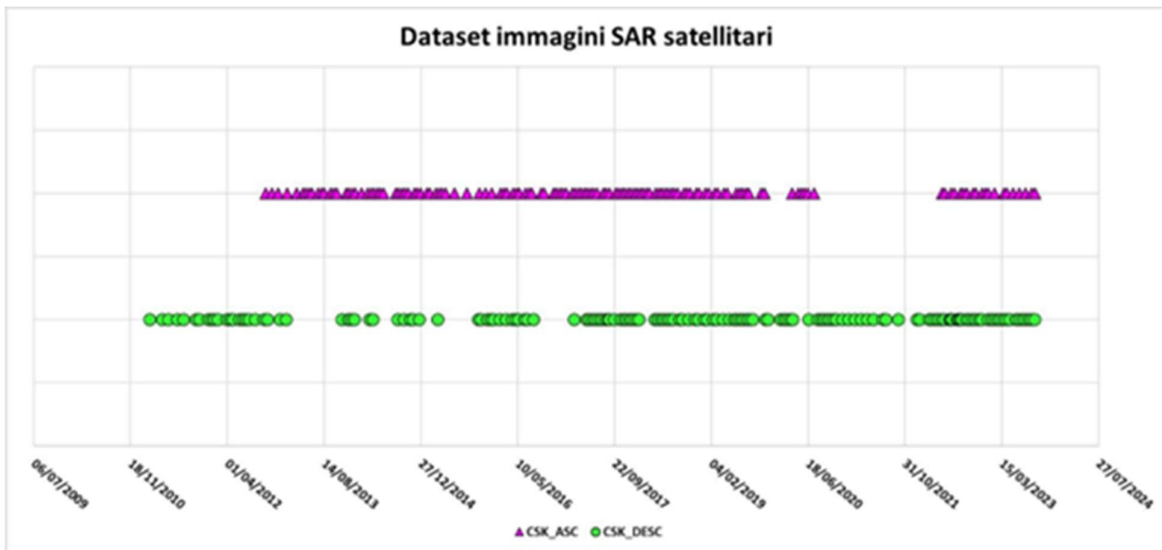


Figura 2-4 - Distribuzione temporale delle immagini SAR COSMO-SkyMed satellitari utilizzate.

Cosmo-SkyMed Ascendente							
1	15/10/2012	36	10/02/2015	71	25/07/2017	106	29/06/2019
2	16/11/2012	37	14/03/2015	72	10/08/2017	107	15/07/2019
3	18/12/2012	38	30/03/2015	73	26/08/2017	108	31/07/2019
4	04/02/2013	39	15/04/2015	74	27/09/2017	109	16/08/2019
5	24/03/2013	40	01/05/2015	75	13/10/2017	110	19/10/2019
6	25/04/2013	41	18/06/2015	76	29/10/2017	111	04/11/2019
7	11/05/2013	42	21/08/2015	77	14/11/2017	112	27/03/2020
8	27/05/2013	43	24/10/2015	78	30/11/2017	113	28/04/2020
9	12/06/2013	44	25/11/2015	79	16/12/2017	114	14/05/2020
10	14/07/2013	45	27/12/2015	80	01/01/2018	115	30/05/2020
11	30/07/2013	46	13/02/2016	81	17/01/2018	116	15/06/2020
12	15/08/2013	47	29/02/2016	82	02/02/2018	117	17/07/2020
13	16/09/2013	48	16/03/2016	83	18/02/2018	118	10/05/2022
14	02/10/2013	49	17/04/2016	84	06/03/2018	119	26/05/2022
15	18/10/2013	50	03/05/2016	85	22/03/2018	120	27/06/2022
16	05/12/2013	51	19/05/2016	86	23/04/2018	121	13/07/2022
17	21/12/2013	52	20/06/2016	87	09/05/2018	122	14/08/2022
18	06/01/2014	53	06/07/2016	88	25/05/2018	123	30/08/2022
19	22/01/2014	54	22/07/2016	89	10/06/2018	124	15/09/2022
20	23/02/2014	55	08/09/2016	90	26/06/2018	125	17/10/2022
21	27/03/2014	56	24/09/2016	91	12/07/2018	126	02/11/2022
22	12/04/2014	57	11/11/2016	92	28/07/2018	127	04/12/2022
23	28/04/2014	58	27/11/2016	93	13/08/2018	128	20/12/2022
24	14/05/2014	59	13/12/2016	94	14/09/2018	129	05/01/2023
25	30/05/2014	60	29/12/2016	95	30/09/2018	130	06/02/2023
26	15/06/2014	61	14/01/2017	96	16/10/2018	131	26/03/2023
27	18/08/2014	62	15/02/2017	97	17/11/2018	132	11/04/2023
28	03/09/2014	63	03/03/2017	98	03/12/2018	133	13/05/2023
29	19/09/2014	64	19/03/2017	99	04/01/2019	134	14/06/2023
30	05/10/2014	65	04/04/2017	100	20/01/2019	135	16/07/2023
31	21/10/2014	66	20/04/2017	101	21/02/2019	136	17/08/2023
32	22/11/2014	67	06/05/2017	102	09/03/2019	137	02/09/2023
33	08/12/2014	68	22/05/2017	103	10/04/2019		
34	24/12/2014	69	07/06/2017	104	26/04/2019		
35	25/01/2015	70	23/06/2017	105	13/06/2019		

Cosmo-SkyMed Discendente									
1	24/02/2011	36	17/10/2015	71	19/06/2018	106	10/11/2020	141	07/03/2023
2	29/04/2011	37	02/11/2015	72	05/07/2018	107	12/12/2020	142	23/03/2023
3	31/05/2011	38	04/12/2015	73	21/07/2018	108	13/01/2021	143	08/04/2023
4	18/07/2011	39	20/12/2015	74	22/08/2018	109	14/02/2021	144	24/04/2023
5	19/08/2011	40	05/01/2016	75	07/09/2018	110	18/03/2021	145	26/05/2023
6	22/10/2011	41	06/02/2016	76	09/10/2018	111	19/04/2021	146	11/06/2023
7	07/11/2011	42	09/03/2016	77	10/11/2018	112	21/05/2021	147	27/06/2023
8	25/12/2011	43	10/04/2016	78	26/11/2018	113	08/07/2021	148	13/07/2023
9	10/01/2012	44	26/04/2016	79	28/12/2018	114	24/07/2021	149	29/07/2023
10	26/01/2012	45	12/05/2016	80	13/01/2019	115	26/09/2021	150	14/08/2023
11	11/02/2012	46	13/06/2016	81	14/02/2019	116	30/12/2021	151	30/08/2023
12	30/03/2012	47	29/06/2016	82	02/03/2019	117	15/01/2022		
13	15/04/2012	48	31/07/2016	83	03/04/2019	118	04/03/2022		
14	01/05/2012	49	24/02/2017	84	05/05/2019	119	20/03/2022		
15	02/06/2012	50	29/04/2017	85	01/06/2019	120	05/04/2022		
16	18/06/2012	51	15/05/2017	86	17/06/2019	121	21/04/2022		
17	04/07/2012	52	31/05/2017	87	03/07/2019	122	07/05/2022		
18	20/07/2012	53	16/06/2017	88	19/07/2019	123	23/05/2022		
19	21/08/2012	54	02/07/2017	89	04/08/2019	124	16/06/2022		
20	08/10/2012	55	18/07/2017	90	20/08/2019	125	24/06/2022		
21	24/10/2012	56	03/08/2017	91	05/09/2019	126	02/07/2022		
22	27/12/2012	57	19/08/2017	92	08/11/2019	127	26/07/2022		
23	28/01/2013	58	23/08/2017	93	24/11/2019	128	03/08/2022		
24	12/11/2013	59	20/09/2017	94	27/01/2020	129	11/08/2022		
25	14/12/2013	60	22/10/2017	95	12/02/2020	130	19/08/2022		
26	30/12/2013	61	07/11/2017	96	28/02/2020	131	12/09/2022		
27	15/01/2014	62	23/11/2017	97	15/03/2020	132	28/09/2022		
28	05/04/2014	63	09/12/2017	98	31/03/2020	133	14/10/2022		
29	21/04/2014	64	25/12/2017	99	19/06/2020	134	30/10/2022		
30	27/08/2014	65	10/01/2018	100	06/08/2020	135	15/11/2022		
31	28/09/2014	66	26/01/2018	101	22/08/2020	136	01/12/2022		
32	30/10/2014	67	16/04/2018	102	07/09/2020	137	02/01/2023		
33	15/11/2014	68	02/05/2018	103	23/09/2020	138	18/01/2023		
34	17/12/2014	69	18/05/2018	104	09/10/2020	139	03/02/2023		
35	23/03/2015	70	03/06/2018	105	25/10/2020	140	19/02/2023		

Figura 2-5 - Calendario delle acquisizioni delle immagini SAR COSMO-SkyMed utilizzate (geometria orbitale ascendente e discendente).

### 3 Elaborazione immagini SAR con Interferometria SAR Satellitare

I due stack di immagini COSMO-SkyMed sono stati analizzati separatamente attraverso un workflow che prevede l'elaborazione mediante metodologie A-DInSAR con procedure proprietarie a cui si aggiungono attività di validazione e post-elaborazione dei risultati.

Tale analisi consente l'individuazione di eventuali fenomeni di deformazione estesi e, in funzione della risoluzione delle immagini SAR utilizzate, l'individuazione di oggetti a terra coinvolti in processi deformativi localizzati. Inoltre, grazie alla capacità di ottenere serie temporali di spostamento con accuratezza millimetrica, è possibile estrarre informazioni sull'evoluzione temporale dei processi deformativi.

Le analisi per ciascun dataset sono state eseguite alla scala dell'area di indagine relativa al futuro giacimento di Colle Santo (poligono rosso in Figura 1), attraverso l'identificazione all'interno della stessa di un punto di riferimento caratterizzato da un'elevata stabilità nel tempo.

Per le due geometrie orbitali sono stati identificati i seguenti punti di riferimento (o reference point):

- localizzazione punto di riferimento dataset ascendente: lat. 42°2'4"N, lon. 14°21'51"E;
- localizzazione punto di riferimento dataset discendente: lat. 42°2'1"N, lon. 14°22'E.

Per ogni dataset è stata selezionata un'immagine master a cui riferire le altre immagini per il calcolo delle differenze di fase. Il primo stadio nell'analisi A-DInSAR è stata la selezione dei PMC (PM Candidates), ovvero l'identificazione dei punti idonei ad essere analizzati. Per questo scopo viene analizzata la mappa della riflettività, ovvero una rappresentazione della riflettività media dei pixel nel tempo ottenuta come media non coerente delle ampiezze delle immagini radar. Oggetti molto riflettenti e ben visibili dal satellite come edifici, rocce esposte, etc. presentano valori più alti di riflettività rispetto ad aree vegetate, specchi d'acqua etc..

I PMC sono stati selezionati sull'area di indagine in modo da ottimizzarne la distribuzione spaziale e la stabilità temporale. Per fare ciò è stata valutata un'opportuna soglia dei valori di Amplitude Stability Index, ovvero dell'indice di stabilità della riflettività nel tempo, e di Spatial Coherence, ovvero la coerenza media degli interferogrammi opportunamente generati. Uno dei requisiti essenziali per l'esecuzione di un'analisi A-DInSAR è, infatti, rappresentato dalla stabilità nel tempo del segnale elettromagnetico relativo ai punti da sottoporre all'analisi stessa (cfr. Appendice).

Una volta analizzati i dati di base relativi al segnale radar e identificati i PMC, grazie all'algoritmo impiegato nelle analisi è stato possibile stimare la componente di fase legata al disturbo atmosferico (Atmospheric Phase Screen, APS) per ciascuna delle immagini costituenti il dataset. Proprio grazie all'eliminazione del contributo delle APS dalla fase interferometrica, è stato possibile stimare i valori dei trend di spostamento (in mm/anno), per tutti i punti di interesse, sempre in relazione al reference point scelto.



## 4 Post-elaborazione e validazione dei risultati

Partendo dai risultati dell'analisi sopra descritta, è stato eseguito un processo di validazione, post-elaborazione e interpretazione del dato. In particolare, sono state applicate routine di validazione semiautomatica basate su algoritmi statistici e strumenti software proprietari di NHAZCA S.r.l., consentendo un controllo multi-parametrico per ciascun punto di misura disponibile al fine di analizzare i comportamenti deformativi spaziali e temporali e di identificare e rimuovere gli outliers. La validazione è stata effettuata sulla base di alcuni parametri rilevanti quali la coerenza temporale, l'indice di stabilità in ampiezza, la velocità stimata, gli andamenti deformativi e le quote stimate. Le procedure di validazione hanno permesso di ottenere circa 13000 Punti di Misura (PM) affidabili in tutta l'area di indagine per la geometria orbitale ascendente e circa 13000 PM affidabili per la geometria orbitale discendente.

La post-elaborazione, effettuata attraverso algoritmi proprietari, ha permesso di estrarre le informazioni più utili in termini di spostamenti, aree coinvolte e anomalie locali per l'efficace comprensione e caratterizzazione dei fenomeni osservati.

I risultati delle analisi sono di seguito restituiti attraverso mappe su basi ortofotografiche che mostrano le informazioni di spostamento. È stata adottata una scala di colori, espressa in mm/anno, che rappresenta la velocità media di spostamento lungo la LOS: il colore verde indica aree con tassi di spostamento sui punti di misura non apprezzabile o non significativo, i colori dal giallo al viola indicano un allontanamento dal sensore, mentre i colori dall'azzurro al blu indicano un avvicinamento. L'errore strumentale stimato è di circa  $\pm 1.00$  mm/anno.

Al fine di contestualizzare i risultati dell'analisi A-DInSAR e integrare le informazioni così ottenute nell'analisi dei processi deformativi presenti nell'area d'interesse, è stato condotto uno studio delle informazioni di letteratura, incluse alcune delle principali banche dati relative ai processi deformativi del territorio. Nello specifico, sono stati utilizzati gli inventari del Progetto IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia, (ISPRA, 2023)) e del Piano per l'Assetto Idrogeologico Abruzzo e Sangro (PAI - Autorità di Bacino distrettuale dell'Appennino Centrale, 2021), rappresentati in Figura 4-1 e Figura 4-2.

