

## S.S.45 DELLA VAL DI TREBBIA

### AMMODERNAMENTO DELLA STRADA STATALE N. 45 DELLA VAL TREBBIA NEL TRATTO CERNUSCA-RIVERGARO

## PROGETTO DEFINITIVO

PROGETTAZIONE: ANAS DPRL

SUPPORTO ALLA PROGETTAZIONE:

I PROGETTISTI:

ing. Antonio SCALAMANDRÉ  
Ordine Ing. di Frosinone n. 1063



IL GEOLOGO:

geol. Maurizio MARTINO  
Ordine Geol. del Lazio ES n. 457



IL RESPONSABILE DEL SIA:

Ing. Laura TROIANI  
Ordine Arch. di Roma n.A-31890



IL COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE:

geom. E PAIELLA



VISTO: IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO:

ing. Anna Maria NOSARI

PROTOCOLLO

DATA

DOTT. GEOL.  
DANILO GALLO

ING. RENATO  
DEL PRETE

BB08

**B - GEOLOGIA E GEOTECNICA**

**BB - INDAGINI**

RELAZIONE INTERFEROMETRIA DIFFIRENZIALE SAR

CODICE PROGETTO

NOME FILE

BB08 - T00GE00GEORE09\_A.dwg

REVISIONE

SCALA:

PROGETTO      LIV. PROG.      N. PROG.

BO0067    D    1801

CODICE ELAB. T00GE00GEORE09

A

-

C

B

A

EMISSIONE A SEGUITO ISTRUTTORIA

LUGLIO  
2020

REV.

DESCRIZIONE

DATA

REDATTO

VERIFICATO

APPROVATO

# RELAZIONE INTERFEROMETRIA DIFFERENZIALE SAR

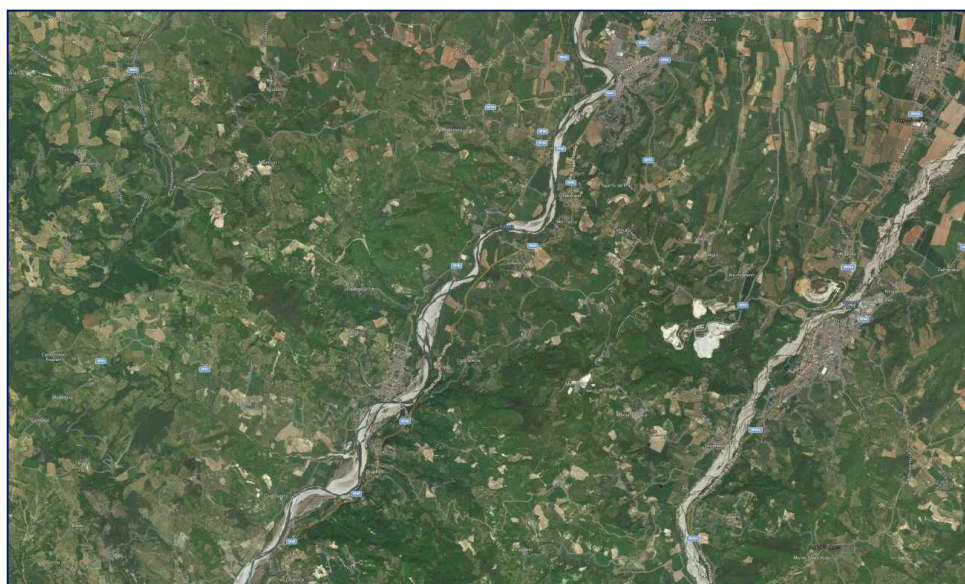


**PROJECT:**  
Progettazione Definitiva dell'intervento S.S. n°45 di Val  
Tebbia - Ammodernamento del tratto Rio  
Cernusca-Rivergaro

**LOCATION:**  
COMUNI DI TRAVO E RIVERGARO (PC)

**CLIENT:**  
ANAS S.p.A.

**OBJECT:**  
RELAZIONE INTERFEROMETRIA DIFFERENZIALE SAR



**Tecno In Ref.:** R.C. 129/19  
**Revision n.:** 00  
**Date:** luglio 2019  
**Description:** emissione

**Redacted by:** Dott. P.I. Antonio Atzeni  
**Reviewed by:** Dr.ssa Geol. Gabriella Vadala'  
**Approved by:** Dr. Geol. Lucio Amato  
**Document code:** 129-19\_rel\_SAR.pdf

## Sommario

1. PREMESSA.....	2
2. GENERALITA' SULL'INTERFEROMETRIA DIFFERENZIALE SAR.....	3
3. DATASET DELLE IMMAGINI SAR.....	5
4. ANALISI DELLE DEFORMAZIONI SUPERFICIALI REGistrate DA ACQUISIZIONI IN GEOMETRIA ASCENDING.....	8
5. ANALISI DELLE DEFORMAZIONI SUPERFICIALI REGistrate DA ACQUISIZIONI IN GEOMETRIA DESCENDING.....	15
6. ANALISI DELLE SERIE TEMPORALI DI SPOSTAMENTO DI ALCUNI RIFLETTORI INDIVIDUATI NELLE DUE GEOMETRIE DI ACQUISIZIONE.....	22
7. CONCLUSIONI .....	39

## 1. PREMESSA

Nella presente relazione sono riportati i risultati relativi all'elaborazione ed all'interpretazione di immagini radar satellitari mediante la tecnica Advanced Differential Interferometry SAR - (A-DInSAR) per il monitoraggio delle deformazioni della superficie terrestre dell'areale circostante la SS. 45 tra i comuni di Cernusca e Rivergaro (PC).

L'area oggetto di analisi è indicata in Figura 1.



Figura 1. Area oggetto di analisi: in rosso, il perimetro del territorio direttamente investigato.

Nello specifico è stata utilizzata la tecnica dell'Interferometria Differenziale SAR (DInSAR) per il processamento di immagini radar di ultima generazione (Very High Resolution – VHR) acquisite dalla costellazione Cosmo-SkyMed dell'Agenzia Spaziale Italiana (ASI).

## **2. GENERALITA' SULL'INTERFEROMETRIA DIFFERENZIALE SAR**

Le tecniche di telerilevamento sono sicuramente tra le innovazioni principali nel campo del monitoraggio geotecnico in quanto hanno introdotto la filosofia del monitoraggio “non a contatto” e possono essere considerate un valido supporto alle tradizionali strumentazioni di misura in situ. Rispetto ai più noti sistemi ottici operano con continuità, in qualsiasi condizione atmosferica e indipendentemente di giorno e di notte.

La disponibilità di un archivio storico di dati, a partite dal 1992, consente inoltre di eseguire analisi a posteriori circa l'evoluzione spazio-temporale dei fenomeni oggetto di studio.

I sistemi radar satellitari forniscono immagini elettromagnetiche (a frequenze comprese tra 500Hz e 10GHz) della superficie terrestre con risoluzione spaziale di qualche metro. Il principio di funzionamento RADAR (acronimo di RAdio Detection And Ranging) è il seguente: un apparecchio trasmettente illumina lo spazio circostante con un'onda elettromagnetica, che incidendo sulla superficie terrestre subisce un fenomeno di riflessione disordinata (diffusione, scattering).

Una parte del campo diffuso torna verso la stazione trasmettente, equipaggiata anche per la ricezione, dove vengono misurate le sue caratteristiche. Il dispositivo è in grado di individuare il bersaglio elettromagnetico (detecting) e, misurando il ritardo temporale tra l'istante di trasmissione e quello di ricezione, valutare la distanza (ranging) a cui è posizionato, localizzandolo in modo preciso lungo la direzione di puntamento dell'antenna (direzione di range).

Il SAR (Synthetic Aperture Radar) è un sensore attivo posto su una piattaforma in movimento, costituito da un'antenna trasmettente/ricevente che invia sulla superficie terrestre impulsi elettromagnetici nel campo delle microonde e ne registra i ritorni. Mediante tale tecnologia, ed in particolare attraverso l'implementazione di specifici algoritmi di processamento (interferometria) delle immagini acquisite, è possibile stimare spostamenti del suolo avvenuti durante le fasi di osservazione di uno specifico sito.

L'Interferometria SAR Differenziale (DInSAR) è nata nei primi anni '90 ed inizialmente ha consentito il monitoraggio degli spostamenti del suolo causati da eventi isolati, come terremoti od attività vulcanica. Più di recente (primi anni 2000), la ricerca si è spostata verso tecniche più avanzate che consentono di seguire l'evoluzione temporale della deformazione osservata durante tutto il periodo di tempo esaminato.

Tali tecniche, denominate Advanced DInSAR Techniques, lavorando a piena risoluzione spaziale (dell'ordine di 3 m circa), consentono di rilevare fenomeni deformativi anche molto ridotti spazialmente.

In particolare, l'Interferometria Differenziale consente di misurare le deformazioni della superficie terrestre, proiettate lungo la linea di vista del sensore (Line of Sight - LoS), calcolando la differenza di fase (interferogramma) tra due differenti immagini SAR relative all'area analizzata, acquisite in istanti di tempo (baseline temporale) e da posizioni orbitali (baseline spaziale) diverse.

La misura di spostamento dell'oggetto in esame deriva dall'informazione di variazione di fase, misurata dal sensore radar nei vari momenti di acquisizione. Tale tecnologia è in grado di assicurare una buona copertura sia spaziale che temporale (acquisizioni ogni 8-16 giorni nel caso dei sensori SAR di ultima generazione montati sulla costellazione di satelliti COSMO-SkyMed dell'Agenzia Spaziale Italiana) dell'area di studio, a costi ridotti se rapportati al numero di punti monitorabili.

Essa, inoltre, fornisce una misura delle deformazioni del suolo (avvicinamento o allontanamento dal sensore) su ampie zone di territorio (fino 10.000 Km<sup>2</sup> in funzione delle costellazioni satellitari e della risoluzione dell'immagine), con una precisione dell'ordine di frazioni della lunghezza d'onda utilizzata, cioè dell'ordine del millimetro.

La tecnica si basa sull'individuazione dei cosiddetti Persistent Scatterers (PS), rappresentati da riflettori naturali (edifici, infrastrutture, rocce ecc.) o artificiali (corner reflector) presenti nell'area investigata.

I prodotti derivanti dal monitoraggio interferometrico sono: mappe del tasso di deformazione (velocità media calcolata lungo la congiungente sensore-bersaglio "LoS") e dello spostamento cumulato (sempre lungo la LoS) e serie temporali degli spostamenti (lungo la LoS) dei target materializzati sulla superficie terrestre.

### 3. DATASET DELLE IMMAGINI SAR

Il dataset delle immagini SAR Cosmo-SkyMed che ha consentito di ottenere i risultati oggetto della presente relazione è stato acquisito nell'ambito di un protocollo d'intesa stipulato con l'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) proprietaria delle immagini Cosmo-SkyMed. Come evidenziato nel paragrafo precedente le immagini radar fornite sono state acquisite nel corso del Progetto MapItaly, sviluppato da ASI e dal Dipartimento della Protezione Civile, con il supporto della società E-GEOS. Lo scopo del progetto è realizzare un mapping interferometrico dell'intero territorio Italiano con la modalità StripMap HIMAGE (polarizzazione HH) della costellazione Cosmo-SkyMed, sia in modalità Ascending Right che Descending Right.

In via preliminare, sono state individuate le track delle immagini di archivio disponibili (Figura 2), in geometria ascending e descending, caratterizzate in entrambi i casi dal medesimo angolo d'incidenza di acquisizione - condizione necessaria per il corretto processamento.

Al fine di ricostruire l'evoluzione delle deformazioni superficiali nell'areale oggetto di analisi, sono stati utilizzati i due seguenti dataset di immagini:

- 107 immagini acquisite in geometria ascending dal 03-02-2012 al 06-02-2019;
- 108 immagini acquisite in geometria descending dal 31-01-2012 al 19-02-2019.

Si sottolinea che tali immagini sono state acquisite mediante la definizione di un protocollo d'intesa dell'utente finale con l'Agenzia Spaziale Italiana (ASI). Le immagini radar fornite sono state acquisite nel corso del Progetto MapItaly, sviluppato da ASI e dal Dipartimento della Protezione Civile, con il supporto della società E-GEOS.

È importante precisare che all'interno dei due dataset di acquisizioni radar, alcune immagini sono state acquisite con un leggero shift rispetto alla normale percorrenza dell'orbita, ragione per cui si è reso necessario escluderle dall'elaborazione ai fini di una migliore ed affidabile qualità dei prodotti.

Nel dettaglio, le immagini registrate in geometria ascending sono acquisite con un angolo di incidenza pari a  $29.3^\circ$ , mentre le immagini acquisite in orbita discendente sono ottenute con un'inclinazione rispetto alla verticale pari a  $32.1^\circ$ .



Figura 2. Impronta delle immagini SAR utilizzate nell'area di interesse (indicata in rosso) disponibili nell'archivio ASI: track ascending (a sinistra), track descending (a destra).

L'algoritmo utilizzato per il processamento delle immagini radar satellitari è definito "Coherent Pixels Technique" (CPT), sviluppato da Mora et al. (2003) presso il Remote Sensing Laboratory (RSLab) dell'Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Tale algoritmo permette di sviluppare l'intera catena interferometrica utilizzando coppie di immagini che presentano baseline spaziale e temporale ridotte e dunque caratterizzate da una migliore risposta di fase.

Il processo di elaborazione è composto di tre fasi principali:

- a) generazione dei migliori interferogrammi a partire dal dataset di immagini disponibili;
- b) selezione di riflettori caratterizzati da un valore di fase "accettabile" e caratterizzati da una buona stabilità della risposta elettromagnetica;
- c) calcolo delle velocità medie di spostamento e calcolo delle serie temporali di spostamento dei punti selezionati nel periodo di osservazione considerato.

I risultati di output ottenuti dal processamento con approccio CPT sono in generale caratterizzati da un grado di precisione e accuratezza intrinseco all'applicazione dell'algoritmo utilizzato.



La precisione delle misure indica il grado di convergenza dei valori misurati intorno alla loro media, mentre l'accuratezza quantifica la distanza tra le misure e il dato reale. Con riferimento al dato interferometrico, le problematiche relative alla precisione e all'accuratezza riguardano la georeferenziazione dei riflettori, la determinazione della velocità media di spostamento e la determinazione delle serie storiche di spostamento.

Per ciò che riguarda il posizionamento spaziale dei riflettori, il passaggio da coordinate nel sistema SAR a coordinate geografiche nel sistema WGS84 è affetto da un errore di posizionamento in direzione Nord-Sud ed in direzione Est-Ovest, pari a  $\pm 5$  m. L'errore relativo alla quota ellissoidica di ogni punto è stimato invece pari a  $\pm 1.5$  m.

La presenza di disturbo, di tipo atmosferico e rumore di decorrelazione, si traduce in errore nella misura della velocità dell'ordine di  $\pm 2$  mm/anno. Per quanto riguarda la precisione sulle serie storiche di spostamento, si può ritenere che la precisione del singolo valore della serie è compresa tra  $\pm 5$  mm/anno.

Il database dei risultati presenta le seguenti informazioni racchiuse nei campi di seguito definiti:

- il codice che permette di identificare in maniera univoca il punto di misura;
- Lat/Long: posizione del riflettore in direzione N-S e E-W in coordinate geografiche;
- UTM\_N/UTM\_E: posizione del riflettore in direzione N-S e E-W in coordinate metriche;
- Quality: parametro di qualità del dato riflettore, con valore compreso tra 0 e 1;
- Height: quota del riflettore calcolata rispetto all'ellissoide di riferimento WGS84;
- Ground Height: quota del riflettore calcolata rispetto al suolo;
- Rate: velocità media annua di spostamento in cm/anno misurata lungo la linea di vista del sensore (LoS) nell'intero arco temporale in cui sono state acquisite le immagini;
- aaaammdd: il valore di spostamento corrispondente a ciascuna acquisizione.

#### 4. ANALISI DELLE DEFORMAZIONI SUPERFICIALI REGISTRATE DA ACQUISIZIONI IN GEOMETRIA ASCENDING

Il processamento delle immagini è stato condotto mediante la tecnica dell'Interferometria Differenziale SAR, attraverso un approccio che lavora con i bersagli radar (Persistent Scatterers, PS) direttamente materializzati al suolo, consentendo di valutarne l'eventuale spostamento nel tempo. I PS sono riflettori materializzati in elementi già presenti al suolo, quali manufatti (edifici, monumenti, strade, linee ferroviarie, tralicci) oppure elementi naturali (affioramenti rocciosi). Pertanto, essi in generale non potranno essere rinvenuti in aree caratterizzate dalla presenza diffusa di vegetazione.

Con tale approccio pertanto è possibile analizzare tutti gli interferogrammi definiti a partire dal dataset di immagini a disposizione, consentendo di effettuare le analisi sul singolo pixel che mostra una determinata qualità/stabilità in termini di fase.

Come già discusso, sono state utilizzate 107 immagini acquisite in geometria ascending dal 03-02-2012 al 06-02-2019 (Fig. 3).

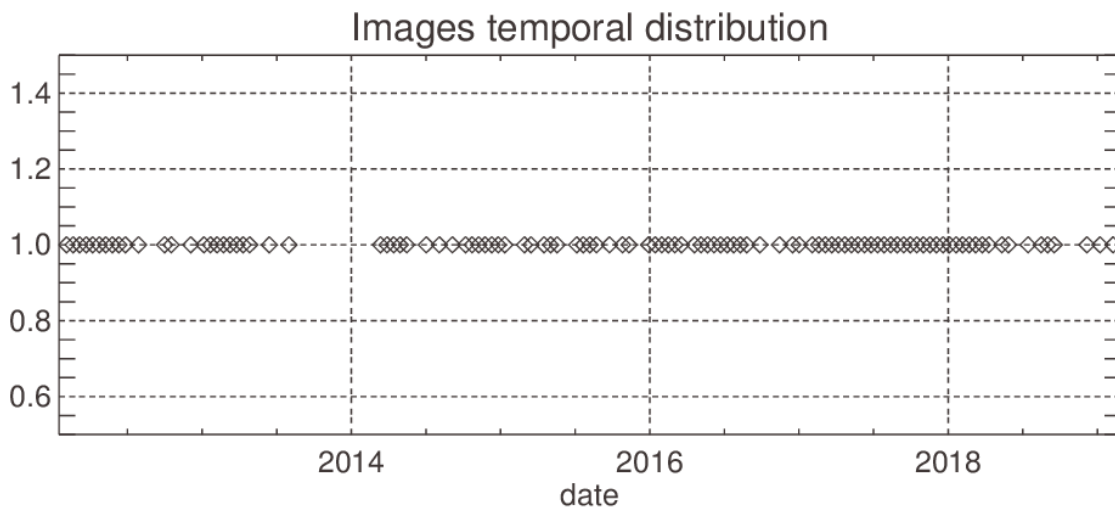


Figura 3. Distribuzione temporale delle immagini in geometria ascending nell'intervallo temporale analizzato.

Da esse sono stati ottenuti 337 interferogrammi (Figure 4 e 5) caratterizzati da baseline spaziale e temporale, minima, di 100 m e 100 giorni rispettivamente e, massima, di 400 m e 300 giorni rispettivamente.

