



LINEE GUIDA ALL'INTERPRETAZIONE DEI DATI SATELLITARI PSInSAR™ IN PIEMONTE

Luglio 2008

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PAVIA

DIPARTIMENTO DI
**SCIENZE
DELLA
TERRA**
VIA FERRATA, 1 - 27100 PAVIA (ITALY)
TEL. 0382.505889 FAX 0382.505890

SOMMARIO

1	Definizione di un metodo che permetta di verificare, a priori, quali aree meglio si prestano all'applicazione del metodo e quali meno	3
1.1	Introduzione.....	3
1.2	Metodologia.....	3
1.3	Deformazioni Prospettiche.....	3
1.4	Elaborazione delle classi di uso del suolo	5
1.5	Mosaicatura dei livelli informativi	6
1.6	Validazione procedura.....	6
1.7	Conclusioni.....	8
2	Analisi dei dati PSInSAR tm	9
2.1	Introduzione.....	9
2.2	Valutazione e Validazione del seminato PS	10
2.2.1	Analisi di conformità tra le metadescrizioni e i singoli datasets	13
2.2.2	Analisi di corretta geocodifica.....	24
2.2.3	Altre operazioni.....	25
2.3	Visualizzazione e classificazione dei PS	26
3	LINEE GUIDA PER L'INTERPRETAZIONE DEI DATI PSInSAR TM	28
3.1	1°FASE: IDENTIFICAZIONE DELLE AREE IN MOVIMENTO	29
3.1.1	Sviluppo di metodi per l'identificazione di aree in movimento.....	29
3.1.2	Metodo visivo-manuale.....	30
3.1.3	Metodo informatico.....	32
3.1.4	Confronto tra i due metodi	39
3.1.5	Criteri di selezione delle aree anomale	40
3.2	2°FASE: INTERPRETAZIONE PRELIMINARE DEI RISULTATI PSInSAR TM	46
3.2.1	Analisi della tipologia dei movimenti possibili nei vari contesti geologici e geomorfologici della Regione Piemonte.....	47
3.2.2	Sviluppo di un metodo di interpretazione preliminare a scala regionale.....	61
3.2.3	Aree anomale ubicate in corrispondenza dei versanti in zona collinare e montana.....	64
3.2.4	Aree anomale ubicate in pianura e nei fondovalle.....	71
3.3	Sviluppo e compilazione di un database riguardante le aree anomale.....	74
3.4	3°FASE: INTERPRETAZIONE DI DETTAGLIO	75
4	esperienze delle singole regioni	77
4.1	Utilizzo dei dati PSInSAR TM per lo studio dei fenomeni franosi Piemonte	77
4.1.1	1 Valutazione in situ e identificazione dei bersagli radar.....	77
4.1.2	Identificazione del movimento in una deformazione gravitativa profonda di versante	78
4.1.3	La tecnica PSInSAR TM conferma i dati precedentemente rilevati	79
4.1.4	Identificazione di aree a differente stato di attività.....	79
4.1.5	Valutazione dei movimenti in area caratterizzata da fenomeni complessi.....	80
4.1.6	Rilevamento di fenomeni franosi non ancora rilevati	81
4.1.7	Rilevamento di aree dove la fotointerpretazione non è resa possibile	81
4.2	Identificazione dei fenomeni franosi.....	82
4.2.1	Numero e densità dei PS in frana.....	82
4.2.2	Determinazione dello stato di attività	85
4.2.3	Contributo della tecnica PSInSAR TM all'identificazione e allo studio dei fenomeni franosi in relazione alla tipologia di frana e all'ambiente geologico	85
4.2.4	ANALISI COPERTURE DATI PSInSAR TM SULLE FRANE MONITORATE DEL PIEMONTE	93
4.2.5	Scomposizione del vettore velocità nelle componenti verticale e orizzontale	100
4.2.6	<i>Esempio:</i> Frana di Montaldo di Cosola nel comune di Cabella Ligure.	102
4.2.7	<i>Esempio:</i> frana di Feisoglio (CN).....	110
4.2.8	<i>Esempio:</i> frana di Sauze d'Oulx	115
4.2.9	Tabella dei siti monitorati su cui ricadono PS in Piemonte.....	119
5	BIBLIOGRAFIA.....	122

1 DEFINIZIONE DI UN METODO CHE PERMETTA DI VERIFICARE, A PRIORI, QUALI AREE MEGLIO SI PRESTANO ALL'APPLICAZIONE DEL METODO E QUALI MENO

1.1 Introduzione

La presente relazione si colloca nell'ambito di un progetto volto alla valutazione delle potenzialità dell'interferometria radar satellitare (PSInSAR™) in ambito geologico, per quanto concerne la localizzazione dei principali fenomeni franosi nonché di fenomeni di deformazione gravitativa profonda di versante (DGPV).

Nell'ambito del monitoraggio di deformazioni superficiali e aree a rischio la tecnica PS è uno strumento estremamente competitivo e multiscala: consente infatti di investigare da satellite, in tempi e a costi ridotti, aree molto estese (fino a migliaia di km²) garantendo velocemente un quadro sinottico di dinamiche a carattere regionale, nonché di realizzare analisi di dettaglio su singoli fenomeni e strutture. Ad oggi i risultati ottenuti evidenziano una copertura variabile in funzione dell'uso del suolo e strettamente correlati ai fenomeni di deformazione prospettica (fenomeni di *layover* e *shadowing*).

Obiettivo del lavoro è quindi la definizione di una metodologia per la mappatura regionale preventiva delle aree che meglio si prestano ad essere investigate con la tecnica dei diffusori permanenti (Permanent Scatterers -PS-). Una valutazione a priori delle aree monitorabili risulta un valido strumento di analisi costi/benefici per l'utente finale.

La sperimentazione è stata effettuata su un'area campione comprendente il settore centro – occidentale della regione Piemonte, un'area di circa 4300 km². Tale area, acquisita regolarmente dai satelliti ERS dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA) in orbita discendente (Track 22), risulta essere statisticamente rappresentativa sia da un punto di vista geo-morfologico che di classi di utilizzo del suolo.

1.2 Metodologia

Il progetto è stato strutturato nelle seguenti fasi principali:

1. Individuazione delle aree in *layover* e *shadowing* del territorio oggetto di studio mediante ri-proiezione del modello digitale del terreno a maglia 20 metri secondo l'orbita del radar e analisi di visibilità del satellite.
2. Mappatura degli elementi di origine naturale (porzioni di versante con roccia affiorante) e di origine antropica (viabilità, edifici, elettrodotti ecc.) che potrebbero risultare in fase di elaborazione bersagli visibili per il satellite e mappatura delle aree ad alta densità di vegetazione, sulle quali è invece difficile individuare bersagli radar.
3. Mosaicatura dei *dataset* ricavati dalle precedenti elaborazioni finalizzato alla classificazione del territorio regionale in aree monitorabili mediante l'uso della tecnica PS.
4. Validazione della procedura mediante confronto dei risultati ottenuti con la copertura PS standard attualmente disponibile sull'area oggetto di studio.

1.3 Deformazioni Prospettiche

La modalità di acquisizione del satellite, non perpendicolare al suolo ma secondo un angolo di vista θ , dà origine a delle deformazioni prospettiche che impediscono al radar la visibilità di alcune aree. Come illustrato in Figura, in base alla pendenza del terreno si distinguono i fenomeni di:

- *foreshortening*: si verifica quando la pendenza del terreno tende ad essere perpendicolare alla congiungente sensore-bersaglio (pendenza positiva pari all'angolo di off-nadir θ); in questi casi il contributo di più punti si concentra in poche celle producendo *pixel* molto luminosi nell'immagine di ampiezza.
- *layover*: si verifica quando la pendenza del terreno è maggiore dell'angolo θ ; questo produce una forte distorsione dell'immagine che impedisce la corretta interpretazione del segnale e ogni analisi quantitativa.
- *shadowing*: si verifica quando alcune zone non possono essere illuminate dall'impulso radar perché schermate da altri oggetti; si producono quindi nell'immagine di ampiezza aree molto scure (in ombra).

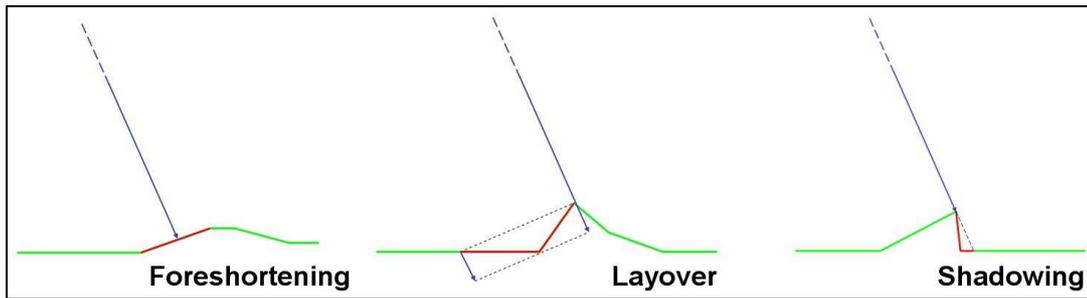


Figura 1.1: esempi di fenomeni di foreshortening, layover e shadowing. Da notare evidenziate le zone non monitorabili.

I fenomeni di **Layover** e **Shadowing** sono stati matematicamente modellati come di seguito descritto. Il fenomeno di **Foreshortening** al contrario è da valutare caso per caso in quanto non sempre comporta l'assenza di informazione da satellite, ed è stato quindi escluso dalla metodologia qui proposta.

Operativamente per l'individuazione delle zone di **layover** e **shadowing** si è proceduto a campionare il modello digitale del terreno dell'area campione a passo 20 metri lungo la direzione perpendicolare alla traiettoria del satellite ottenendo così una serie di sezioni **x_i** della topografia parallele e distanziate tra loro di 20 m (Figura 2). Ciascun profilo è stato quindi elaborato in ambiente Matlab al fine di individuare le zone non visibili al satellite. Il cuore dell'algoritmo (Kropatsch, Strobl, 1990) consiste nel misurare per ogni punto del profilo in analisi la distanza geometrica **R** dal satellite come funzione della posizione lungo **x** e della quota **z** (Figura 2). Studiando tale funzione e le sue derivate prima e seconda si possono individuare le porzioni di versante caratterizzate da **shadowing** e **layover**.

L'algoritmo attribuisce così ad ogni punto della griglia caratterizzato da **layover** o **shadowing** un indice binario.

Il risultato è stato infine riconvertito in un raster con coordinate UTM ED50 (Figura 3) e utilizzato come **prima maschera** da applicare al modello.

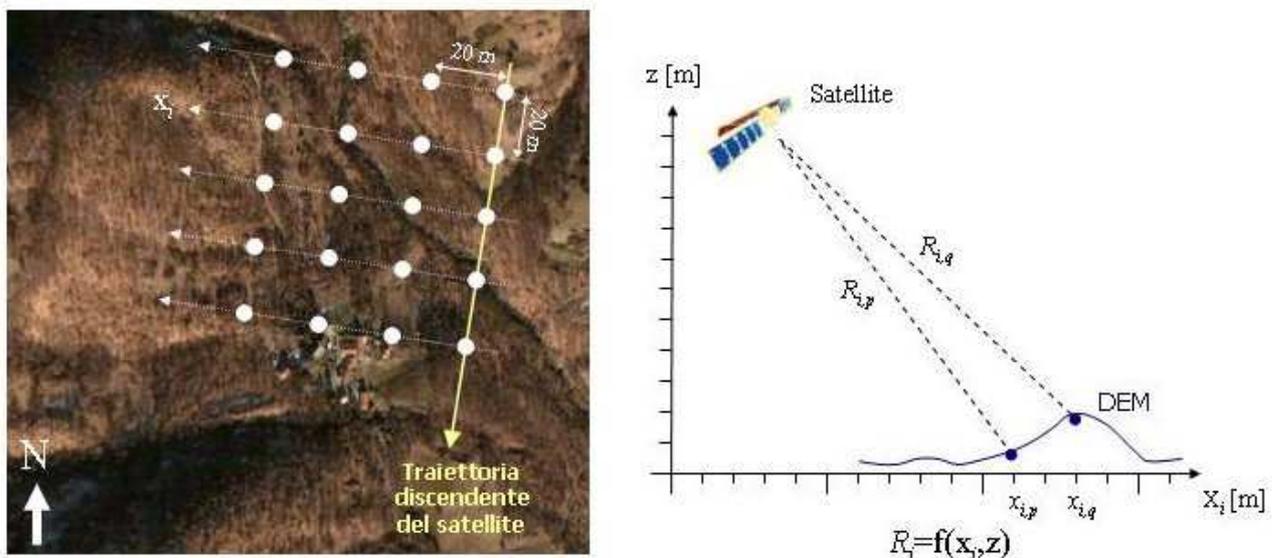


Figura 1.2. DTM orientato secondo coordinate SAR ed esempio di sezione elaborata in ambiente Matlab

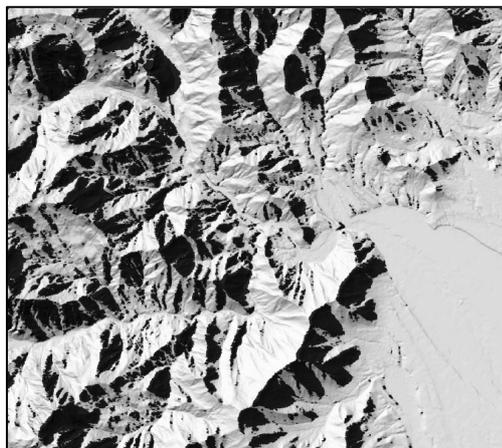


Figura 1.3. Zonizzazione in base alla visibilità del radar (in nero le aree in layover e shadowing)

1.4 Elaborazione delle classi di uso del suolo

Come primo **step** di analisi sono stati utilizzati i **dataset** relativi ai piani territoriali forestali (PTF), relativi al 2001, che rappresentano le classi di utilizzo del suolo del settore alpino della Regione Piemonte. In considerazione del fatto che il livello di dettaglio di tali dati risulta essere significativo per un utilizzo a scala 1:25.000, si è ritenuto opportuno integrare i livelli “zone rocciose”, “edificati”, “viabilità” “acque” e “ghiacciai” con i relativi livelli della carta tecnica regionale numerica (CTRN) che, anche se non altrettanto recenti - il dato risale infatti al 1991 -, forniscono un livello di dettaglio decisamente maggiore (scala 1.10.000) rispetto ai PTF. Questo ha consentito di scorporare dalle aree di aggregazione precedentemente identificate zone che altrimenti avrebbero potuto falsare sensibilmente i risultati. I livelli informativi così integrati, dopo una serie di elaborazioni, sono stati accorpati in un unico **dataset** comprendente delle macro-categorie di uso del suolo, identificate in funzione della possibilità o meno di contenere al loro interno dei potenziali bersagli radar.

Le categorie identificate sono strutturate nelle seguenti cinque classi:

- 1) **Classe I** - ottima probabilità di individuare bersagli radar;
Edifici e infrastrutture / Rocce esposte – da letteratura rappresentano i candidati più idonei a diventare bersagli in virtù delle loro proprietà di riflessione del segnale radar.
- 2) **Classe II** - buona probabilità di individuare bersagli radar;
Praterie di montagna – essendo caratterizzate da vegetazione bassa e rada, in mancanza di potenti coltri di suolo, permettono l'affioramento del substrato roccioso e possono quindi contenere al loro interno numerosi bersagli radar (di origine naturale).
- 3) **Classe III** - limitata probabilità di individuare bersagli radar;
Prati e seminativi / Frutteti – l'uso prevalentemente agricolo di queste categorie presuppone la presenza di manufatti di modeste dimensioni che, anche se non facilmente rilevabili dalla cartografia utilizzata, possono risultare degli ottimi bersagli radar ed essere identificati da satellite (es. depositi per attrezzi, elettrodomesti ecc.).
- 4) **Classe IV** - scarsa probabilità di individuare bersagli radar;
Boschi – l'elevata copertura vegetale ad alto fusto che caratterizza tale categoria rende difficile l'individuazione di eventuali bersagli radar.
- 5) **Classe V** – probabilità nulla di identificare bersagli radar;
Acque / Ghiacciai – da letteratura, l'acqua e il ghiaccio non presentano le caratteristiche elettromagnetiche di bersagli radar.

Il **dataset** così costituito è stato trasformato in un **raster** a passo 20 metri e viene a costituire la **seconda maschera** da applicare al modello.

1.5 Mosaicatura dei livelli informativi

I due livelli precedentemente creati sono stati mosaicati in un unico **raster** che è stato utilizzato per creare una carta di tipo semaforico (Figura 4) rappresentante la classificazione del territorio in base alla probabilità di trovare o meno dei potenziali bersagli radar. Operativamente si è proceduto a moltiplicare il **raster** classi di uso del suolo precedentemente elaborato con il **raster** contenente le aree in **layover** e **shadowing**.

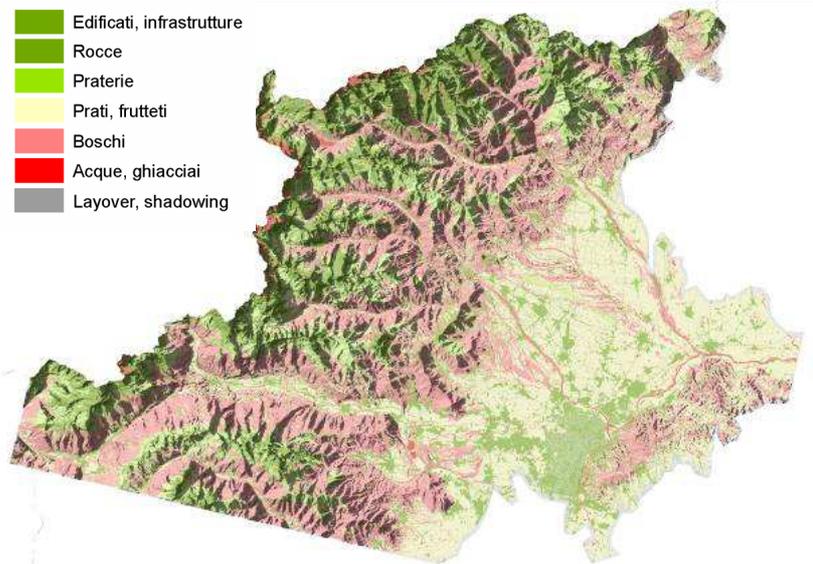


Figura 1.4. – zonizzazione del territorio in base alla probabilità di trovare dei bersagli radar. In rosso le aree a più bassa probabilità, in bianco quelle a probabilità maggiore.

1.6 Validazione procedura

Come ultima analisi, si è proceduto alla validazione della metodologia mediante confronto tra le maschere elaborate e la copertura dei PS, quest'ultima ottenuta nell'ambito della collaborazione in atto tra TRE e ARPA Piemonte che prevede l'analisi PSInSAR™ dell'intero territorio regionale.

Nello specifico nell'area campione di 4300 km² sono stati individuati oltre 730.000 punti per una densità media di 170 punti a km². Il **dataset** di immagini utilizzato copre l'arco temporale 1992-2000.