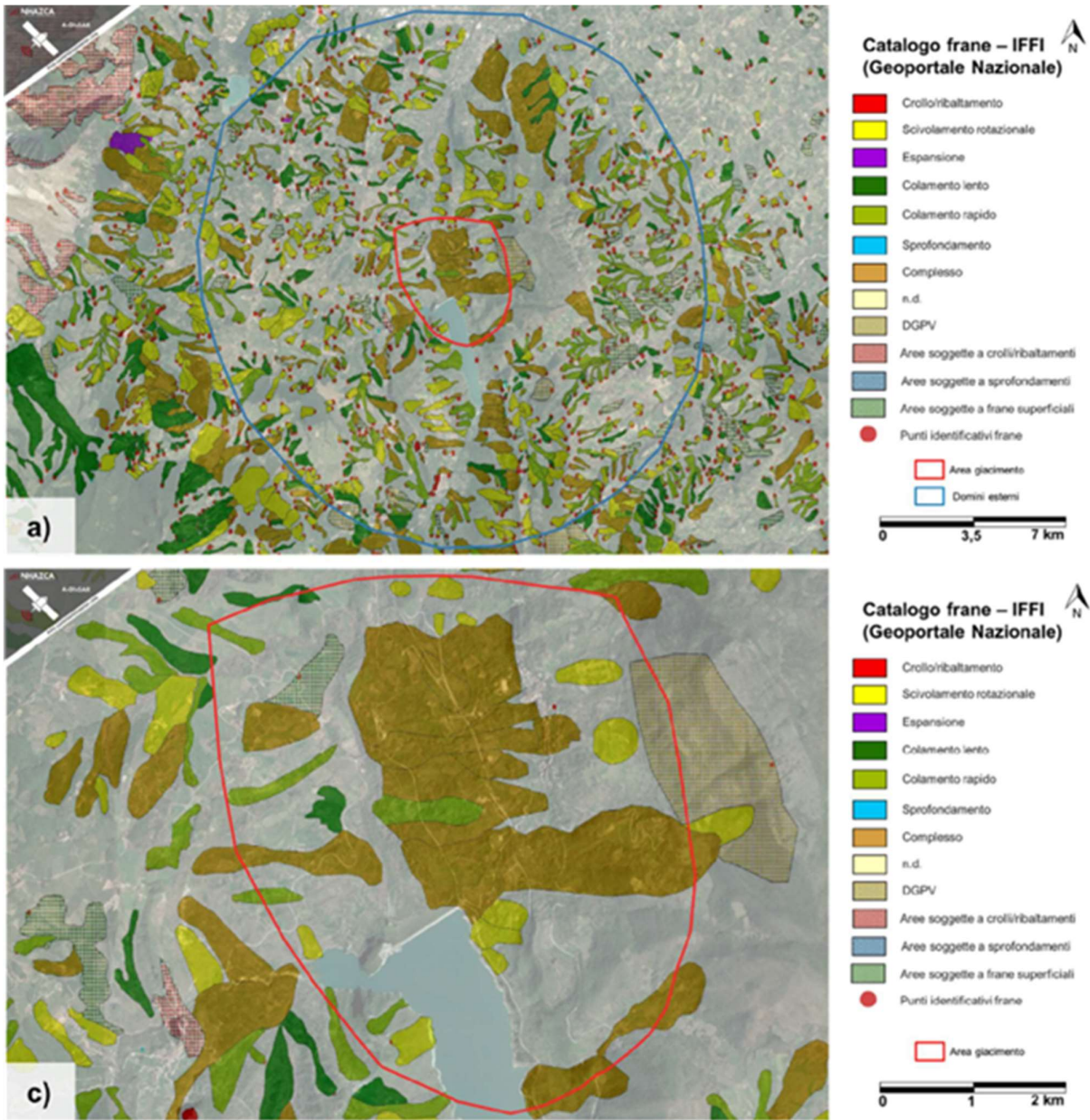


Figura 4-1 - Rappresentazione del catalogo frane IFFI sull'area dei domini esterni (a) e sull'area relativa al giacimento (c).

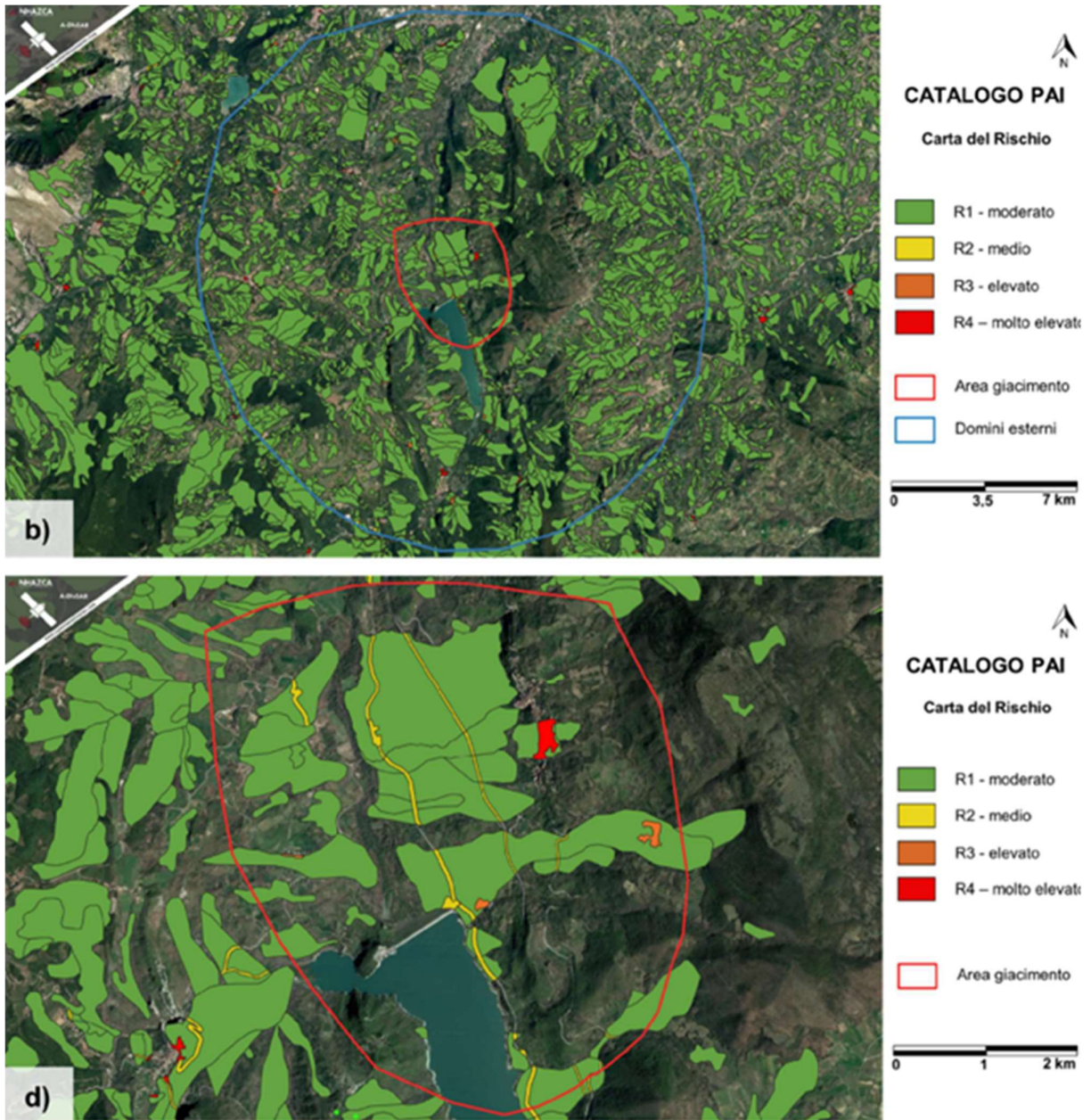


Figura 4-2 - Rappresentazione della carta dei rischi PAI sull'area dei domini esterni (b) e sull'area relativa al giacimento (d).

## 5 Risultati ottenuti

I risultati ottenuti dall'analisi A-DInSAR sono riportati dalla Figura 5-2 alla Figura 5-3 attraverso mappe che mostrano le velocità medie annue dei punti di misura (PM). L'indagine eseguita ha consentito di ottenere un'ottima distribuzione spaziale dei PM lungo l'intera area di studio e in particolare in corrispondenza della diga e nell'area circostante il futuro sito di estrazione, sia in geometria ascendente che discendente. Questo ha consentito un'osservazione ridondante degli eventuali processi deformativi che lo caratterizzano. Nello specifico, sono stati identificati circa 26000 PM (complessivamente per le due geometrie orbitali) nell'intera area di indagine. I PM corrispondono ad elementi naturali e antropici presenti nel settore, caratterizzati da un'elevata stabilità alla riflessione delle onde radar nel tempo. Una maggiore densità di PM si rileva, di conseguenza, nei centri abitati e nelle infrastrutture, mentre la densità risulta inferiore nelle aree densamente vegetate e coltivate.

Come prodotto derivante dalle attività di post-elaborazione, vengono riportate le Mappe di velocità dei Punti di Misura Sintetici (PMS) nelle direzioni verticale ed orizzontale (Est- Ovest), derivanti dalla scomposizione vettoriale delle misure lungo la linea di vista strumentale (LOS) dei PM ottenuti in geometria orbitale ascendente e discendente. Infatti, si ricorda che le misure di spostamento e di velocità dei punti di misura sono calcolate lungo la linea di vista del sensore (LOS). Questo implica che gli spostamenti rilevati sui singoli punti di misura rappresentano, in realtà, la proiezione degli spostamenti reali lungo la congiungente sensore-bersaglio (cfr. Appendice). In presenza di moti puramente verticali, il movimento stimato è facilmente riconducibile alla deformazione lungo la direzione verticale, ma se il bersaglio in analisi presenta anche spostamenti orizzontali, la misura ottenuta è il risultato della combinazione plano-altimetrica degli spostamenti. Tuttavia, attraverso l'utilizzo delle due geometrie orbitali di acquisizione, è possibile distinguere i due contributi. Una scomposizione vettoriale dei risultati ottenuti dall'analisi dei dati nelle due geometrie orbitali è stata eseguita, attraverso l'utilizzo di algoritmi proprietari, per ottenere i vettori di spostamento lungo la direzione orizzontale (Est-Ovest) e verticale, riportate da Figura 5-5 a Figura 5-6. In particolare, l'area di indagine è stata discretizzata in celle esagonali (con raggio del cerchio inscritto pari a 20 m) secondo una griglia regolare. I risultati mostrano i valori risultanti delle sole celle ("PM sintetici") contenenti almeno un punto di misura per entrambe le geometrie orbitali.

A valle delle attività di elaborazione e validazione dei dati A-DInSAR sono state effettuate delle attività di post-elaborazione tramite l'applicazione di algoritmi proprietari con lo scopo di contestualizzare le deformazioni osservate e di definire eventuali interferenze con gli elementi di interesse della Committenza. Nello specifico, a partire dalle componenti di velocità orizzontale e verticale, è stata effettuata una "Spazializzazione", ovvero un'interpolazione volta ad ottenere dati con visualizzazione continua nello spazio e copertura più completa della zona d'interesse. In questo modo è stato inoltre possibile ottenere le curve isocinetiche, ovvero delle linee che delimitano le aree con la stessa velocità media annuale. Il risultato di questa operazione è mostrato in Figura 5-8.

In aggiunta a questi risultati, sono stati inoltre valutati gli interferogrammi, ovvero le mappe delle differenze di fase del segnale, utili per evidenziare l'eventuale presenza di fenomeni impulsivi non rilevabili dalla tecnica A-DInSAR per via della loro eccessiva rapidità o intensità (cfr. Appendice). Sono stati presi in esame un totale di 286 interferogrammi (136 in geometria ascendente e 150 in geometria discendente), di cui si riporta un esempio in Figura 5-1 da cui tuttavia non sono stati riscontrati fenomeni d'interesse, in quanto le uniche frange interferometriche distinguibili sono da ricondurre verosimilmente alla topografia locale e non a deformazioni effettive.

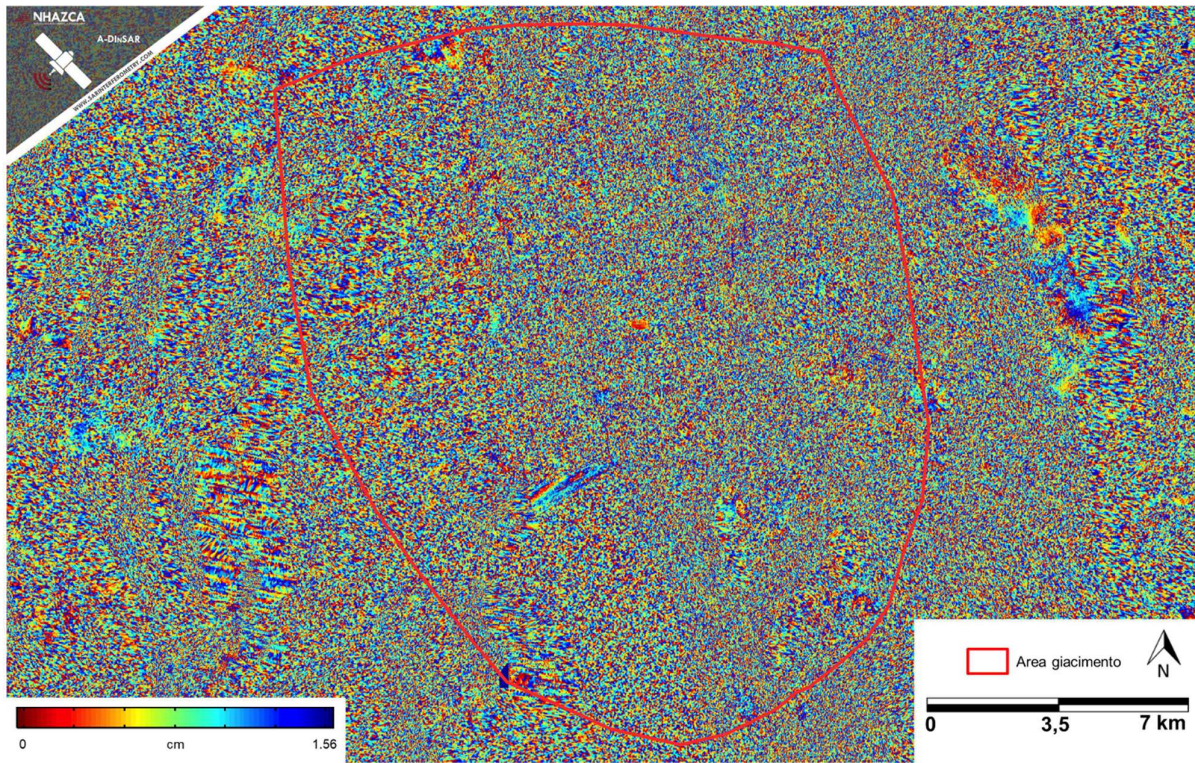


Figura 5-1 - Esempio di interferogramma acquisito in geometria ascendente. Le frange colorate indicano la presenza di variazioni di fase (dovute o alla topografia locale o a deformazioni in atto), mentre l'effetto "sale e pepe" è caratteristico di zone con segnale scarso o rumoroso.

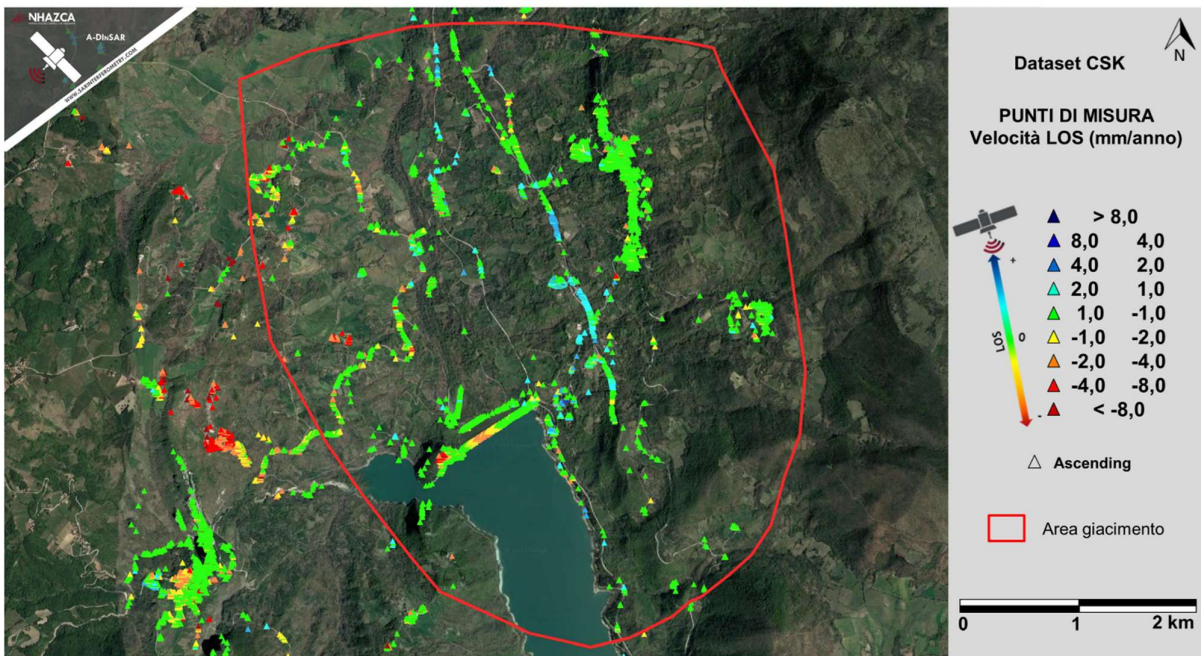


Figura 5-2 - Mappa di velocità dei Punti di Misura ottenute da analisi A-DInSAR in geometria ascendente.