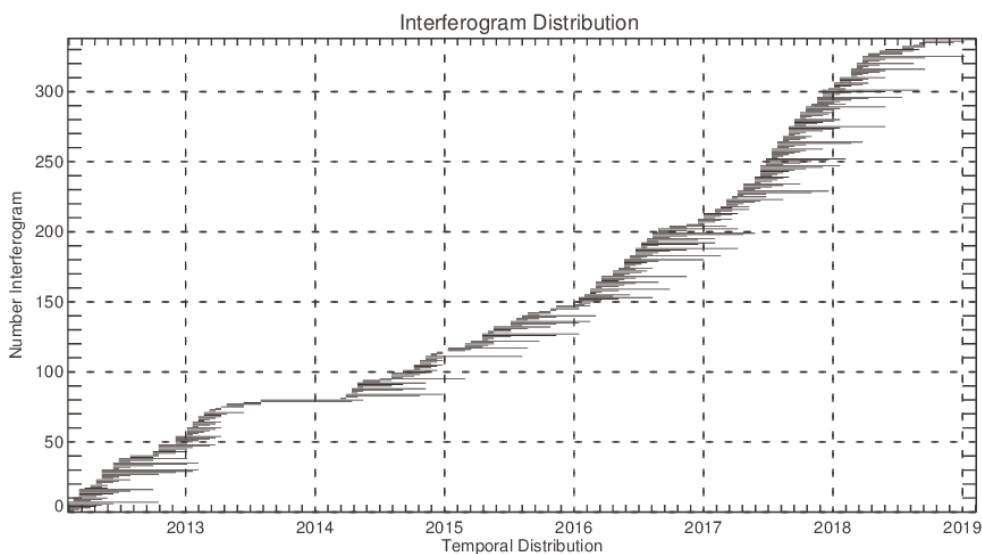


Figura 4. Distribuzione temporale degli interferogrammi ottenuti dalle immagini acquisite in geometria ascending.

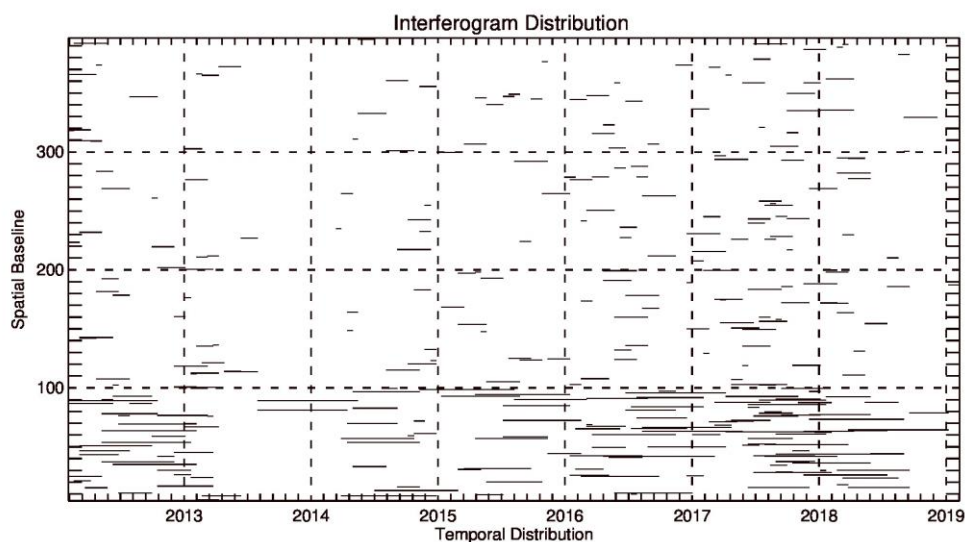


Figura 5. Distribuzione degli interferogrammi ottenuti dalle immagini acquisite in geometria ascending in relazione alla loro baseline spaziale e temporale.

L'immagine master è stata selezionata automaticamente dal software, il quale è capace di selezionarla al fine di minimizzare la decorrelazione totale nella generazione di tutti gli interferogrammi. Nel dettaglio, l'acquisizione in data 17-03-2016 è stata scelta come acquisizione di riferimento al fine di co-registrare tutto lo stack di immagini.

Successivamente sono state ottenute:

- le immagini ad alta risoluzione, dove sono rappresentati gli oggetti caratterizzati da maggiore riflettività e che possono essere monitorati durante tutto l'intervallo di tempo delle acquisizioni (Figura 6);

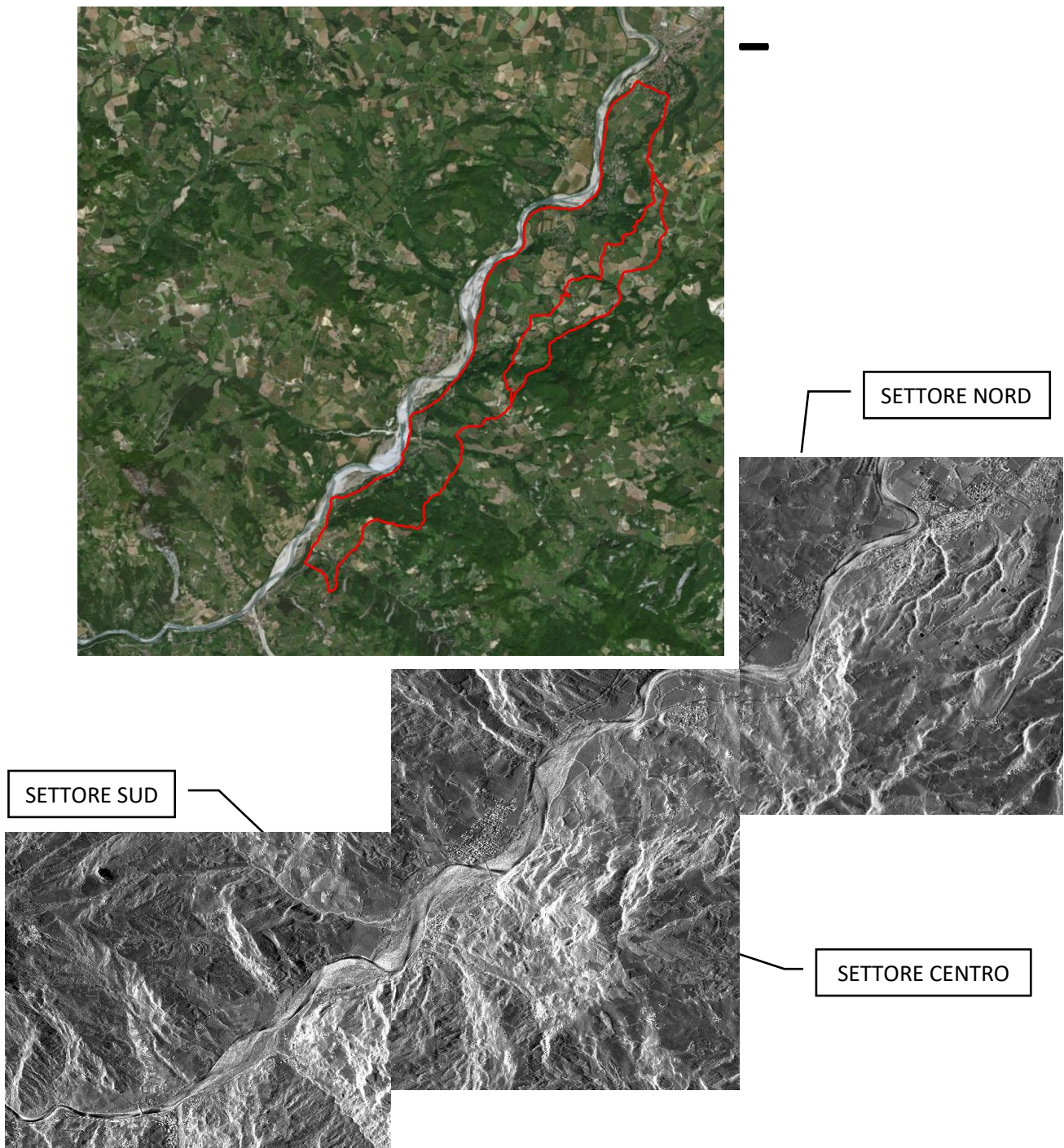


Figura 6. Immagine di alta risoluzione ascending dei settori NORD, CENTRO e SUD nell'areale investigato.

- le mappe dei punti direttamente selezionati e monitorabili, prefissata una data soglia di qualità pari a 0.45 (Figura 7).

Ai fini di una migliore restituzione dei risultati, l'areale oggetto di analisi, che si estende in direzione NE-SO, è stato suddiviso in 3 settori denominati rispettivamente SETTORE NORD, SETTORE CENTRO E SETTORE SUD.

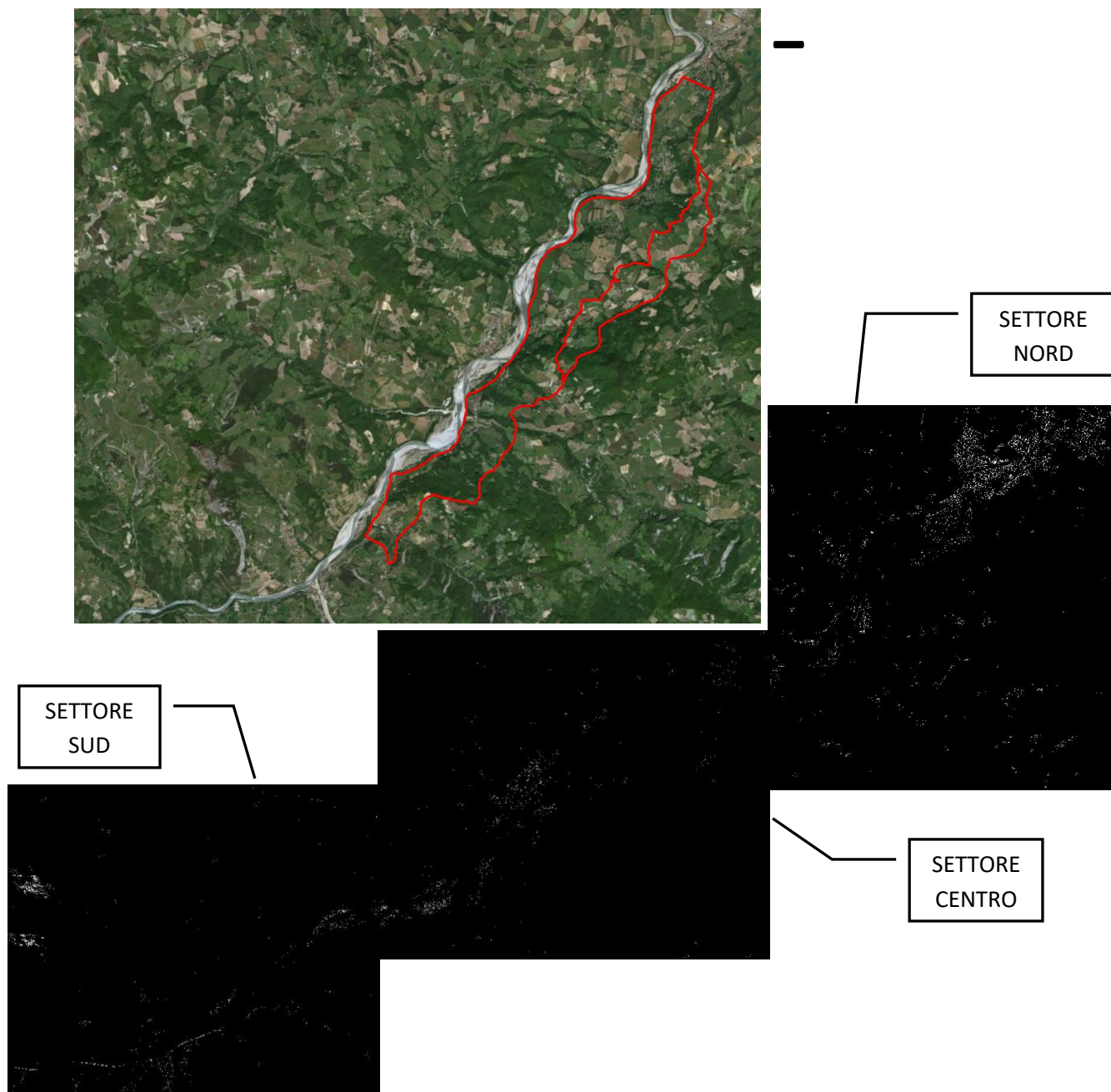


Figura 7. Punti selezionati e monitorabili nei settori NORD, CENTRO e SUD nell'areale investigato.

In analogia con le reti geodetiche, l'insieme dei riflettori radar identificati su un territorio può essere considerato come una fitta rete naturale di punti di misura, le cui posizioni e velocità di movimento sono riferite ad uno o più punti fissi assunti come riferimento stabile nel tempo. In fase di elaborazione la velocità di tali punti di riferimento è posta per convenzione uguale a zero.

A termine del processo di elaborazione per tutti i riflettori materializzati sono fornite rispettivamente:

- la mappa della velocità media di spostamento lungo la "LoS" dei target individuati (Figura 8);
- la mappa dello spostamento cumulato nel periodo 03-02-2012 / 06-02-2019 sempre lungo la "Los" dei target individuati (Figura 9).

È necessario sottolineare che queste ultime rappresentano gli spostamenti cumulati a partire dalla prima immagine disponibile, mentre le velocità medie rappresentano una sorta di velocità lineare che il modello stima sull'intero intervallo di acquisizione.

Si sottolinea che al fine di individuare anche eventuali fenomeni deformativi esterni ma potenzialmente interagenti con l'areale di analisi, è stata effettuata un'elaborazione in un dominio centrato intorno all'area in oggetto ed al suo interno sono stati identificati tutti i riflettori materializzati.

Come può notarsi, un elevato numero di riflettori è identificato in corrispondenza della rete infrastrutturale e dell'urbanizzato esistente, in dipendenza di un'elevata risposta elettromagnetica dei manufatti presenti; di contro, gli ambienti fortemente vegetati sono caratterizzati da un numero ridotto di target, risultando pertanto difficilmente investigabili.

È necessario osservare che in accordo alla convenzione comunemente adottata, valori positivi di velocità/spostamento sono da interpretarsi come avvicinamento al satellite (direzione Est-Ovest) mentre i valori negativi sono da interpretarsi come allontanamento dal satellite (direzione Ovest-Est), sempre lungo la congiungente sensore-bersaglio (Line of Sight, LoS).

In dettaglio, nell'areale in oggetto sono stati individuati 74850 target che presentano velocità medie di spostamento lungo la "LoS" dell'ordine massimo di 2,5 cm/anno, con spostamenti cumulati nell'arco temporale esaminato finanche di 18 cm.

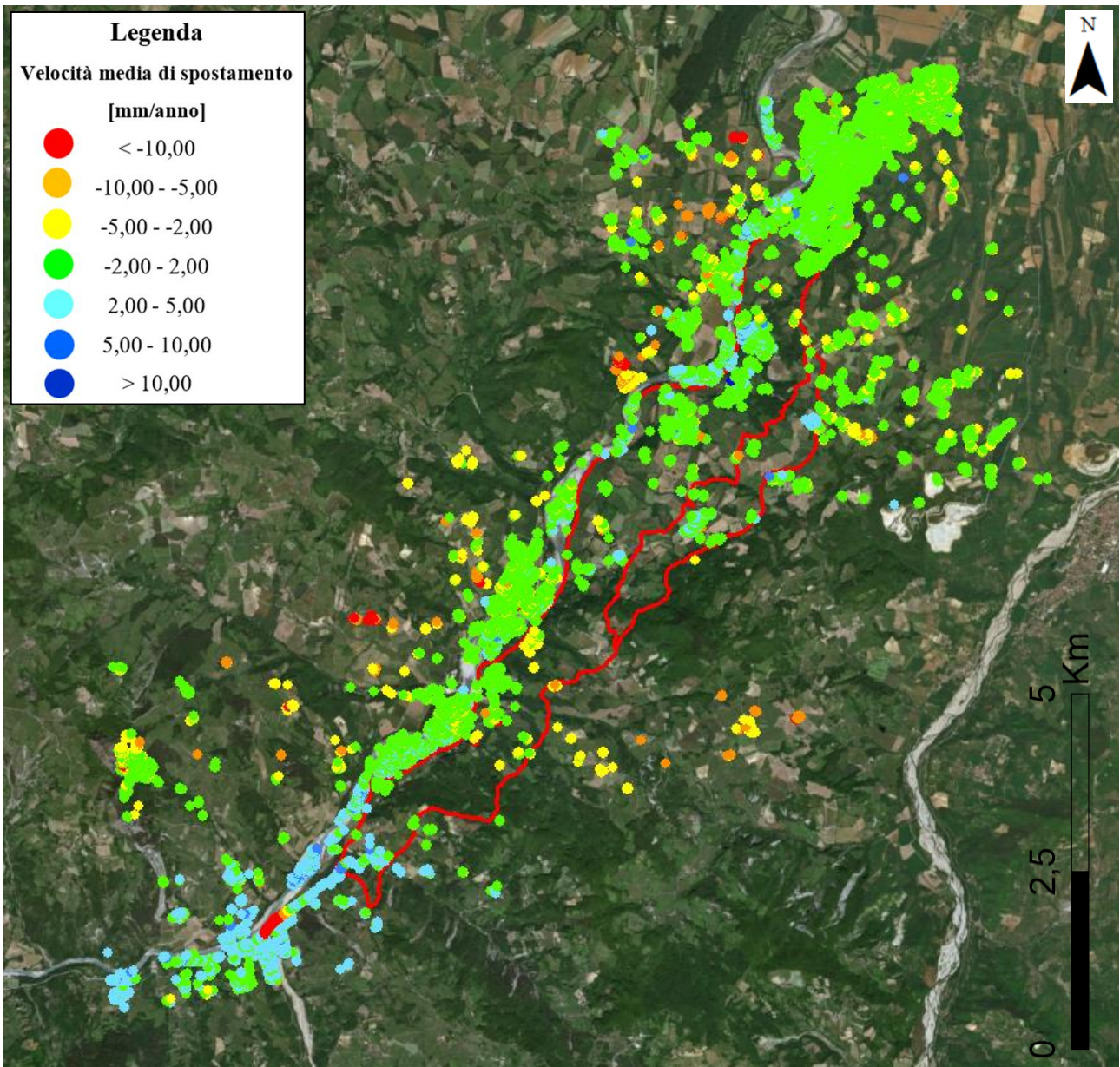


Figura 8. Mappa della velocità media di spostamento dei target identificati in geometria ascending.