Dall'incrocio dei **dataset** emerge un'ottima corrispondenza tra la distribuzione dei PS e la zonizzazione dell'area di studio in classi di probabilità, come riassunto nella tabella sottostante (tabella 5) e come graficamente visualizzato nella figura 6b. Si può infatti osservare come sia il numero di PS che i valori di densità (numero di PS per km²) siano molto elevati per le categorie "edificati ed infrastrutture" e "rocce affioranti" (classe I), per poi diminuire progressivamente fino ai valori quasi nulli della categoria "ghiacciai" (classe V).

Dai dati in tabella 5 risulterebbe un valore di densità apparentemente elevato per le acque (classe V) che in realtà non riflettono energia al radar. Tale anomalia è dovuta al fatto che una considerevole porzione della classe "acque" ricade nel territorio urbano della città di Torino (Fiume Po), dove numerose infrastrutture quali ponti, piloni, pali della luce, cartelloni pubblicitari ecc. risultano ubicate nelle immediate vicinanze dei corsi d'acqua; ad un'analisi a scala 1:20.000 non è stato possibile scorporare efficacemente dal livello "acque" tutti questi elementi, che in realtà avrebbero dovuto essere inseriti nel livello "edificati ed infrastrutture".

Uso	Classe	N. PS	% Totale	Area (km ²)	DENSITA' (punti/km ²)
Infrastrutture	I	522.452	71,7	450,6	1159
Rocce affioranti	I	96.698	13,3	327,5	295
Praterie	II	44.812	6,2	389,5	115
Prati	III	29.020	3,9	847,4	34
Frutteti	III	2.953	0,4	90,1	32
Boschi	IV	31.519	4,3	1.092,6	28
Acque	V	905	0,1	26,4	34
Ghiacciai	V	46	0,1	10,5	4
Layover/Shad.	VI	7.100	0,6	1084,4	6

Tab. 1.1 valori di distribuzione dei PS sull'area oggetto di studio

In quest'analisi è stata inoltre inserita un'ulteriore classe rappresentata dalle aree non visibili al radar. Quest'area, che copre circa il 25% dell'area oggetto di studio, presenta un valore non nullo di densità dei PS (trattandosi di zone in ombra per il radar, tale valore dovrebbe essere prossimo allo zero). Pur apparendo come anomalia questa è in realtà dovuta sia ai limiti di precisione del DTM utilizzato sia all'errore intrinseco generato dai parametri orbitali di massima utilizzati nella riproiezione del DTM lungo la direzione di vista del satellite.

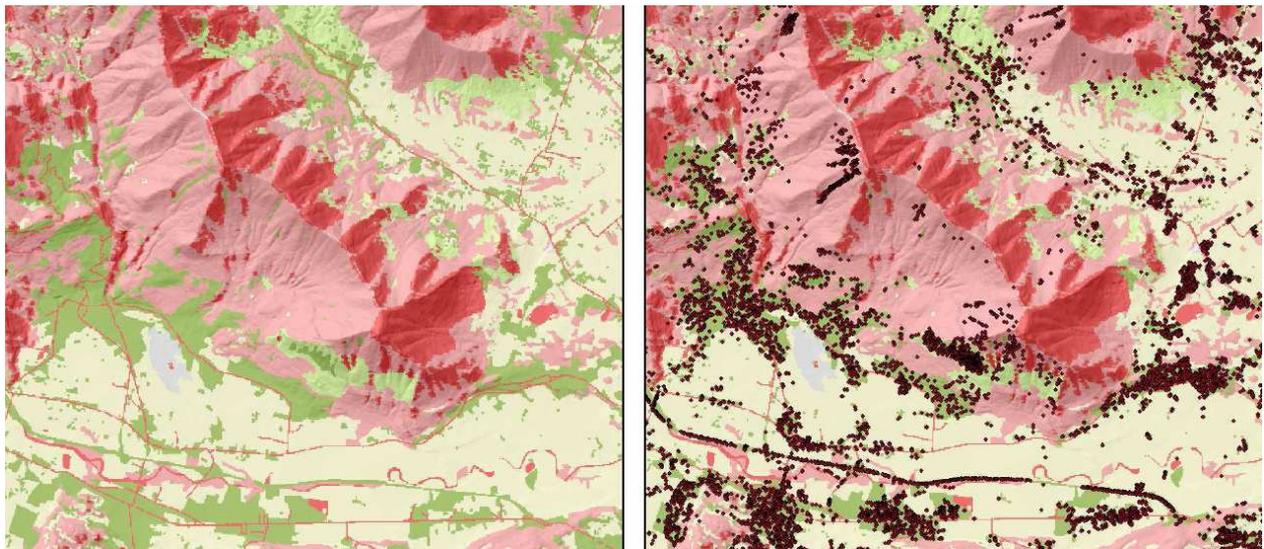


Figura 1.5a – dettaglio della carta semaforica (da verde a rosso aumenta la probabilità di trovare PS)

Figura 1.5b – medesimo dettaglio con l'ubicazione dei PS di controllo.

1.7 Conclusioni

Il presente studio ha permesso di definire una metodologia applicabile a grande scala volta all'identificazione delle aree potenzialmente monitorabili mediante la tecnica dei diffusori permanenti, basandosi sull'analisi incrociata delle banche dati relative all'uso del suolo e dei modelli digitali di terreno. Tale metodologia, sebbene presenti un grado di accuratezza vincolato alla scala di dettaglio dei **dataset** utilizzati per le elaborazioni, consente di valutare in maniera relativamente semplice la possibilità di ritrovare addensamenti di bersagli in funzione di zone omogenee del territorio.

I risultati ottenuti rappresentano un valido strumento in fase di pre-fattibilità di un'analisi PS: possono infatti guidare alla scelta dell'area da monitorare e alla tipologia di analisi da effettuare a vantaggio del rapporto costi/benefici.

La metodologia proposta inoltre apre diversi scenari di approfondimento che vanno da eventuali aggiornamenti di cartografia e piani territoriali a possibili studi statistici sulla qualità radiometrica dei PS in funzione della classe di uso del suolo in cui vengono identificati.

La sempre maggiore disponibilità di dati radar, ottici e telerilevati, infine, consentirà in futuro di raffinare ulteriormente la metodologia presentata.

2 ANALISI DEI DATI PSINSAR™

2.1 Introduzione

Scopo della ricerca è la qualificazione geologica dei PS elaborati sul territorio piemontese al fine di identificare, qualificare (separare) e quantificare (spazialmente e temporalmente) fenomeni deformativi in senso lato manifestatisi nell'arco temporale campionato dai PS attraverso lo sviluppo di procedure di analisi, raccolta ed interpretazione del dato SAR.

In particolare l'attività si è articolata nelle seguenti attività:

- 1) disamina dello stato dell'arte della tecnica PSInSAR™ nello studio dei fenomeni geologici attraverso l'analisi dei risultati di studi riportati nella letteratura specifica;
- 2) analisi dei dati PSInSAR™ in Regione Piemonte;
- 3) sviluppo di un sistema di processamento per il trattamento automatico del seminato PS capace di individuare e perimetrare ambiti con comportamento anomalo, verosimilmente in movimento per motivi geologico-geofisici;
- 4) individuazione di aree anomale secondo la metodologia sviluppata;
- 5) definizione del modello di una base-dati geografica per l'inserimento di tutti i settori "anomali" risultanti dall'indagine InSAR dell'intero territorio piemontese;
- 6) selezione preliminare di aree campione su cui testare, validare e collaudare la metodologia proposta;
- 7) Confronto tra le risultanze derivanti dalla tecnica PSInSAR™ e quelle derivanti dalla rete regionale di controllo sui movimenti franosi gestita da Arpa, congiuntamente con i tecnici di ARPA Piemonte;
- 8) Stesura di linee guida per la validazione e l'interpretazione delle risultanze del metodo PSInSAR™.

L'analisi condotta si articola in quattro parti:

- una prima parte in cui viene illustrata la metodologia di valutazione e validazione dei dati PSInSAR™ utilizzati;
- una seconda parte in cui viene illustrata la metodologia di interpretazione dei dati PSInSAR™ proposta ed utilizzata;
- una terza parte in cui vengono illustrati i risultati fino ad ora ottenuti, ovvero le aree anomale individuate nell'intero territorio regionale e l'interpretazione preliminare di alcuni datasets;
- Una quarta parte in cui vengono riportate le risultanze dell'esperienza relativa all'analisi comparativa tra i dati ricavati dai controlli convenzionali e le analisi PSInSAR™ sui fenomeni franosi più rilevanti nel territorio piemontese.

2.2 Valutazione e Validazione del seminato PS

Questa fase dell'analisi viene realizzata a partire dai dataset formato .dbf forniti nello specifico da TRE ad ARPA Piemonte. Ha la funzione di precontrollo sulla qualità del prodotto, realizzando le seguenti operazioni:

- analisi di conformità tra le metadescrizioni e i singoli datasets
- analisi di correttezza (o meglio verosimile) geocodifica
- estrazione di parametri statistici
- estrazione di densità areale
- traduzione verso altri formati dati

I dati interferometrici sono stati elaborati da Tele-Rilevamento Europa mediante un approccio di tipo "standard" (SPSA – Standard PS Analysis). Questa tecnica, utilizzata per elaborare un numero elevato di immagini, permette il riconoscimento di capisaldi radar e la stima della media delle velocità durante il periodo di monitoraggio attraverso una procedura automatica che assume linearità negli spostamenti.

Il dato interferometrico è stato ricavato sulla base delle immagini SAR delle missioni ERS1 ed ERS2 provenienti dagli archivi ESA sia su orbite ascendenti che discendenti e acquisite nel periodo maggio 1992 - gennaio 2001:

– Dataset discendente: Track 22, Track 251

– Dataset ascendente: Track 301, Track 29, Track 258

Nelle Figure 2.1. e 2.2. è riportata la copertura geografica dei datasets ascendenti e discendenti.

Le analisi standard PS svolte hanno prodotto 3 tipologie di datasets. Due datasets sono relativi all'analisi PS standard di tutto l'archivio interferometrico del periodo 1992-2001 rispettivamente in modalità ascendente e discendente. Per il dataset discendente nelle aree contraddistinte da acclività e da quote elevate si è operata un'ulteriore analisi "filtrata" prendendo in considerazione solamente l'archivio di immagini estive (SPSA apr-nov) per ovviare al problema ben noto della copertura nevosa in area montana. L'analisi estiva risulta generalmente più ricca di punti di misura sui versanti ma incorre in problemi di robustezza del dato a causa del numero esiguo di immagini utilizzate.

Il sistema di proiezione utilizzato è ED50-UTM32; è stata inoltre consegnata anche una copia dei datasets in sistema di riferimento geografico WGS84, identificata nel nome del file con il suffisso GEO.

In totale l'analisi fornita da TRE Europa ha individuato 2.163.869 Permanent Scatterers, suddivisi in 117 dbf, derivanti dall'analisi di 614 immagini SAR che ricoprono una superficie totale di territorio di circa 25000 km².

- N° di Permanent Scatterers discendente SPSA Full : 1.839.507
- N° di Permanent Scatterers discendente SPSA apr-nov : 683.716
- N° di Permanent Scatterers ascendente SPSA : 304.452
- Densità media discendente SPSA Full: 80 PS/Km²
- Densità media discendente SPSA apr-nov : 89 PS/ km²
- Densità media ascendente SPSA : 24 PS/ km²

La prima elaborazione (analisi statistica) dei datasets consegnati ha tuttavia portato ad identificare alcune problematiche quali:

- punto di riferimento localizzato in corrispondenza di frane (Pragelato full);
- velocità media del dataset caratterizzata da trend decisamente negativi (Argentera full) o positivi (Arona full);
- non corrispondenza tra dati full e summer (Biella);
- aree in sollevamento in corrispondenza di rilievi alpini e appenninici (Alagna, Torino, Demonte, Fossano, Ormea, Ovada, Locana).
- Tali datasets stati successivamente rielaborati da parte della TRE.

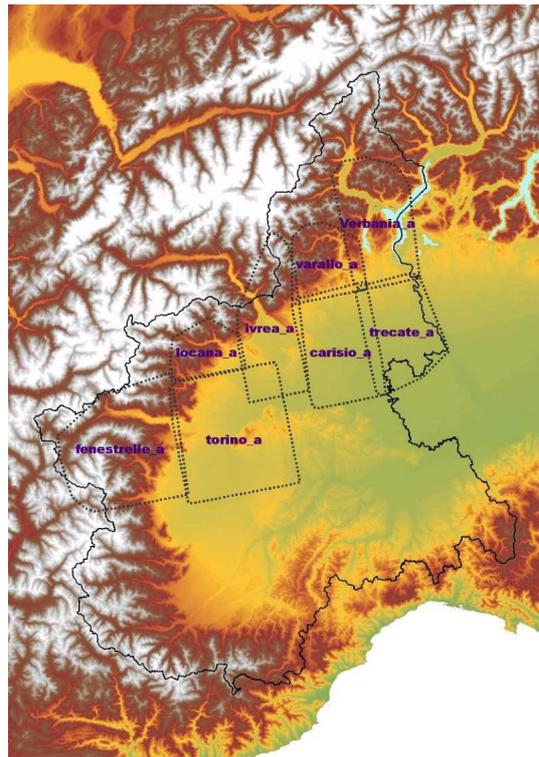


Fig.2.1. Copertura geografica dei datasets ascendenti

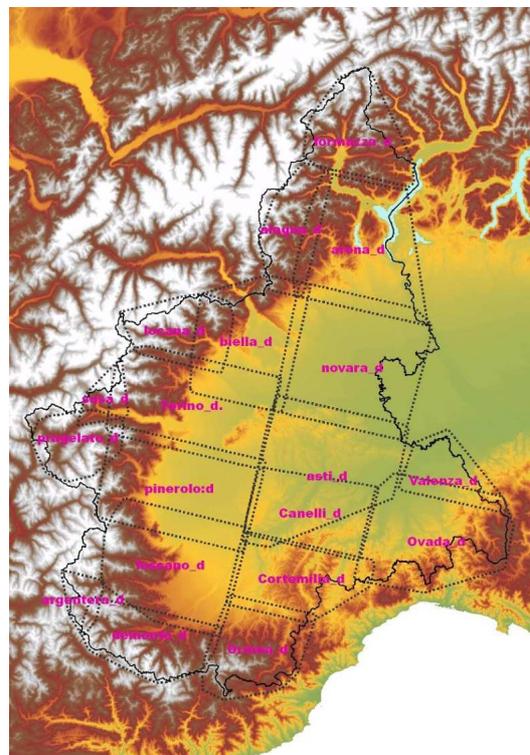


Fig.2.2. Copertura geografica dei datasets discendenti.

I databases dei risultati sono costituiti da files in formato “.dbf” indicati dai suffissi REF, Vel e TS.

I datasets indicati con il suffisso REF contengono i reference points e sono organizzati secondo i seguenti campi:

- Code: codice che permette di identificare univocamente il punto di misura all'interno del file;
- Lat/North: posizione in latitudine del PS espressa nel sistema di coordinate geografico GCS WGS 84 o sistema proiettato;
- Lon/East: posizione in longitudine del PS espressa nel sistema di coordinate geografico GCS WGS 84 o sistema proiettato;
- Vel: velocità media annua di spostamento lungo la LOS espressa in [mm/anno] stimata sull'intero arco temporale coperto dalle acquisizioni elaborate e relativa al punto di riferimento supposto a velocità nulla;
- Coherence: parametro di qualità del PS, compreso tra 0 e 1, tanto più elevato quanto più l'andamento del moto del PS è di tipo lineare (un moto perfettamente lineare ha valore pari a 1). È funzione del numero di acquisizioni elaborate e della distribuzione dei baseline temporali e spaziali.

I files .dbf, indicati con il suffisso Vel contengono le velocità medie annue calcolate sull'intero arco temporale (1992-2000) dei PS individuati. Oltre alle informazioni sopra descritte (Code, Lat/North, Lon/East, Vel e coherence) è riportato il campo V_stdev, che rappresenta la deviazione standard dell'errore sulla misura della velocità.

I files dbf con il suffisso TS contengono, oltre alle informazioni già descritte per gli altri files, anche la serie temporale del punto, cioè l'evoluzione della distanza sensore-bersaglio lungo la Line Of Sight (L.O.S.) in corrispondenza delle acquisizioni dell'area in esame e riferite ad un punto supposto fermo (reference point). I valori, espressi in millimetri, che danno luogo alla serie storica vengono riportati in campi definiti dalla data in cui è avvenuta l'acquisizione nel formato aaaammgg. L'istante T0 è posto in corrispondenza della acquisizione master, assunta come riferimento temporale per tutta l'elaborazione.

I risultati dell'accuratezza dei valori forniti dalla tecnica PSInSAR™ per il territorio piemontese forniti da T.R.E. sono riportati in Tab.2.1.

VELOCITÀ	± 0.1-2	[mm/anno]
POSIZIONE IN EST	± 6-10	[m]
POSIZIONE IN NORD	± 2-5	[m]
SPOSTAMENTI (singolo valore della serie storica)	± 2-5	[mm]

Tab.2.1. Accuratezza delle misure fornite sotto ipotesi di dataset ≥ 50 e distanza dal punto di riferimento ≤ 2 km (TRE, 2006)

Per la prima consegna di dataset sono stati inoltre forniti da TRE:

- le informazioni ancillari dell'elaborazione
- il dataset utilizzato
- il PS report
- le informazioni sul campo di velocità in direzione LOS e moto degli scatteratori.

2.2.1 ANALISI DI CONFORMITÀ TRA LE METADESCRIZIONI E I SINGOLI DATASETS

L'analisi di conformità tra le metadescrizioni e i singoli datasets, è sviluppata in ambiente GIS e integrata ad una semplice analisi di visualizzazione, in modo da valutare eventuali singolarità, errori e difetti. Vengono descritti di seguito le principali operazioni:

- individuazione trends anomali
- individuazione sollevamenti nelle zone di bordo ed in corrispondenza di quote elevate
- analisi della velocità nella zona di sovrapposizione dei dataset
- analisi delle zone con forte orografia e quote levate
- analisi dei dati ascendenti
- analisi dei TS – serie storiche
- verifica della natura del PS

- Individuazione trends anomali

La semplice visualizzazione dei datasets (Fig.2.3.) unita all'estrazione di parametri statistici (punto 3) ha permesso di osservare dei trends anomali di sollevamento per i dataset Biella full e Arona full (VLOS_{media}=+1,5 mm/anno) e dei trends anomali di abbassamento per il dataset Argentera full (VLOS_{media}=-1,8 mm/anno) e Prigelato full (VLOS_{media}=-2,8 mm/anno).

Tale fenomeno appare legato alla scelta dei reference points. Le misure di velocità calcolate dalla tecnica PSInSARTM sono misure di tipo differenziale: esse non esprimono un valore assoluto di spostamento di un punto a terra, bensì indicano, come in una rete geodetica, le velocità dei PS rilevati in relazione ad un punto scelto come riferimento. Il punto di riferimento è un PS il cui moto è per ipotesi considerato uguale a zero e rispetto al quale tutte le altre velocità vengono calcolate. Bisogna precisare che il punto di riferimento viene scelto in fase di elaborazione come un PS al centro della scena in analisi. Nessuna informazione sul comportamento geologico dell'area in cui si trova o sul suo specifico moto è nota a priori (Fig.2.4.-2.5.).

La non corrispondenza delle velocità dei PS con quelle dei dataset attigui (es. Argentera e Demonte) è un'ulteriore conferma dell'esistenza di tali trend anomali.