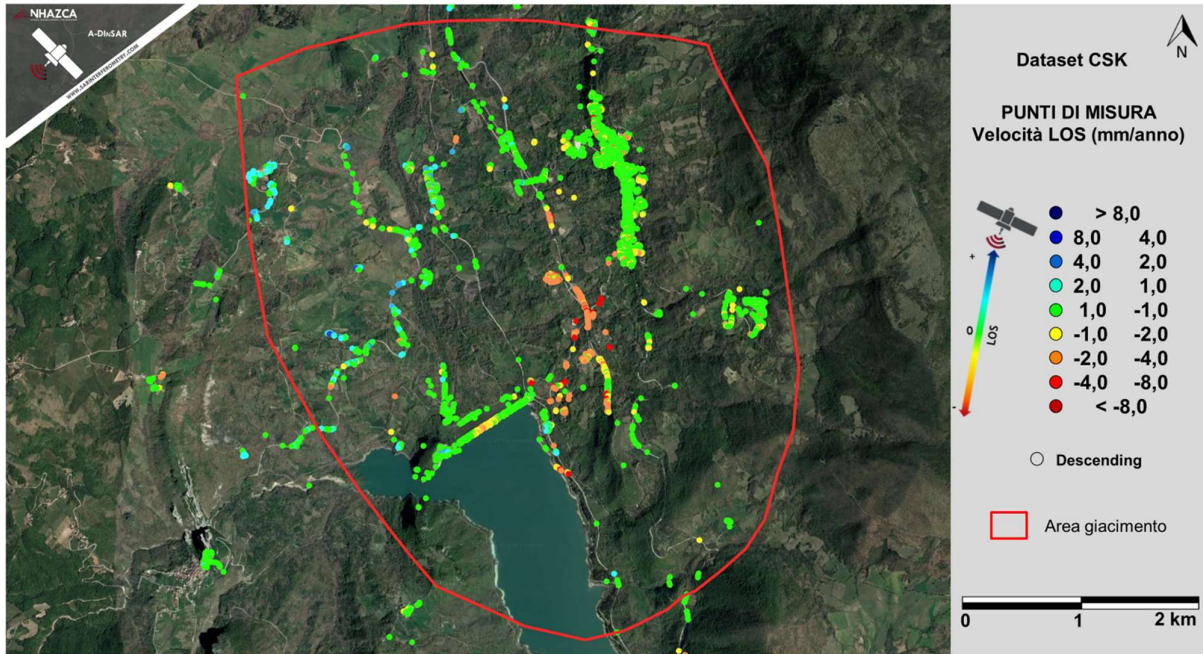


Figura 5-3 - Mappa di velocità dei Punti di Misura ottenute da analisi A-DInSAR in geometria discendente

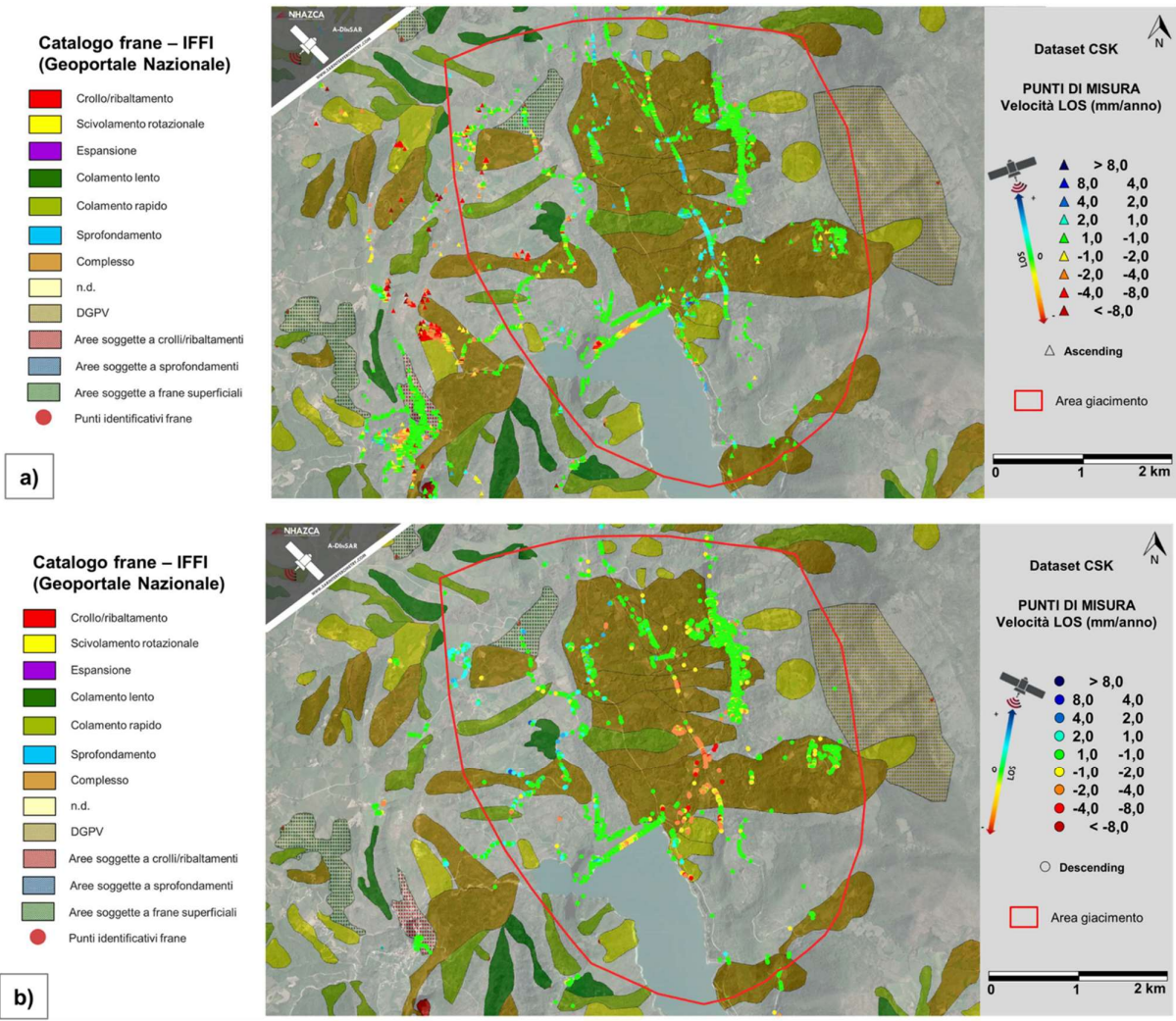


Figura 5-4 - Sovrapposizione della mappa di velocità in geometria ascendente (a) e discendente (b) dei Punti di Misura con catalogo IFFI.

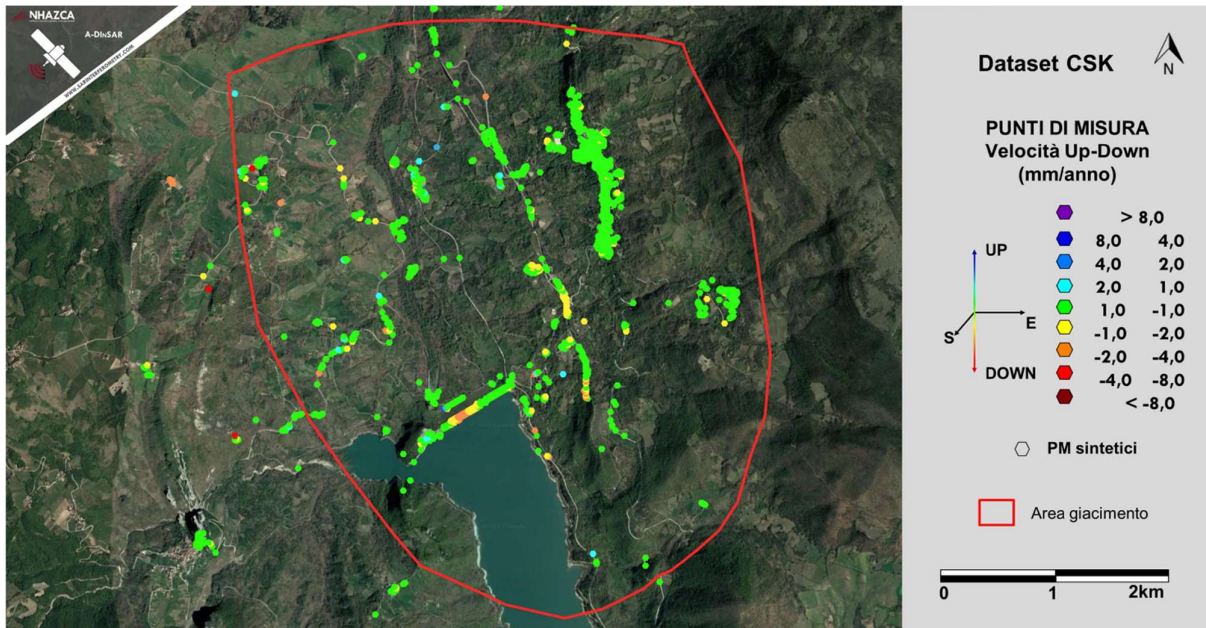


Figura 5-5 - Mappa di velocità dei punti di misura sintetici (PMS) lungo la direzione verticale. Valori positivi = Up; Valori negativi = Down.

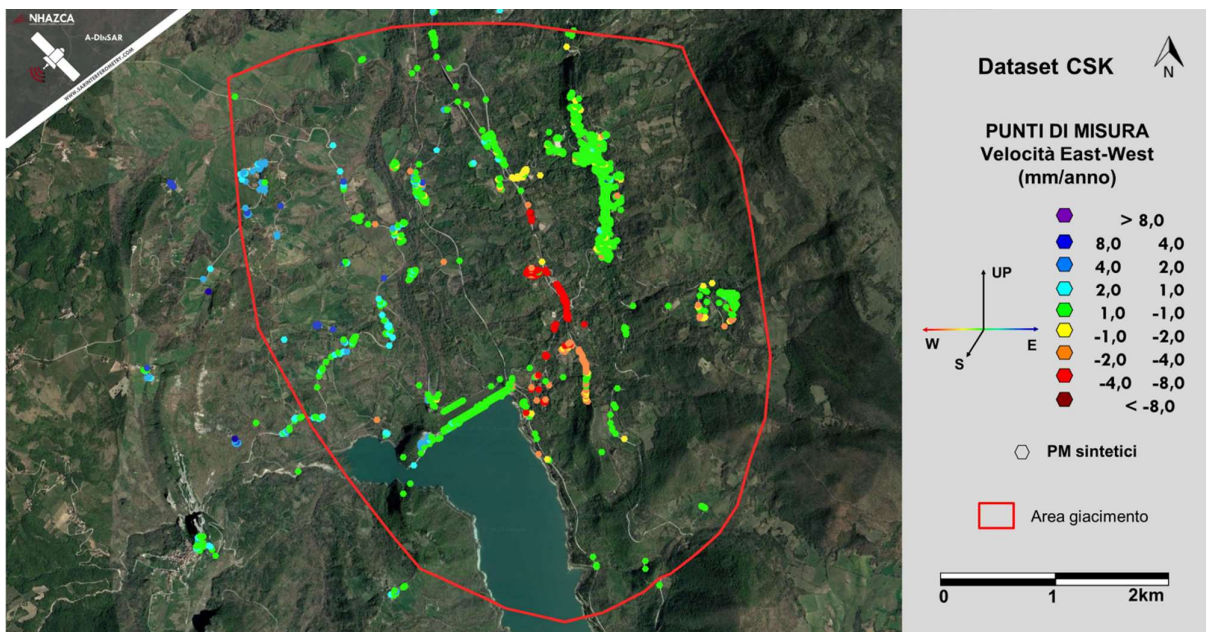


Figura 5-6 - Mappa di velocità dei punti di misura sintetici (PMS) lungo la direzione orizzontale (Est-Ovest). Valori positivi = Est; Valori negativi = Ovest.



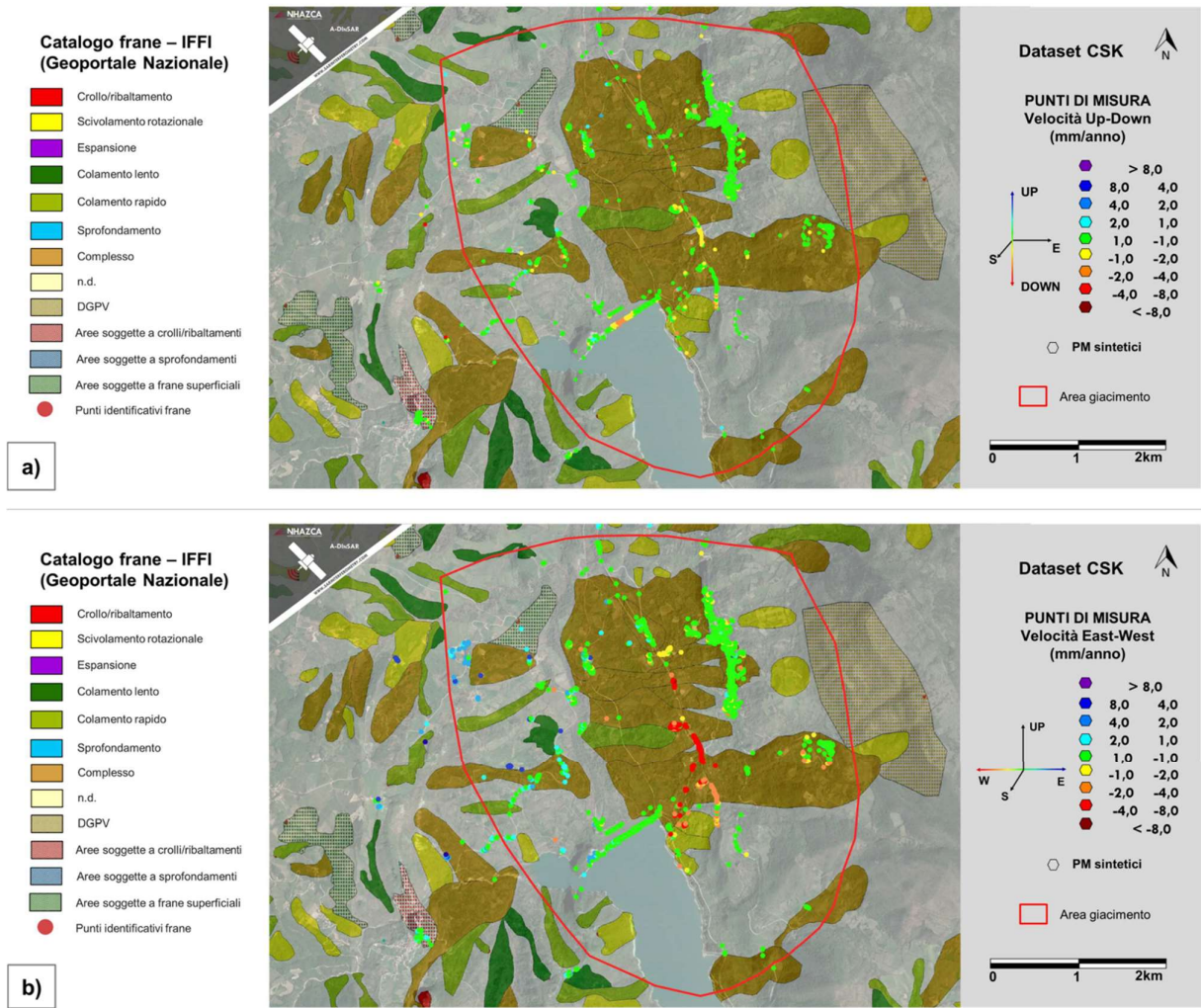


Figura 5-7 - Sovrapposizione della mappa di velocità verticale (a) e orizzontale (b) dei Punti di Misura Sintetici con catalogo IFFI.