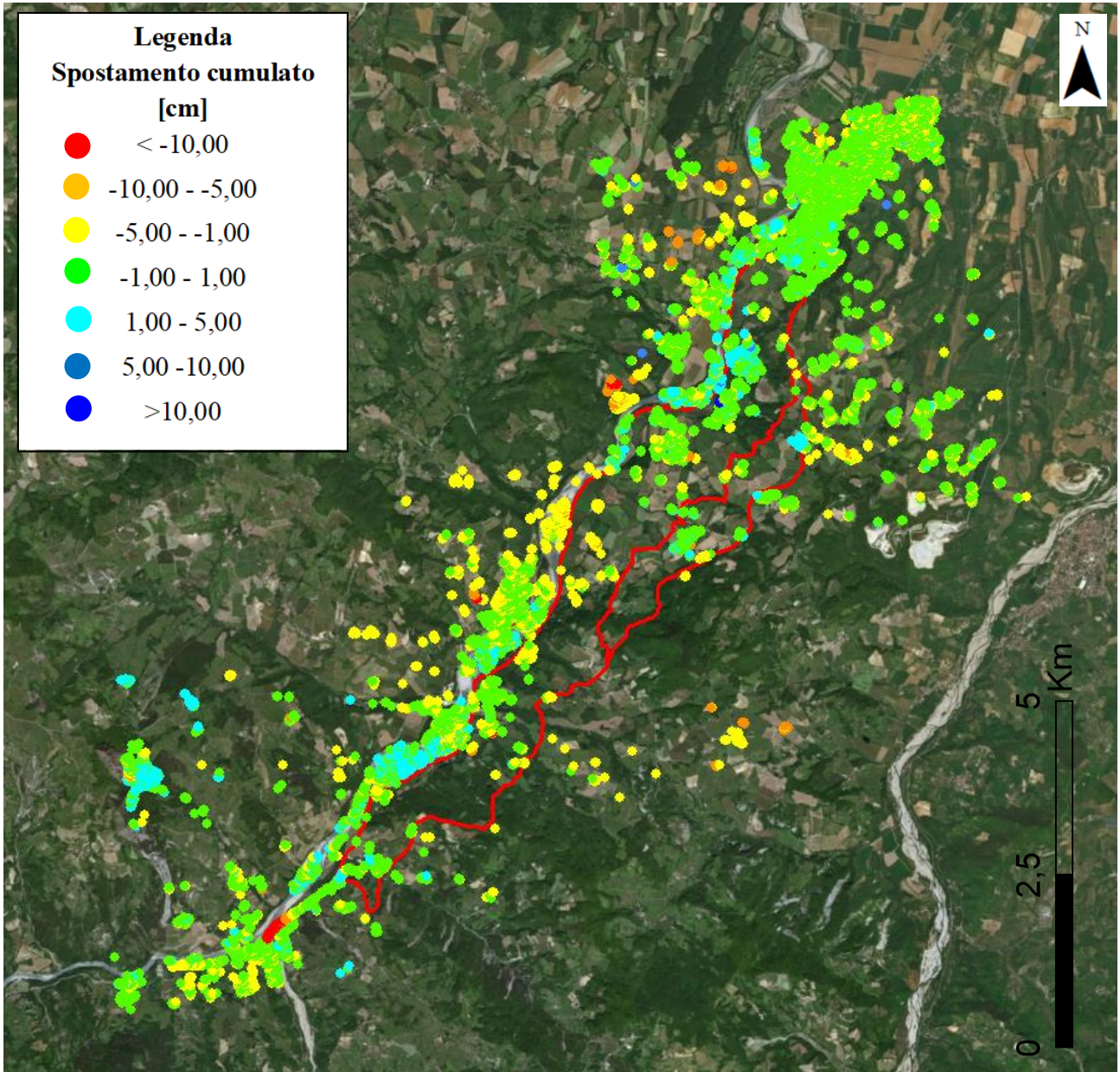


Figura 9. Mappa dello spostamento cumulato dei target identificati in geometria ascending.

## 5. ANALISI DELLE DEFORMAZIONI SUPERFICIALI REGISTRATE DA ACQUISIZIONI IN GEOMETRIA DESCENDING

In maniera analoga a quanto discusso nel precedente paragrafo, è stato eseguito mediante l'approccio dei Persistent Scatterers il processamento di 108 immagini acquisite in geometria descending dal dal 31-01-2012 al 19-02-2019 (Figura 10). Con tale approccio pertanto sono analizzati tutti gli interferogrammi definiti a partire dal dataset di immagini a disposizione, consentendo di effettuare le analisi sul singolo pixel che mostra una determinata qualità/stabilità in termini di fase.

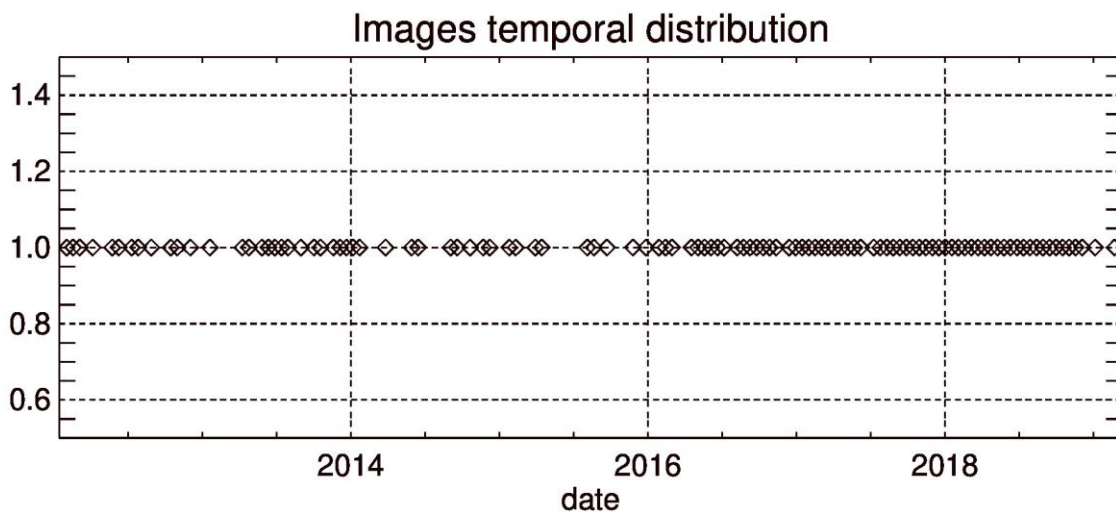


Figura 10. Distribuzione temporale delle immagini in geometria descending nell'intervallo analizzato.

Da esse sono stati ottenuti 426 interferogrammi (Figure 11 e 12) caratterizzati da baseline spaziale e temporale, minima, di 150 m e 150 giorni rispettivamente e, massima, di 400 m e 300 giorni rispettivamente.

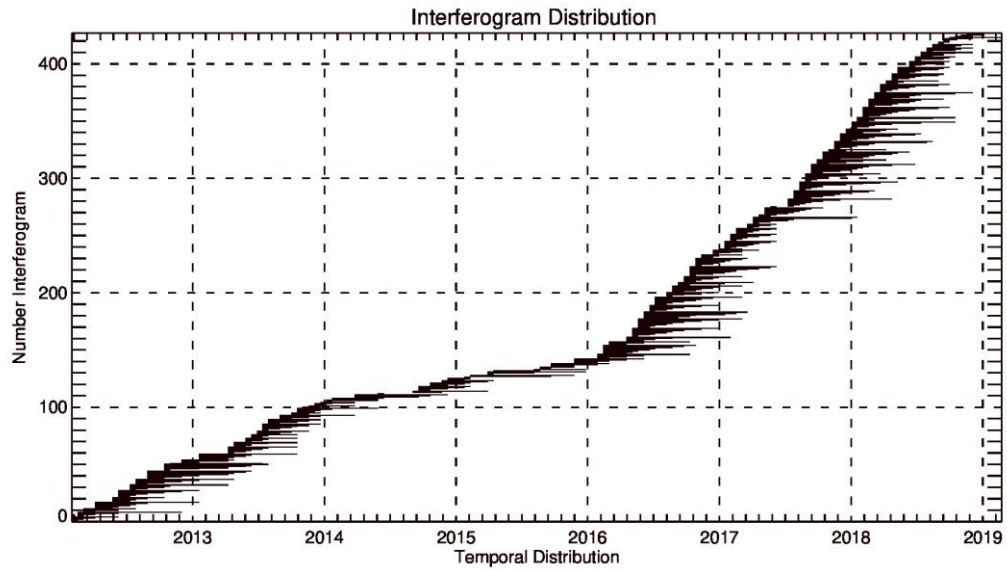


Figura 11. Distribuzione degli interferogrammi ottenuti dalle immagini acquisite in geometria descending.

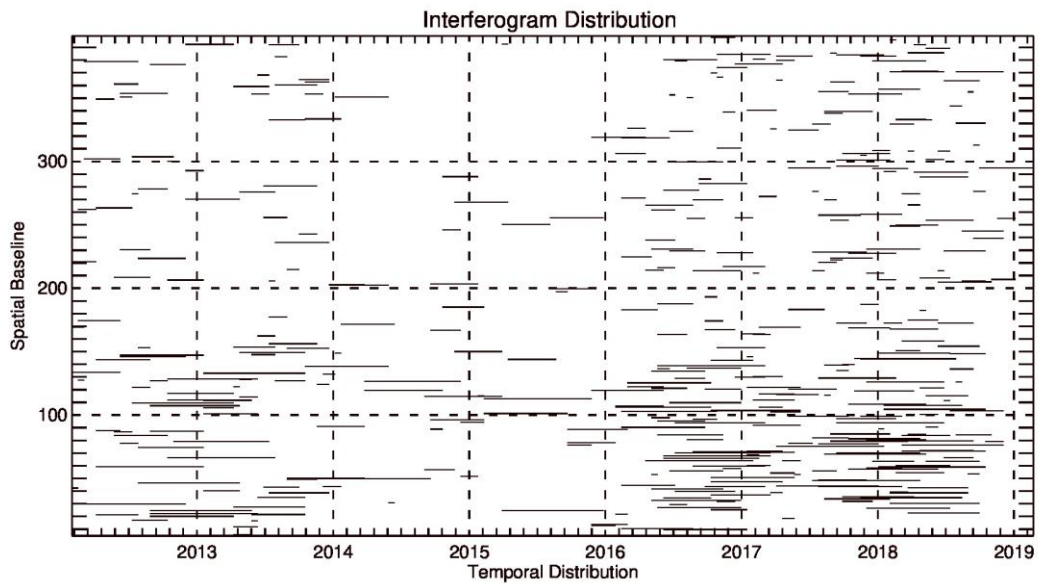


Figura 12. Distribuzione degli interferogrammi ottenuti dalle immagini acquisite in geometria descending in relazione alla loro baseline spaziale e temporale.

L'immagine master è stata selezionata automaticamente dal software, il quale è capace di selezionarla al fine di minimizzare la decorrelazione totale nella generazione di tutti gli interferogrammi. Nel dettaglio, l'acquisizione in data 26-01-2016 è stata scelta come acquisizione di riferimento al fine di co-registrare tutto lo stack di immagini.

Successivamente sono state ottenute:

- le immagini ad alta risoluzione, dove sono rappresentati gli oggetti caratterizzati da maggiore riflettività e che possono essere monitorati durante tutto l'intervallo di tempo delle acquisizioni;
- le mappe dei punti direttamente selezionati e monitorabili, prefissata una data soglia di qualità pari a 0.4.

Ai fini di una migliore restituzione dei risultati, l'areale oggetto di analisi, che si estende in direzione NE-SO, è stato suddiviso in 3 settori denominati rispettivamente SETTORE NORD, SETTORE CENTRO E SETTORE SUD e per ciascuno di essi sono riportate l'immagine ad alta risoluzione e la mappa dei punti direttamente selezionati (Figure 13 e 14).

In analogia con le reti geodetiche, l'insieme dei riflettori radar identificati su un territorio può essere considerato come una fitta rete naturale di punti di misura, le cui posizioni e velocità di movimento sono riferite ad uno o più punti fissi assunti come riferimento stabile nel tempo. In fase di elaborazione sono stati assunti gli stessi punti fissi utilizzati per il processamento delle immagini acquisite in geometria ascending, la cui velocità è posta per convenzione uguale a zero.

A termine del processo di elaborazione per tutti i riflettori materializzati sono fornite rispettivamente:

- la mappa della velocità media di spostamento lungo la "LoS" dei target individuati (Fig. 15);
- la mappa dello spostamento cumulato nel periodo 31-01-2012 / 19-02-2019 sempre lungo la "Los" dei target individuati (Figura 16).

È necessario sottolineare che queste ultime rappresentano gli spostamenti cumulati a partire dalla prima immagine disponibile, mentre le velocità medie rappresentano una sorta di velocità lineare che il modello stima sull'intero intervallo di acquisizione.

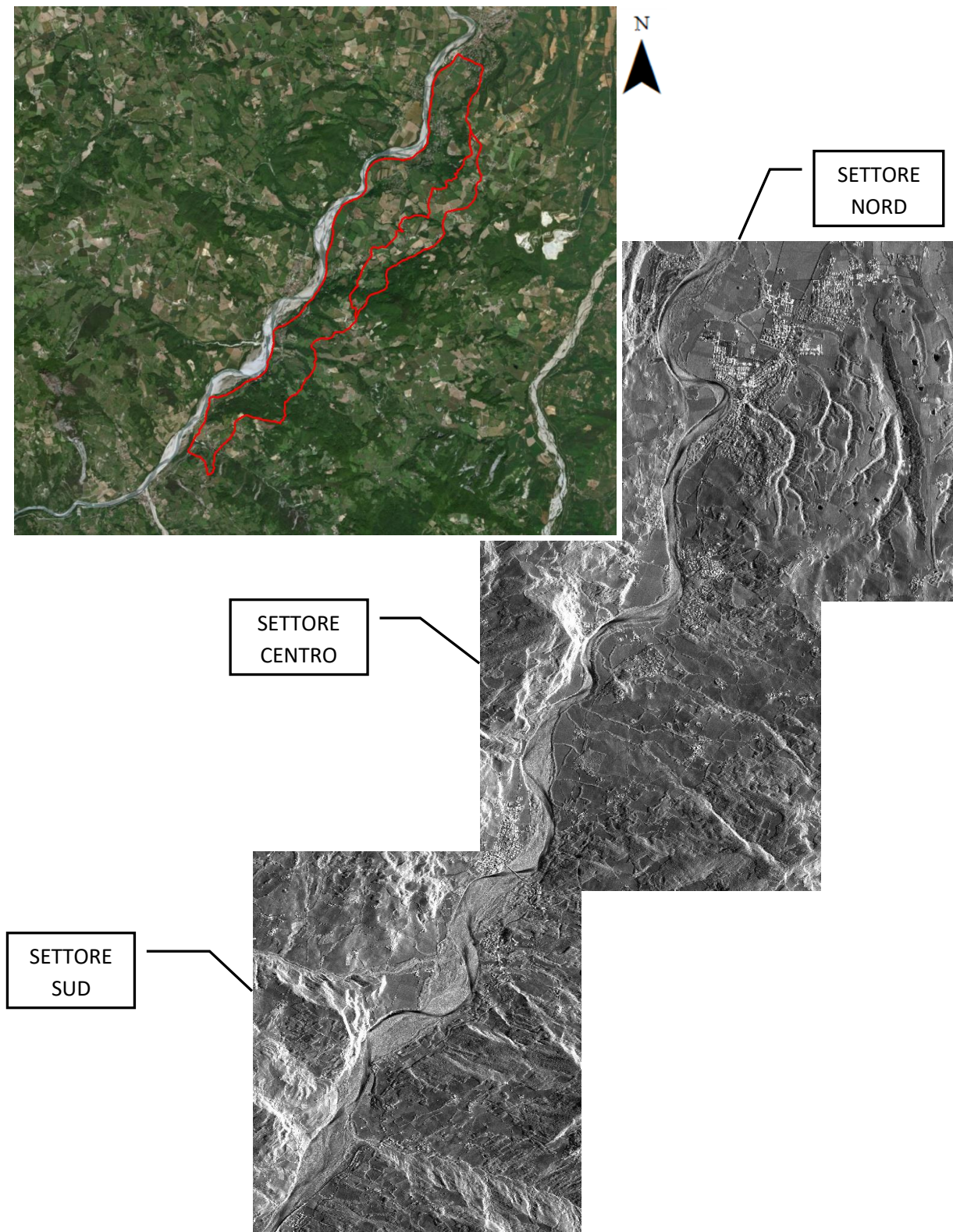


Figura 13. Immagine di alta risoluzione descending dei settori NORD, CENTRO e SUD nell'areale investigato.

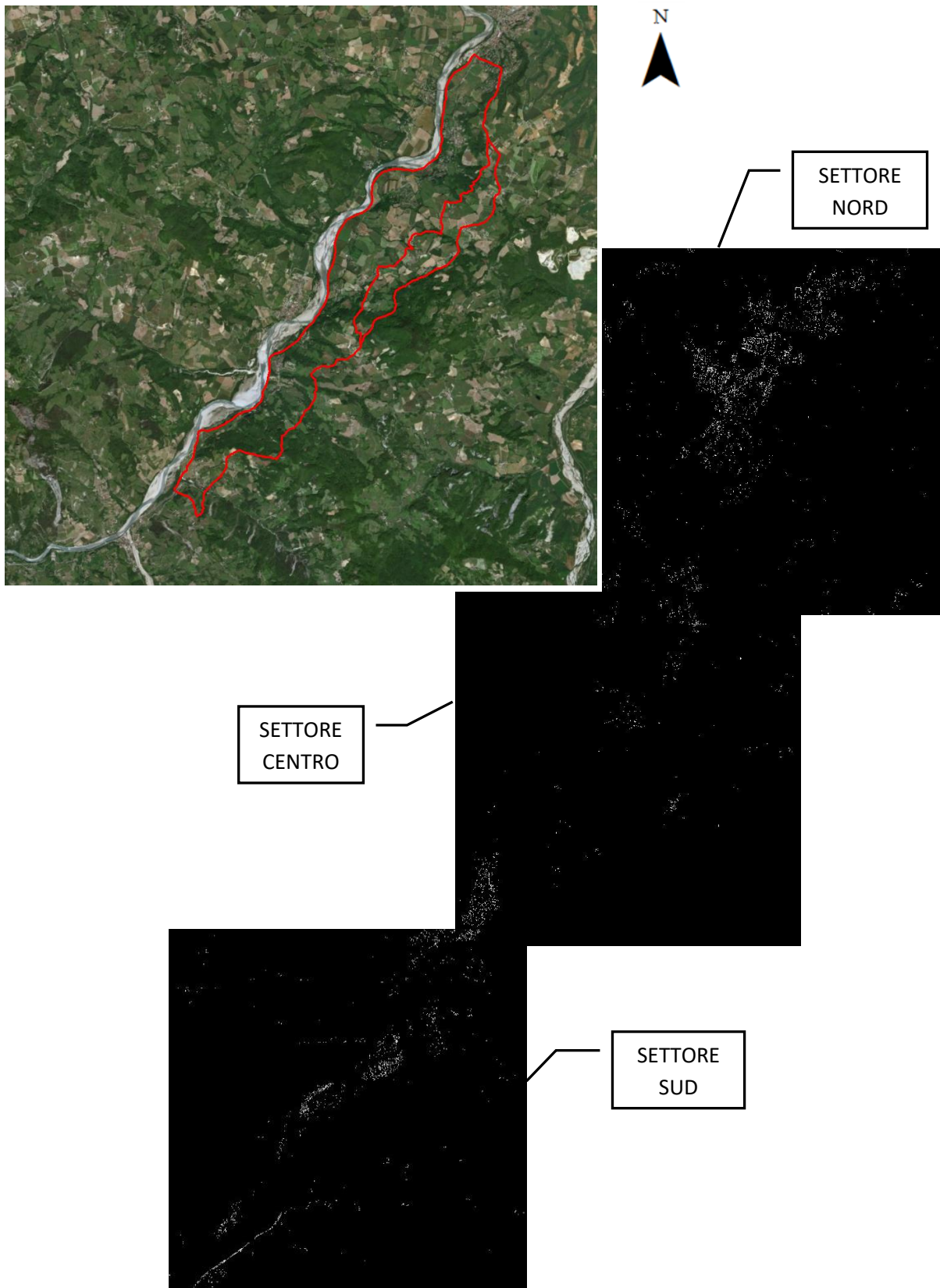


Figura 14. Punti selezionati e monitorabili nei settori NORD, CENTRO e SUD nell'areale investigato.