Tale problematica è stata risolta per i dataset Arona con uno shift rigido applicato alle velocità dei PS (Fig.2.6.) e per Prigelato mediante la modifica del punto di riferimento e il riprocessamento dei dati da parte della TRE.

Dalle considerazioni sopra riportate emerge la necessità di una fase di omogeneizzazione dei dati PSInSARTM che comporta la verifica dei reference points tramite:

- controllo sul terreno;
- raccolta di informazioni sul moto del sito (confronto con livellazioni IGM o altri dati);
- analisi da letteratura delle deformazioni regionali di origine tettonica (mm/anno) che possono ricadere nel sito.

E' auspicabile in futuro che la scelta dei reference points oltre che su criteri ingegneristici venga scelta anche sulla base dei seguenti criteri geologici:

- ubicazione in un'area stabile dal punto di vista geologico (assenza di movimenti di versante, di terreni problematici, ecc...)
- localizzazione in zona facilmente raggiungibile e possibilmente non soggetta a modificazioni (es. rifacimento dei tetti nel caso di edifici)
- prossimità a capisaldi topografici o altro monitorati/bili nel tempo

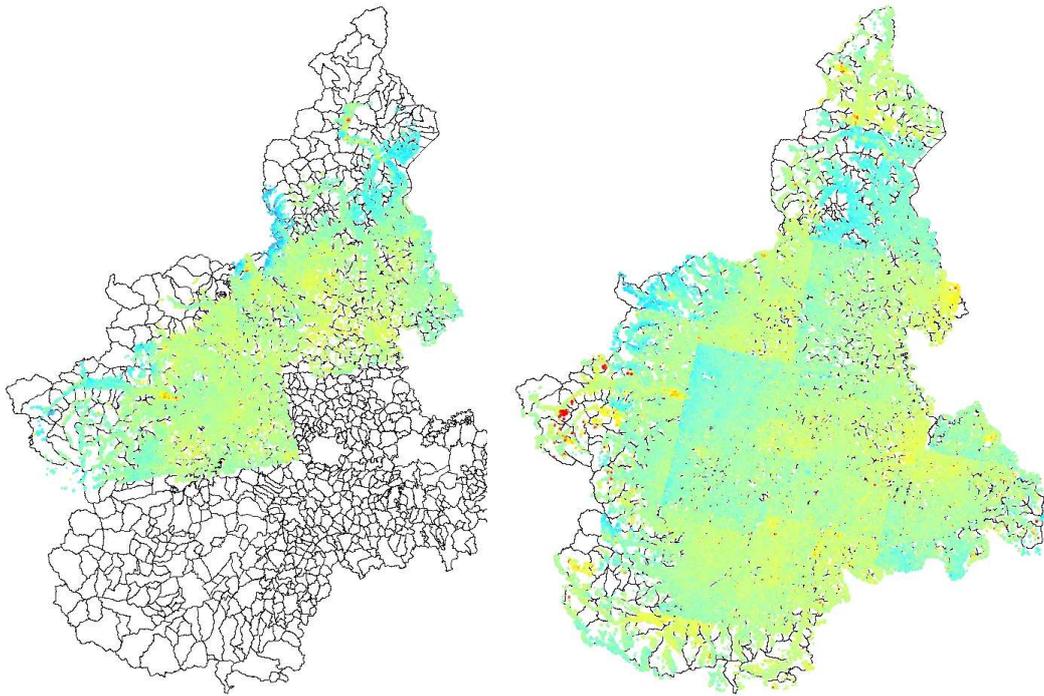


Fig. 2.3. Visualizzazione dei datasets ascendenti e discendenti.

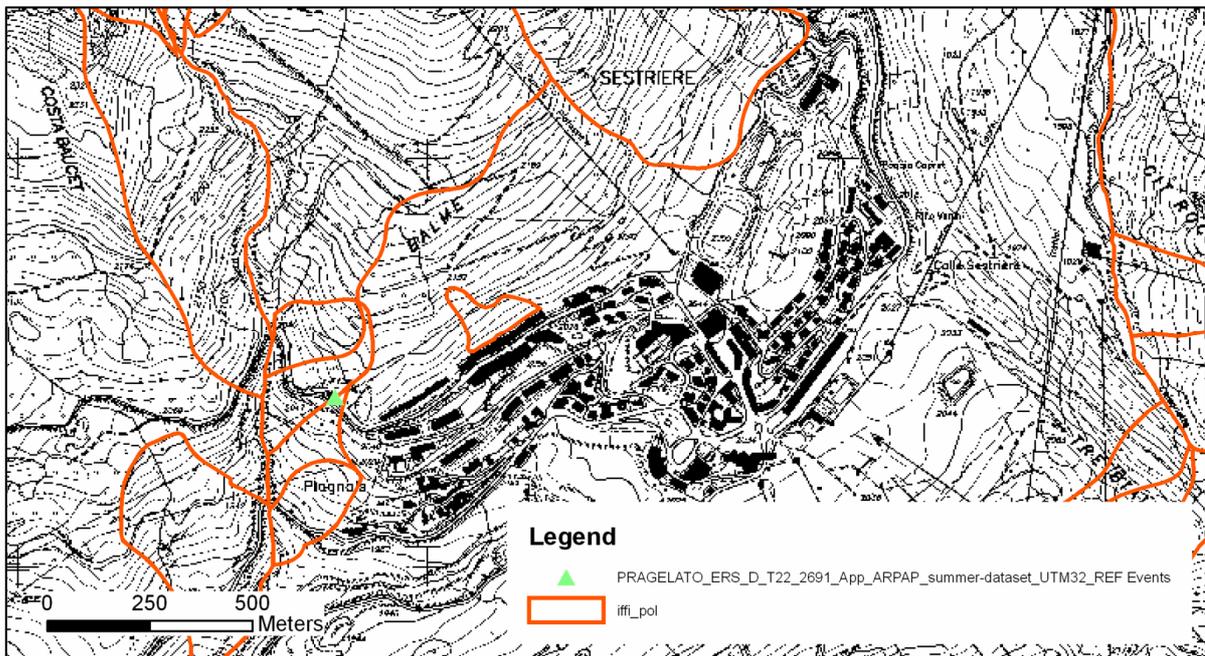


Fig.2.4. Il punto di riferimento del dataset Pragelato_ summer ricade in un'area in frana.

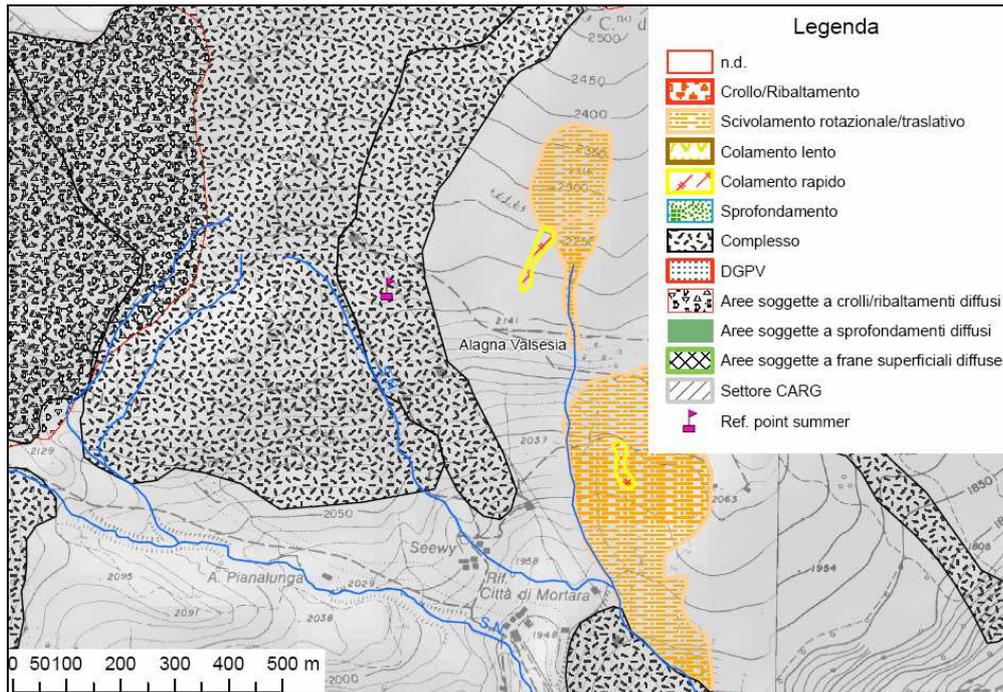


Fig.2.5. Il punto di riferimento del dataset *alagna_summer* ricade in un'area in frana.

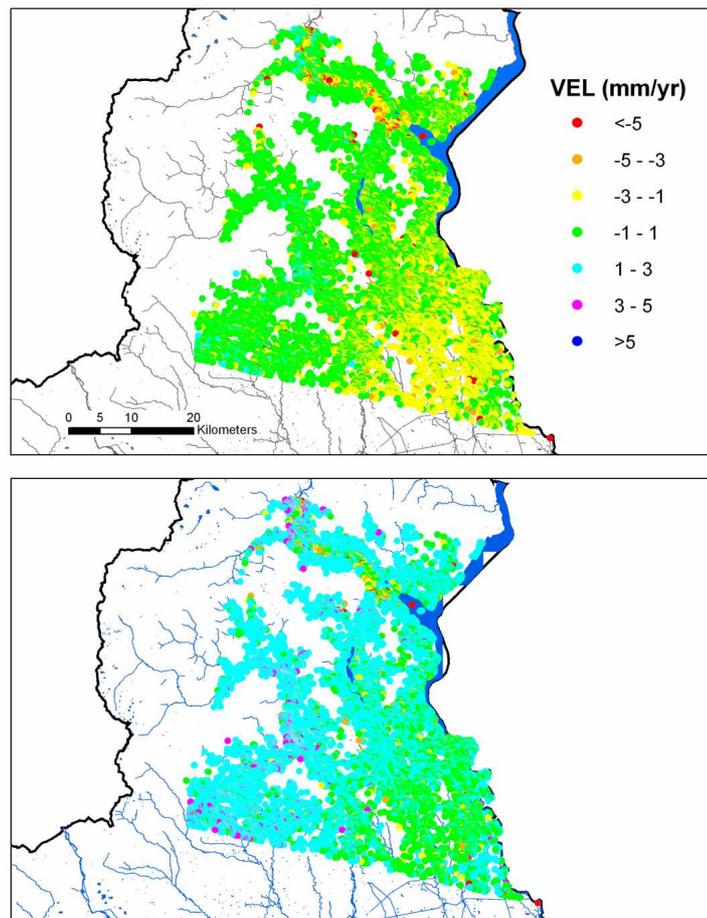


Fig.2.6. Dataset Arona riprocessato (in alto) e originale (in basso). Il punto di riferimento non è stato modificato

- Individuazione sollevamenti nelle zone di bordo o in corrispondenza di quote elevate
 Per altri datasets (Alagna e Ovada) la “zona di bordo” è spesso caratterizzata da sollevamenti, la cui entità ($>+1$ mm/a) porterebbe ad escludere un’origine connessa ad attività neotettonica (Fig.2.7), che risultano di difficile interpretazione geologica e che sembrano per lo più legate a problematiche di elaborazione delle immagini satellitari connesse al contributo atmosferico che presenta una diversa entità in relazione alle differenze di quota (Fig.2.8.- 2.9.).

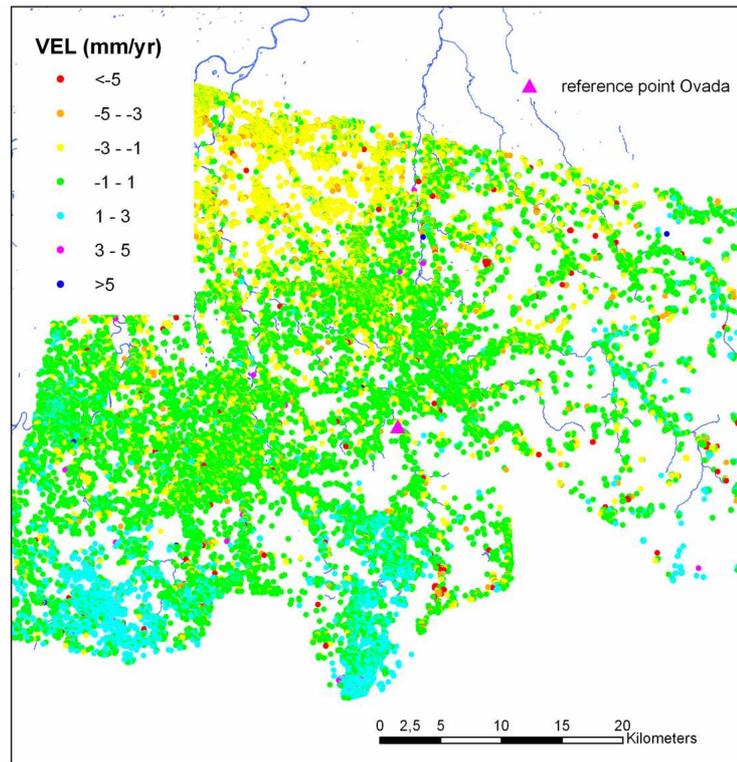


Fig. 2.7. Dataset Ovada.

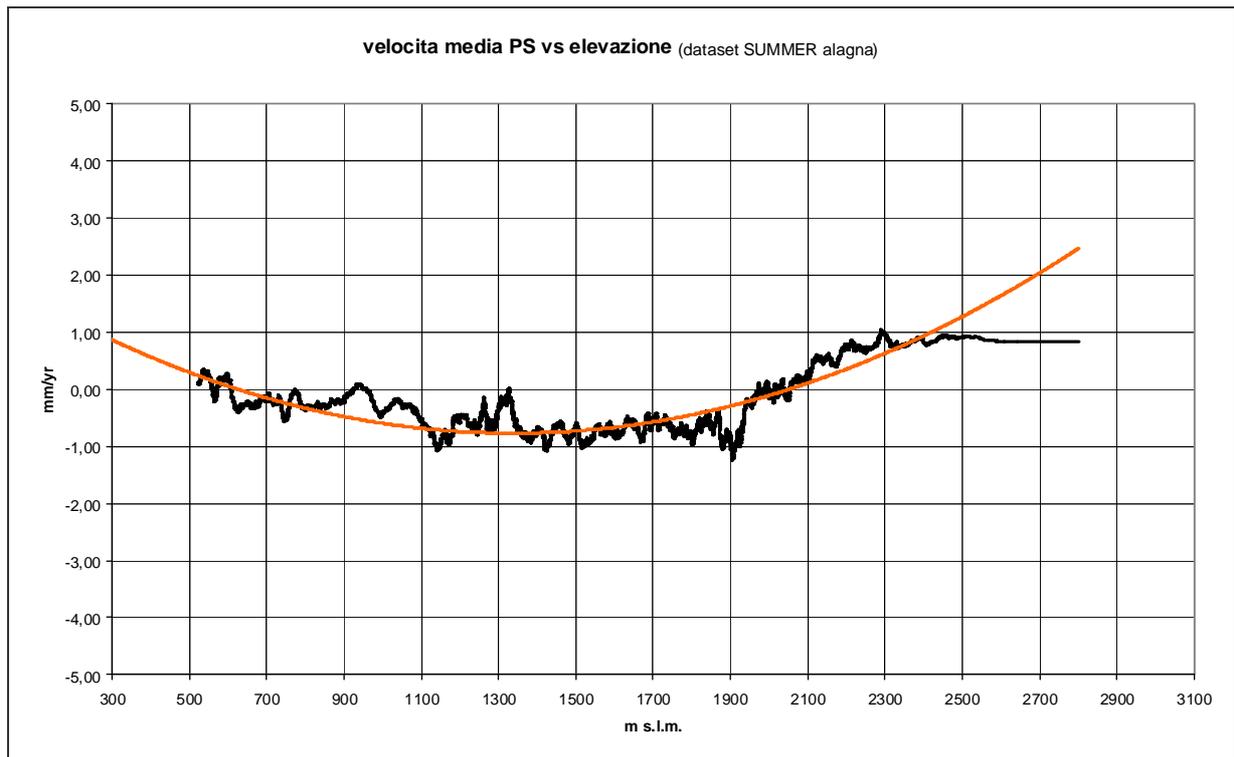


Fig.2.8.: Andamento della VLOS in relazione alla quota topografica (dataset alagna summer). Le quote superiori ai 2000 m sono caratterizzate da velocità positive.

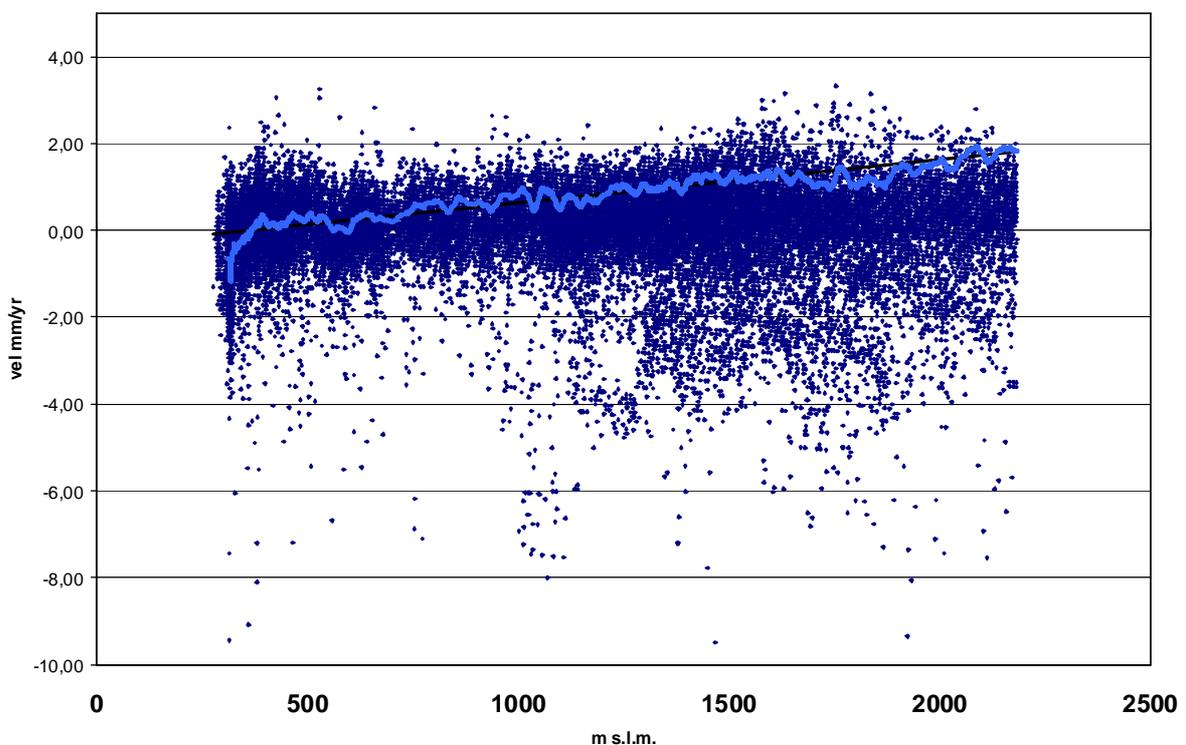


Fig.2.9.: Andamento della V_{LOS} in relazione alla quota topografica (dataset Locana full). Le quote superiori ai 1400-1500 m sono caratterizzate da velocità positive.