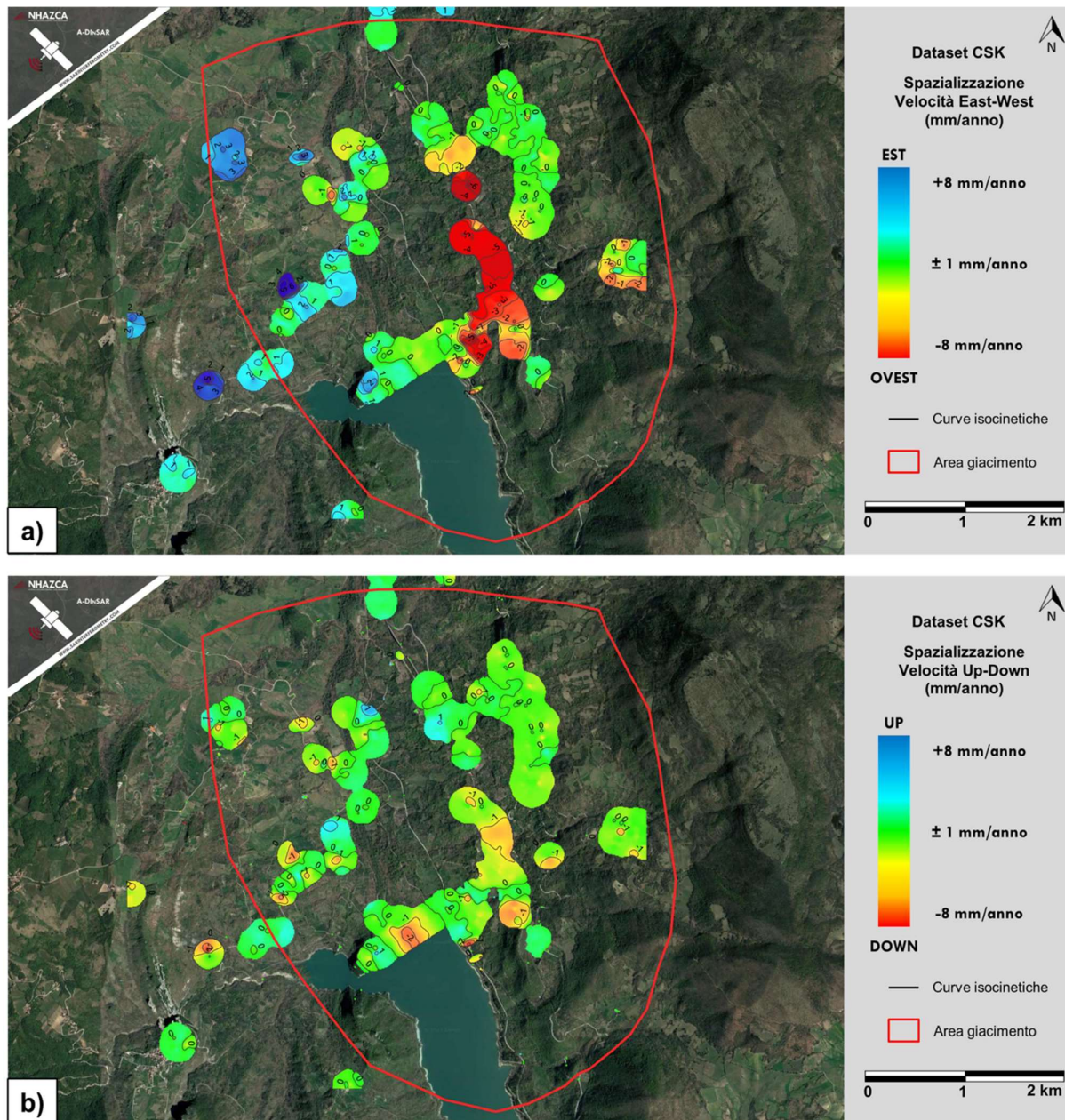


Figura 5-8 - Spazializzazione delle componenti di velocità orizzontale (a) e verticale (b) dei Punti di Misura Sintetici.

Dall'analisi delle mappe dei PM (sia in geometria orbitale ascendente che discendente) si evince che l'intera area di studio sia interessata da fenomeni deformativi di lungo periodo con entità variabile, fortemente localizzati in alcuni settori, come ad esempio in prossimità di Bomba. Dalle Figura 5-7 e Figura 5-8 si può distinguere come le zone sottoposte a maggiori deformazioni siano in aree interessate da fenomeni franosi (prevalentemente appartenenti alle categorie di colamento rapido, scivolamento rotazionale e frane complesse), che peraltro coinvolgono gran parte dell'area di studio. In generale si osserva che l'area è soggetta principalmente a deformazioni in direzione orizzontale, compatibilmente con l'esposizione dei versanti.

Al fine di caratterizzare con maggiore accuratezza le zone in prossimità dei pozzi di estrazione, che mostrano un trend di deformazione rilevante, è stato scelto di attenzionare tre aree di focus descritte successivamente.

## 5.1 Aree di focus

In Figura 5-9 sono mostrate le zone di focus per le quali è stata condotta un'interpretazione dei risultati più approfondita, in quanto caratterizzate da deformazioni significative e, nel caso delle prime due, situate vicine al sito dei pozzi di estrazione.

Per queste aree sono riportati degli ingrandimenti (Figura 5-10 - Figura 5-11 - Figura 5-14 - Figura 5-15 - Figura 5-18 - Figura 5-19) delle mappe di velocità lungo la LOS e le relative componenti orizzontali e verticali, e l'ubicazione approssimativa di alcuni Punti di Misura e Punti di Misura Sintetici di cui sono state estratte le serie temporali di spostamento (Figura 5-12 - Figura 5-13 - Figura 5-16 - Figura 5-17 - Figura 5-20). Per ciascun settore è stata inoltre riportata una tabella riassuntiva delle velocità medie, massime e minime, distinte per geometria orbitale e componente (n.b: lungo la LOS segni negativi corrispondono ad allontanamento e positivi ad avvicinamento al sensore; lungo la direzione verticale e orizzontale invece segni negativi corrispondono rispettivamente ad abbassamento e spostamento verso Ovest, segni positivi ad innalzamento e spostamento verso Est).

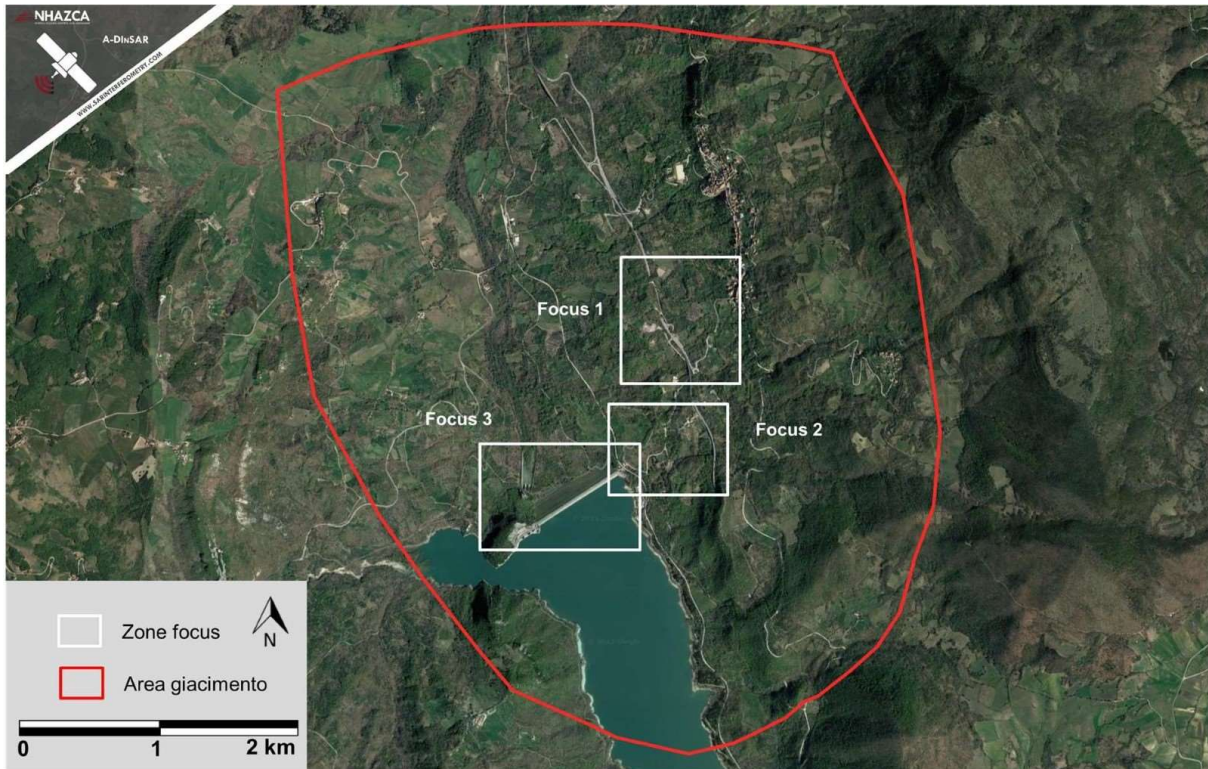


Figura 5-9 - Localizzazione delle zone di focus per l'analisi storica entro l'area d'interesse.

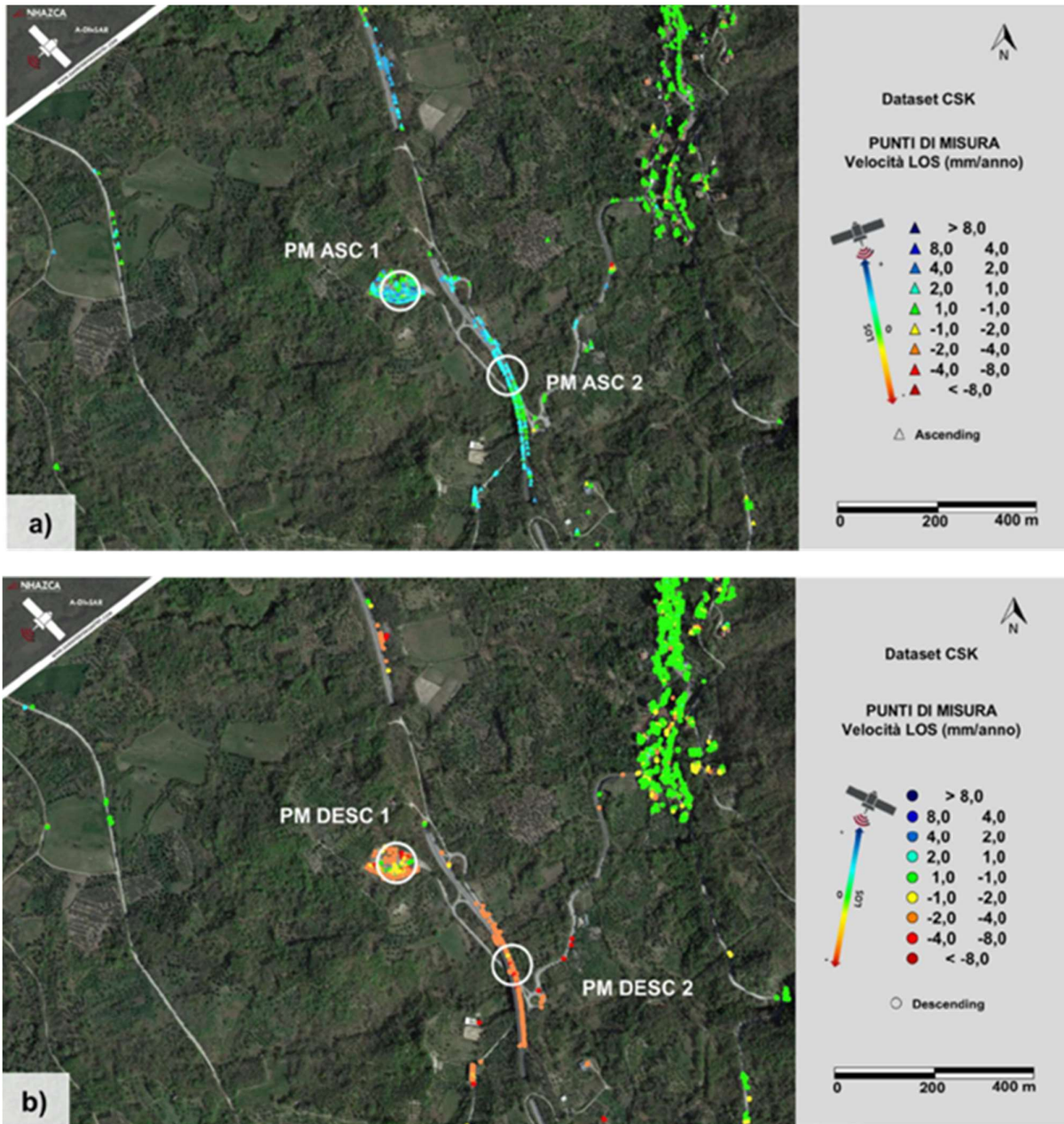


Figura 5-10 - Mappa di velocità in geometria ascendente (a) e discendente (b) dei PM con relativa localizzazione di punti significativi nella zona di focus 1.

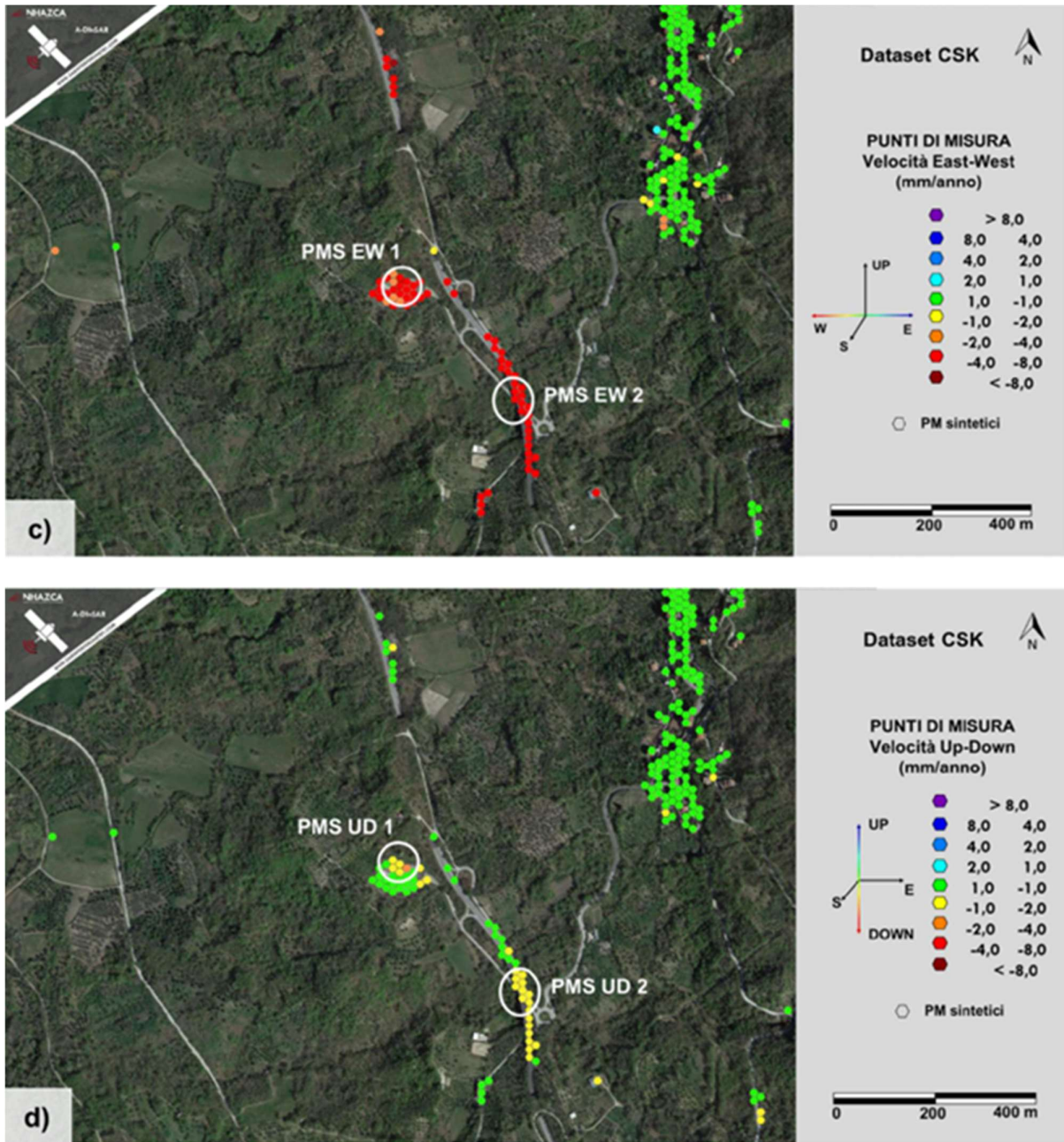


Figura 5-11 - Mappa di velocità in geometria orizzontale (c) e verticale (d) dei PMS con relativa localizzazione di punti significativi nella zona di focus 1.