Anche in tal caso si sottolinea che al fine di individuare eventuali fenomeni deformativi esterni ma potenzialmente interagenti con l'areale di analisi, è stata effettuata un'elaborazione in un dominio centrato intorno all'area in oggetto ed al suo interno sono stati identificati tutti i riflettori materializzati.

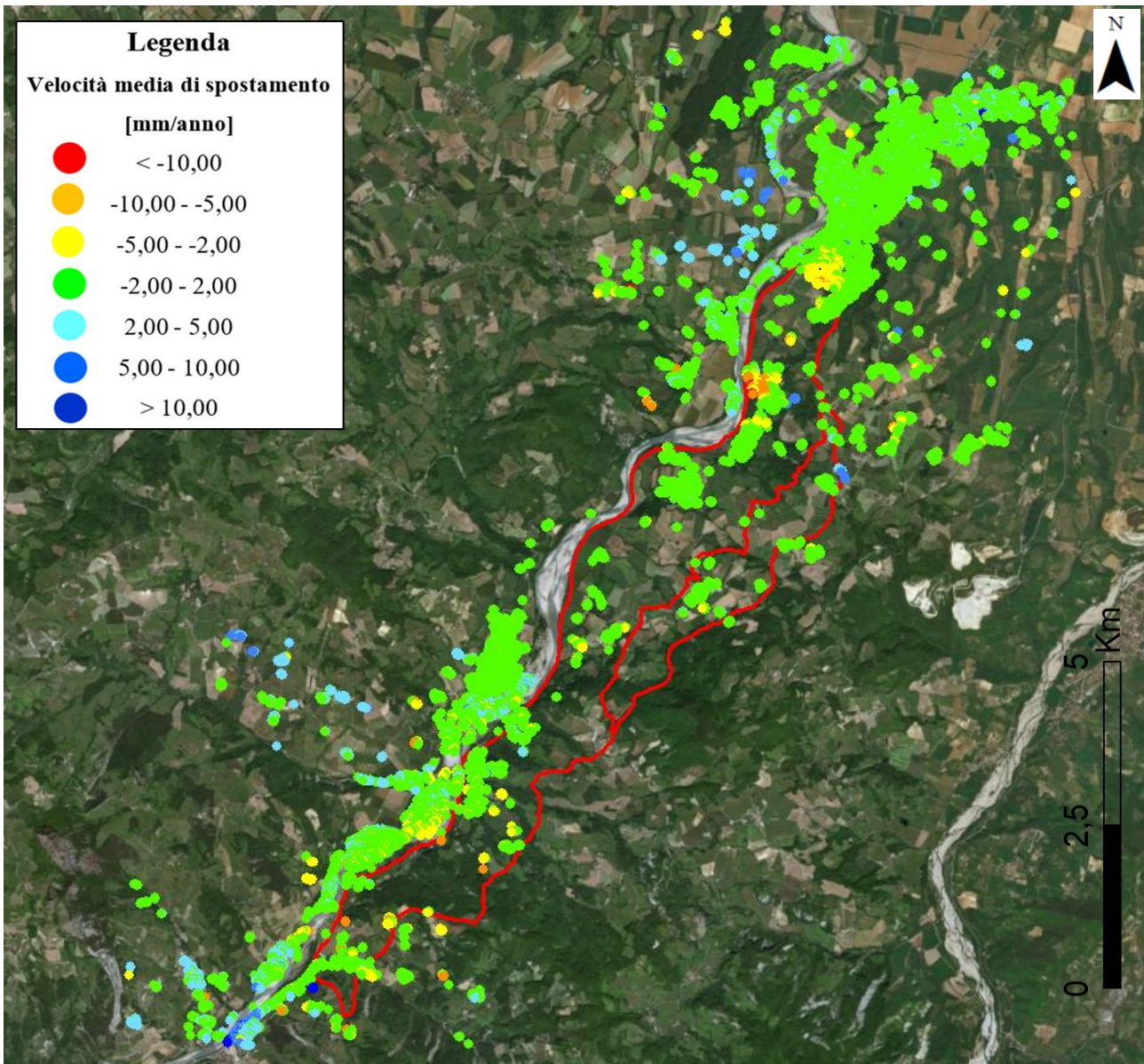


Figura 15. Mappa della velocità media di spostamento dei target identificati in geometria descending.

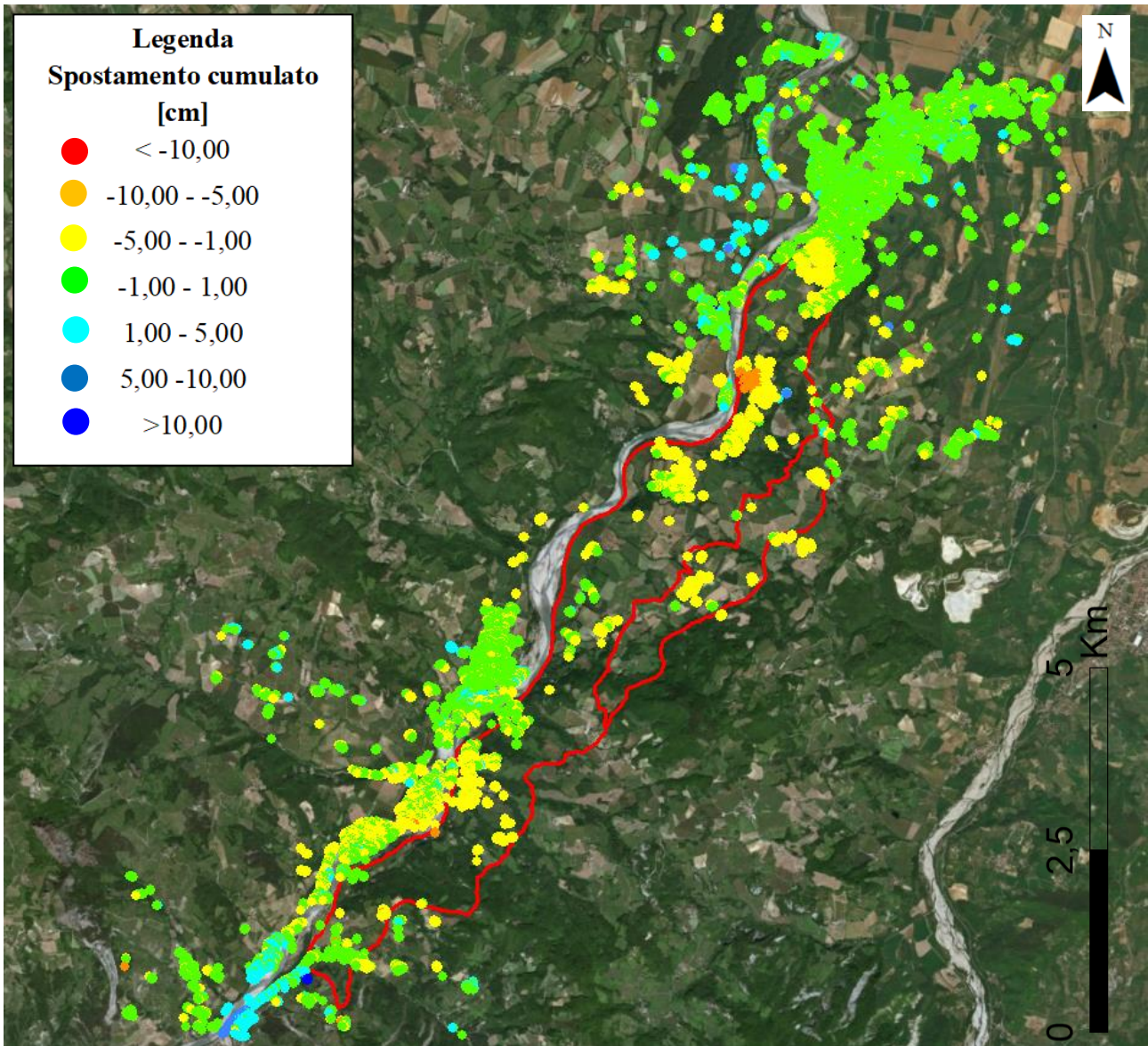


Figura 16. Mappa dello spostamento cumulato dei target identificati in geometria descending.

Come può notarsi è stata ottenuta una densità di target dello stesso ordine di grandezza di quelli ottenuti in geometria ascending: un elevato numero di riflettori è identificato in corrispondenza della rete infrastrutturale e dell'urbanizzato esistente, in dipendenza di un'elevata risposta elettromagnetica dei manufatti presenti; di contro, gli ambienti fortemente vegetati sono caratterizzati da un numero ridotto di target, risultando pertanto difficilmente investigabili.



È necessario osservare che in accordo alla convenzione comunemente adottata, valori positivi di velocità/spostamento sono da interpretarsi come avvicinamento al satellite (direzione Ovest-Est) mentre i valori negativi sono da interpretarsi come allontanamento dal satellite (direzione Est-Ovest), sempre lungo la congiungente sensore-bersaglio (Line of Sight, LoS).

In dettaglio, nell'areale in oggetto sono stati individuati 74543 target che presentano velocità medie di spostamento lungo la "LoS" dell'ordine massimo di 1,7 cm/anno, con spostamenti cumulati nell'arco temporale esaminato finanche di 12,5 cm.

## **6. ANALISI DELLE SERIE TEMPORALI DI SPOSTAMENTO DI ALCUNI RIFLETTORI INDIVIDUATI NELLE DUE GEOMETRIE DI ACQUISIZIONE**

In tale fase sono stati selezionati in entrambe le geometrie di acquisizione alcuni target caratterizzati da un comportamento cinematico significativo e che possono essere assunti come indicatori di processi deformativi del suolo, in atto o potenziali (Figure 17 e 18) e per essi sono state definite le serie temporali di spostamento, utili a valutarne la progressiva evoluzione nel tempo.

In via preliminare, ai fini di una migliore caratterizzazione geomorfologica dei fenomeni in atto, i prodotti interferometrici sono stati sovrapposti anche alla Carta Inventario dei fenomeni franosi già cartografati nell'areale oggetto di analisi (derivate dal Progetto CARG, alla scala 1:25.000, 2012): tale operazione ha permesso di valutare l'evoluzione spaziotemporale di fenomeni già censiti e identificare nuovi settori interessati da nuove attivazioni e potenzialmente instabili.

Inoltre come già discusso, valori positivi dello spostamento sono da interpretarsi come in avvicinamento al satellite mentre i valori negativi sono da interpretarsi come allontanamento dal satellite, sempre lungo la congiungente sensore-bersaglio (Line of Sight, LoS). È importante sottolineare che solo la composizione dei vettori ottenuti nelle due geometrie di acquisizione permette di ottenere, attraverso formulazioni

trigonometriche, le reali componenti di spostamento in direzione verticale, lungo l'asse z, e orizzontale nella direzione E-W.

Valori di spostamento con verso opposto nelle due distinte geometrie caratterizzano un moto con componente principale nel piano orizzontale, mentre nel caso in cui il sensore rileva in entrambe le geometrie di vista uno spostamento con verso concorde, il movimento risulta caratterizzato da una componente predominante in direzione verticale.

Va precisato infine che le acquisizioni in geometria ascending e descending non sono ottenute esattamente negli stessi giorni.

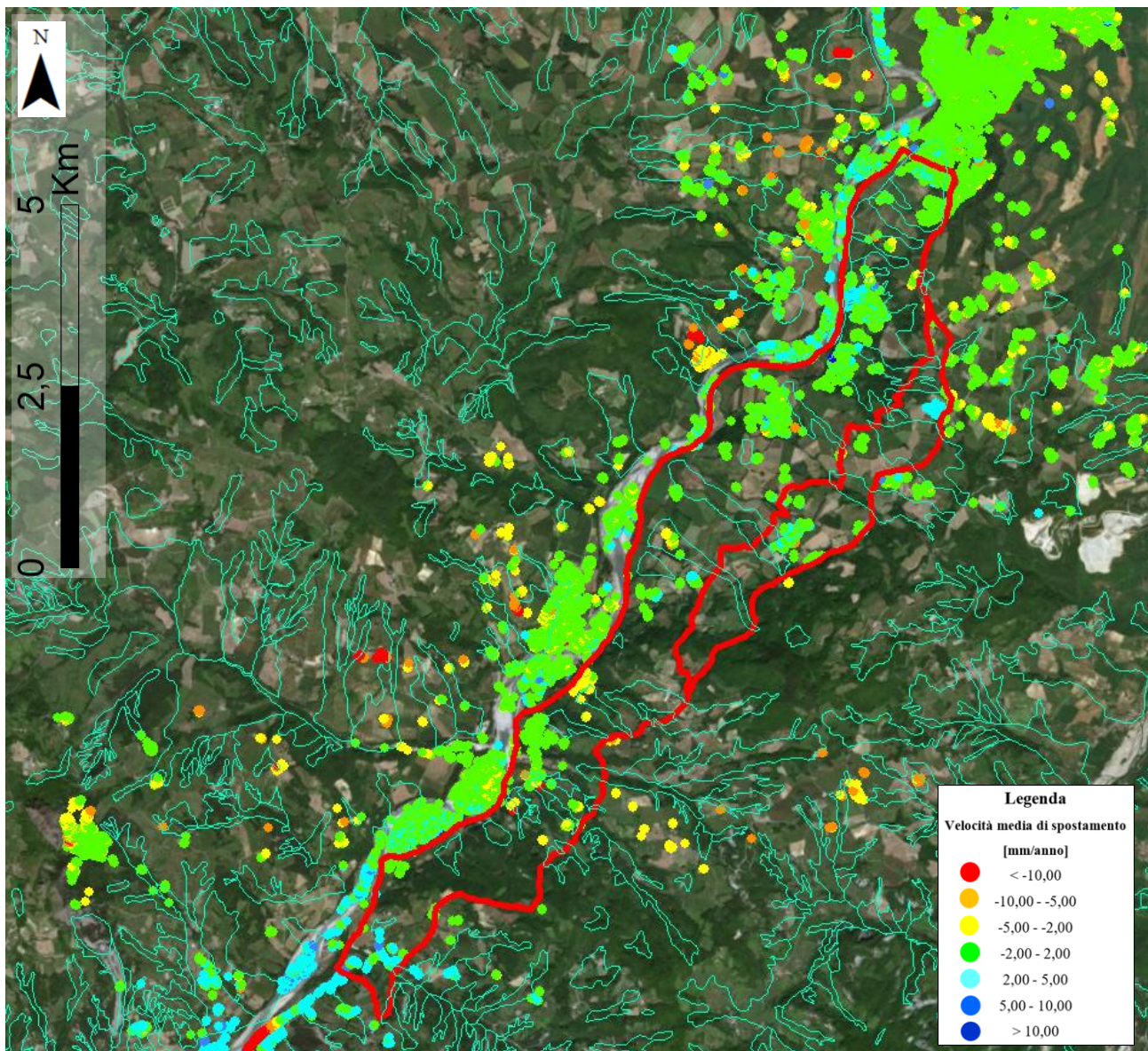


Figura 17. Target materializzati in geometria ascending integrati a fenomeni franosi già cartografati.