Il riprocessamento dei dati per il dataset Ovada, effettuato dalla TRE tenendo conto del diverso contributo atmosferico in relazione alla quota, ha permesso di eliminare tali aree in sollevamento.

- Analisi delle velocità nella zona di sovrapposizione dei dataset

Nel caso di analisi di aree molto estese, come un intero territorio regionale, è consuetudine suddividere l'elaborazione PS in più ritagli (o siti) al fine di limitare il carico computazionale in fase di processing. Ogni sito avrà un suo punto di riferimento e i PS ad esso correlati. Le misure di spostamento fornite sono differenziali e relative al punto di riferimento del singolo sito, di conseguenza PS provenienti da datasets diversi possono avere velocità leggermente differenti. La zona di sovrapposizione dei datasets evidenzia di solito una differenza di velocità dei PS. La Fig.2.10. si riferisce ad un settore della pianura tortonese nella zona di sovrapposizione tra il dataset Ovada e Valenza ed evidenzia una differenza di velocità di circa 1,2-1,5 mm/a tra i due datasets.

L'elaborazione dei datasets necessita di un'operazione di "messa in passo", consistente nella stima statistica della differenza di velocità dei PS nella parte di sovrapposizione e nella successiva rimozione di tale differenza dalle velocità dei PS di un dataset rispetto a quello preso a riferimento. Tale operazione può essere applicata nel caso di aree di studio collocate nella zona di sovrapposizione di due datasets, ma non si può estendere alla totalità dei datasets presenti nel territorio regionale (causa propagazione dell'errore).



Fig.2.10. Confronto tra il dataset Ovada (a sinistra) ed il dataset Valenza (a destra) nella zona di Pontecurone (pianura tortonese)

- Analisi delle zone con forte orografia e quote elevate

Per i datasets completi ("full") nelle aree alpine, contraddistinte da una forte orografia e da quote elevate, occorre considerare il fattore neve. Quest'ultimo infatti può compromettere la qualità del dato radiometrico: se un oggetto (il tetto di un'abitazione, una roccia) è in alcuni mesi dell'anno coperto da neve il satellite vede una serie di acquisizioni coerenti nei mesi non invernali e un dato rumoroso nei mesi invernali, ciò riduce considerevolmente il numero di PS.

Sono stati messi a confronto i dataset full e summer. I grafici di Fig.2.11. mostrano un deciso guadagno del numero dei PS in corrispondenza delle quote più elevate (1700-2000 m). L'utilizzo del dataset

summer consente un aumento non solo del numero dei PS ma anche un aumento dell'area coperta dai dati (Fig.2.12).

Per le zone alpine risulta di conseguenza utile il "dataset estivo" che non comprende le acquisizioni caratterizzate dalla presenza di neve. Tuttavia la minore accuratezza della misura, dovuta al ridotto numero di immagini utilizzate rende necessario una verifica preliminare della qualità del dato da effettuarsi caso per caso con confronto con dati pregressi e sopralluoghi sul terreno.

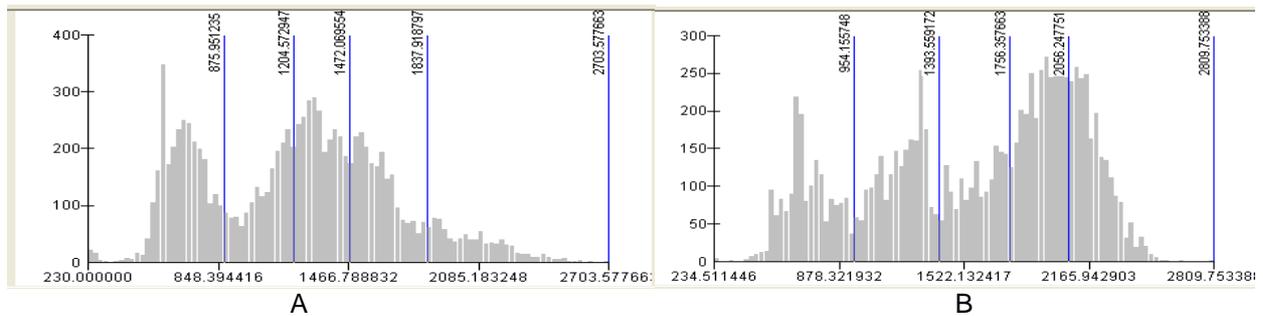


Fig.2.11. Relazione tra il n° dei PS e le quote per il dataset ALAGNA full (A) e ALAGNA summer (B)

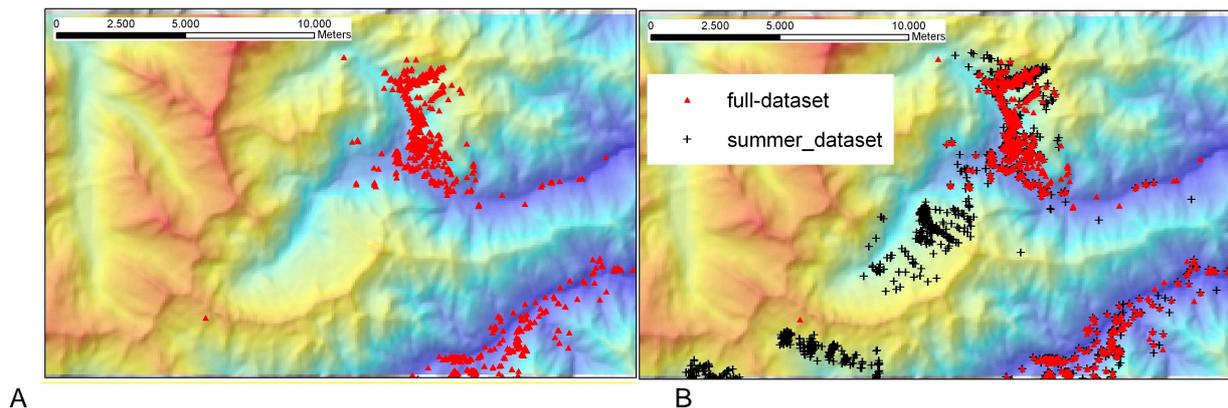


Fig.2.12. Confronto tra il dataset full (A) e summer (B).

- Analisi dei dati ascendenti

Nell'analisi ascendente l'esiguo numero di immagini a disposizione (mediamente 30 acquisizioni per sito) ha consentito di raggiungere una densità di PS molto più bassa di quella ottenuta nell'elaborazione discendente.

Per esempio sui versanti esposti a E – SE l'effetto delle deformazioni prospettive nei dataset discendenti riduce la possibilità di trovare bersagli permanenti; l'utilizzo di dati ascendenti può incrementare in alcuni casi (Fig.2.13) le informazioni ottenibili dalla tecnica PSInSARTM. Tuttavia anche in questo caso si incorre in problemi di robustezza del dato che rendono necessaria la verifica caso per caso dell'attendibilità delle misure.

E' da verificare localmente la possibilità di integrazione tra dati ascendenti e discendenti, il cui principale vantaggio è la capacità di osservare le deformazioni in due direzioni.

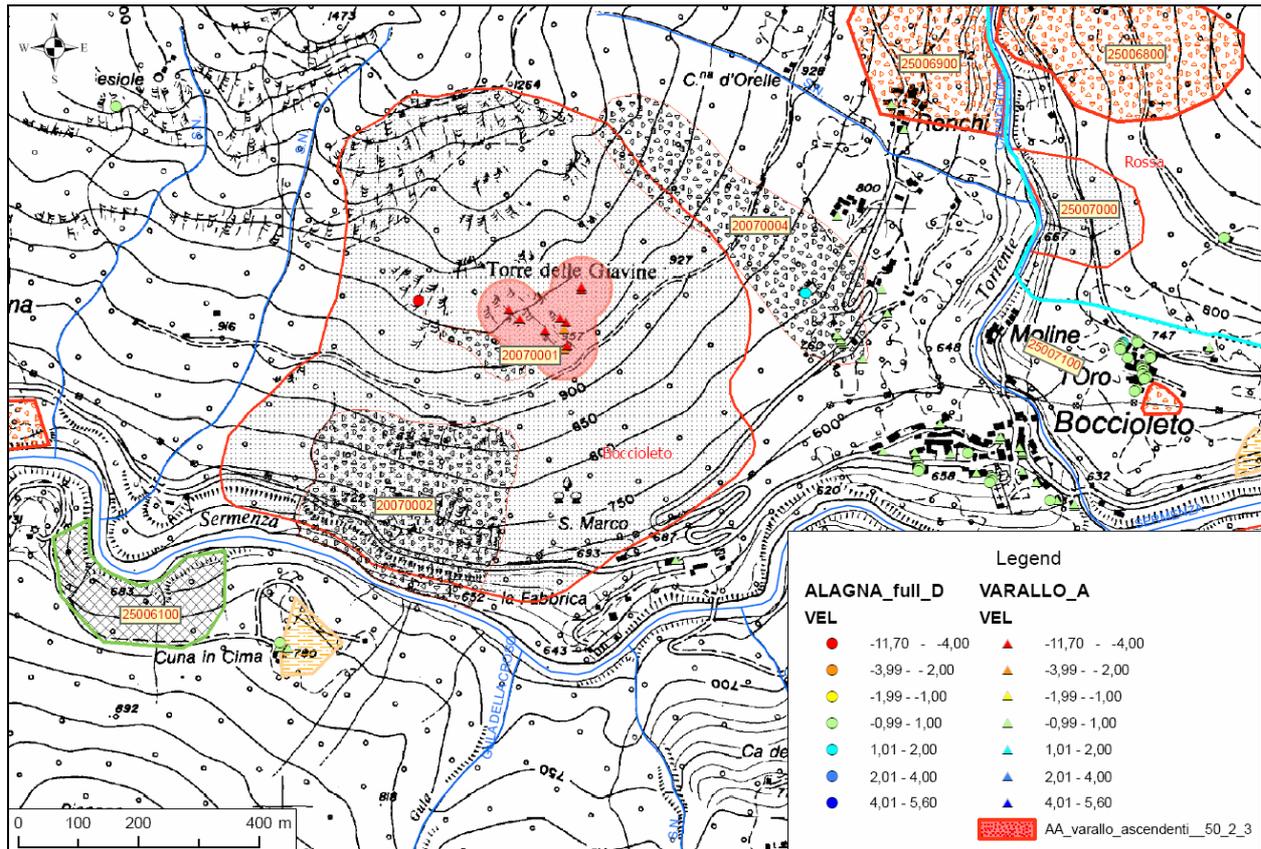


Fig.2.13: Confronto tra il dataset ascendente “VARALLO” e il dataset discendente ALAGNA (full) (AA: aree anomale). Il dataset ascendente ha permesso di individuare un’area anomala in abbassamento nella zona di Torre delle Giavine.

- Analisi dei TS - Serie storiche

Le serie storiche riportano, per ogni PS, gli spostamenti in millimetri del bersaglio lungo la LOS in funzione del tempo trascorso dall’acquisizione master che viene utilizzata come riferimento temporale e posta quindi a 0 mm (il punto in cui il grafico attraversa lo zero è in corrispondenza dell’immagine master presa come origine temporale delle osservazioni).

L’analisi di dettaglio di questi spostamenti permette di ricavare informazioni approfondite circa il comportamento del singolo PS non direttamente deducibili dal solo valore di velocità media annua. Tuttavia nel caso di analisi standard (SPSA) in presenza di spostamenti che non seguono il modello lineare utilizzato nell’analisi PSInSAR™ si hanno forti perdite di coerenza che possono portare alla perdita del PS, sono pertanto esclusi i movimenti non lineari.

Talora sono osservabili piccole oscillazioni picco-picco di 2-3 mm (Fig.2.14), che potrebbero essere interpretate in vario modo: movimenti a carattere stagionale, deformazioni dell’edificio, ecc....In genere queste serie storiche sono caratterizzate da valori di coerenza non molto elevati. In questi casi i bassi valori di coerenza non sono necessariamente dovuti ad una elevata rumorosità del dato, ma bensì al fatto che il tipo di moto analizzato non viene ben approssimato dal modello lineare. Infatti, anche in presenza di dati poco rumorosi, le componenti sinusoidali (moti stagionali) vengono interpretate dal modello come rumore facendo ridurre fortemente il valore della coerenza.

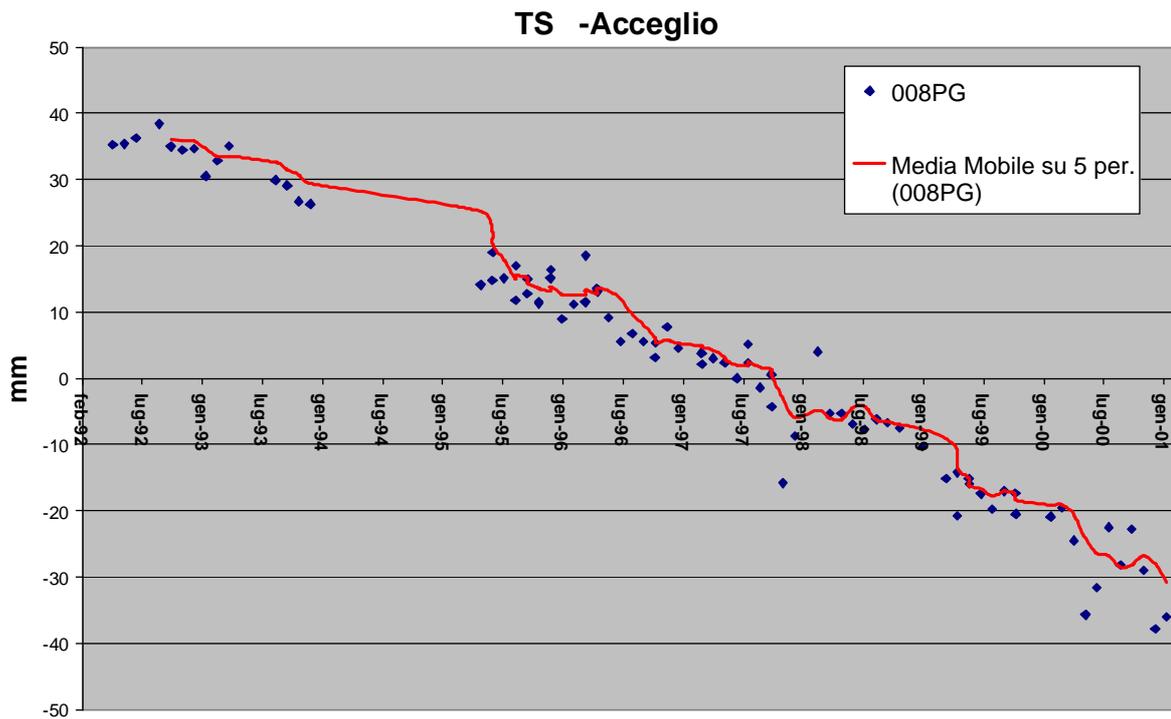


Figura 2.14: Serie storica di un TS situato in corrispondenza della frana complessa di Chiappera (coerenza = 0,8).

Dall'analisi delle serie storiche sono inoltre emerse delle differenze (20-25 mm in alcuni casi) tra i movimenti del suolo misurati dal satellite ERS1 e quelli registrati al passaggio di ERS2 nelle successive 24 ore (17 e 18/06/1995, 22 e 23/07/1995, 26 e 27/08/1995, 4 e 5/11/1995, 17 e 18/02/1996, 27 e 28/04/1996, 1 e 2/06/1996, 17 e 18/04/1999, 22 e 23/05/1999, 26 e 27/06/1999, 4 e 5/09/1999, 9 e 10/10/1999, 26-27/02/00 per il datasets Valenza) (Fig.2.15). Di tale fatto occorre tenere presente soprattutto nella fase di interpretazione di dettaglio (monitoraggio fenomeni franosi).

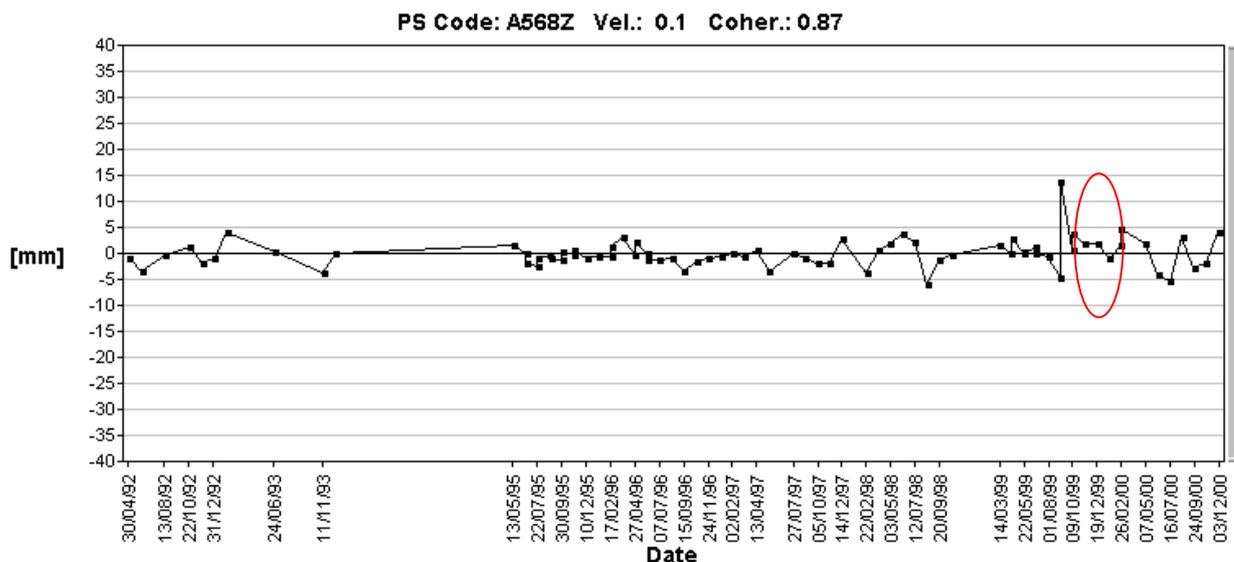


Fig. 2.15. Esempio delle differenze tra i movimenti del suolo misurati dal satellite ERS1 e quelli registrati al passaggio di ERS2 nelle successive 24 ore.

- Natura del PS:

La maggior parte dei PS corrisponde a strutture antropiche: edifici, strade e ferrovie, antenne (Fig.2.16.), ecc..



Fig. 2.16. Dataset Valenza: PS in abbassamento in corrispondenza di un'antenna

Il posizionamento del PS in direzione Nord-Sud risulta affetto da un errore con distribuzione statistica di tipo uniforme compresa tra ± 2 m, mentre in direzione Est-Ovest da un errore con distribuzione statistica di tipo gaussiano a valor medio nullo e deviazione standard pari a circa 6 m (TRE, 2006). Questo comporta la difficoltà nel caso di edificio isolato di distinguere a quale parte della costruzione (es. PS alla base dell'edificio stesso generati da fenomeni di riflessione tra piano stradale e facciata) o dei manufatti accessori (marciapiedi, muretti, garage, ecc...) appartenga il PS. Nel caso di nuclei urbani risulta talora difficile distinguere su quale edificio si trovi il PS. In generale è emerso che i capannoni industriali e i manufatti con tetti in lamiera sono ottime superfici riflettenti e sono caratterizzati di conseguenza da un numero elevato di bersagli radar.