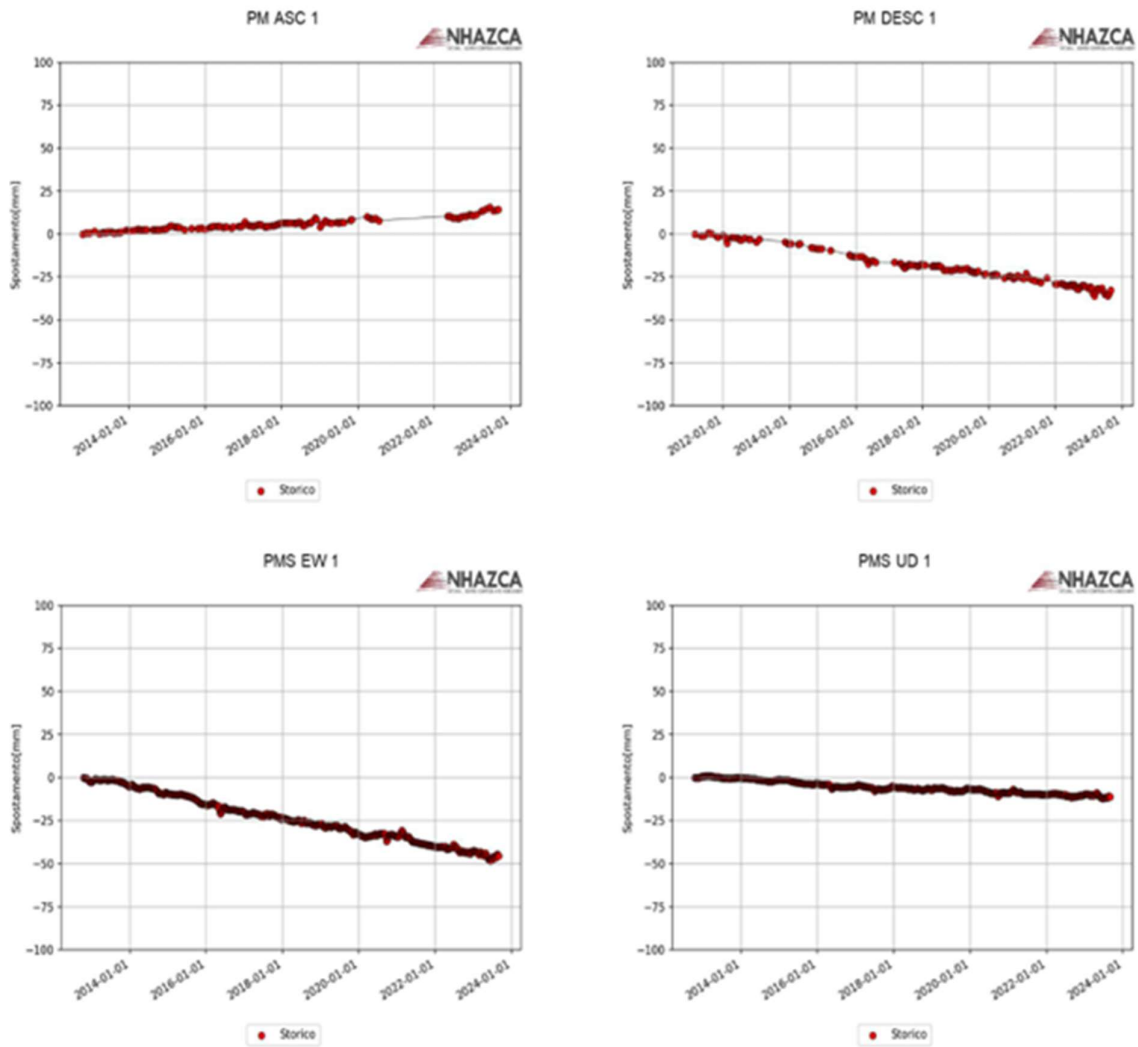


Figura 5-12 - Serie temporali di spostamento dei punti significativi individuati in Figura 5-10 e Figura 5-11 (PM/PMS 1).

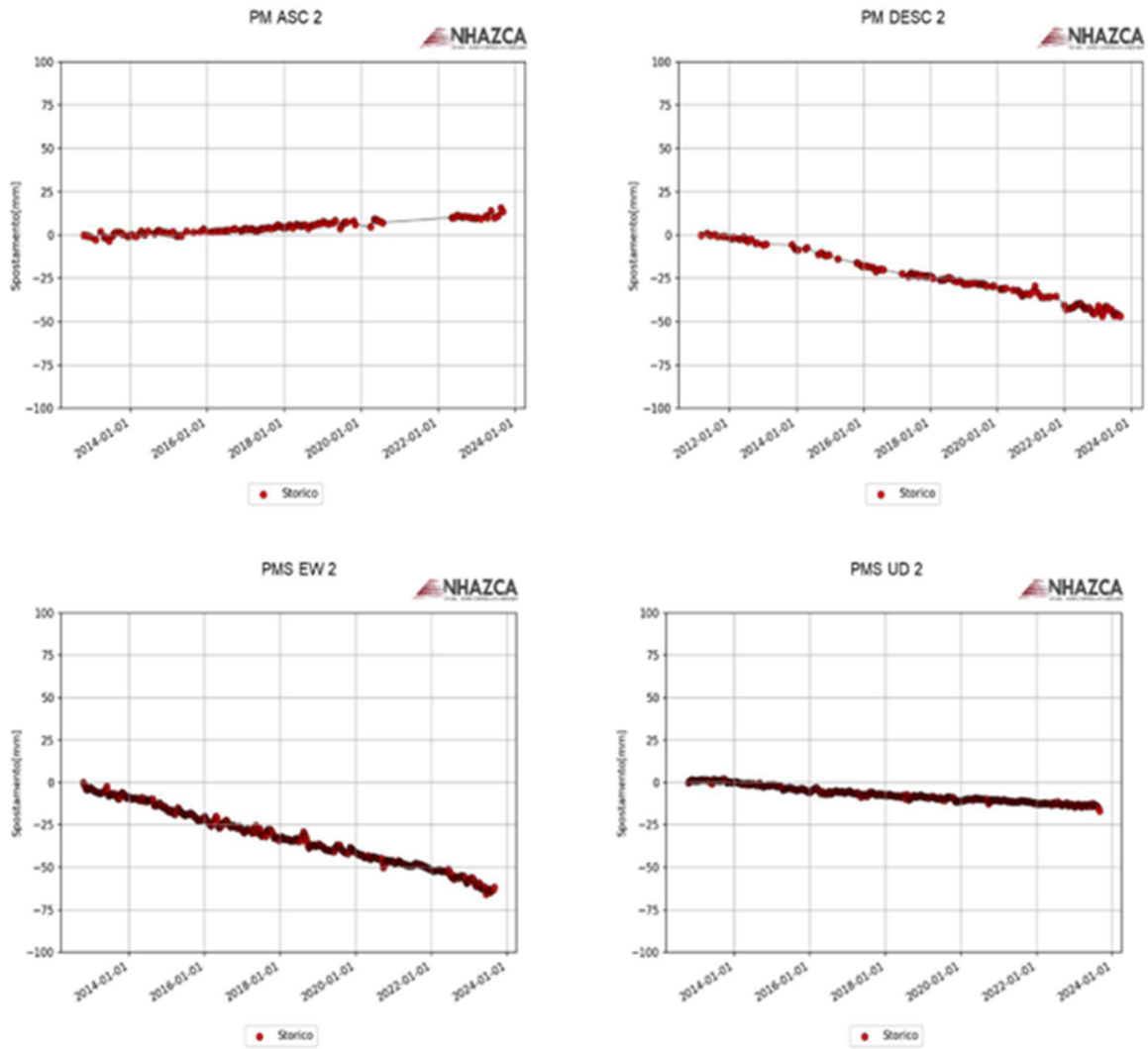


Figura 5-13 - Serie temporali di spostamento dei punti significativi individuati in Figura 5-10 e Figura 5-11 (PM/PMS 2).

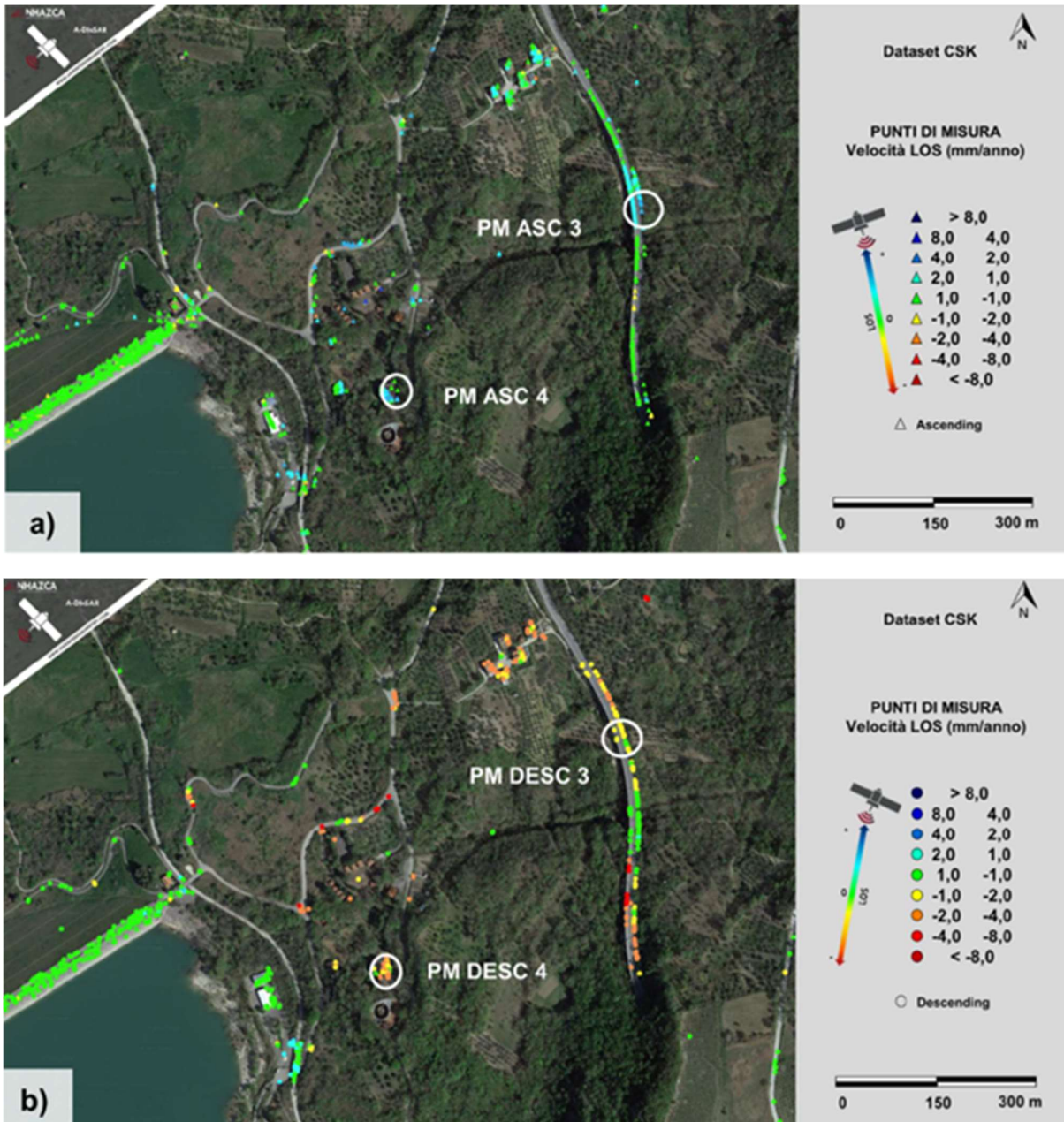


Figura 5-14 - Mappa di velocità in geometria ascendente (a) e discendente (b) dei PM con relativa localizzazione di punti significativi nella zona di focus 2.



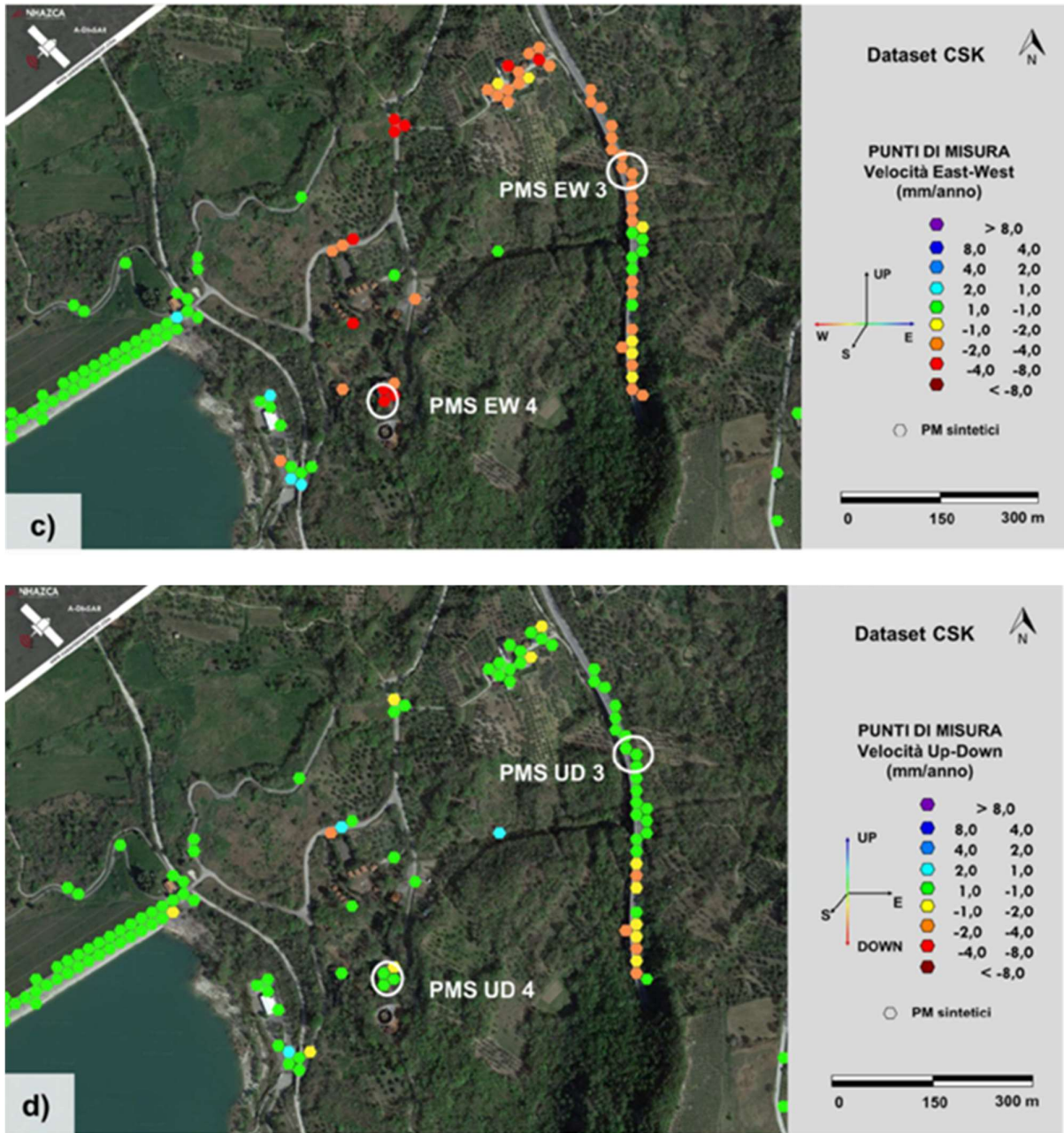


Figura 5-15 - Mappa di velocità in geometria orizzontale (c) e verticale (d) dei PMS con relativa localizzazione di punti significativi nella zona di focus 2.