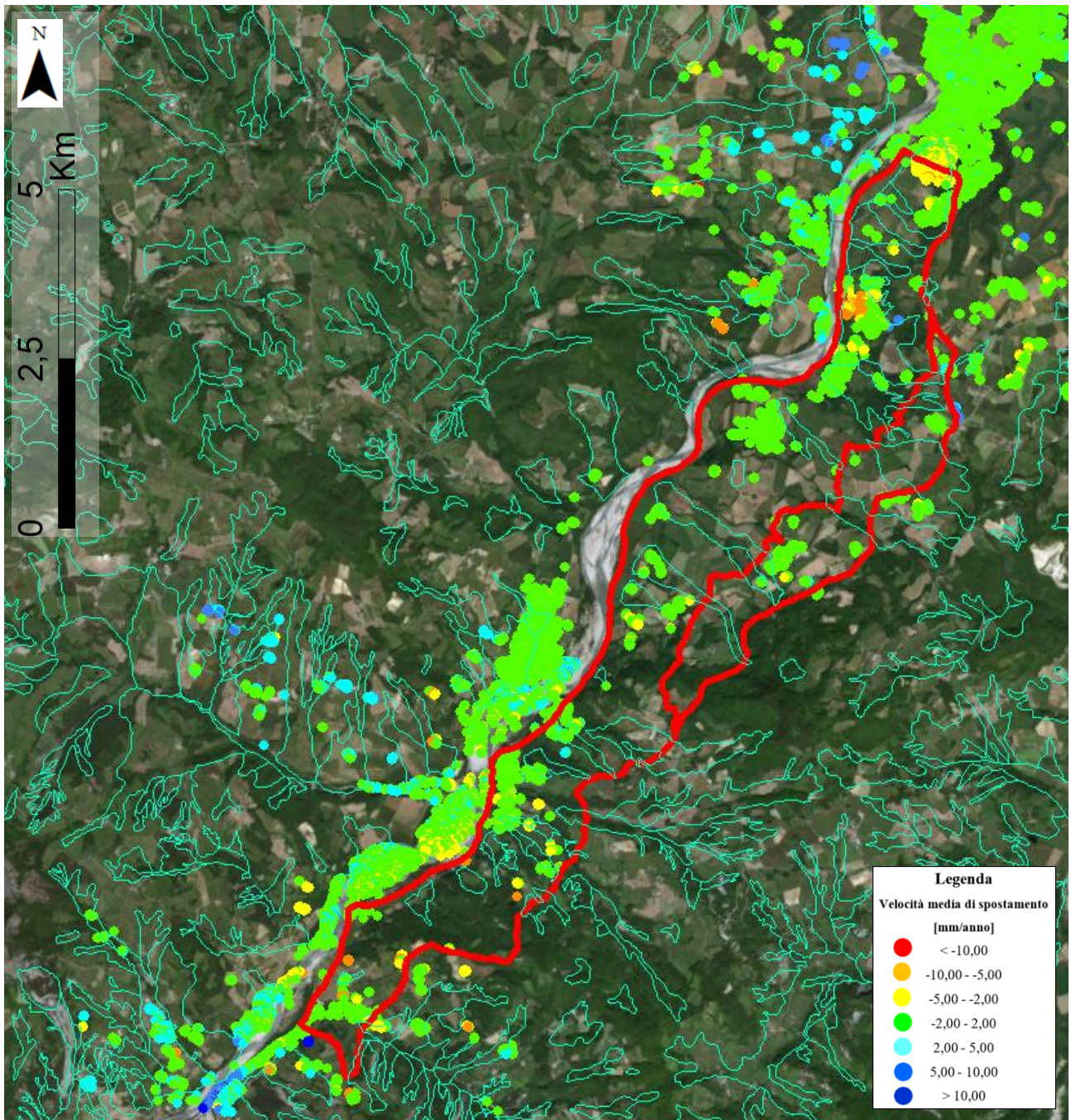
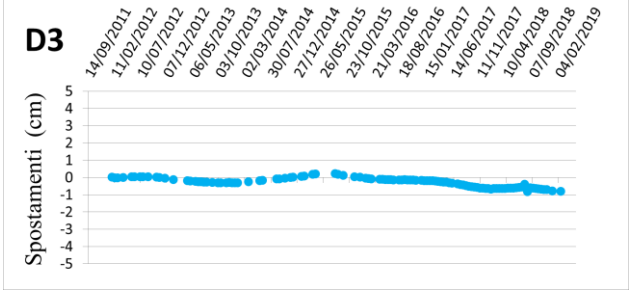
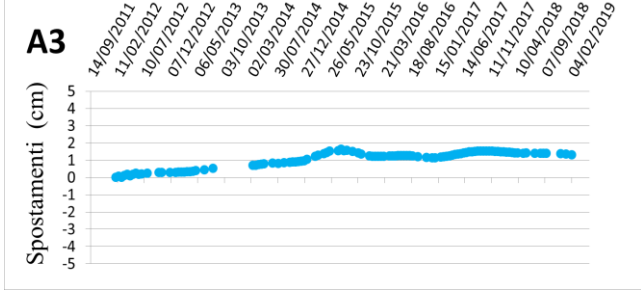
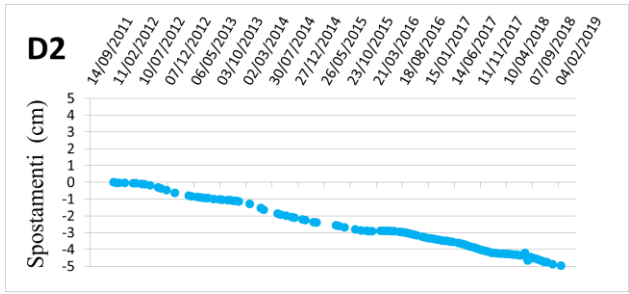
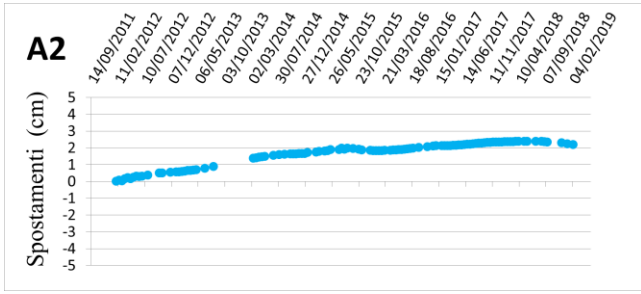
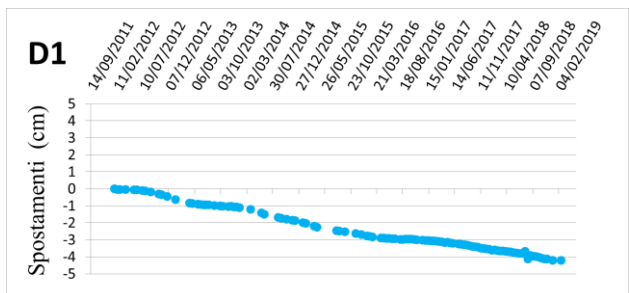
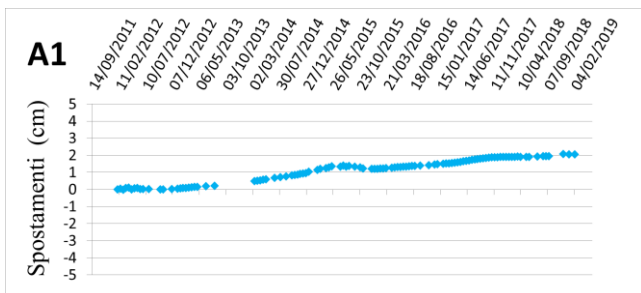
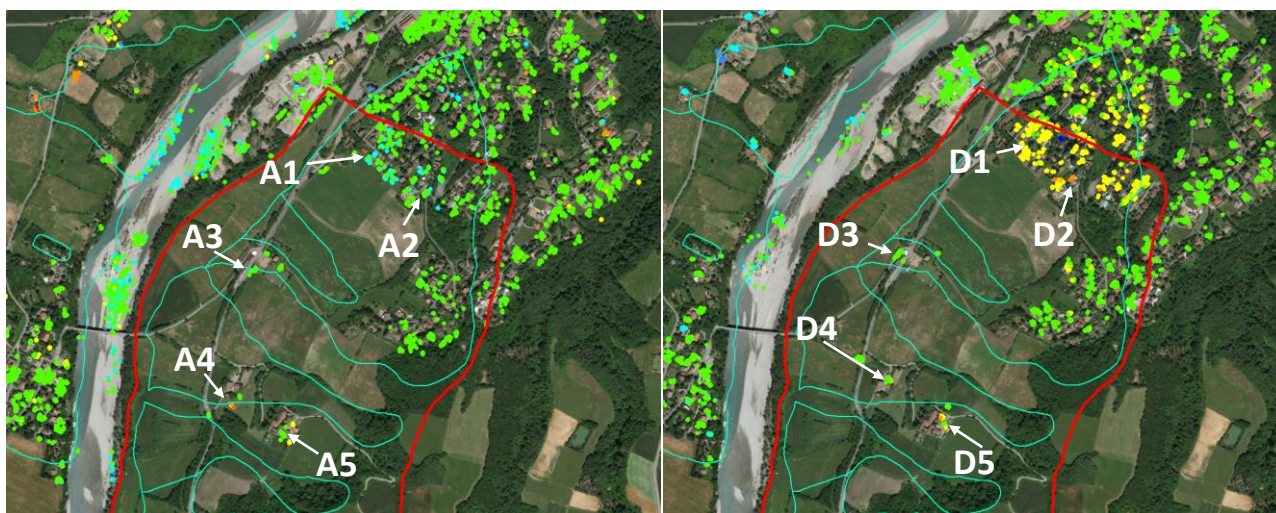
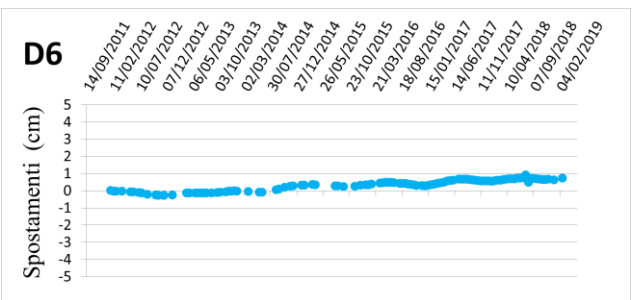
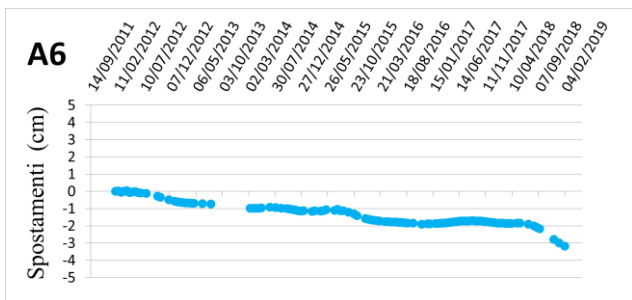
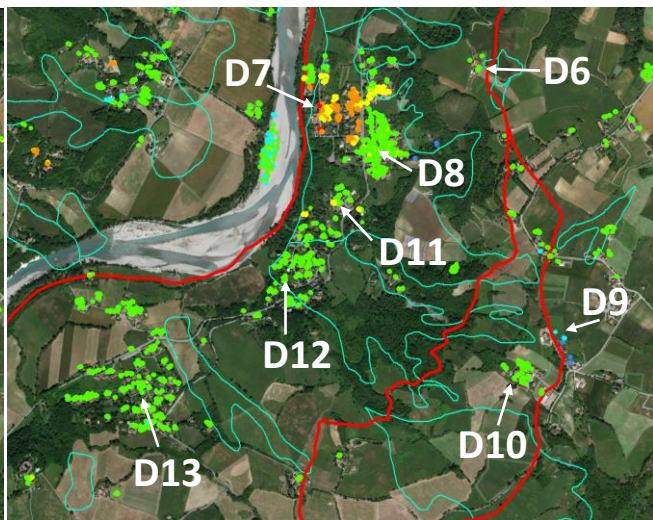
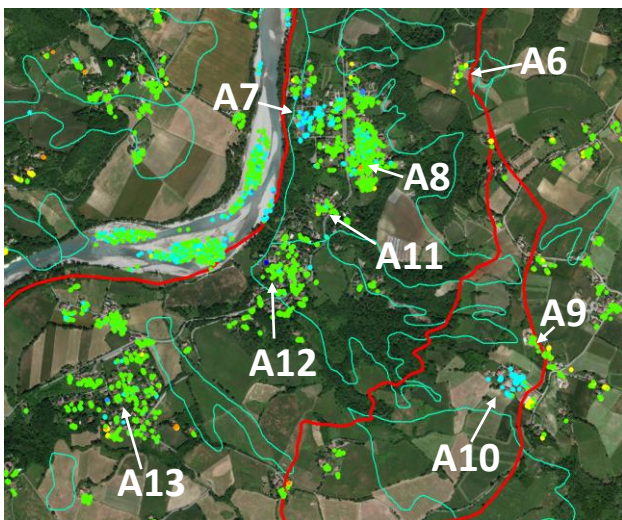
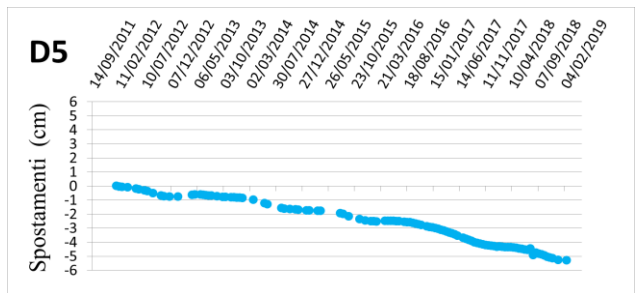
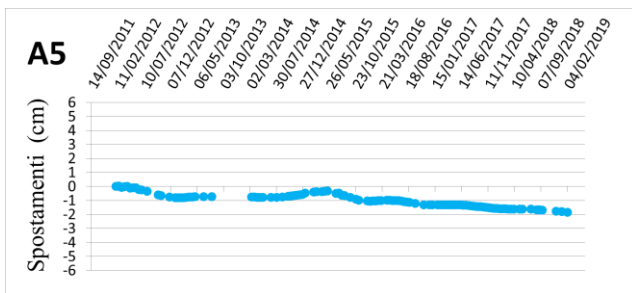
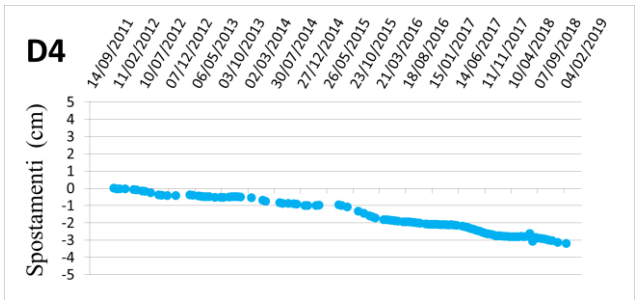
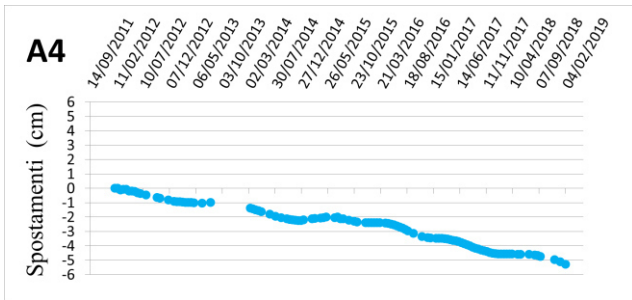
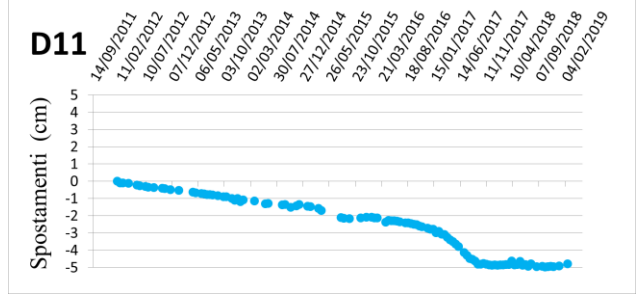
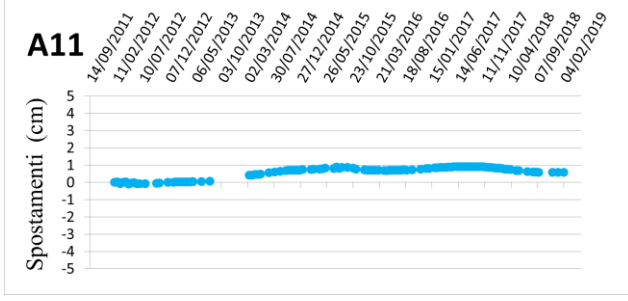
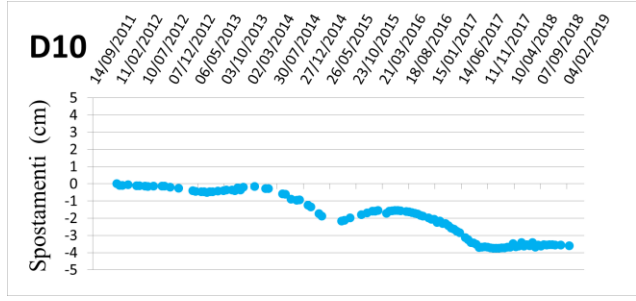
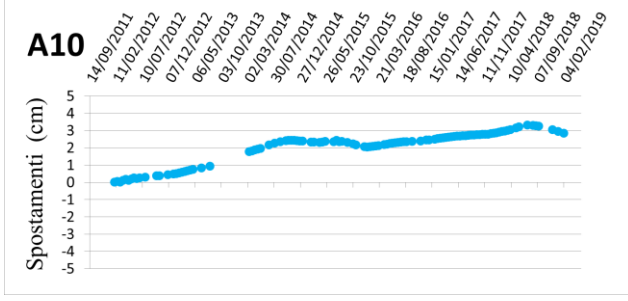
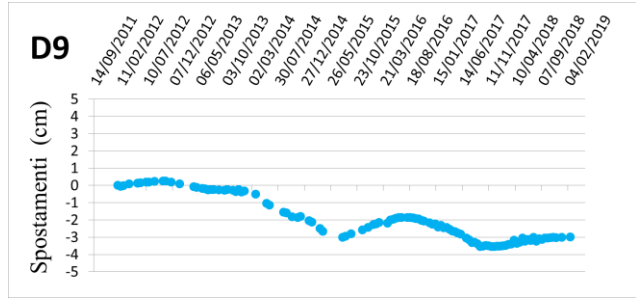
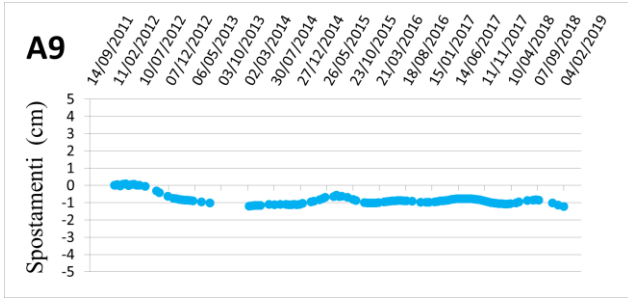
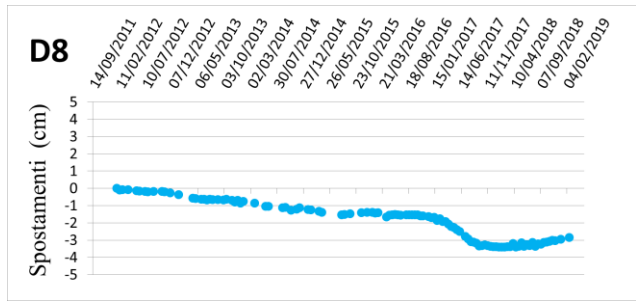
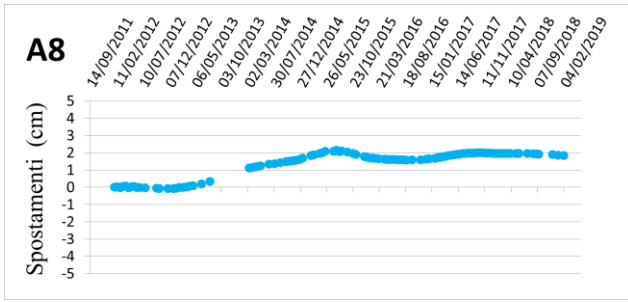
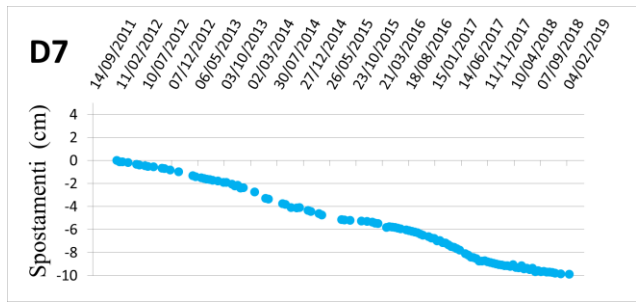
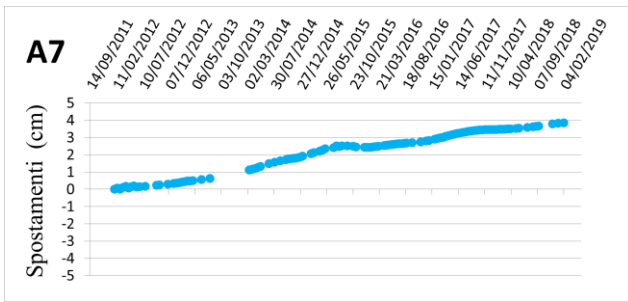