La maggior parte dei PS naturali corrispondono in ambiente alpino e in parte in ambiente appenninico a detriti di versante, che per le loro caratteristiche geometriche costituiscono delle ottime superfici riflettenti (Fig.2.17-2.18).



A



B

Fig. 2.17. Dataset Valenza: PS in corrispondenza di detrito nei Calcari di Monte Antola (A e B).



Fig. 2.18. Dataset Valenza: PS in corrispondenza di roccia fratturata nei Calcari di Monte Antola.

2.2.2 ANALISI DI CORRETTA GEOCODIFICA

L'operazione di georeferenziazione dei PS è affetta da due tipi di errori, uno variabile per ciascun PS e l'altro comune all'intero set di PS individuati nell'elaborazione. Il posizionamento del PS in direzione Nord-Sud risulta affetto da un errore con distribuzione statistica di tipo uniforme compresa tra ± 2 m, mentre in direzione Est-Ovest (direzione di *range*) da un errore con distribuzione statistica di tipo gaussiano a valor medio nullo e deviazione standard pari a ca. 6 m, come illustrato in Figura 2.19. In prima istanza, l'incertezza del posizionamento del singolo PS è dunque compresa entro questi limiti. L'errore di posizionamento in direzione Est-Ovest risulta affetto anche da un errore dipendente dalla distanza dal punto di riferimento, in quanto per punti lontani dal REF peggiora la stima del valore di quota del singolo PS, elemento necessario per poter condurre correttamente il processo di geocodifica. Osservando la distribuzione spaziale della deviazione standard della stima delle quote questo disturbo risulta correlato nello spazio, ovvero PS vicini tra loro ma entrambi lontani dal REF, subiscono lo stesso tipo di errore (TRE, 2006).

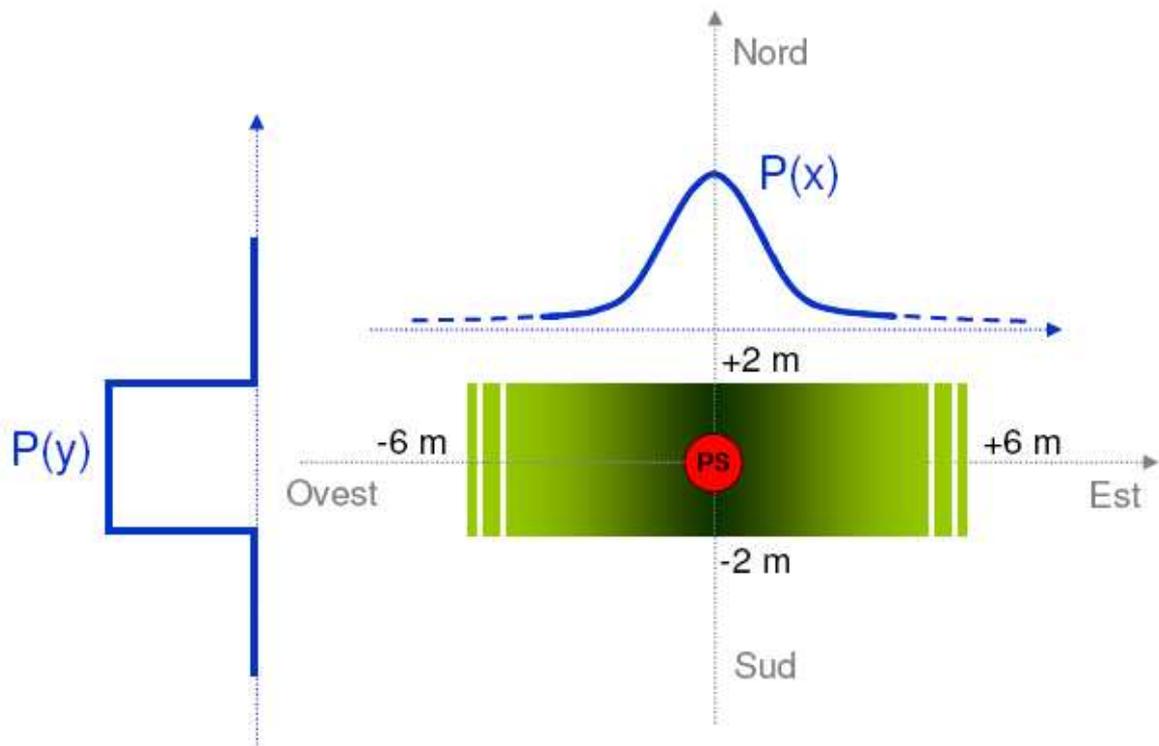


Fig. 2.19. Schematizzazione degli errori di geocodifica (TRE, 2006).

La procedura utilizzata, si basa su un approccio empirico, realizzato in ambiente GIS e prevede di integrare i dataset PS su basi dati come la CTR e le ortofoto digitali che permettono una lettura immediata dei rapporti tra le coperture del suolo e la distribuzione dei PS. Sfruttando il fatto che le densità di PS sono fortemente legate al tipo di copertura del suolo, è possibile individuare, nel caso di buon posizionamento, dei pattern distributivi di alta densità correlati positivamente (ovvero spazialmente sovrapposti) all'urbanizzato e in generale anche alle reti viarie. Questa operazione, realizzata in maniera manuale, permette, qualora la relazione antropico-PS non si realizzi (errore sistematico), più o meno compiutamente, l'immediata segnalazione e il rigetto del dataset per una nuova operazione di geocodifica (shift rigido).

E' utile verificare anche la **precisione delle quote stimate** e la **precisione in termini di deformazioni** misurate. In questo caso in assenza di altre informazioni possono essere utili le livellazioni IGM.

2.2.3 ALTRE OPERAZIONI

estrazione di parametri statistici (MEAN, STADDEV, MODE, etc....) sia sull'intero pacchetto di dati, raggruppato per tipologia di acquisizione (DESC, ASC, e SUMMER), che sui singoli frame dati.

- estrazione di densità areale per i dataset,
- **traduzione verso altri formati dati** (es. GEODATABASE, POSTGRES/POSTGIS, MYSQL, ORACLE, ARCSDE, GOOGLE EARTH...) dell'intera consegna o di parti.

2.3 Visualizzazione e classificazione dei PS

Il primo passo consiste nell'importare i Permanent Scatterers, in formato .dbf, all'interno di un GIS e visualizzarli, associando le coordinate contenute all'interno della tabella dei PS alle coordinate X ed Y del progetto.

La visualizzazione dei PS viene effettuata classificando i punti in funzione della velocità con colori differenti. La scala di colori utilizzata identifica con i colori giallo, arancione e rosso allontanamenti dal sensore lungo la LOS, con il verde i punti stabili e con varie tonalità di blu gli avvicinamenti al sensore lungo LOS. I valori di velocità vengono normalmente raggruppati in un numero di classi i cui limiti possono essere scelti in funzione delle esigenze di analisi, che dipendono dalla tipologia, e quindi dalla velocità, del fenomeno esaminato (frane, subsidenza, attività neotettonica, ecc...) (Fig.2.20).

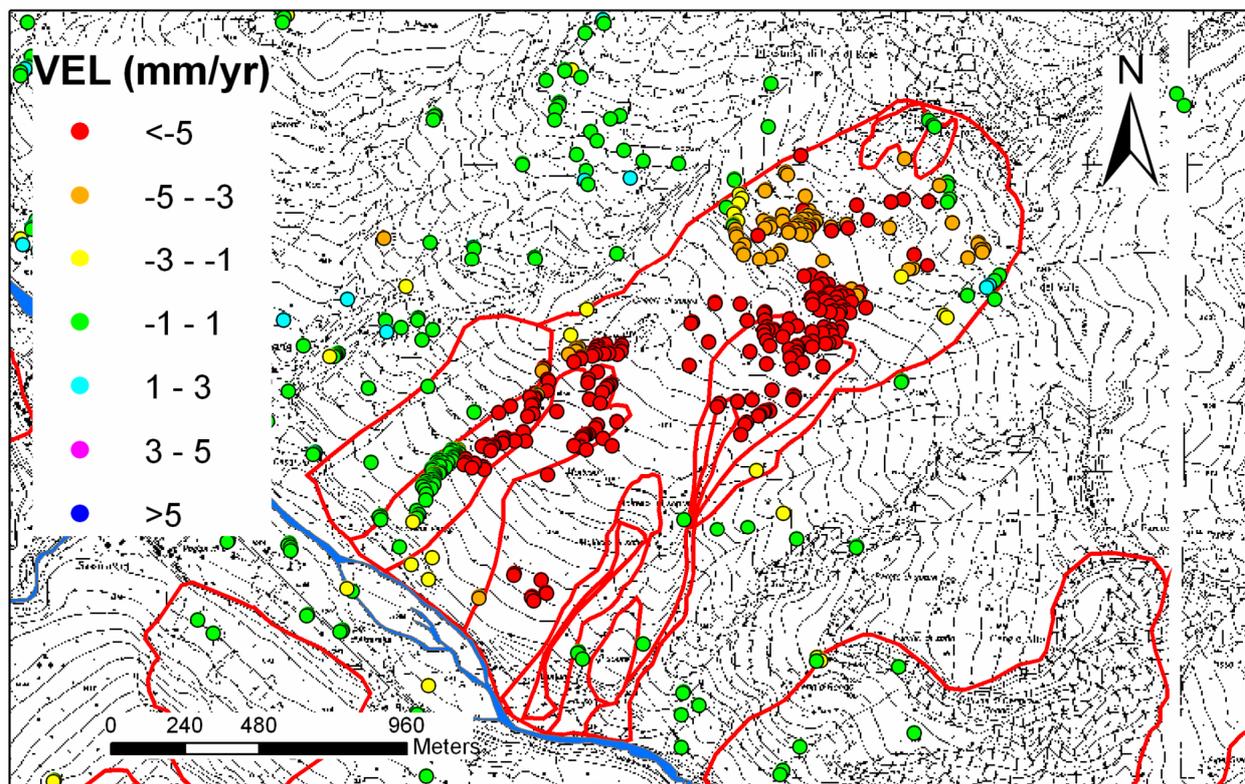


Fig2.20: Esempio di visualizzazione dei PS.

Tenendo conto dell'accuratezza della misura di velocità ($\pm 0,1-2$ mm/a) dei dati PSInSARTM forniti, sono stati considerati in movimento quei PS con velocità maggiori di -2 mm/a ($-+1,5$ mm/a per il settore appenninico).

I PS discendenti e ascendenti devono essere rappresentati con una simbologia diversa (ad esempio triangoli per gli ascendenti e cerchi per i discendenti), a causa delle differenti geometrie di vista delle due orbite che possono dare origine a notevoli differenze nel tasso di deformazione anche su uno stesso versante.

Per facilitare la comprensione dei fenomeni e quindi per poter risalire alla direzione di movimento senza dover tenere presente la direzione della linea di vista delle acquisizioni ascendenti o discendenti è possibile visualizzare i PS anche mediante delle frecce nella direzione della linea di vista (LOS) proiettata sull'orizzontale e nel verso dato dal segno ($-$ allontanamento, $+$ avvicinamento), rendendo più intuitiva l'interpretazione (Farina, 2006) (Fig.2.21).

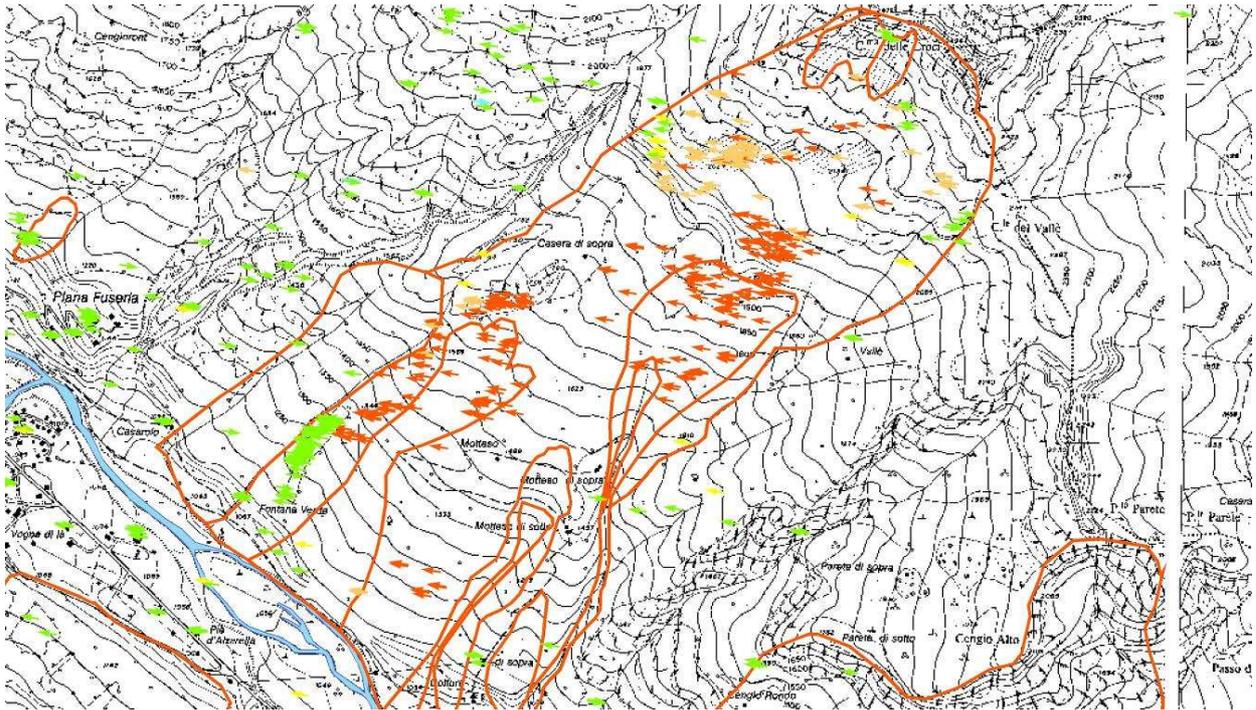


Fig. 2.21 - PS visualizzati mediante frecce nella direzione proiettata sull'orizzontale della linea di vista dei satelliti

3 LINEE GUIDA PER L'INTERPRETAZIONE DEI DATI PSInSAR™

Negli ultimi anni si è assistito ad un notevole sviluppo delle tecniche di interferometria da satellite applicate all'identificazione dei processi naturali e al loro monitoraggio. E' prevedibile inoltre un aumento dei campi di applicazione e il rafforzamento delle capacità di monitoraggio (in termini di tempi di rivisitazione e risoluzioni spaziali) di tali tecniche in prospettiva delle missioni satellitari di inizio millennio (ALOS-PALSAR, Cosmo-Skymed, Terra-SarX RADARSAT2, Sentinel-ESA) e delle configurazioni in costellazione (es. Cosmo-Skymed). Risulta di conseguenza necessario la messa a punto di linee guida relative all'interpretazione dei dati interferometrici indirizzate a vari utilizzatori, tra i quali gli enti pubblici e i liberi professionisti.

Sulla base dello stato dell'arte esistente in letteratura, di progetti già esistenti sull'argomento (es. Terrafirma) e di esperienze pregresse del gruppo di ricerca è stata sviluppata una metodologia di interpretazione dei dati PSInSAR™.

Tale metodologia si articola in tre livelli caratterizzati da gradi di approfondimento crescente (Fig.3.1.):

1. Identificazione delle aree in movimento (aree anomale): riguarda l'analisi dei dati PSInSAR™ in termini di accuratezza/precisione planimetrica e di deformazione, la visualizzazione del dato PS, il processamento automatico del seminato PS capace di individuare e perimetrare le cosiddette "aree anomale". Con questo termine si intende un settore sul quale uno o più PS indichino fenomeni di deformazione rispetto ad una media definita di "riposo", ovvero cluster di PS che per caratteristiche fisiche e spaziali (velocità superiori od inferiori alla classe di velocità considerata stabile, distanza interpunti e numerosità) possono rappresentare indizi di geo-processi.
2. Interpretazione preliminare delle aree in movimento: le aree anomale, che per definizione non hanno nessun significato fisico ma rappresentano solamente aggregati di PS, vengono relazionate a processi e forme geologiche al fine di individuare/ipotizzare le cause delle deformazioni misurate. Si tratta di un'interpretazione geologica preliminare a scala regionale che andrà successivamente verificata con l'analisi di dettaglio. Questo livello si presta a studi di carattere regionale ed in particolare all'identificazione dei fenomeni franosi;
3. Interpretazione di dettaglio delle aree in movimento: riguarda quelle aree anomale che, per grado di rischio associato, richiedono uno studio più approfondito. E' in questo livello che viene trattato il monitoraggio dei fenomeni franosi.

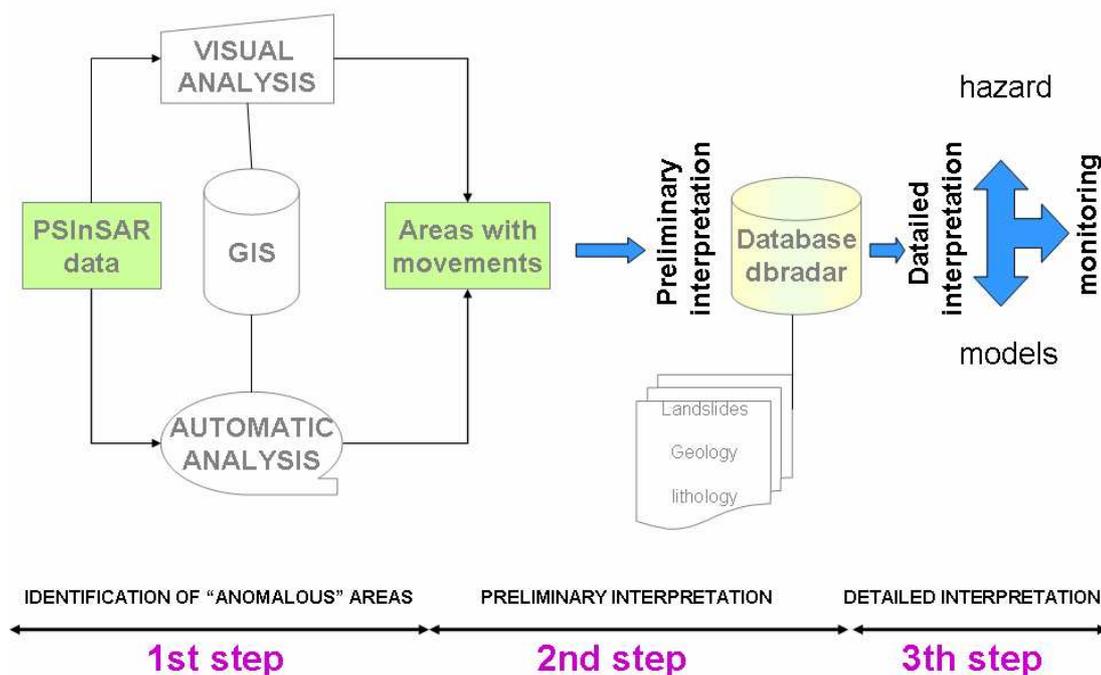


Fig. 3.1. Metodologia di interpretazione dei dati PSInSAR™

3.1 1FASE: IDENTIFICAZIONE DELLE AREE IN MOVIMENTO

La prima fase della metodologia (Fig.3.2.) ha riguardato la messa a punto di metodi per:

1. l'analisi dei dati PSInSARTM in termini di accuratezza/precisione planimetrica e di deformazione;
2. la visualizzazione del dato PS;
3. il processamento automatico del seminato PS capace di individuare e perimetrare le aree anomale.