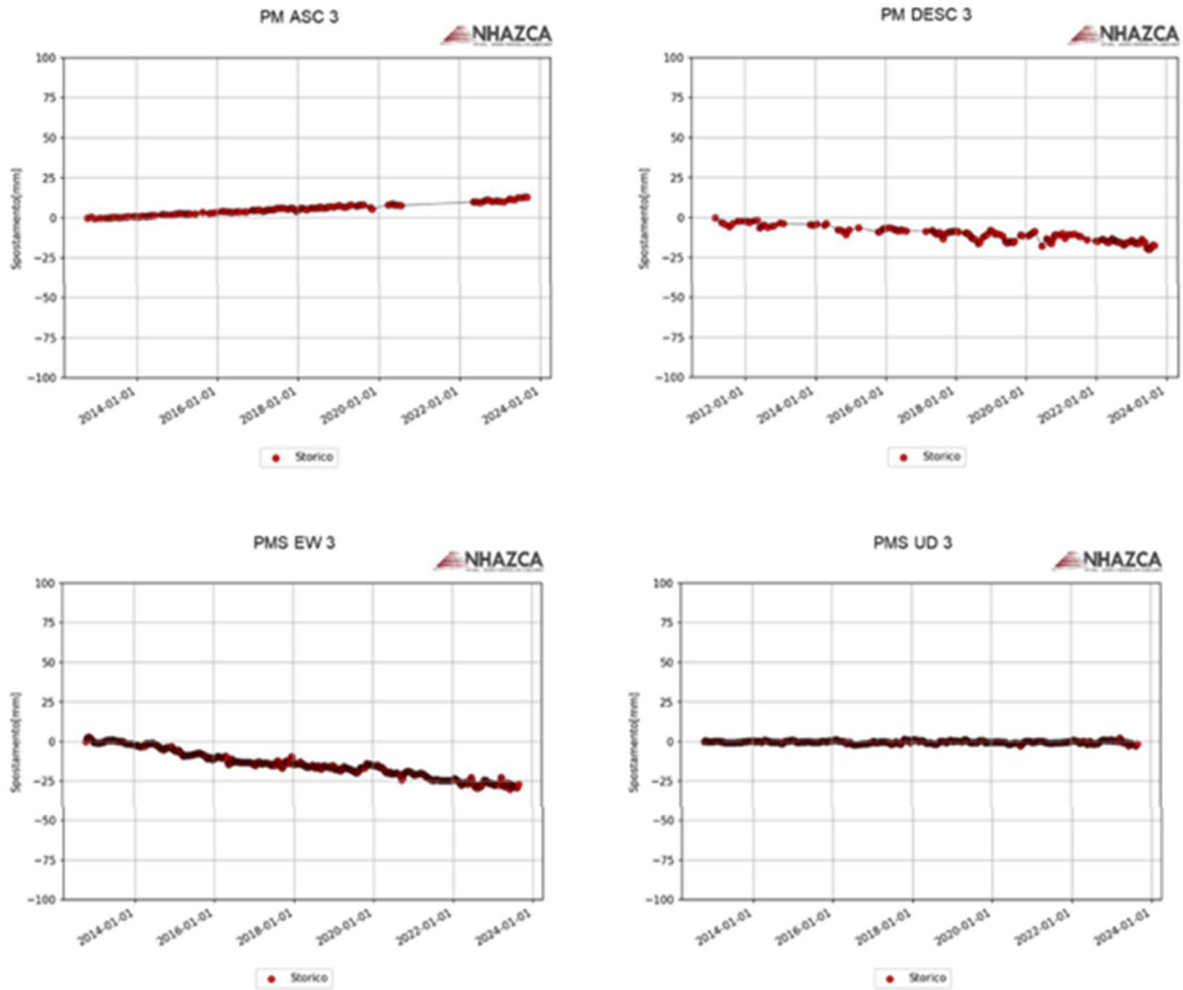


Figura 5-16 - Serie temporali di spostamento dei punti significativi individuati in Figura 5-14 e Figura 5-15 (PM/PMS 3).

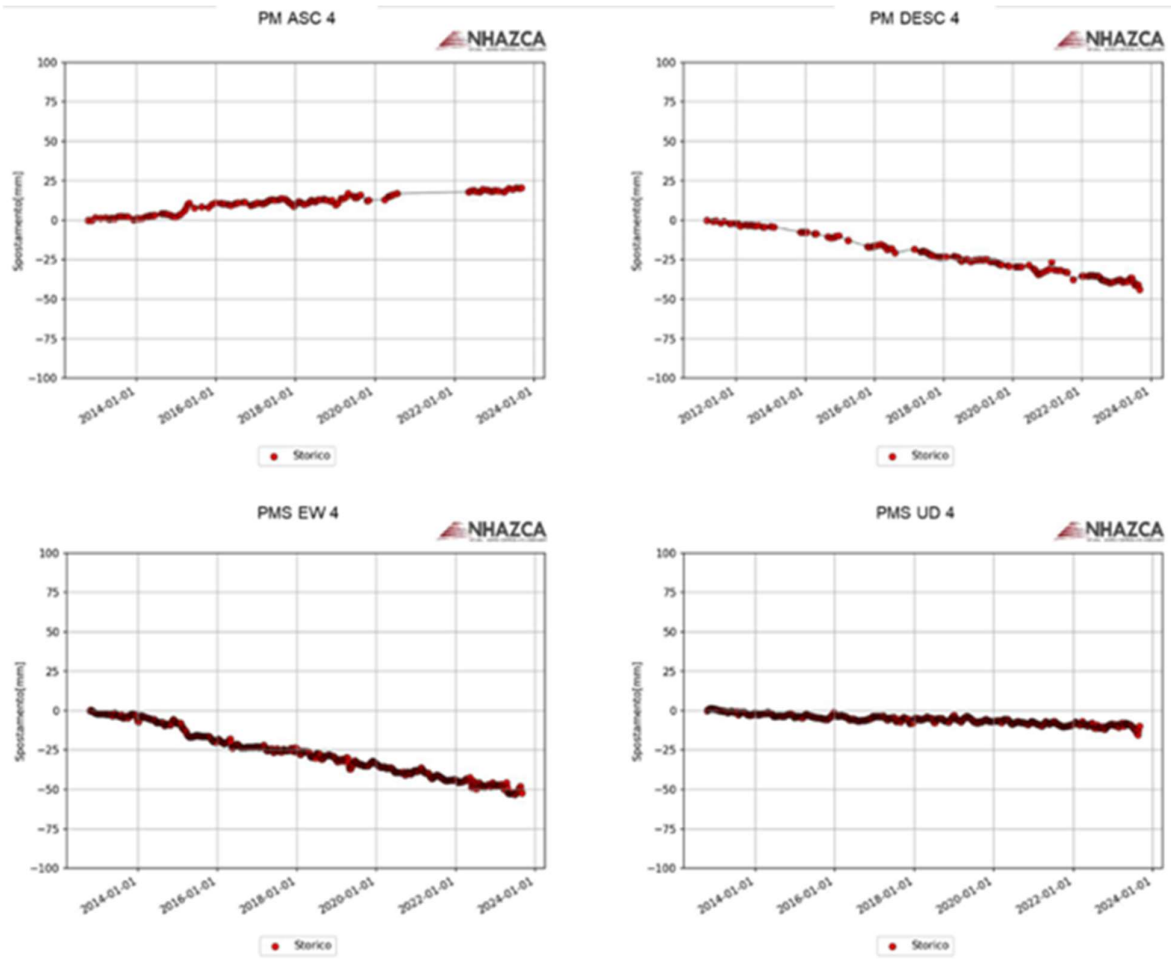


Figura 5-17 - Serie temporali di spostamento dei punti significativi individuati in Figura 5-14 e Figura 5-15 (PM/PMS 4).

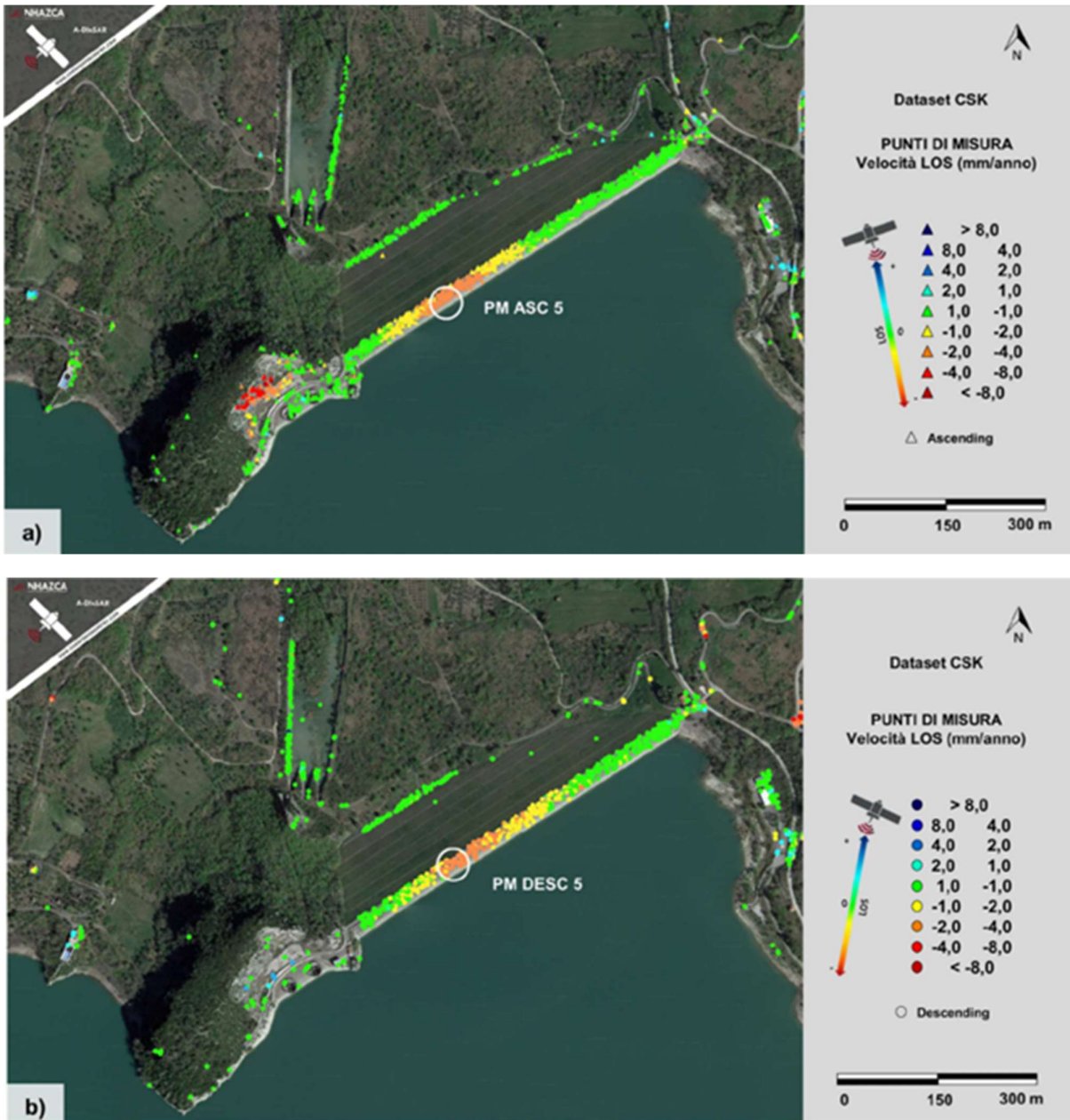


Figura 5-18 - Mappa di velocità in geometria ascendente (a) e discendente (b) dei PM con relativa localizzazione di punti significativi nella zona di focus 3.

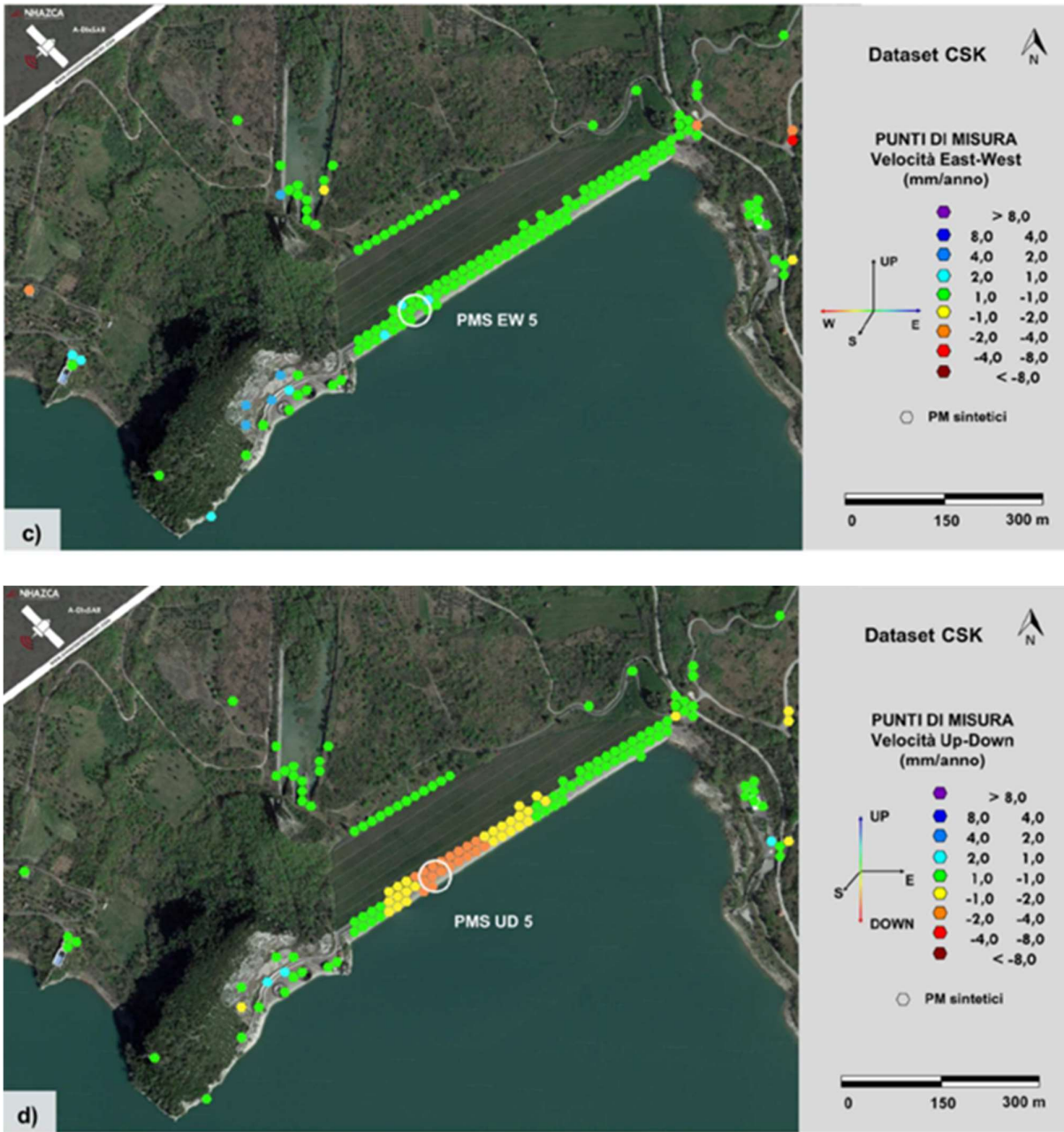


Figura 5-19 - Mappa di velocità in geometria orizzontale (c) e verticale (d) dei PMS con relativa localizzazione di punti significativi nella zona di focus 3.