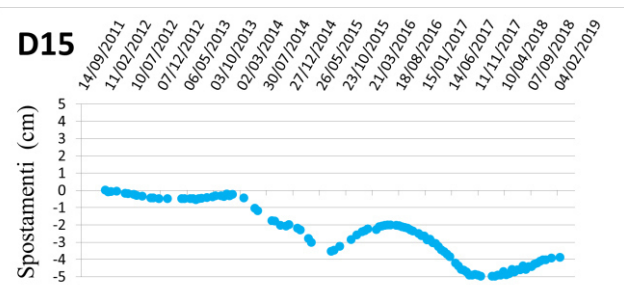
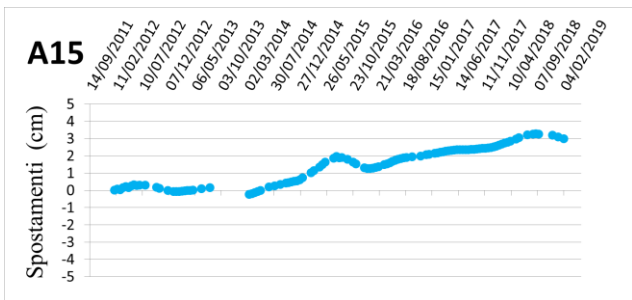
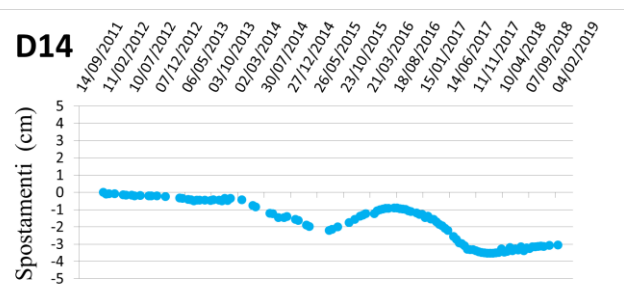
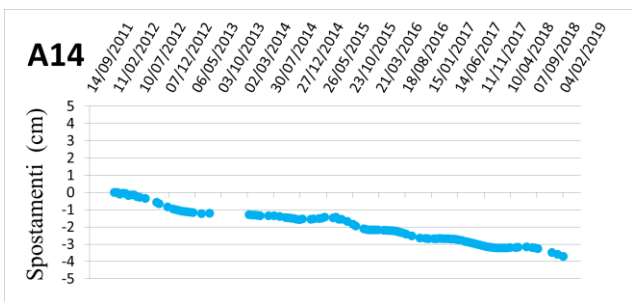
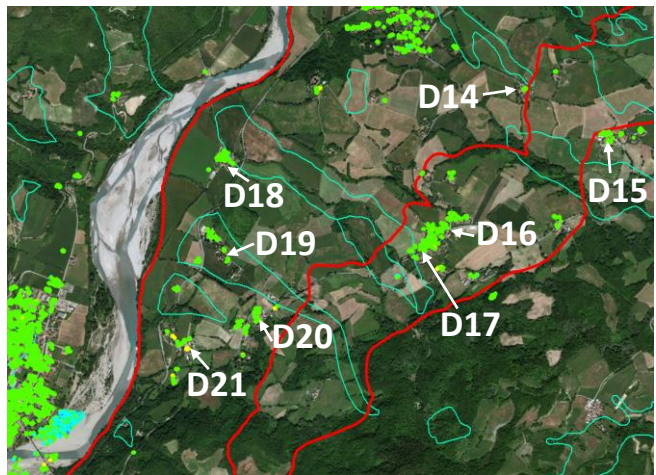
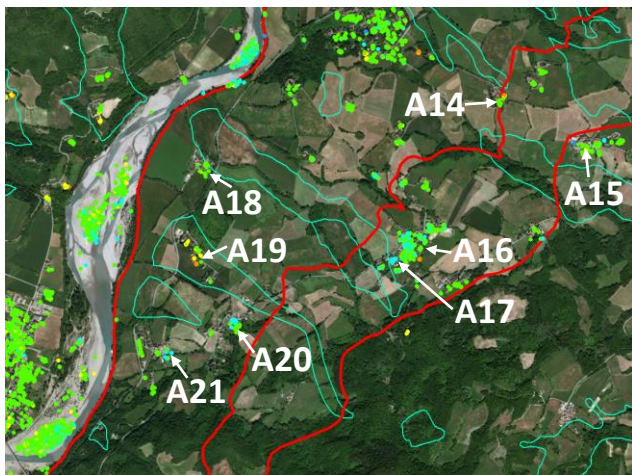
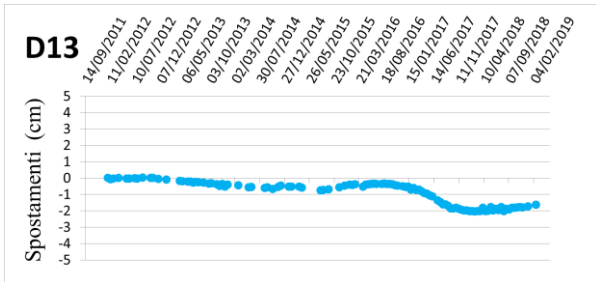
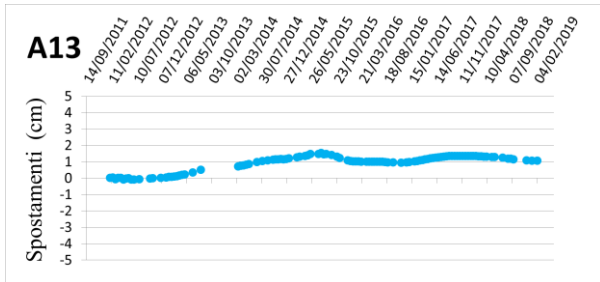
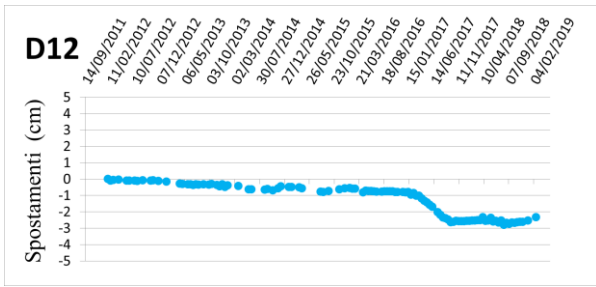
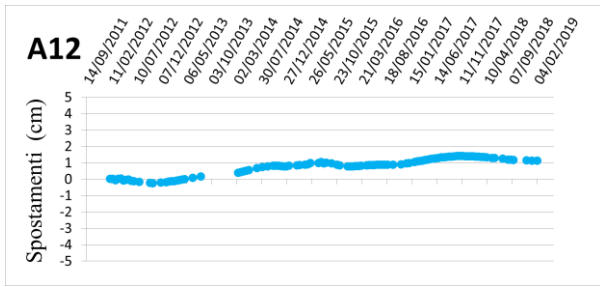
Figura 18. Target materializzati in geometria descending integrati a fenomeni franosi già cartografati.

Partendo dal settore nord, sono stati individuati i seguenti areali caratterizzati da comportamento cinematico e deformativo significativo e per essi sono state plottate le serie temporali di spostamento di alcuni riflettori individuati al loro interno.



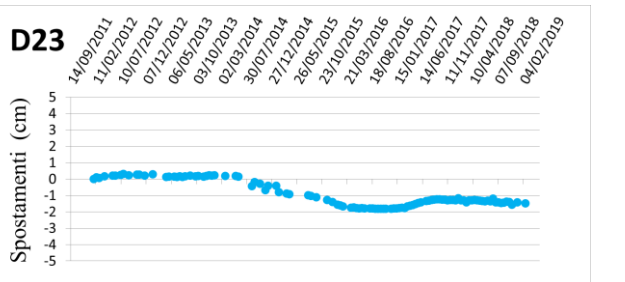
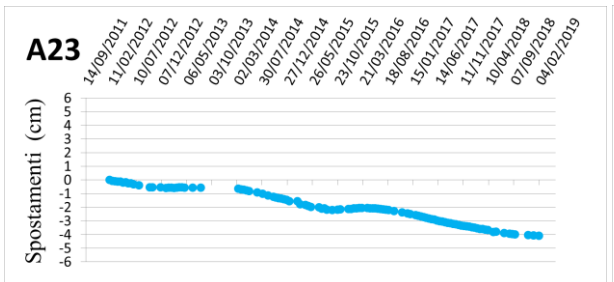
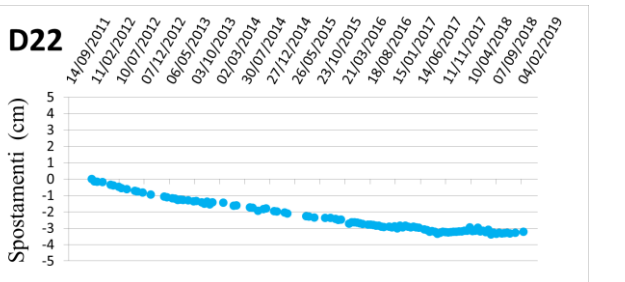
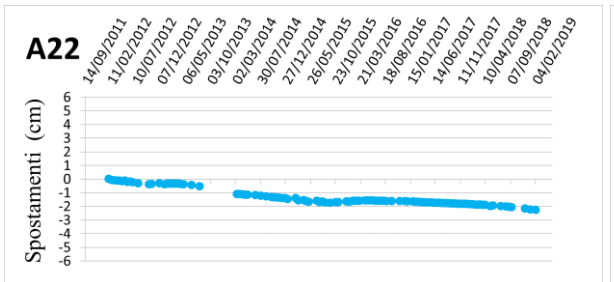
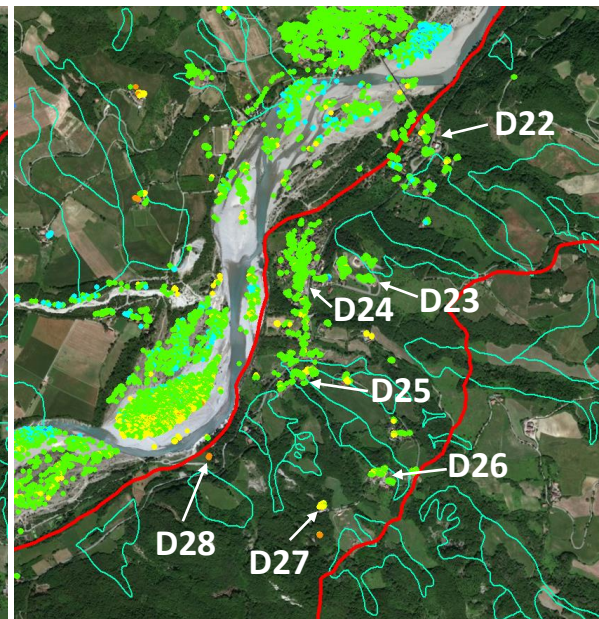
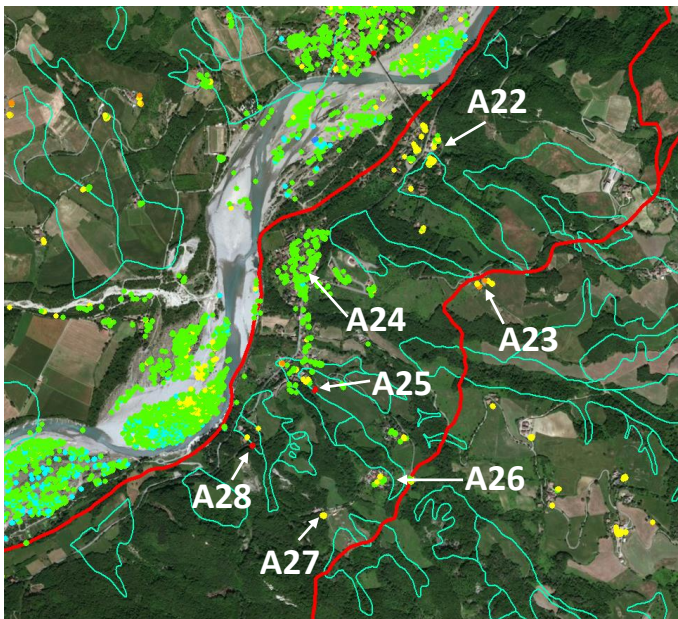
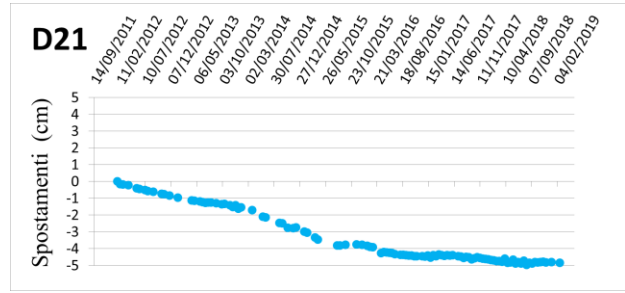
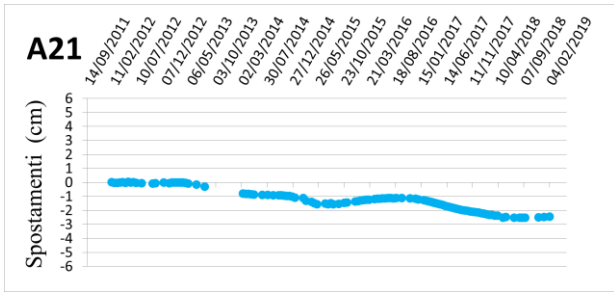


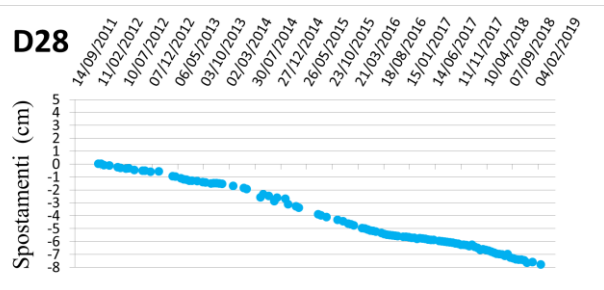
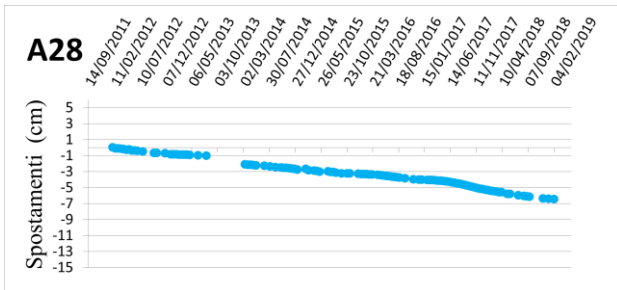
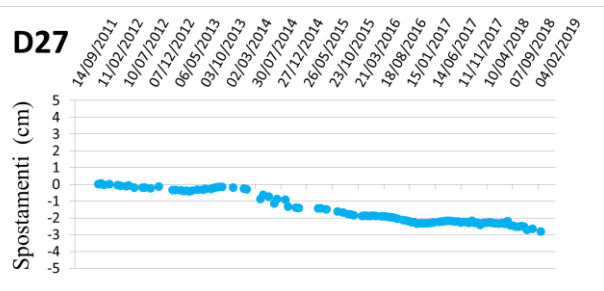
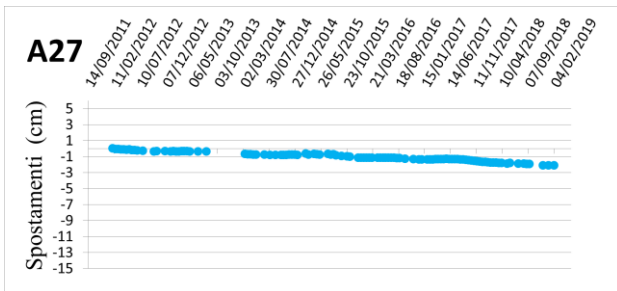
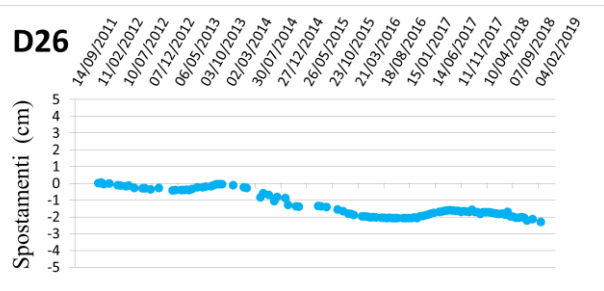
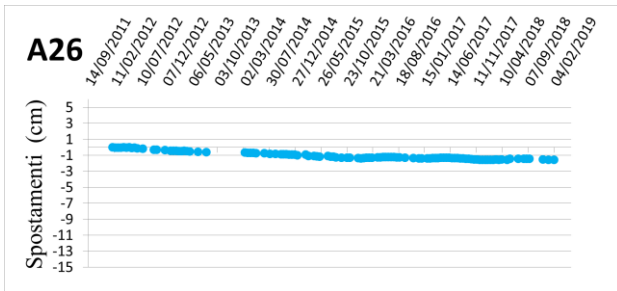
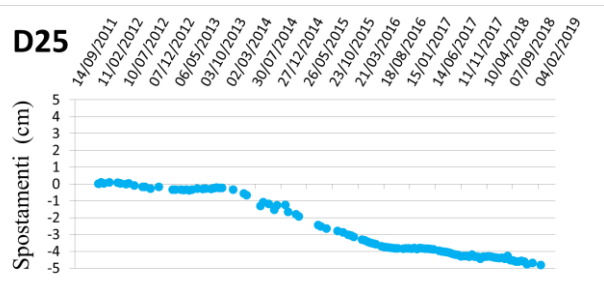
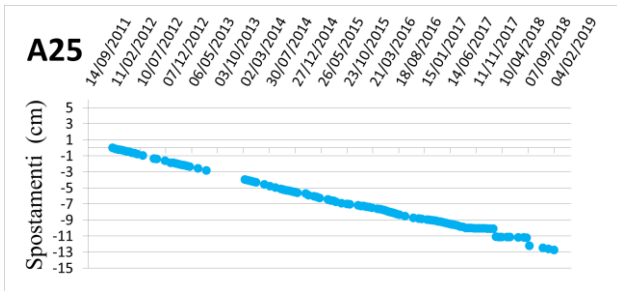
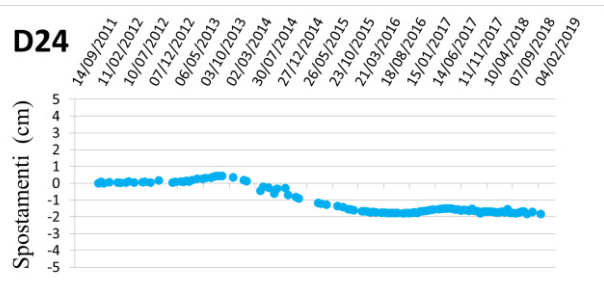
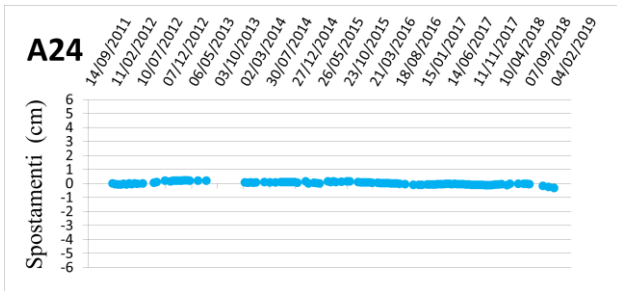