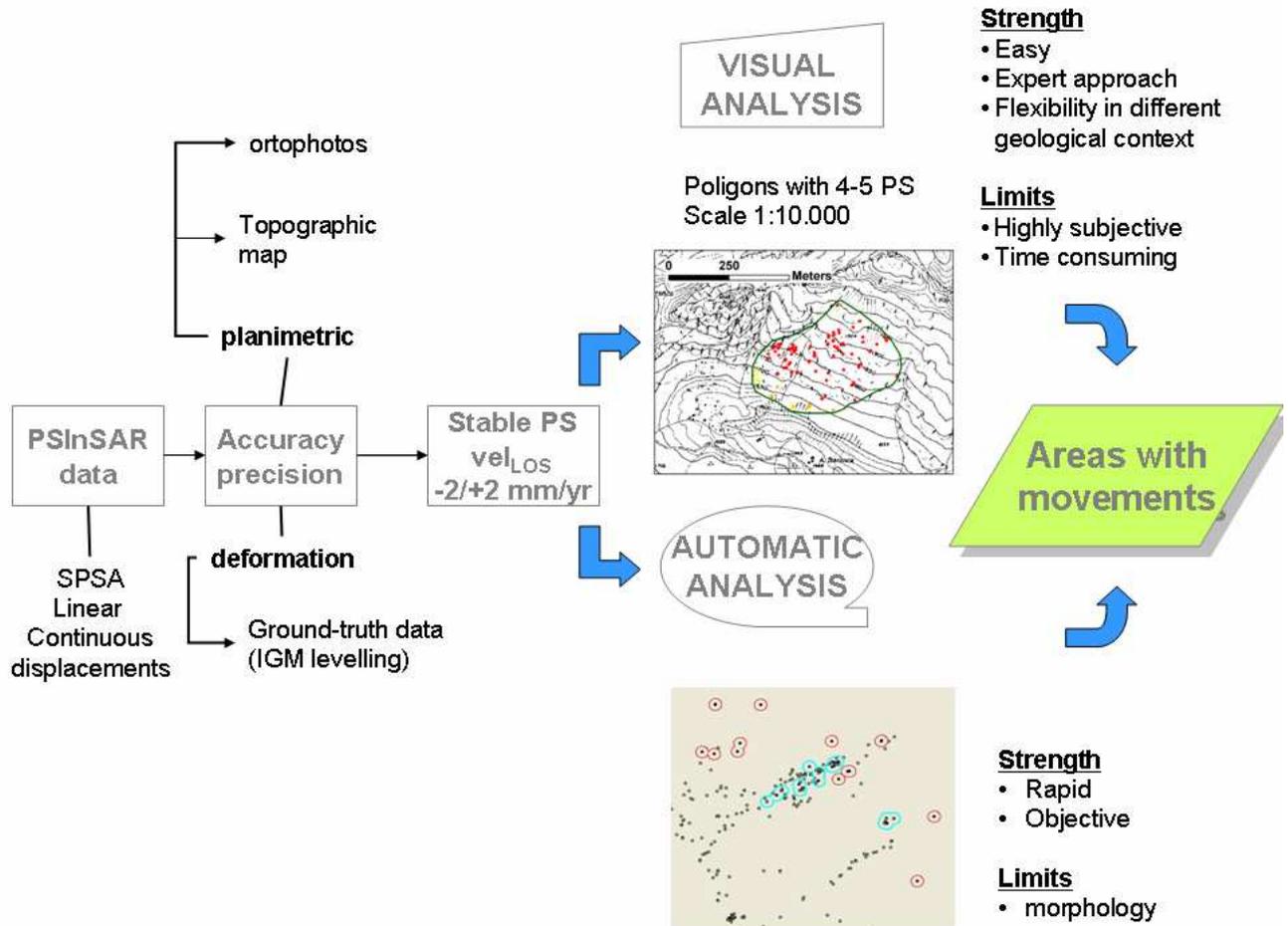


Fig. 3.2. Flow-chart illustrante la prima fase della metodologia.

3.1.1 SVILUPPO DI METODI PER L'IDENTIFICAZIONE DI AREE IN MOVIMENTO

Il percorso di analisi, il cui obiettivo consiste nell'interpretazione geologica dei campi di moto descritti dai PS, proposto ed utilizzato nel presente lavoro, prevede come passo iniziale la formazione di aggregati o cluster di PS che per caratteristiche fisiche e spaziali (velocità superiori od inferiori alla classe di velocità considerata stabile, e distanza interpunti e numerosità) possono rappresentare indizi di geo-processi. Tali raggruppamenti sono stati definiti come "aree anomale" o "aree critiche". Le operazioni realizzate si concretizzano sostanzialmente in una serie di filtri di attributo e spaziali dei dataset, derivate dalle operazioni di verifica descritte nei capitoli successivi, e permettono di concentrare l'analisi su gruppi di dati PS con carattere locale.

A questo scopo sono state applicate due metodologie:

- 1) la classica interpretazione visiva-manuale che viene sviluppata in ambiente GIS, con supporto di layer informativi territoriali di varia natura, che permettono all'esperto di analizzare compiutamente e segnalare concentrazione di PS con comportamento anomalo rispetto ad una media definita di "riposo";
- 2) l'analisi, che in seguito definiremo "automatica", che prende corpo da una serie di procedure di analisi del dato puntuale, di tipo random, o evento, da realizzarsi, almeno come obiettivo di questa fase, con il minimo intervento d'utente attraverso computer. Le motivazioni che spingono ad affiancare una metodologia, già sostanzialmente testata ed efficace, come quella manuale, derivano da una serie di problematiche proprie delle dimensioni del prodotto PS-PIEMO: numerosità assoluta e areale complessivo.

Le metodologie sopra esposte possono essere applicate a:

- singolo dataset: in generale non ha sempre, per motivi dimensionali, significato geologico, ma ha il vantaggio di avere un unico punto di riferimento;
- ambito geologico-geomorfologico omogeneo: ha significato geologico, ma potrebbe ricadere in corrispondenza di più datasets e quindi avere più punti di riferimento, richiedendo la preventiva "messa in passo" dei datasets.

3.1.2 METODO VISIVO-MANUALE

Il metodo consiste nelle seguenti fasi:

- selezione dei PS "anomali". La scelta viene fatta in funzione della precisione di misura della tecnica, della distribuzione dei valori di velocità all'interno di ogni dataset e della tipologia di fenomeni da studiare (es. movimenti di versante, attività neotettonica). Per i datasets in aree alpine sono stati selezionati i PS con velocità $> \pm 2$ mm/a. Tale valore soglia riflette principalmente la precisione di misura della velocità che è di 0,1-2 mm/anno per un PS distante meno di 2 km dal punto di riferimento ed in caso di dataset composto da almeno 50 immagini. (TRE, 2006). Tuttavia per i datasets del settore meridionale in zona appenninica la bassa densità di PS ha reso necessario l'abbassamento dei valori soglia ($\pm 1,5$ mm/a);
- creazione di due subsets di PS con $-2\text{mm/a} > v > +2$ mm/a sulla base della coerenza:

1° subset: contiene tutti i PS;

2° subset: selezione dei PS sulla base di un valore soglia della coerenza di 0,8, che esclude i bersagli radar rumorosi caratterizzati da una minore accuratezza;

- sovrapposizione della distribuzione dei PS con la carta CTR 1:10.000 o ortofoto IT2000;
- individuazione di concentrazioni di almeno 3-4 PS in un intorno fra i 50 e i 100 metri, per ognuno dei due subsets creato nella fase precedente;
- creazione di poligoni che contornano i PS "anomali" (è da sottolineare il fatto che tali poligoni non hanno alcun significato geologico) (Fig.3.3). La creazione dei poligoni deve tenere conto della topografia.

Il metodo è stato applicato ai seguenti datasets: Alagna_D_summer e Prigelato_D_summer per l'area alpina, Ovada e Valenza per il settore appenninico e di pianura.

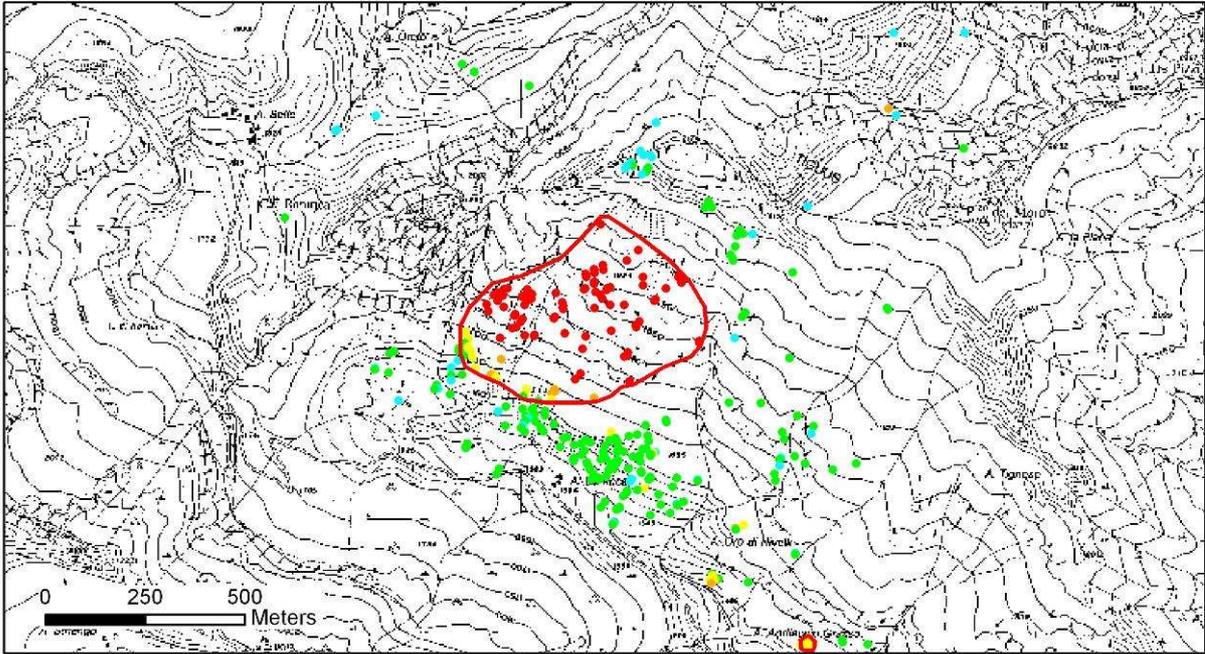


Fig.3.3. Esempio di poligono manuale con PS "anomali".

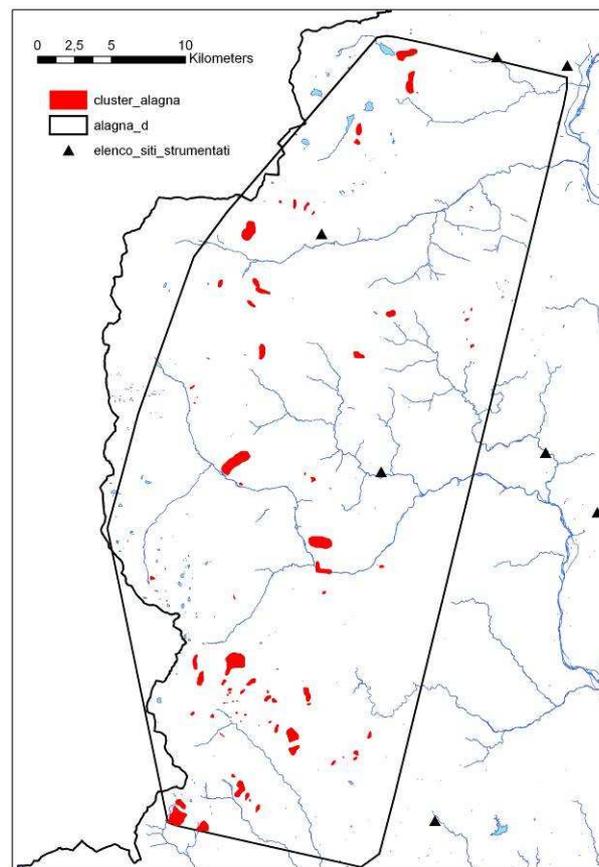


Fig.3.4. Risultati dell'applicazione del metodo visivo-manuale (dataset alagna).

Per il dataset *alagna_D_summer* nel primo subset, che contiene tutti i PS, sono stati individuati 83 poligoni che indicano aree in movimento di cui 14 hanno velocità $>+2\text{mm/a}$ e 46 cadono all'interno di aree mappate in frana dal progetto IFFI (Fig.3.4).

Nel secondo subset, che esclude i PS rumorosi caratterizzati da una coerenza minore di 0,8 (il 90% dei PS del dataset *alagna*), si ottengono solo 29 poligoni.

I risultati ottenuti dimostrano che in genere alti valori soglia di coerenza assicurano una maggiore accuratezza della misura di spostamento, ma anche un numero decisamente inferiore di PS. Di conseguenza è consigliabile utilizzare tutti i PS per ottenere un'indicazione preliminare della distribuzione di velocità, successivamente e solo sulle aree caratterizzate da un'elevata densità di bersagli radar è possibile alzare il valore soglia della coerenza.

In generale questo approccio si scontra in termini di rapidità e con la fornitura di un prodotto omogeneo a dimensione regionale.

3.1.3 METODO INFORMATICO

A fianco ad un'analisi classica di tipo manuale-visuale, il gruppo di lavoro ha valutato diversi approcci di analisi "automatica". L'idea di fondo che spinge a verificare come metodologie automatiche di analisi possano rintracciare pattern-cluster nei PS è resa necessaria da una serie di fattori:

- elevata numerosità dei dataset PS
- superficie dell'area di studio
- quantità e qualità dei diversi processi geologici attivi al momento della formazione dello stack interferometrico che in qualche maniera, almeno in potenza, possono avere influenza sulle velocità registrate dai PS.

Altro obiettivo è anche quello di realizzare prodotti simili a quelli ottenuti dall'analisi manuale-visiva, che ha rappresentato finora la modalità di analisi per eccellenza in studi simili (vedi Farina *et al.*, 2006, Meisina *et al.*, 2006).

Lo scopo è quindi di generare "poligoni" contenenti PS, verosimilmente congruenti in termini di cause, in modalità automatica, sfruttando le capacità proprie di un GIS di analizzare dati spaziali, con i seguenti obiettivi guida:

1. riproduzione per quanto possibile delle operazioni di filtraggio e aggregazione sviluppate da un operatore;
2. semplicità di realizzazione pratica e concettuale;
3. possibilità di ripetere con rapidità le procedure in caso di rilesione di soglie (VEL e distanza di influenza);
4. realizzare un prodotto di immediato utilizzo all'interno di un GIS.

I diversi test sono stati realizzati all'interno di ARCGIS 9.1, in modo da sfruttare immediatamente le potenzialità del dato e dall'altra parte utilizzare uno strumento comune ai ricercatori impegnati. La metodologia che viene descritta di seguito è composta da operazioni semplici di query e di analisi di prossimità e overlay.

Schema operativo

L'approccio consta delle seguenti fasi (Fig.3.5.):

- 1) Definizione della soglia di velocità da considerare come rappresentativa di uno status di stabilità e selezione dei PS in "movimento" (e subordinatamente, se necessario, di coerenza);
- 2) Individuazione dell'area di compartecipazione tra i diversi PS, ovvero della zona di influenza tra PS (scala di rappresentatività);
- 3) Determinazione della numerosità minima di PS sopra la soglia di stabilità che deve essere presente per definire un'area anomala o critica (significatività).

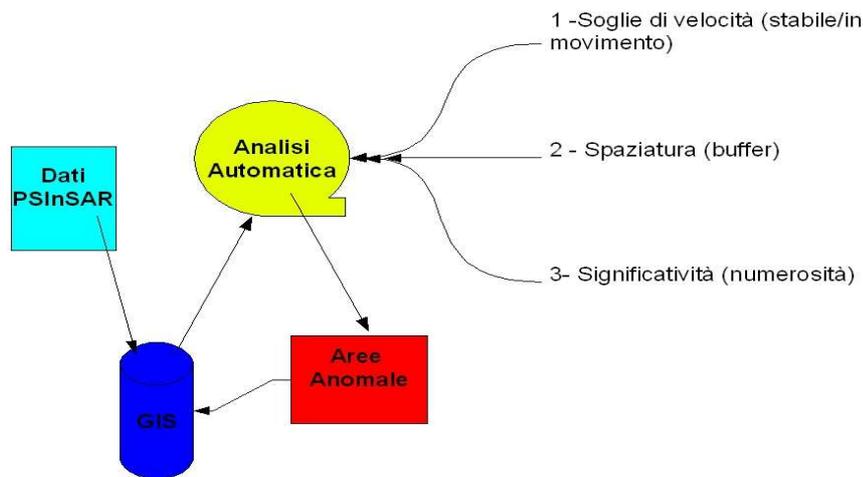


Fig.3.5.: Parametri per la definizione delle aree anomale

Il primo step risulta fortemente critico rispetto al prosieguo del lavoro. I valori soglia da considerare come rappresentativi di uno status di stabilità possono derivare da:

- una analisi combinata dei valori di velocità ottenuti attraverso le analisi statistiche preliminari descritte in precedenza (distribuzione dei valori di velocità all'interno di ogni dataset);
- considerazioni geologiche (trend regionali di movimento, tuttavia difficilmente determinabili nell'area di studio a causa della mancanza di bibliografia al riguardo);
- considerazioni sull'accuratezza e precisione del dato (come da documentazione fornita da TRE).

Nello specifico di questo studio l'intervallo di velocità considerato come stabile è risultato compreso tra -2 e +2 mm/anno (per le aree appenniniche è stata selezionata una soglia di $\leq -1,5$ e $\geq 1,5$ mm/year). Tale valore soglia riflette principalmente la precisione di misura della velocità che è di 0,1-2 mm/anno per un PS distante meno di 2 km dal punto di riferimento ed in caso di dataset composto da almeno 50 immagini. Questa operazione di selezione è stata realizzata attraverso l'interfaccia SQL di ARCGIS e ha portato come primo risultato alla selezione solo dei punti PS che rispettavano queste soglie (Fig.3.6-3.7-3.8.).