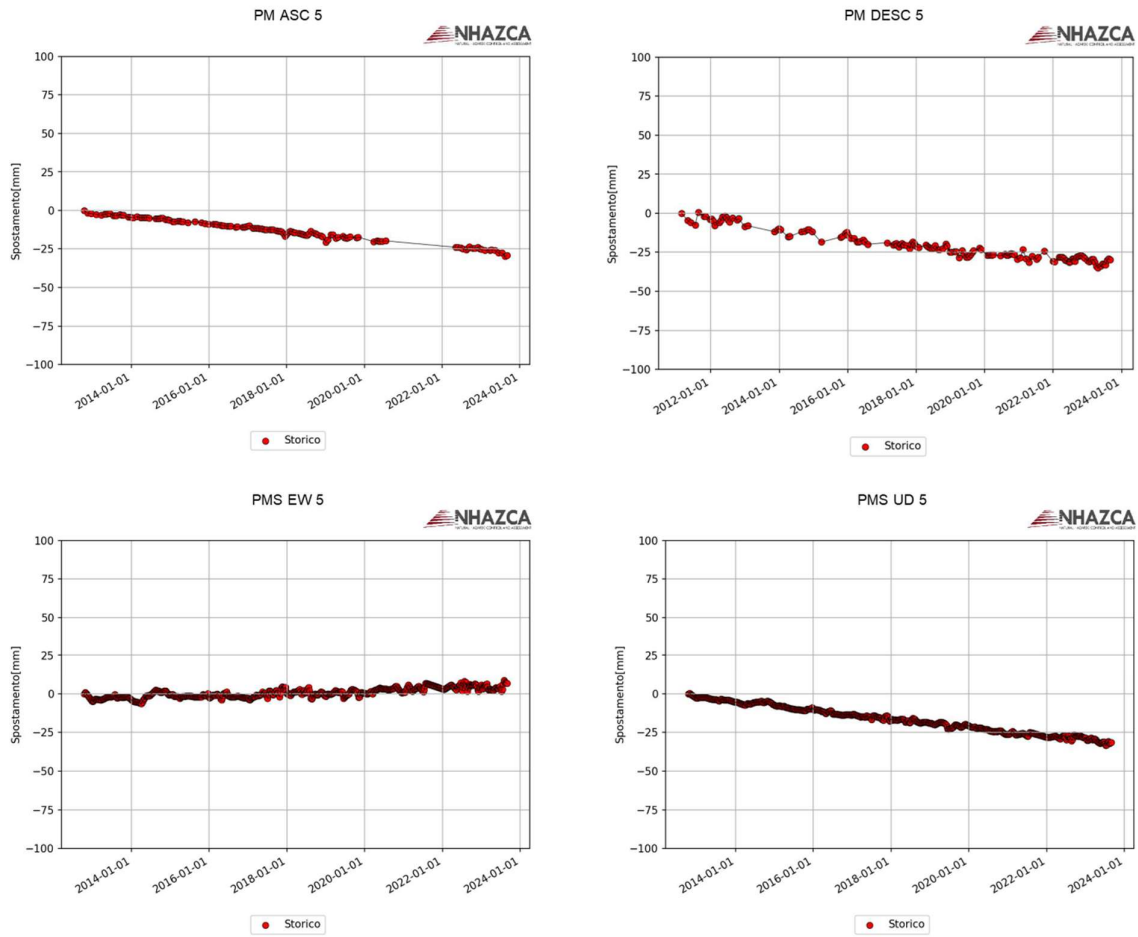


Figura 5-20 - Serie temporali di spostamento dei punti significativi individuati in Figura 5-18 e Figura 5-19 (riga 1: PM 5, riga 2: PMS 5).

ZONA DI FOCUS 1					
LOS	Componente	PM/PMS <sub>tot</sub>	V. media	V. min [mm/anno]	V. max [mm/anno]
			[mm/anno]		
	Ascendente	1838	0.585	-3.4	5.35
	Discendente	1367	-0.758	-6.35	2.63
	Orizzontale		-1.93	-8.77	1.12
	Verticale	190	-0.413	-2.16	0.794

Tabella 1 - Valore medio, minimo e massimo delle componenti della velocità lungo la LOS e relative componenti orizzontali e verticali dei PM/PMS individuati nella zona di Focus 1.

ZONA DI FOCUS 2					
Componente	PM/PMS tot	V. media [mm/anno]	V. min [mm/anno]	V. max [mm/anno]	
LOS		1470	0.264	-3.01	4.93
	Ascendente	1366	-0.935	-7.83	2.26
	Discendente		-1.46	-6.48	0.978
	Orizzontale	121			
Verticale		-0.398	-2.94	1.58	

Tabella 2 - Valore medio, minimo e massimo delle componenti della velocità lungo la LOS e relative componenti orizzontali e verticali dei PM/PMS individuati nella zona di Focus 2.

ZONA DI FOCUS 3					
Componente	PM/PMS tot	V. media [mm/anno]	V. min [mm/anno]	V. max [mm/anno]	
LOS		2552	-0.585	-8.27	4.93
	Ascendente	1372	-0.675	-7.46	2.58
	Discendente		0.07	-2.97	3.11
	Orizzontale	150			
Verticale		-0.656	-3.48	1.58	

Tabella 3 - Valore medio, minimo e massimo delle componenti della velocità lungo la LOS e relative componenti orizzontali e verticali dei PM/PMS individuati nella zona di Focus 3.

La zona di Focus 1 comprende il sito dei due pozzi esplorativi Monte Pallano 1 e Monte Pallano 2, un settore del paese di Bomba situato nella parte Sud del paese, e circa 1 km della Strada Statale 652 a Sud-Ovest di Bomba. Dalle Figura 5-10 e Figura 5-11 si nota come gli edifici nel paese siano in una condizione di sostanziale stabilità (ricordando che al colore verde si associa il range di accuratezza strumentale). La strada e il sito dei pozzi risultano essere invece soggetti a rilevanti deformazioni verso Ovest (velocità comprese fra -3.03 e -8.77 mm/anno) e spostamenti più modesti verso il basso (velocità fra -0.03 e -2.15 mm/anno). In riferimento ai dati forniti dal catalogo IFFI (Figura 4-1), si deduce che i fenomeni deformativi misurati sono riconducibili alla presenza di frane di tipo complesso che interessano il versante in analisi.

Trend analoghi si riscontrano anche nella zona di Focus 2, situata a Sud della zona 1 e comprendente parte del corpo diga e circa 700 m di SS 652. Anche in questo caso la componente principale di spostamento è orizzontale in direzione Ovest, con velocità comprese fra -1.17 mm/anno e -6.48 mm/anno. Si rileva inoltre una discreta deformazione verticale verso il basso in una tratta lunga circa 200 m della Strada Statale, con velocità massime dell'ordine di -2.9 mm/anno. Anche in questo caso, gli spostamenti misurati sono compatibili con la presenza di fenomeni franosi (di tipo complesso e scivolamento rotazionale) che interessano il versante.

Per quanto riguarda invece la zona di Focus 3, è stato scelto di analizzare l'intero corpo diga a causa di una apparente subsidenza che coinvolge la parte centrale dello stesso. Dalla Figura 5-19 si distingue chiaramente un tratto della diga lungo circa 300 m interessato da deformazioni verticali, prevalentemente verso il basso, con velocità comprese fra -0.764 e -2.91 mm/anno. Lo stesso tratto è invece stabile per quanto riguarda i movimenti in direzione orizzontale, con velocità comprese fra -0.891 e 1.20 mm/anno (PMS EW 5 e PMS UD 5 in Figura 27).

## 6 European Ground Motion Service (EGMS)

Operativo dal 2019, l'European Ground Motion Service (EGMS) è un servizio gratuito (finanziato dall'European Environment Agency - EEA, in quanto parte del COPERNICUS Land Monitoring Service - CLMS), e incluso tra i servizi di monitoraggio del territorio a scala paneuropea. In particolare, EGMS si concentra sulla fornitura di informazioni relative ai processi deformativi coinvolgenti il terreno e le strutture di tutti i paesi membri dell'Unione Europea.

I prodotti restituiti da EGMS sono mappe codificate a colori in base alla velocità del movimento del suolo, in termini di millimetri all'anno. I prodotti sono ottenuti dall'analisi interferometrica multi-temporale di immagini acquisite dai satelliti Sentinel-1 a partire dal 2015. I dati vengono poi validati per renderli armonizzati su tutta l'Europa.

In particolare, EGMS distribuisce tre livelli di prodotti:

- **Basic:** si tratta di mappe di velocità in linea di vista (LOS - Line of sight) per l'orbita ascendente e l'orbita discendente; questi prodotti sono riferiti rispetto a un punto di riferimento locale.
- **Calibrated:** si tratta di mappe di velocità in linea di vista (LOS - Line of sight) per l'orbita ascendente e l'orbita discendente; questi prodotti vengono riferiti rispetto a un modello derivato dai dati acquisiti mediante Global Navigation Satellite Systems (GNSS).
- **Ortho:** mappe della componente verticale e della componente orizzontale dello spostamento (riferite a un modello geodetico di riferimento e ricampionate su una griglia di 100 m).

Nel contesto di questo studio sono stati interpretati i prodotti EGMS Basic su tutta l'area dei Domini Esterni (Figura 6-1), e a partire da questi è stata effettuata una scomposizione vettoriale per calcolare le componenti verticali e orizzontali dello spostamento (Figura 6-2). Infine, anche per questi dati è stata realizzata la Spazializzazione già descritta nel capitolo 1.2. Si osserva che per questi prodotti l'intervallo di stabilità è stato esteso a  $\pm 2$  mm/anno (anziché  $\pm 1$  mm/anno come per i prodotti COSMO-SkyMed), per tenere in considerazione la minore risoluzione di Sentinel-1.

### 6.1 Risultati post elaborazione EGMS

I risultati della post-elaborazione, insieme al dato originario EGMS Basic, mostrano che l'area dei Domini Esterni è prevalentemente stabile (ovvero con tassi di deformazione entro il range di errore strumentale); anche in questo caso si rilevano spostamenti fortemente localizzati, riconducibili ai numerosi fenomeni franosi che interessano l'area di studio (Figura 4-1 - Figura 4-2). Alcune aree particolarmente soggette a deformazione sono ad esempio le frazioni di Colle Buono (Comune di Roccascalegna, CH), Valle Franceschelli (Comune di Archi, CH) e Montebello sul Sangro (CH), per i quali vengono riportati in Tabella 4 i valori medi e massimi di velocità orizzontale e verticale ottenuti a valle della scomposizione vettoriale (si ricorda che a velocità negative corrispondono spostamenti verso Ovest in direzione orizzontale e verso il basso in direzione verticale, mentre a valori positivi corrispondono spostamenti verso Est e verso l'alto).

Località	V. media [mm/anno]		V. massima [mm/anno]	
	Orizzontale	Verticale	Orizzontale	Verticale
Colle Buono	12.72	-5.20	20.03	-8.76
Valle Franceschelli	17.11	-3.9	38.63	-8.12
Montebello sul Sangro	-5.10	-2.18	-7.78	-5.36

Tabella 4 - Valori medi e massimi delle componenti di velocità orizzontale e verticale dei PMS EGMS per le località indicate.



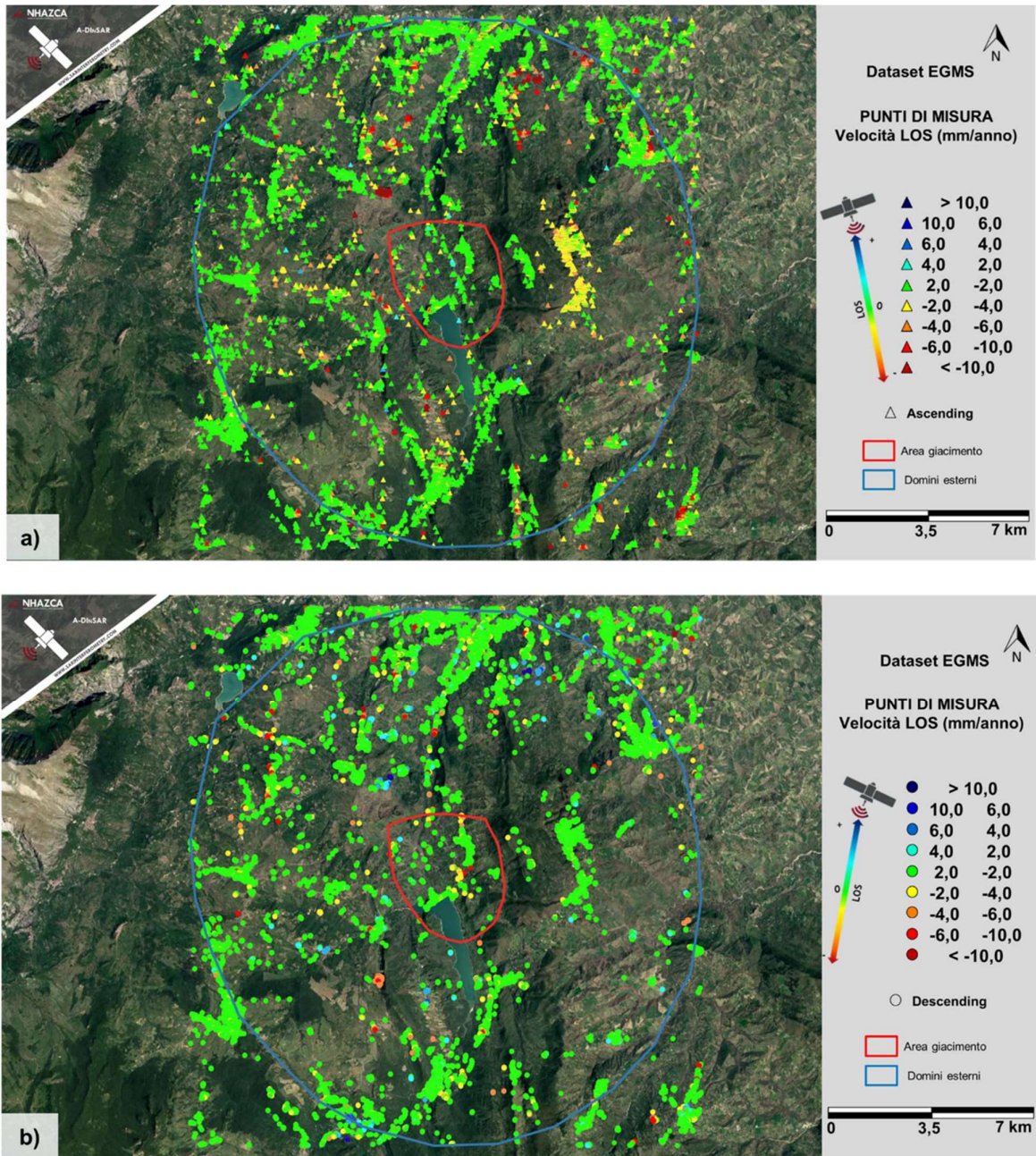


Figura 6-1 - Mappa di velocità in geometria ascendente (a) e discendente (b) dei PM EGMS nell'area dei Domini Esterni.