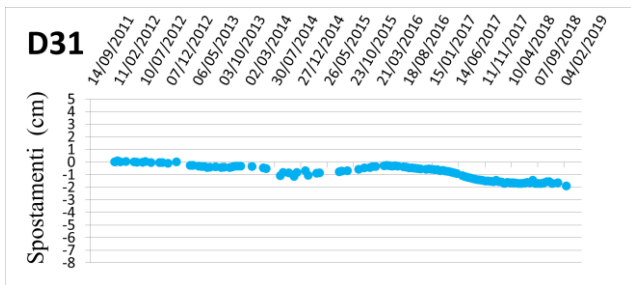
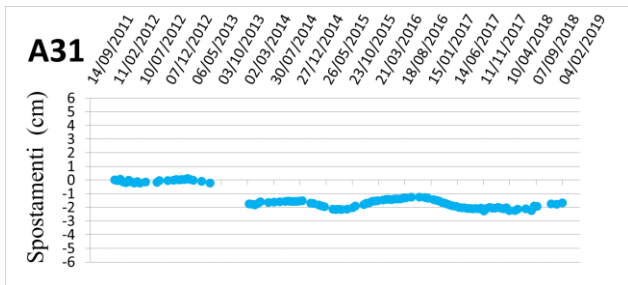
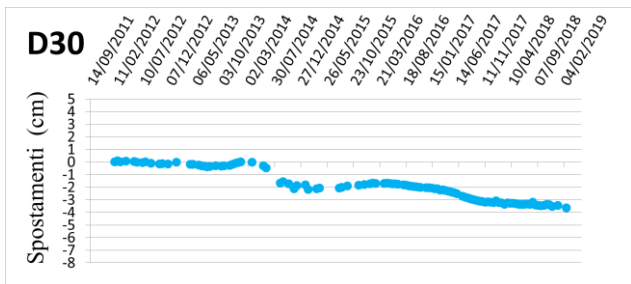
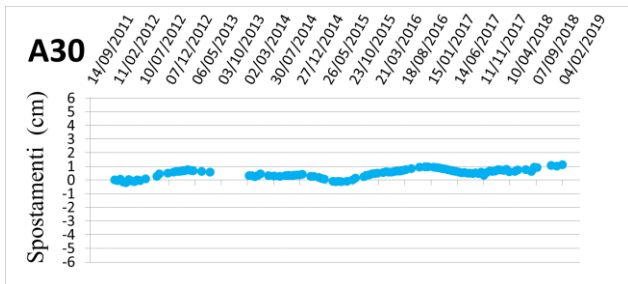
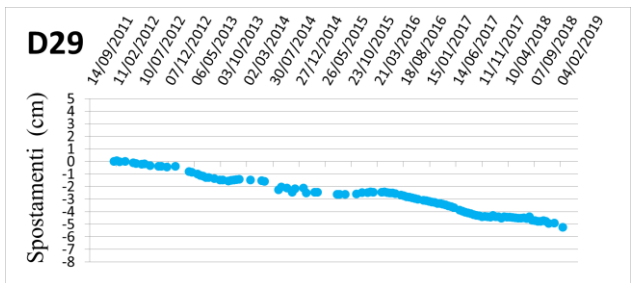
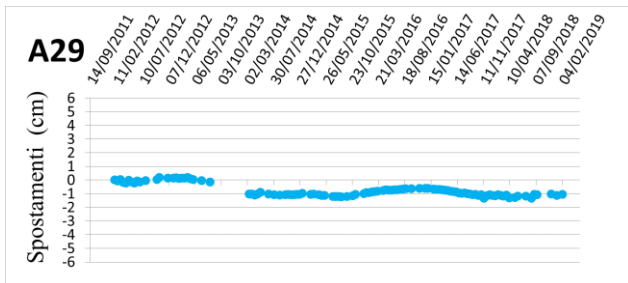
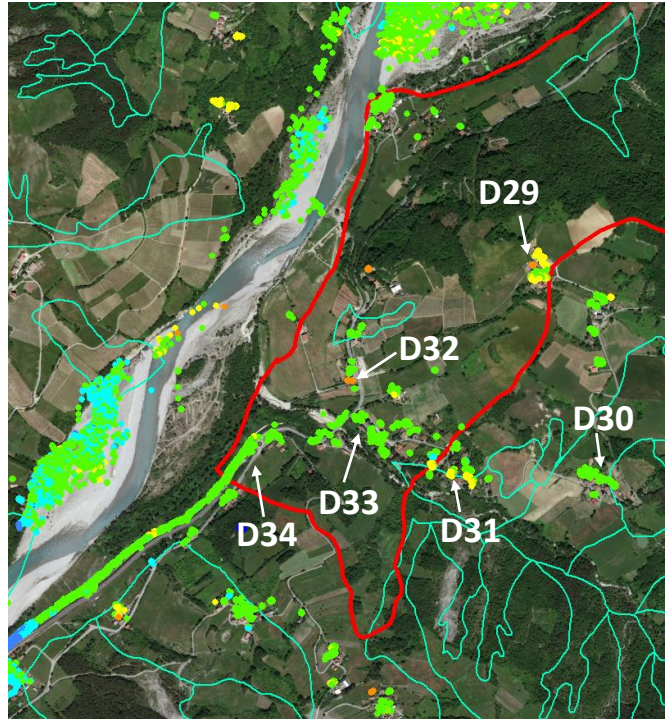
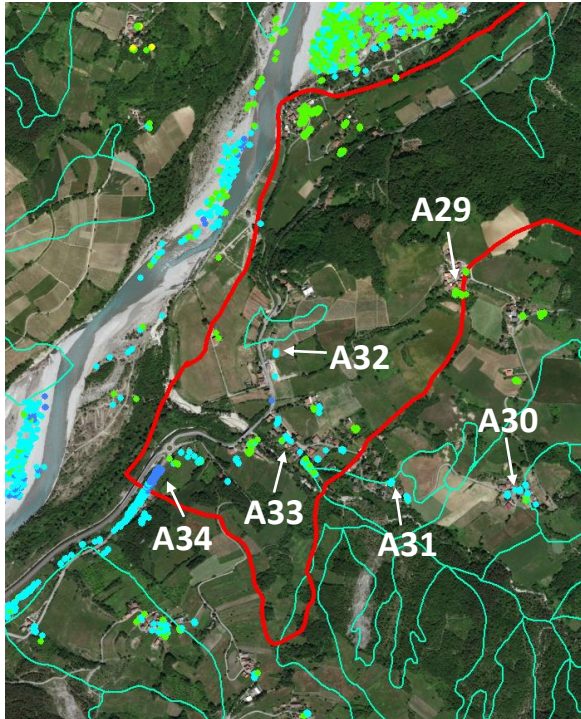


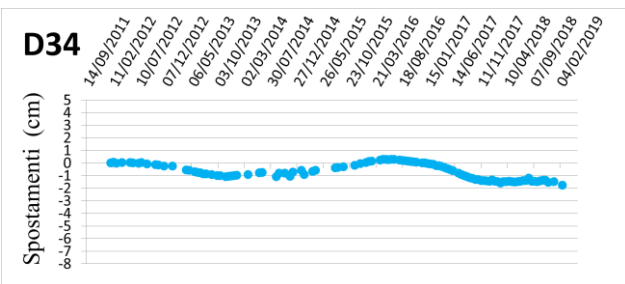
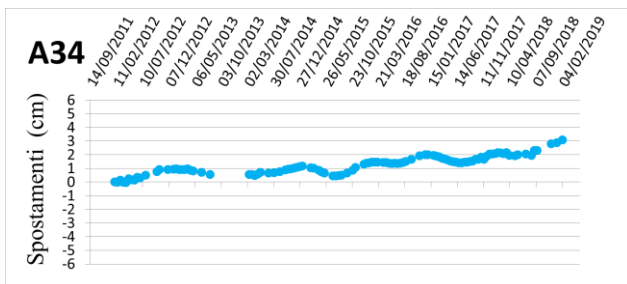
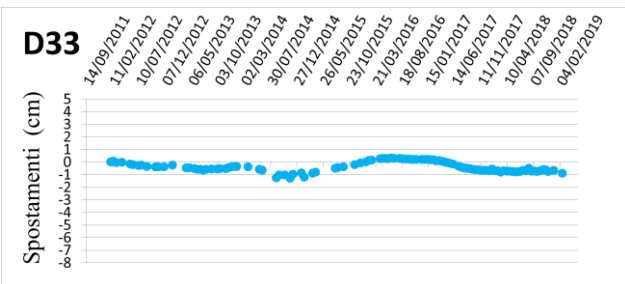
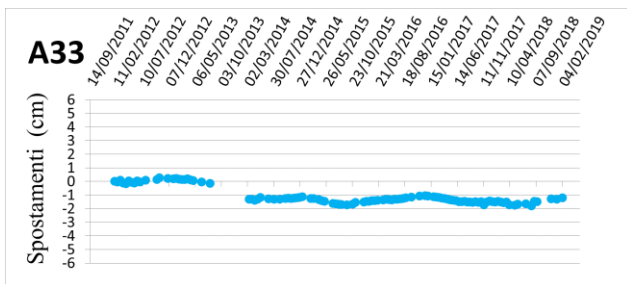
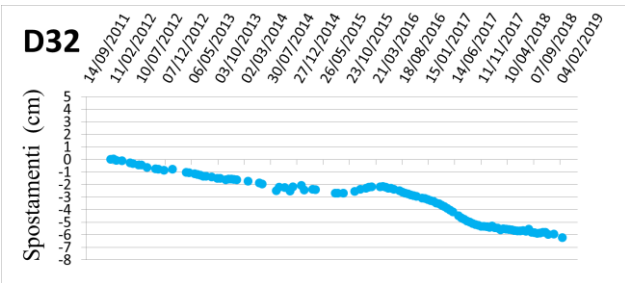
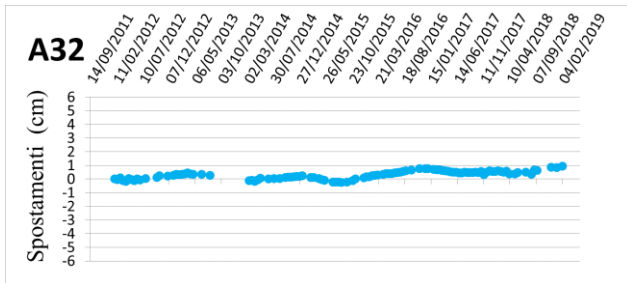












I riflettori identificati nell'areale investigato evidenziano la presenza di processi cinematici riconducibili a fenomeni franosi molto lenti, con velocità medie di spostamento dell'ordine di qualche cm/anno. L'analisi effettuata ha permesso inoltre di individuare anche nuovi settori caratterizzati da cinematismi significativi, sia in zone già interessate da fenomeni franosi consentendo in tal senso di aggiornarne la perimetrazione, sia laddove inizialmente non erano stati cartografati fenomeni di instabilità di versante, individuando pertanto nuove aree potenzialmente instabili.

L'analisi dei trend di spostamento di alcuni riflettori individuati ha evidenziato il manifestarsi di oscillazioni periodiche ripetute durante l'arco temporale esaminato, probabilmente correlate ai cicli stagionali delle piogge e alle variazioni piezometriche che si verificano nei terreni.

Si sottolinea inoltre che l'elevata dimensione spaziale delle immagini radar satellitari consente di analizzare i tassi di spostamento anche negli areali direttamente circostanti l'area

da monitorare. Come può notarsi nella figura seguente, anche il versante a Nord del fiume Trebbia risulta interessato da fenomeni deformativi non trascurabili.

Le time series di spostamento di alcuni punti (ascending a sinistra e descending a destra) identificati in settori ritenuti particolarmente significativi (Z1, Z2, Z3, Z4, Z5) (Figura 19) hanno confermato il verificarsi di processi di instabilità con tassi di spostamento superiori al cm/anno e spostamenti cumulati finanche di 10-15 cm.

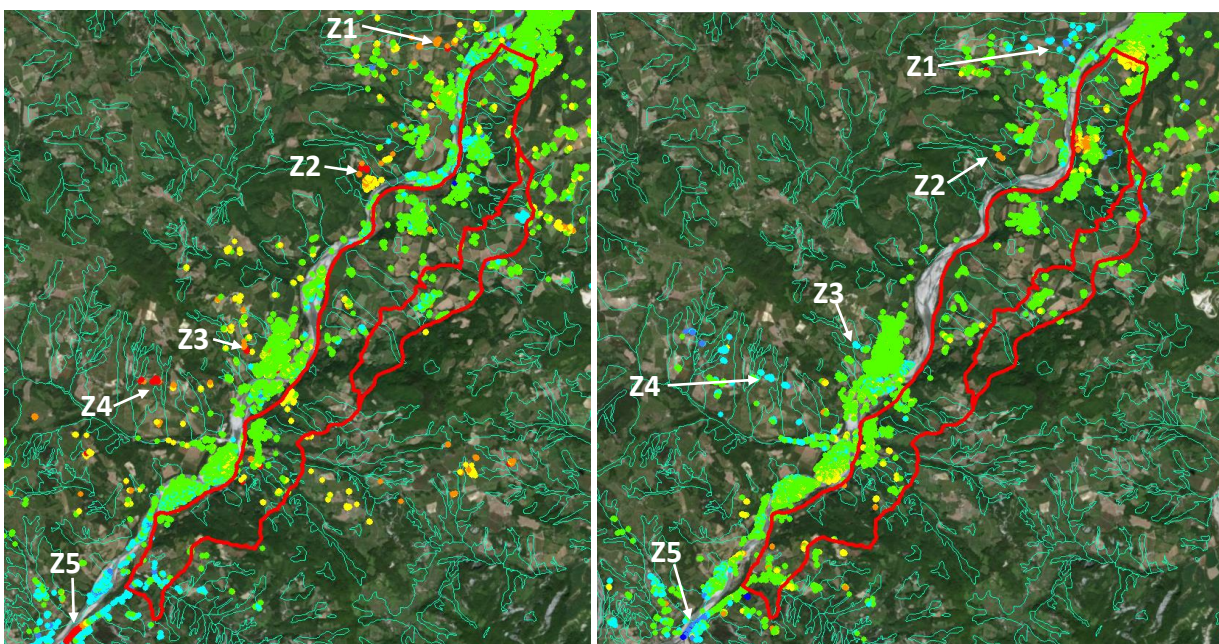
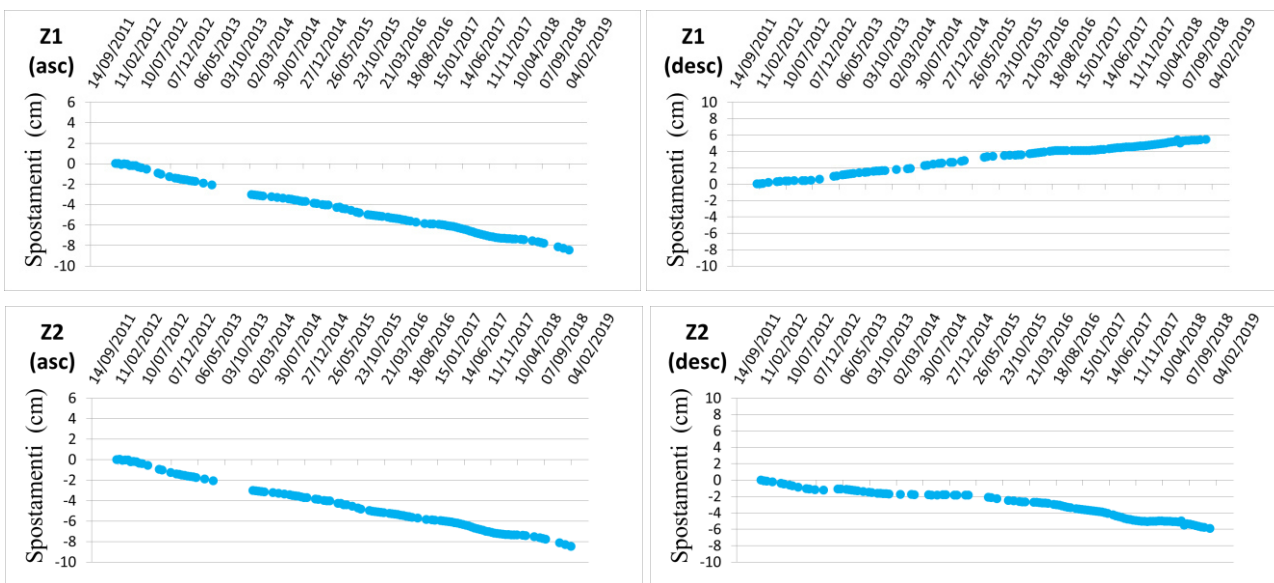
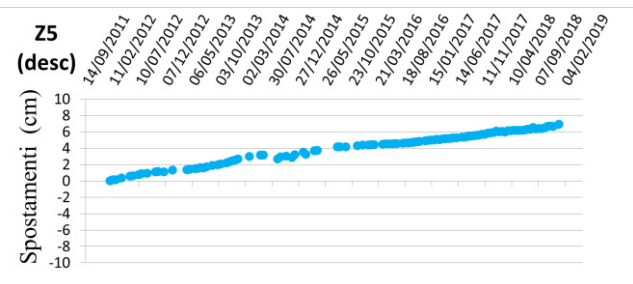
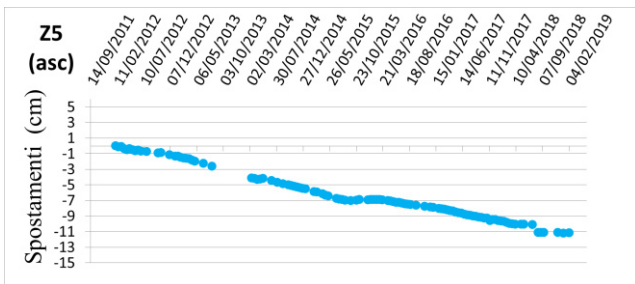
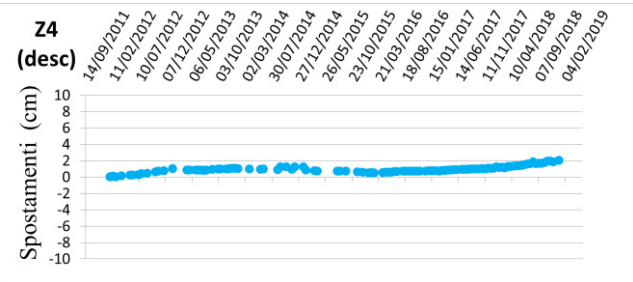
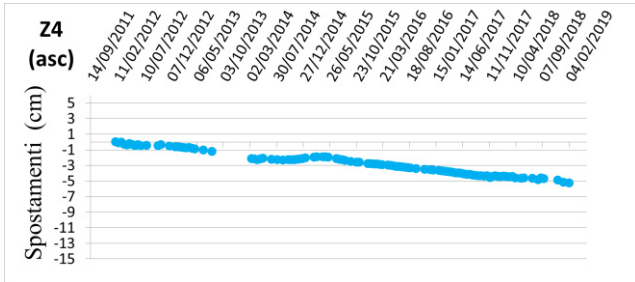
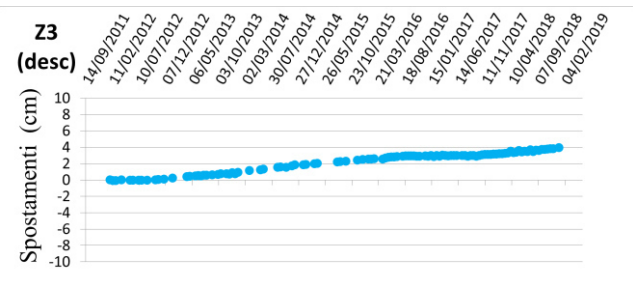
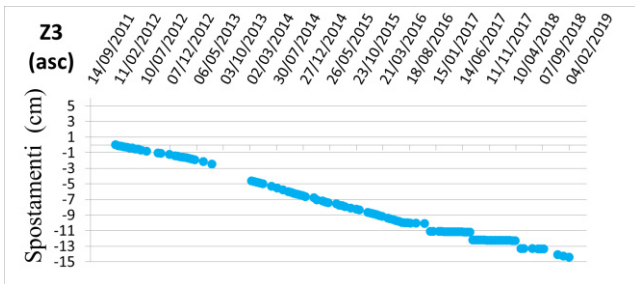


Figura 19. Settori caratterizzati da deformazioni significative esterni all'areale investigato.