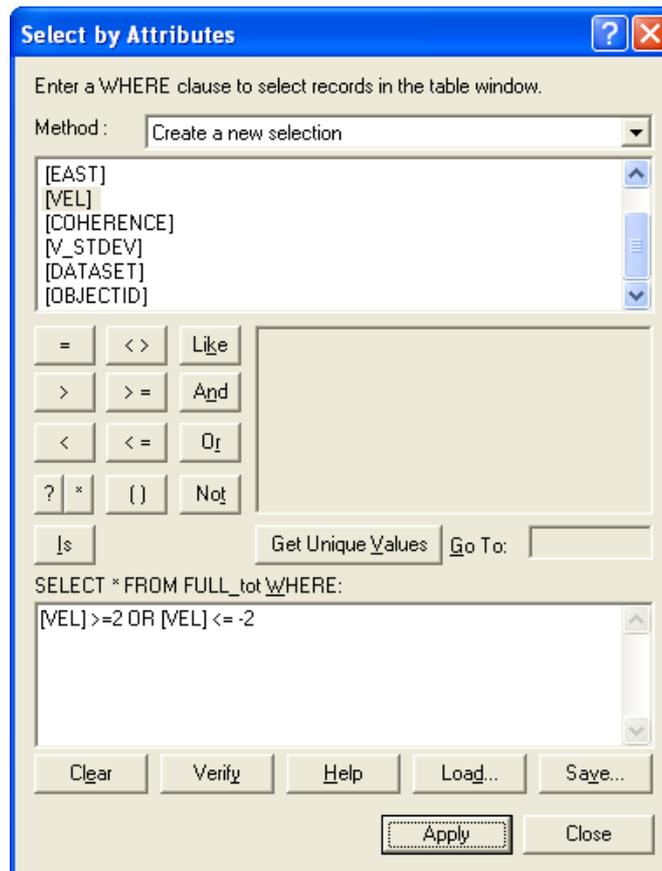


Fig.3.6. Query di selezione PS sopra soglia

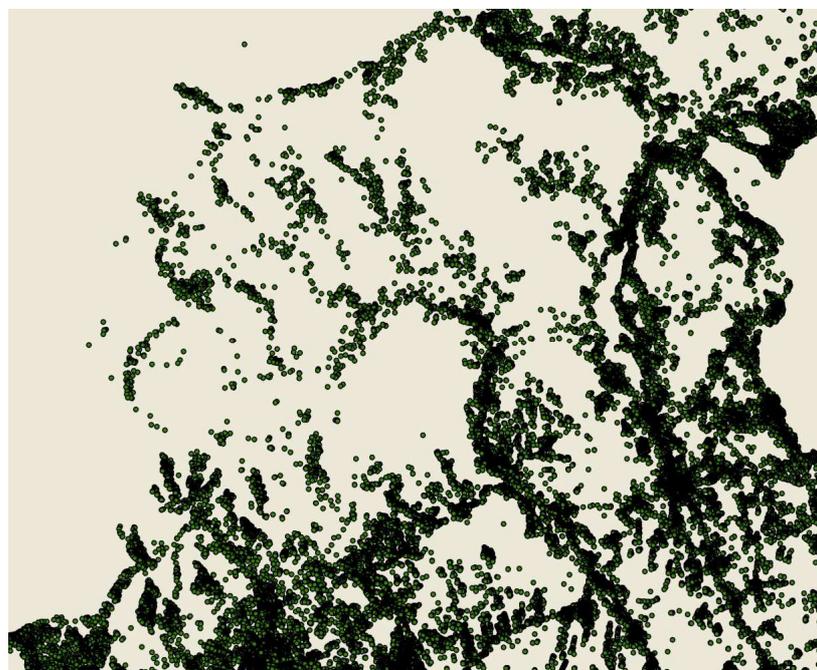


Fig.3.7. Dataset pre-query

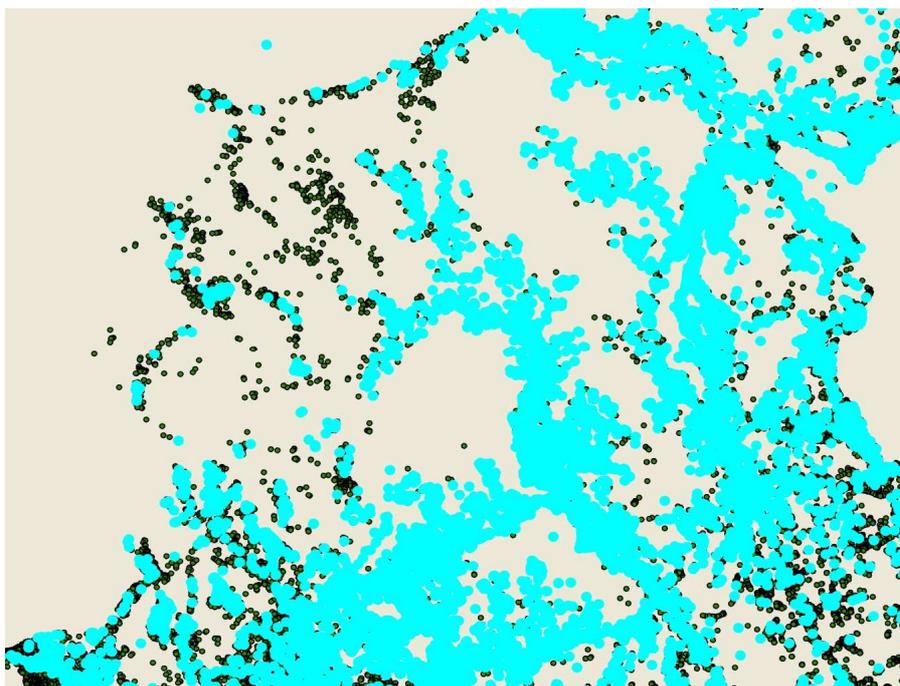


Fig. 3.8. Risultato della selezione su dataset precedente; in azzurro i PS candidati

La base di partenza del secondo step è stata la valutazione di una distanza di influenza e/o di rappresentatività dei PS selezionati nella fase precedente, al fine di aggregare tra loro PS in movimento, che verosimilmente si trovavano negli stessi ambiti morfologici (versante, fondovalle, ecc.).

Da osservazioni morfologiche la distanza minima tra PS di 50 m sembra rappresentare una buona soluzione per mantenere il risultato areale (area anomala o critica caratterizzata da PS in movimento), all'interno di un unico "contesto geomorfologico".

Questo step è stato realizzato per mezzo di un'operazione di prossimità (BUFFER) ovvero sono stati generati cerchi con raggio di 50 metri attorno ai bersagli radar in movimento; la successiva unione di tali figure geometriche ha portato alla generazione di poligoni (aree omogenee o critiche) contenenti aggregazioni di PS distanti non più di 50 m uno dall'altro (Fig.3.9). Nell'operazione di buffer si è scelto di aggregare, nel caso di sovrapposizione, attraverso il dissolving, i poligoni risultanti. In questa maniera si premiano gli elementi ravvicinati.

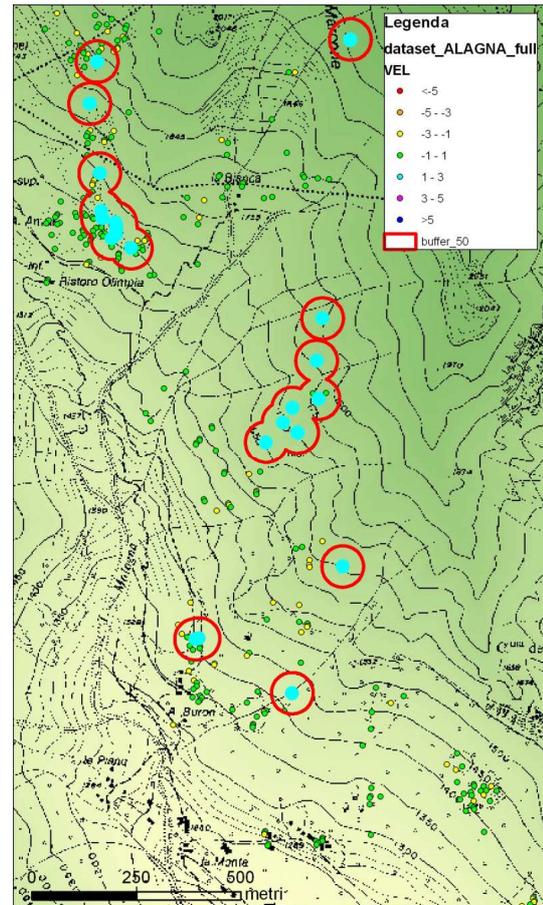
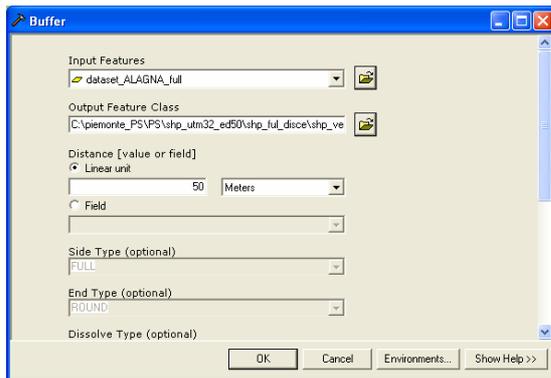


Fig.3.9. Individuazione dell'area di influenza (es. 50 metri) intorno ai PS selezionati nel passo precedente

Nel terzo step sono state considerate significative e selezionate le aree anomale o critiche con un contenuto minimo di PS in movimento maggiore o uguale a 3 (Fig.3.10). Il risultato di quest'ultima operazione è una proposta di area omogenea anomala, pronta ad essere integrata nel 2° livello come da Fig. 3.1.

Attributes of buffer_50_conteggio

FID	Shape*	Id	PntsinPoly
56	Polygon	0	2
57	Polygon	0	166
58	Polygon	0	3
59	Polygon	0	2
60	Polygon	0	1
61	Polygon	0	2
62	Polygon	0	8
63	Polygon	0	1
64	Polygon	0	4
65	Polygon	0	2
66	Polygon	0	49
67	Polygon	0	1
68	Polygon	0	1
69	Polygon	0	1
70	Polygon	0	3

Record: 1 Show: All Selected

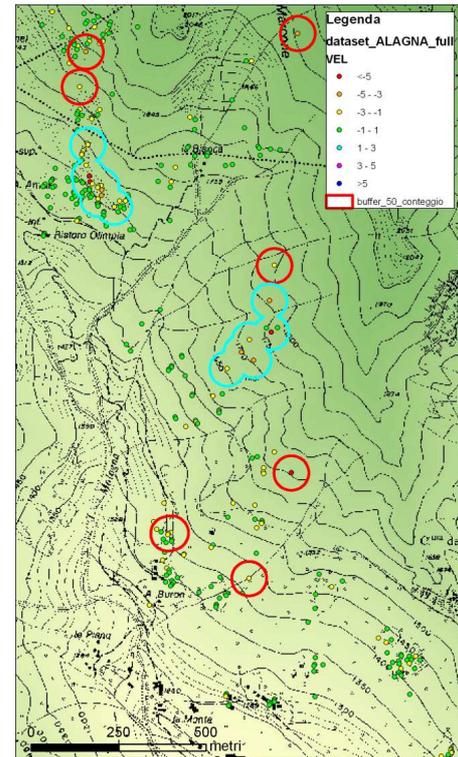


Fig.3.10. Conteggio dei PS in movimento per AREE (es. ≥ 3)

Il prodotto derivato da questa procedura (area anomala, Fig.3.11), non vuole assolutamente assumere un ruolo di prodotto definitivo e soprattutto non ha un significato geologico; piuttosto esso è da considerare come un semilavorato, su cui si può concentrare l'attenzione del geologo, che attraverso le attività di rilevamento sul terreno, fotointerpretazione etc., può confermare o meno la sua significatività e quindi procedere alla sua interpretazione.

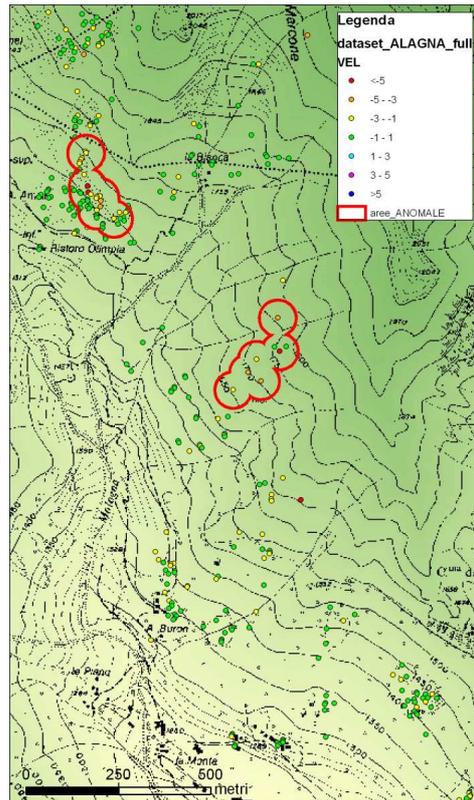


Fig.3.11. Aree anomale

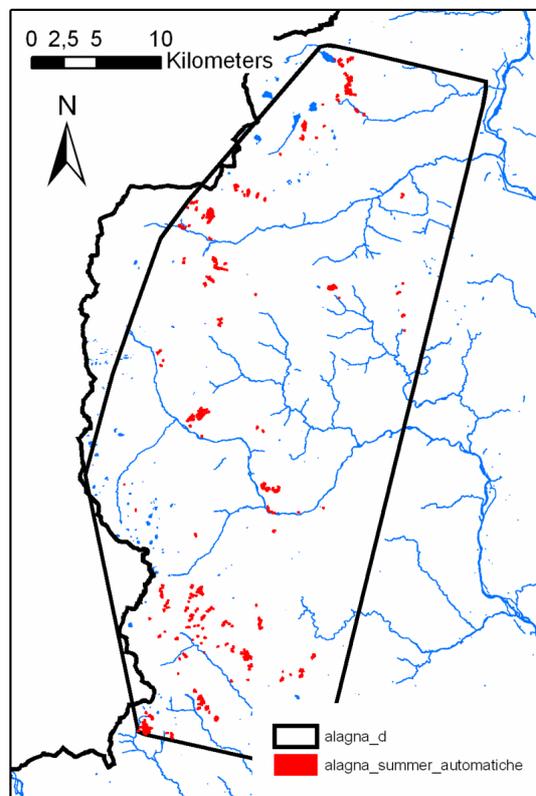


Fig.3.12. Risultati dell'applicazione del metodo automatico (dataset alagna).

3.1.4 CONFRONTO TRA I DUE METODI

Il metodo “visuale-manuale” ha i seguenti vantaggi:

- semplicità, non richiede particolari conoscenze statistiche;
- completo controllo da parte dell’operatore,
- può essere applicato a tutti gli ambiti geologico-geomorfologici.

I principali svantaggi consistono nei lunghi tempi di esecuzione (in media 2 giorni per dataset) e nella soggettività legata allo stato di conoscenze pregresse dell’operatore nell’area esaminata.

Il metodo informatico ha presumibilmente il vantaggio dell’oggettività e dei rapidi tempi di esecuzione e della semplicità operativa.

Per quanto riguarda i limiti esso ha la tendenza ad operare uno splitting forse eccessivo anche in ambiti geomorfologicamente omogenei e tende a sottolineare i fenomeni locali, dall’altro va anche segnalato che è comunque necessario fornire al software una serie di input soggettivi:

- la soglia di VEL (stabile/instabile);
- le eventuali soglie sulla coerenza;
- l’area di compartecipazione (supporto) tra i diversi PS, ovvero la zona di influenza tra i diversi PS;
- e la numerosità minima di PS sopra la soglia di stabilità che deve essere presente minimamente per definire un area omogenea-anomala.

I risultati ottenuti con il metodo automatico ed il metodo visivo mostrano una buona sovrapposizione (Fig.3.13.). Ad una prima analisi appare (Tab.3.1.) che il metodo automatico permetta di ottenere un numero più elevato di aree anomale (circa il 40% in più rispetto a quello manuale), tuttavia è osservabile dalla Figura 3.13 che in realtà le aree anomale manuali corrispondono a più aree anomale automatiche.

Dataset	N° aree anomale	
	Metodo Manuale	Metodo automatico
Alagna_D_Summer	83	197
Alagna_D_Full	-	89

Tab.3.1. Confronto delle aree anomale ottenute per il dataset alagna con il metodo manuale e con il metodo automatico.

In generale è emersa la necessità di utilizzare più metodologie di identificazione dei settori anomali in relazione all’ambito geologico-geomorfologico (pianura, Alpi e Appennini) e alla densità dei PS e ai loro caratteri cinematici.

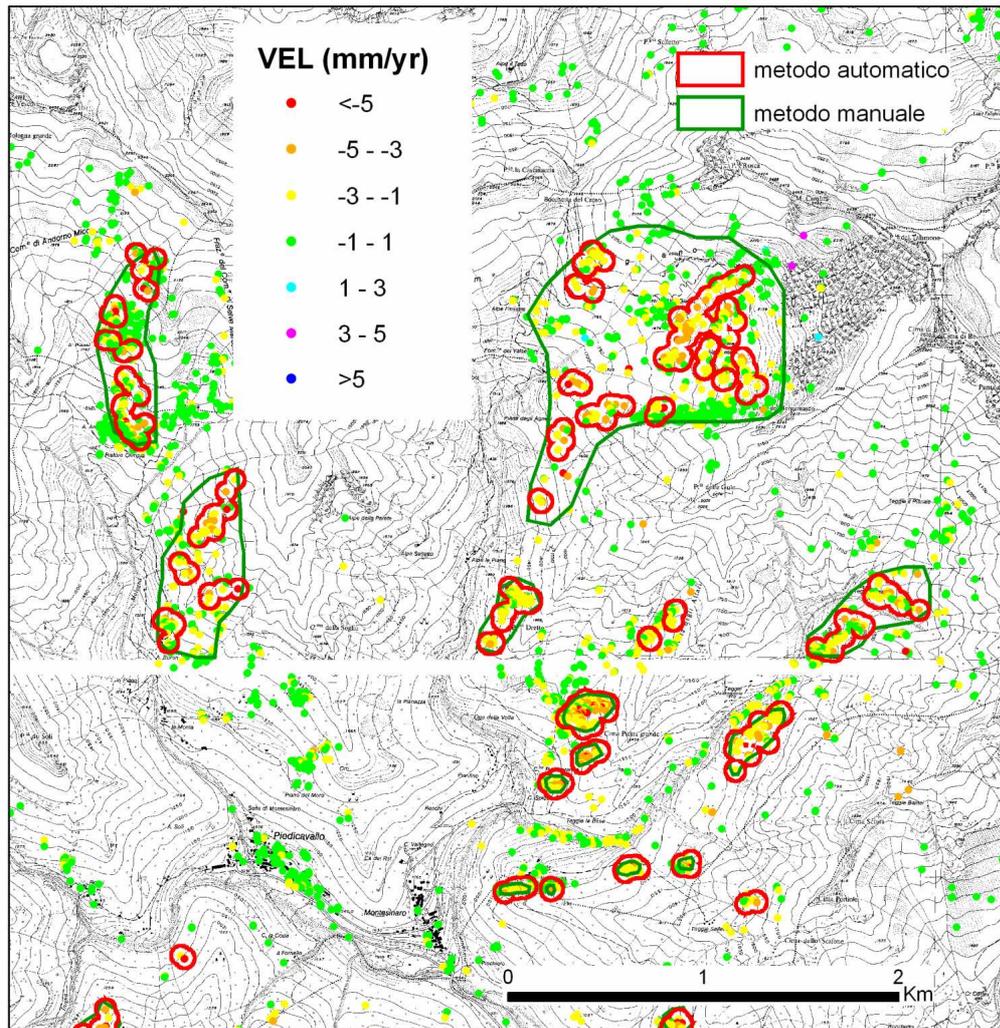


Fig.3.13. Dataset alagna: confronto tra i risultati ottenuti tramite metodo visivo e automatico.