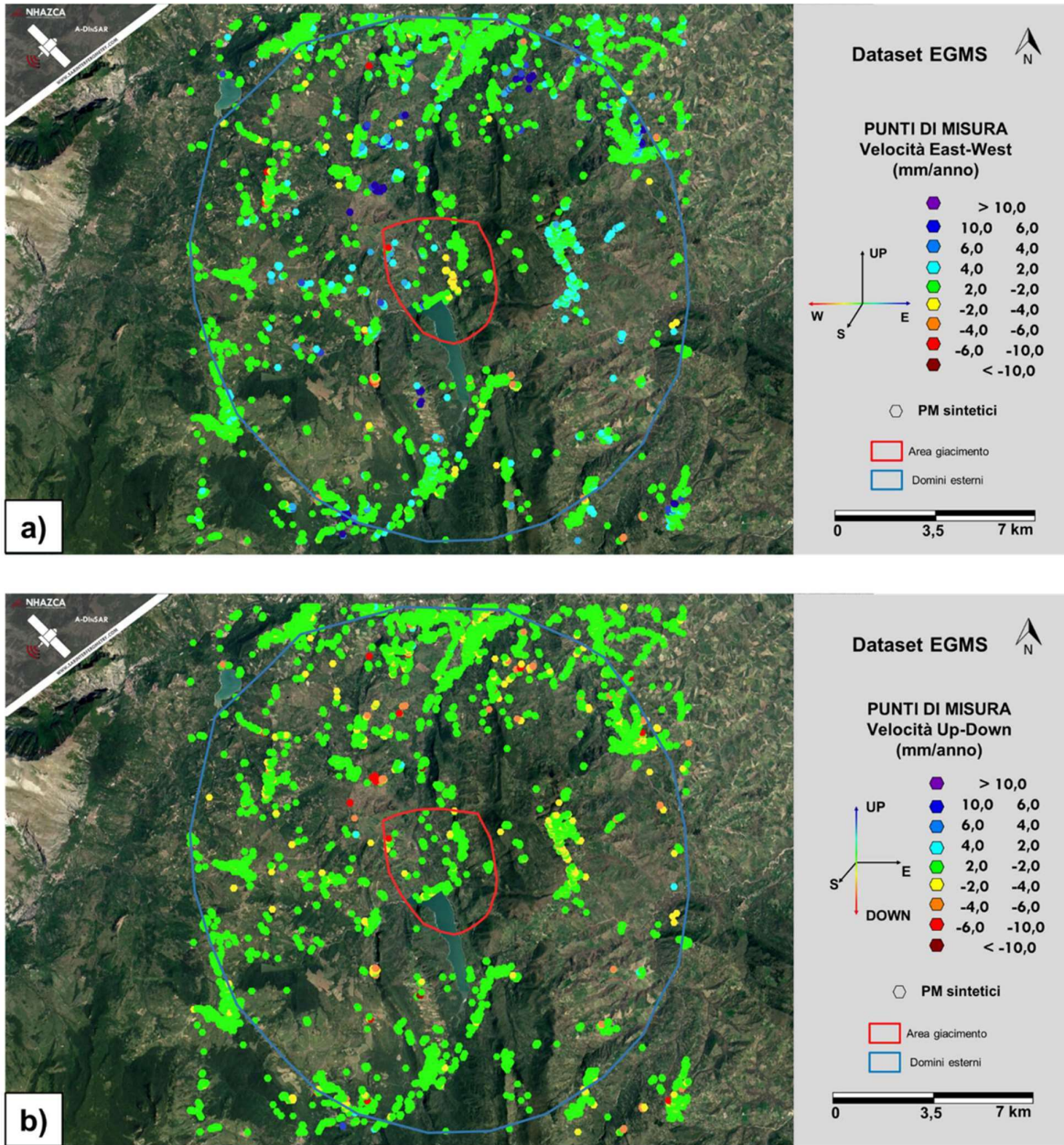


Figura 6-2 - Mappa di velocità orizzontale (a) e verticale (b) dei PMS EGMS nell'area dei Domini Esterni.

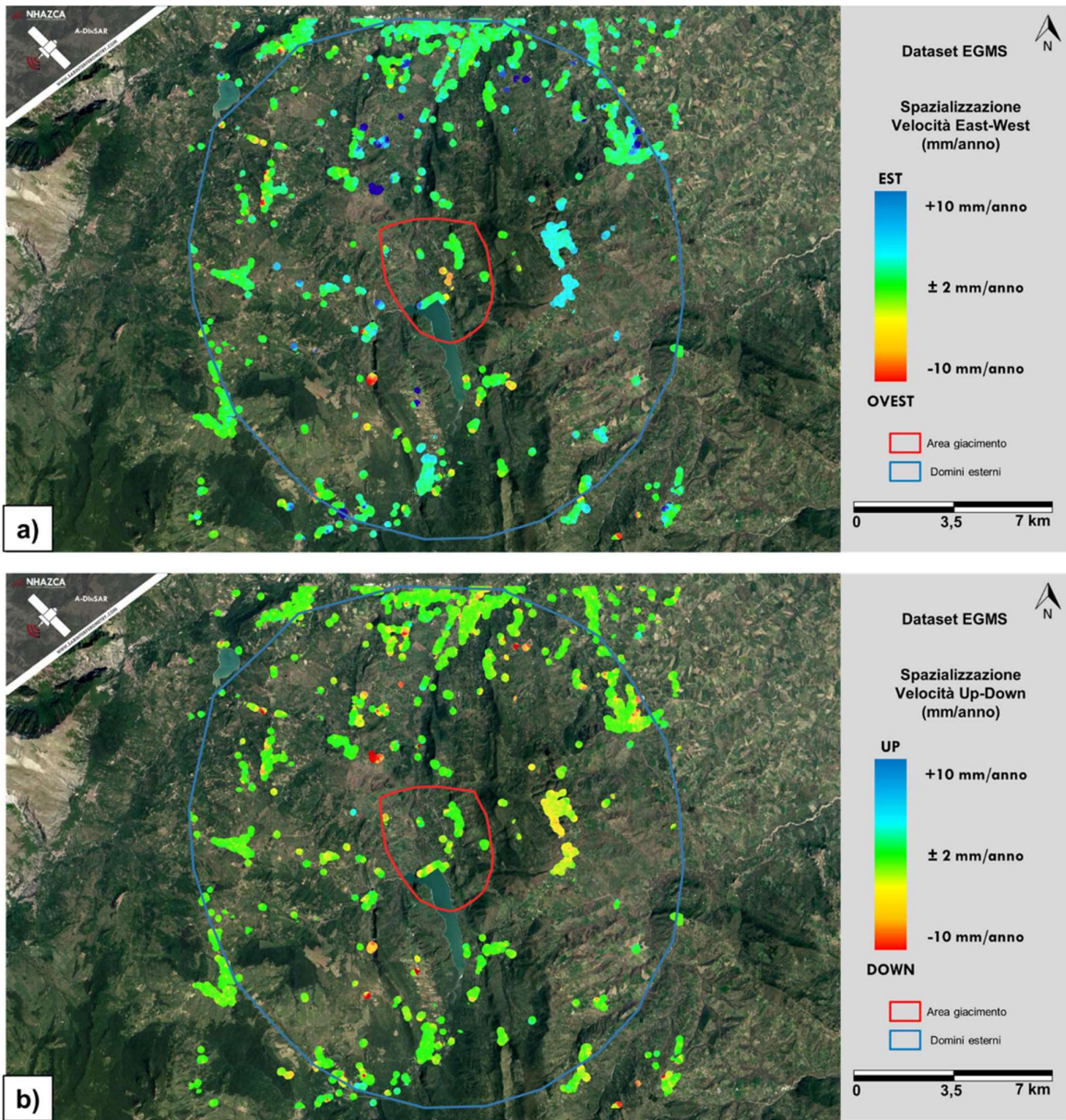


Figura 6-3 - Spazializzazione delle componenti di velocità orizzontale (a) e verticale (b) dei PMS EGMS nell'area dei Domini Esterni.

## 7 Considerazioni conclusive

I risultati delle analisi eseguite con tecniche A-DInSAR a partire da immagini COSMO- SkyMed e dell'interpretazione del dato European Ground Motion Service, hanno consentito di identificare e quantificare i tassi e i trend di spostamento di fondo nell'area di indagine. Lo studio ha riguardato due macroaree: una interna (Area Giacimento) su cui sono stati considerati esclusivamente i risultati ottenuti dall'analisi storica per il periodo 2011-2023, e una esterna (Domini Esterni) su cui sono stati presi in esame i dati acquisiti dai satelliti Sentinel-1 nel periodo 2015-2021 e forniti dal servizio EGMS. È stato quindi possibile ottenere le mappe di velocità dei Punti di Misura (in geometria orbitale ascendente e discendente, che esprimono i tassi di spostamento relativamente alla linea di vista del sensore), e dei Punti di Misura Sintetici (che esprimono i tassi di spostamento in direzione orizzontale e verticale) che, confrontate con i cataloghi IFFI e PAI, hanno permesso di caratterizzare i siti di interesse.

Dall'analisi delle mappe dei PM (in Figura 5-2 e Figura 5-3) si evince che l'area del giacimento, in particolare in prossimità di Bomba, sia affetta da fenomeni deformativi di lungo periodo diffusi e di entità localmente molto variabile, da lieve a media. Dall'osservazione delle mappe di deformazione in direzione verticale e orizzontale (Figura 5-5 e Figura 5-6), si osserva una prevalente componente deformativa in tutta l'area di studio in direzione orizzontale, verso Est o Ovest a seconda dell'esposizione del versante, mentre risultano di minore entità le deformazioni in direzione verticale, che appaiono localizzate principalmente sul corpo diga del Lago di Bomba.

Sull'area del giacimento sono stati individuati tre settori di focus, ritenuti interessanti per la loro posizione (ovvero in prossimità del sito dei pozzi esplorativi Monte Pallano 1 e 2) e per l'entità dei relativi fenomeni deformativi.

Le prime due aree hanno tassi di deformazione prevalentemente orizzontali verso Ovest, con velocità massime pari rispettivamente a -8,77 mm/anno e -6,48 mm/anno (Tabella 1 e Tabella 2). Questi trend sono riconducibili alla presenza di fenomeni franosi locali, ampiamente cartografati nell'inventario IFFI (Figura 4-1).

La terza area di focus è stata invece individuata sul corpo diga, dove è stata riscontrata una velocità verticale massima pari a -3,48 mm/anno (spostamento verso il basso), mentre la velocità orizzontale risulta quasi totalmente entro l'intervallo di stabilità.

Dall'interpretazione del dato EGMS nell'area dei domini esterni è stato possibile concludere che anche in questo caso i fenomeni deformativi sono fortemente localizzati e variabili in entità, con la gran parte dei PM/PMS nel range di sensibilità del sensore e alcuni settori con velocità massime oltre il cm/anno. Anche qui la componente di spostamento prevalente è quella orizzontale, con tassi di deformazione verticale di media entità (Tabella 4).

In considerazione della diffusa presenza di fenomeni gravitativi in tutta l'area (sia nel dominio esterno che area del giacimento) le attività di monitoraggio SAR satellitare, già previste dallo studio, potranno permettere il controllo dei processi già individuati e verificare l'insorgenza di possibili nuovi fenomeni deformativi grazie ai dati COSMO-SkyMed che si renderanno disponibili nei prossimi mesi.

## 8 Glossario

### A-DInSAR

Acronimo di “Advanced Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar”. Tipologia di tecniche di elaborazione di immagini SAR satellitari che si basano sull’utilizzo di stack (cfr. Stack) multitemporali.

### EGMS

Acronimo di “European Ground Motion Service”. Servizio gratuito di monitoraggio su scala paneuropea parte del COPERNICUS Land Monitoring Service - CLMS. I prodotti restituiti da EGMS sono mappe codificate a colori in base alla velocità del movimento del suolo, in termini di millimetri all’anno, ottenuti dall’analisi interferometrica multi-temporale di immagini acquisite dai satelliti Sentinel-1 a partire dal 2015.

### Geometria orbitale

I satelliti dotati di sensori SAR orbitano attorno alla Terra secondo orbite circa-parallele ai meridiani (quasi-polari). La contemporanea rotazione del pianeta attorno al suo asse, consente ai satelliti di osservare l’intera superficie terrestre. Il satellite, quindi, è in grado di sorvolare una medesima area sia durante l’orbita ascendente (da Sud verso Nord) che discendente (da Nord verso Sud). Poiché la linea di vista del sensore (LOS) è inclinata rispetto alla direzione nadirale, il satellite è in grado di osservare la medesima area da due punti di vista diversi durante l’acquisizione dei dati. La maggior parte dei satelliti utilizza una configurazione right-looking (osserva verso destra), perciò, in geometria ascendente le immagini sono acquisite con il fascio radar proveniente da Ovest, mentre in geometria discendente vengono acquisite con il sensore che osserva da Est.

### LOS

Linea di vista del satellite misurata lungo la congiungente sensore-bersaglio a terra (sia esso naturale o artificiale).

### RADAR

Acronimo per “RADio Detection And Ranging”, ovvero individuazione e misurazione di distanze attraverso onde radio. Il termine identifica un sistema basato sull’utilizzo di onde elettromagnetiche per la rilevazione di un oggetto nello spazio e per la misura della loro distanza sfruttando il principio della dispersione verso un’antenna ricevente, della radiazione elettromagnetica inviata da un’antenna trasmittente. Il sistema si basa sulla misura del tempo necessario al segnale a percorrere il tragitto che separa il target dal sensore.

### SAR

Acronimo per “Synthetic Aperture Radar”, ovvero “Radar ad apertura sintetica”, rappresenta una particolare tipologia di radar la cui caratteristica è di sfruttare il moto lungo una traiettoria predefinita per mezzo di una piattaforma aerea (orbita di un satellite, direzione di volo di un aereo, etc.) o terrestre (vengono frequentemente utilizzati sistemi elettromeccanici con sensori radar che si muovono su binari di lunghezza di ordine metrico). Attraverso tale soluzione diventa possibile osservare la stessa area da più angoli di vista, “simulando” quindi, un’antenna di grandi dimensioni al fine di incrementare la risoluzione al suolo.

### Stack

Dataset multitemporale di immagini SAR acquisite con le medesime caratteristiche (risoluzione, polarizzazione, geometria orbitale, angolo di incidenza, etc.) su una stessa area in un determinato intervallo di tempo. Rappresenta il dato di base per l’esecuzione di analisi A-DInSAR.

## 9 Bibliografia

- Hanssen, R. F. (2001). *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Kluwer Academic.
- ISPRA. (2023). *IFFI – Inventario dei fenomeni franosi in Italia*. <https://idrogeo.isprambiente.it/app/>
- Kampes, B. M. (2006). *Radar Interferometry: Persistent Scatterer Technique*. Springer: Dordrecht, The Netherlands.
- Massonnet D., & Feigl, K. L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Rev. Geophys.*, 36(4), 441–500. <https://doi.org/10.1029/97RG03139>
- Moreira A., P-I. P. Y. M. K. G. H. I. & P. K. (2013). A tutorial on synthetic aperture radar. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 6–43.
- Tarquini S. Isola I., F. M. B. A. (2007). *TINITALY, a digital elevation model of Italy with a 10 m-cell size (Version 1.0)*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/TINITALY/1.0>