Infine, al fine di migliorare la caratterizzazione geo-morfologica dell'areale investigato attraverso una correlazione tra dati derivanti da tecniche di indagine tradizionali (sondaggi stratigrafici, misure inclinometriche) ed innovative (misure radar satellitari) sono state plottate le serie temporali di spostamento dei riflettori materializzati in corrispondenza o quanto più possibile vicino ai punti in cui sono state eseguite le indagini in situ (Figura 20). Si precisa che non per tutti i punti è stato possibile indentificare target in entrambe le geometrie di acquisizione (ascending e descending).

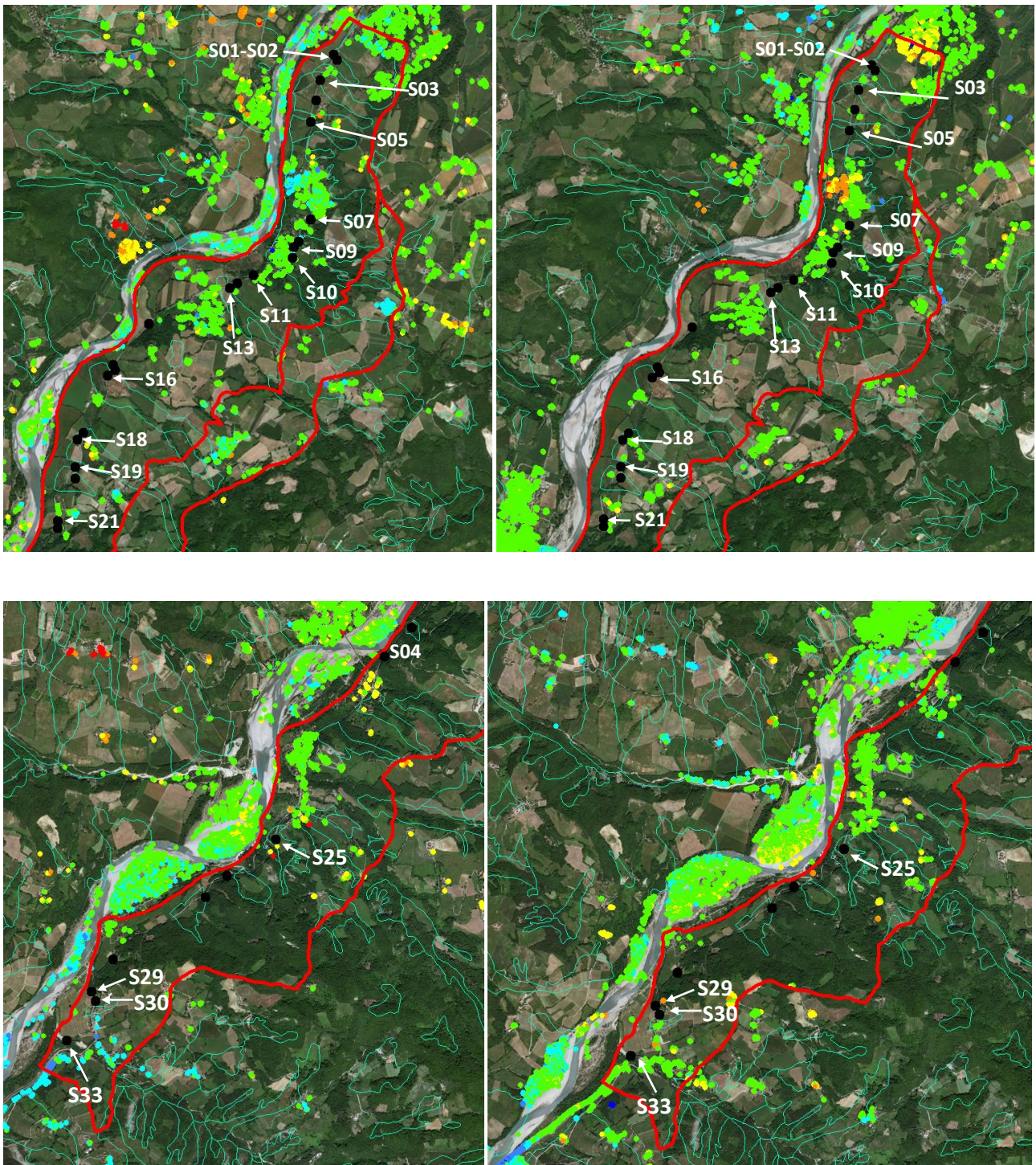
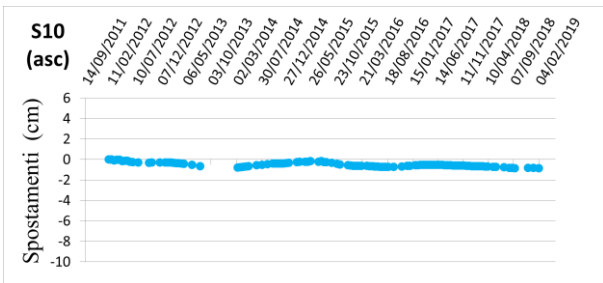
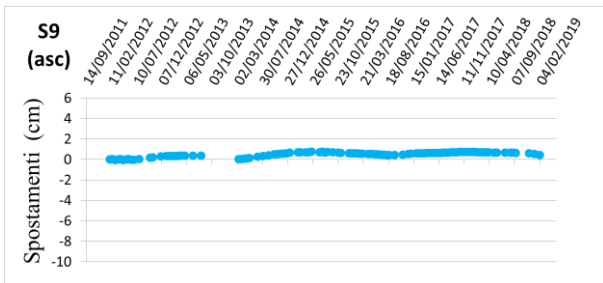
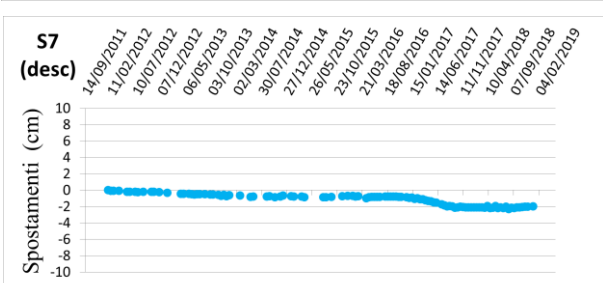
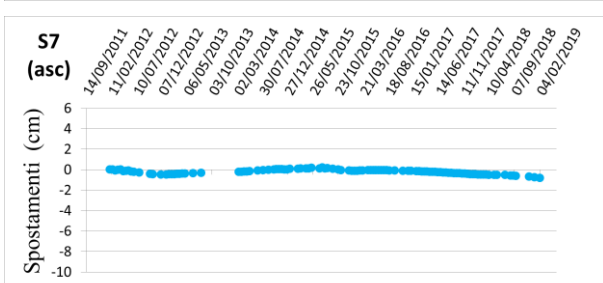
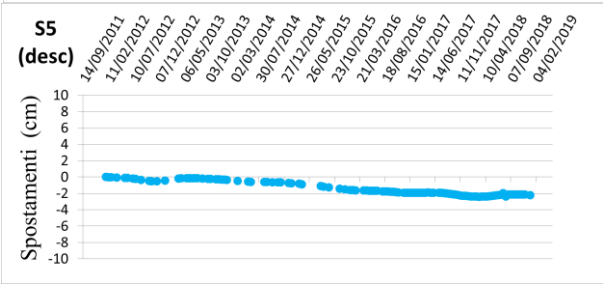
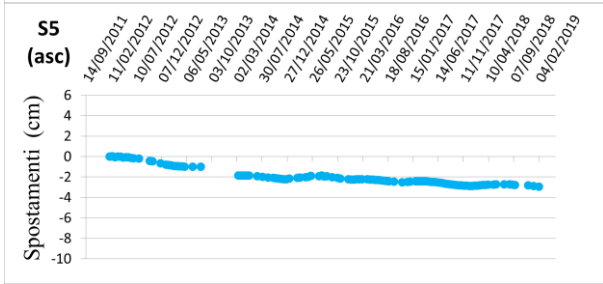
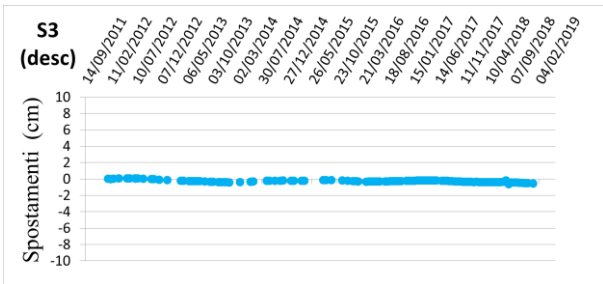
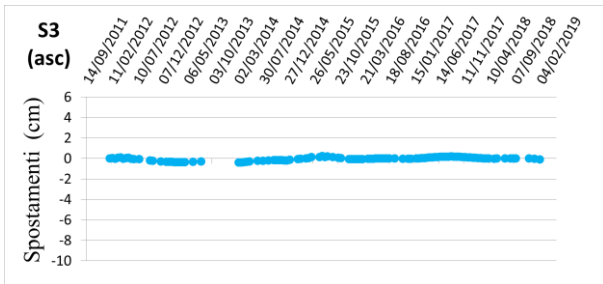
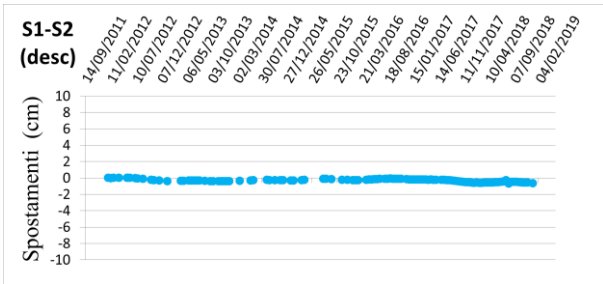
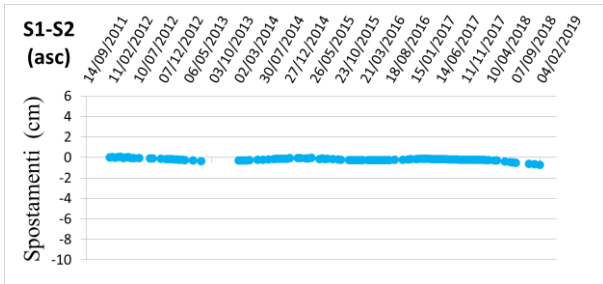
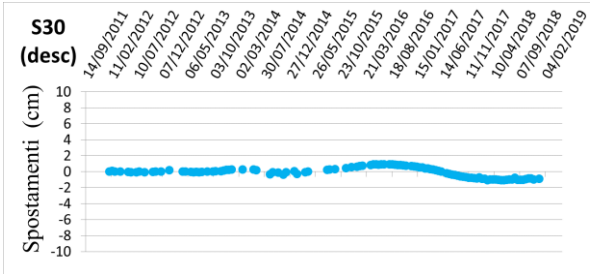
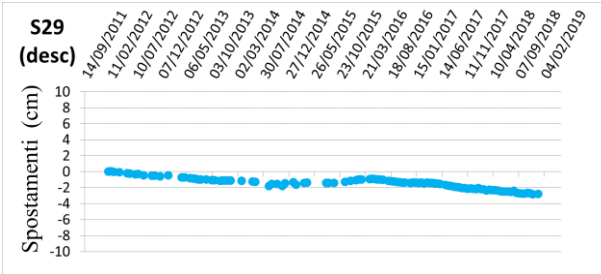
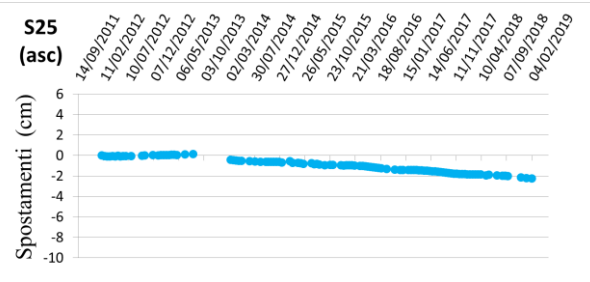
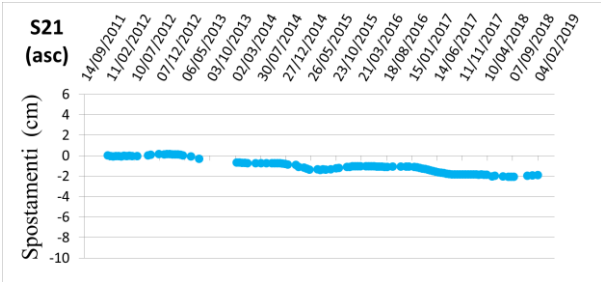
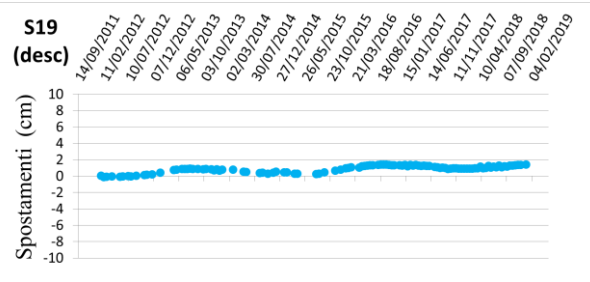
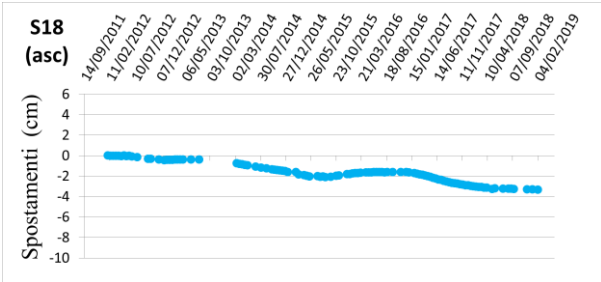
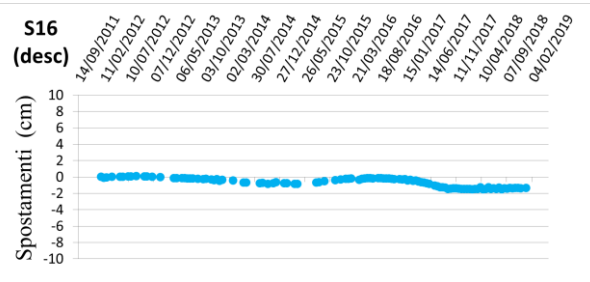
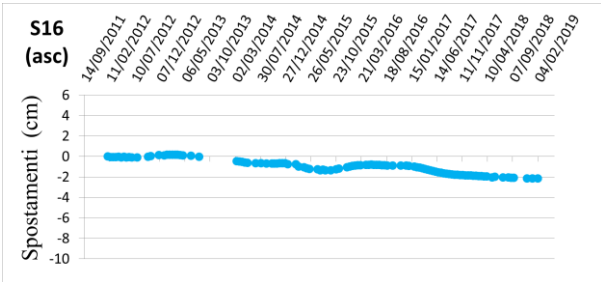
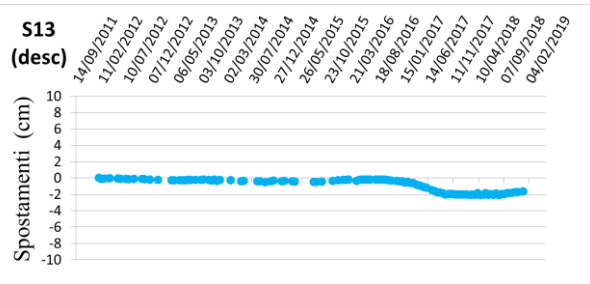
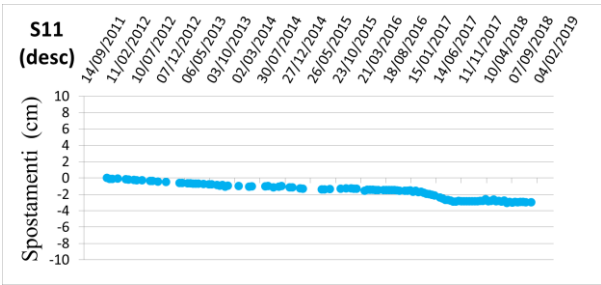
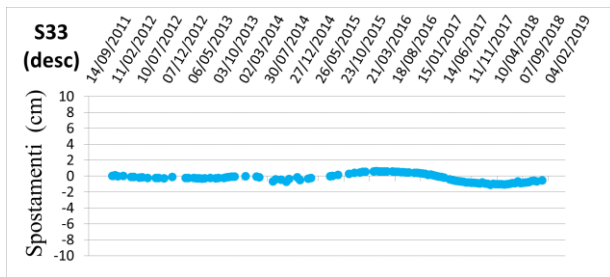


Figura 20. Mappe della velocità media di spostamento dei riflettori individuati in geometria ascending (a sinistra) e descending (a destra) e ubicazione delle indagini tradizionali (sondaggi) eseguite in situ.









## 7. CONCLUSIONI

In questo report, sono riportati i risultati delle elaborazioni mediante la tecnica dell'Interferometria Differenziale SAR ai fini del monitoraggio delle deformazioni superficiali al suolo in un areale circostante la SS. 45 tra i comuni di Cernusca e Rivergaro (PC).

I risultati sono stati rappresentati da mappe di velocità media di spostamento, mappe dello spostamento cumulato e serie temporali di alcuni target identificati nelle due geometrie di acquisizione in settori particolarmente significativi dal punto di vista cinematico.

Si evidenzia come la morfologia del territorio e la discreta urbanizzazione dello stesso, legata alla presenza di strutture e infrastrutture, garantiscano la presenza di un buon numero di riflettori presenti, con una densità molto simile per acquisizioni in geometria ascending e descending. Solo nelle aree coperte da una fitta vegetazione la densità di punti monitorabili si riduce notevolmente; tale problema potrebbe risolversi mediante l'installazione di una rete di corner reflector, cioè di riflettori artificiali installati *in situ* e caratterizzati da un'ottima riflettività elettromagnetica.

I prodotti interferometrici hanno identificato delle zone caratterizzate da tassi di spostamento tutt'altro trascurabili, con velocità dell'ordine finanche di qualche cm/anno e spostamenti cumulati nell'arco temporale esaminato anche dell'ordine di 15-18 cm, entrambi riferiti alla congiungente sensore-bersaglio (LoS). Trattasi in ogni caso di fenomeni di instabilità estremamente lenti. L'esame congiunto dei risultati interferometrici (serie temporali di spostamento) con la carta ufficiale dei fenomeni franosi cartografati nell'areale oggetto di analisi ha permesso di valutarne preliminarmente l'evoluzione spazio-temporale, identificandone eventualmente riattivazioni localizzate, e di individuare nuove potenziali aree instabili.

Solo la combinazione dei dati acquisiti in entrambe le geometrie permette di ottenere informazioni circa le componenti di spostamento in direzione verticale ed orizzontale E-O. Nello specifico, laddove i riflettori presentino verso di spostamento discorde nelle due geometria si manifesta un movimento a componente di spostamento prevalente in direzione orizzontale, mentre se il verso dello spostamento è concorde in geometria ascending e descending allora si configura un moto a componente prevalente in direzione verticale.