3.1.5 CRITERI DI SELEZIONE DELLE AREE ANOMALE

Per l'individuazione delle aree anomale a scala regionale si è scelto di utilizzare per le considerazioni sopra esposte (soprattutto estensione dell'area e numero di dati interferometrici) il metodo automatico, che ha portato ad individuare nell'intero Piemonte circa 9012 aree anomale (i valori si riferiscono ai dataset full, tenendo conto dei nuovi dataset riprocessati dalla TRE, e prendendo come soglia di velocità in Appennino $\pm 1,5$ mm/a) (Fig.3.14). Considerando i dataset summer le aree anomale nell'intero territorio della Regione Piemonte sono 9877.

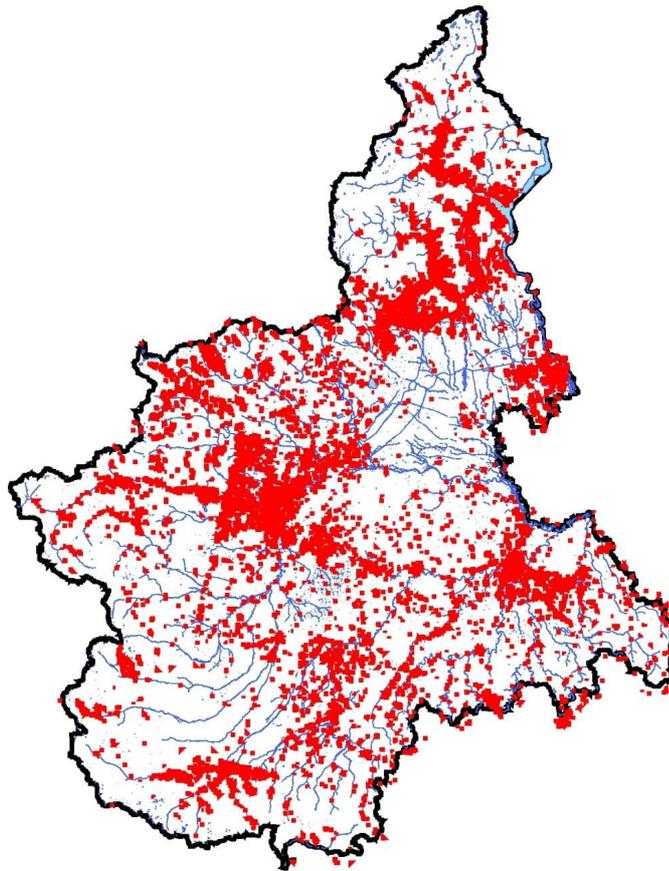


Fig.3.14. Aree anomale in Piemonte individuate con il metodo automatico

Il prodotto ottenuto consiste in files formato shape con le seguenti informazioni:

- codice dell'area anomala
- area dell'area anomala
- n° di PS in movimento ricadenti nell'area anomala
- n° di PS totali ricadenti nell'area anomala
- V_{LOS} minima, massima e media dei PS all'interno dell'area
- Coerenza minima, massima e media dei PS all'interno dell'area
- Rapporto in percentuale tra il n° di PS in movimento e il n° di PS totale
- Modalità di interpretazione
- Dataset di derivazione

L'elevata numerosità dei dati ottenuti (aree anomale) ha tuttavia reso necessario lo sviluppo di ulteriori metodologie di selezione delle aree in movimento. Tale selezione è avvenuta secondo due procedure differenti a seconda dei contesti geologici-geomorfologici di appartenenza (collina-montagna e pianura) (Fig.3.15).

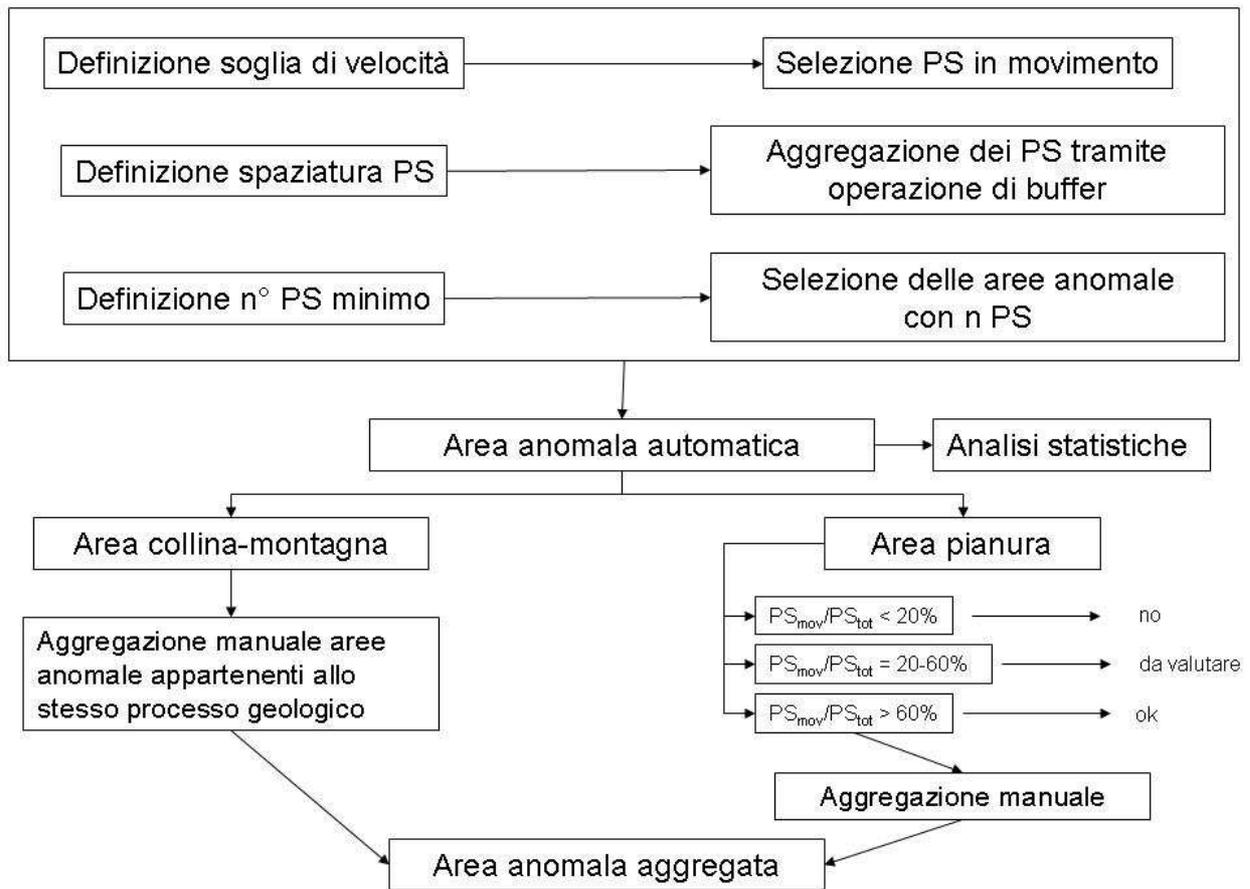


Fig.3.15: Sintesi della metodologia di individuazione delle aree anomale

Collina-montagna:

- aggregazione manuale delle aree anomale considerate appartenenti allo stesso processo geologico (“aree anomale aggregate”)(Fig.3.16).

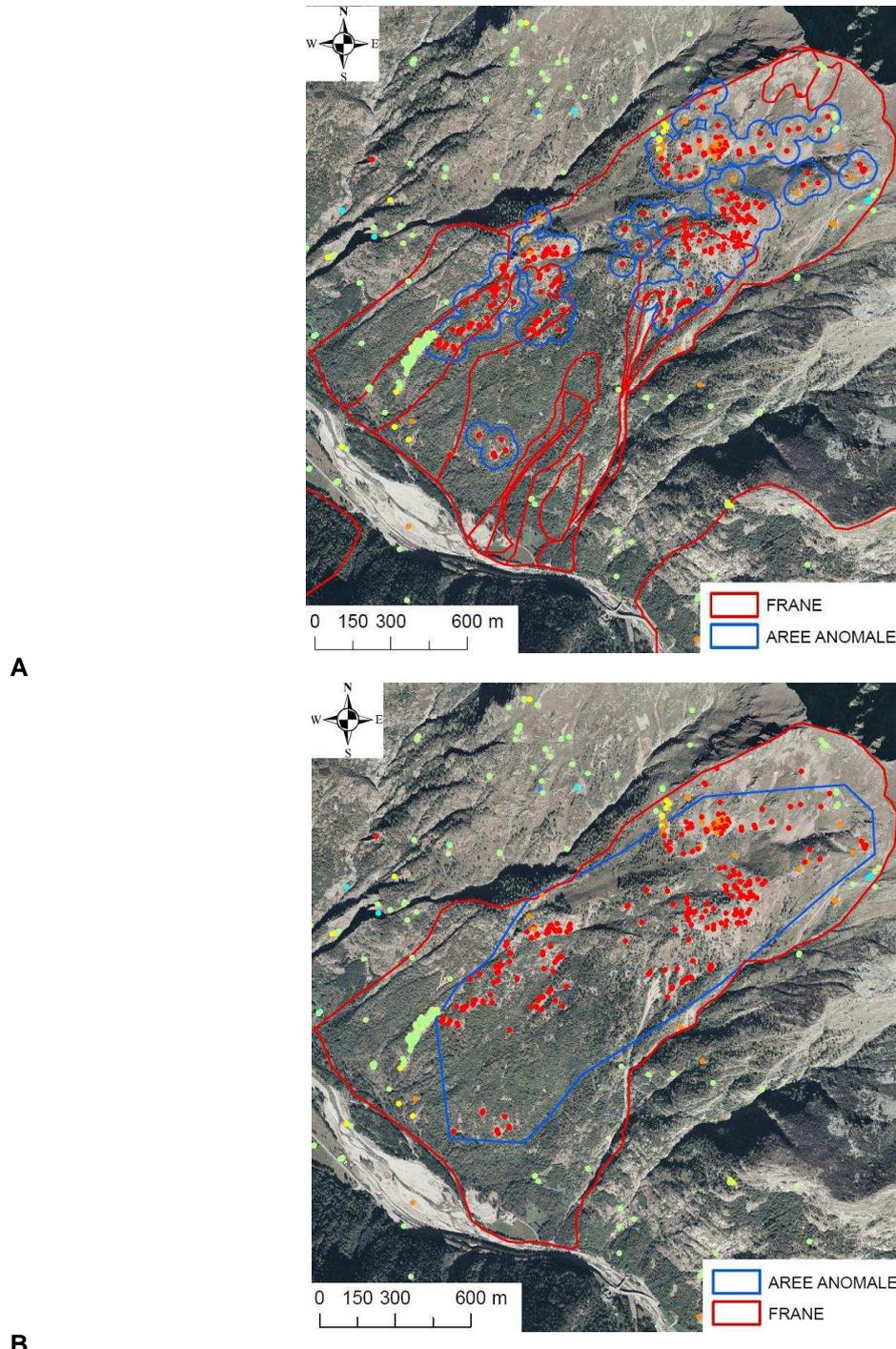


Fig.3.16: Esempio di aggregazione manuale delle aree anomale in area di collina-montagna. A: aree anomali automatiche; B: aree anomale aggregate.

Pianura:

- selezione delle aree anomale con rapporto tra PS in movimento e PS totali superiore almeno al 20% (Fig.3.17, 3.18.);
- aggregazione manuale delle aree anomale selezionate e considerate appartenenti allo stesso processo geologico (aree anomale “interpretate” o “aggragate”) (Fig.3.17).

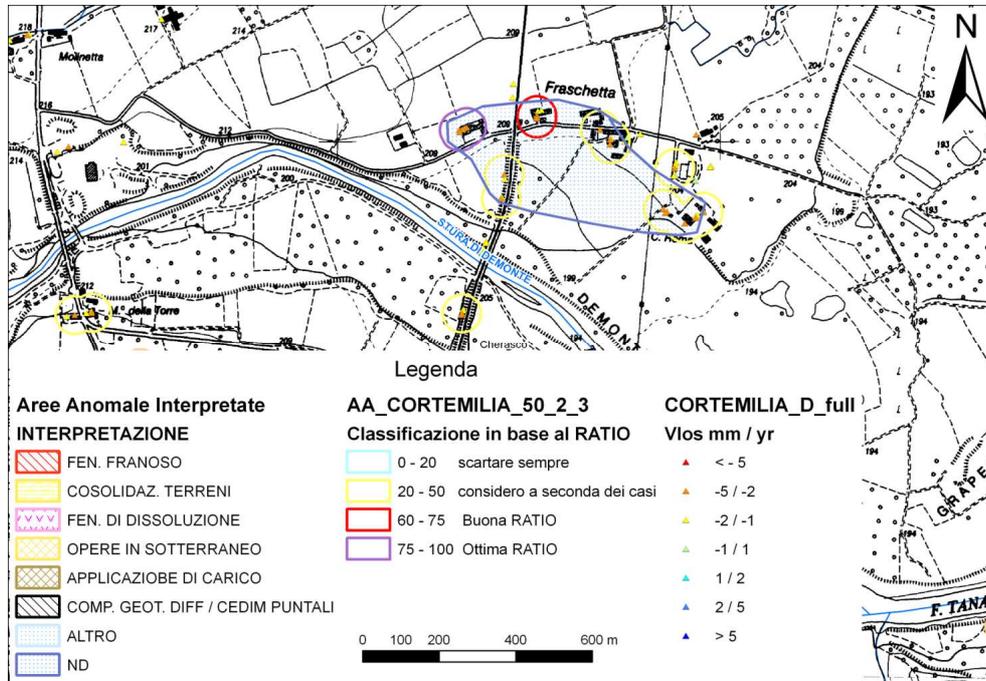


Fig.3.17: Aree anomale automatiche con diverso rapporto tra PS in movimento e PS stabili (RATIO) (comune di Cherasco).

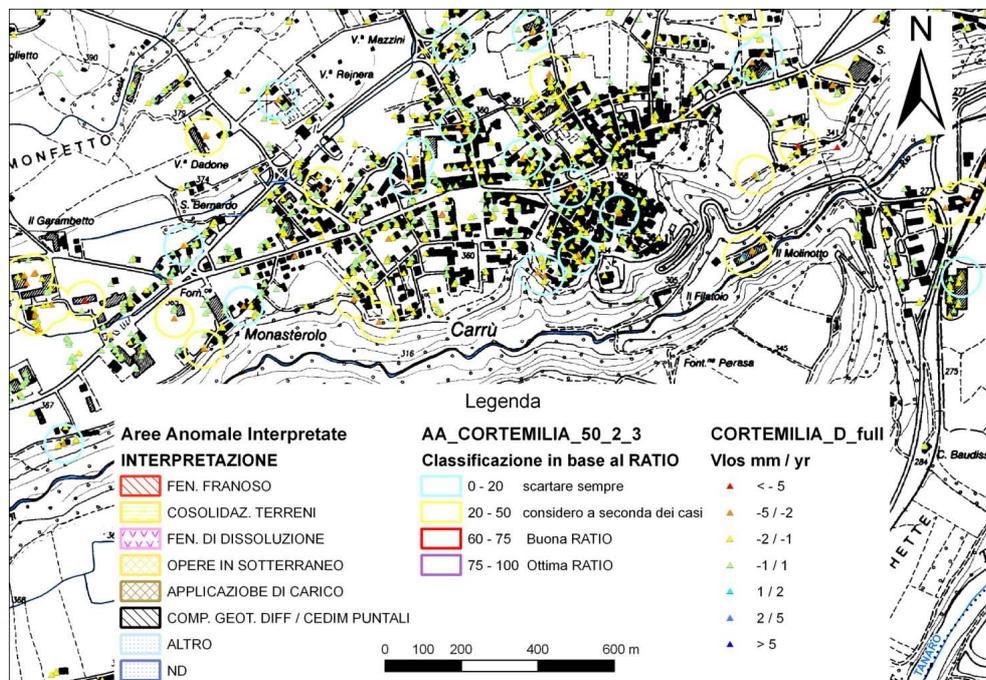


Fig.3.18: Esempio di aree anomale scartate (comune di Carrù)

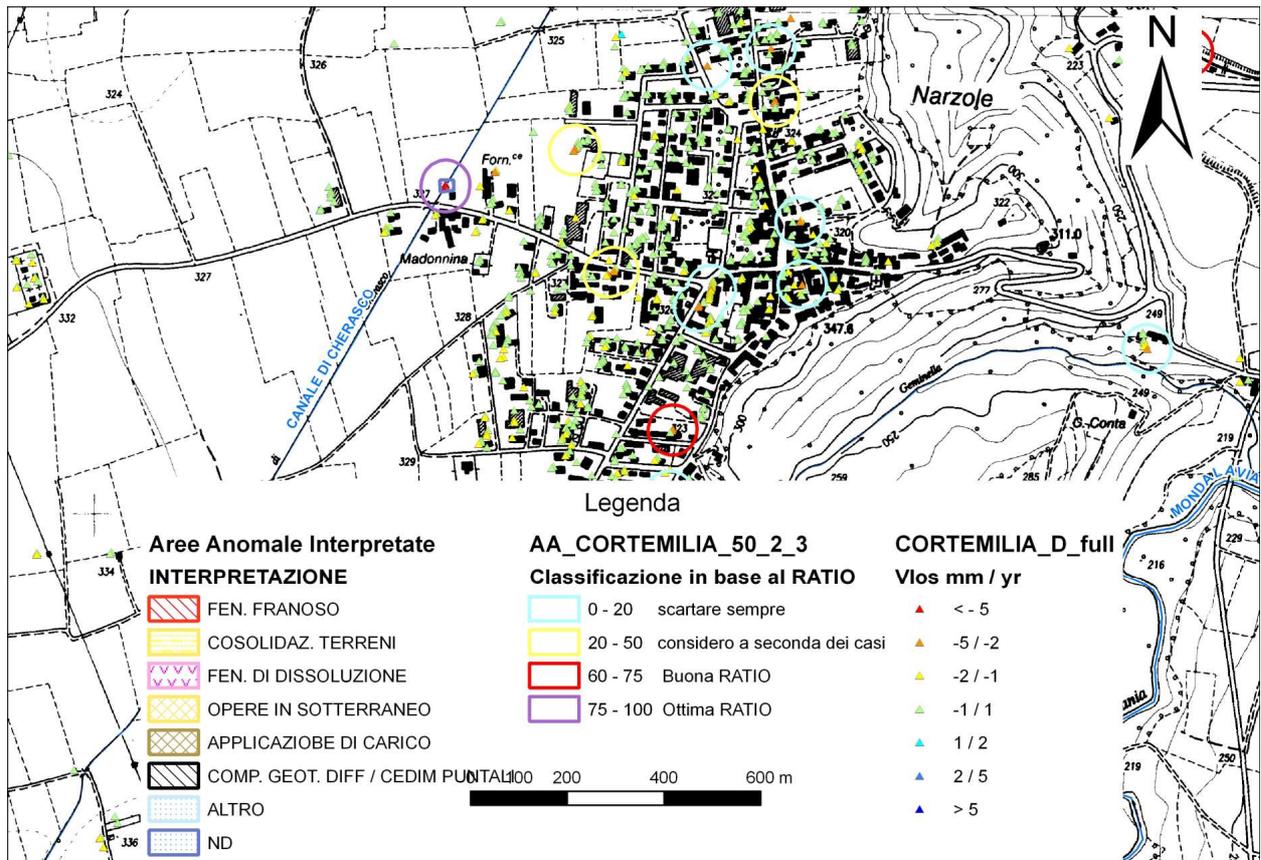


Fig.3.19: Esempio di aree anomale scartate (comune di Narzole)

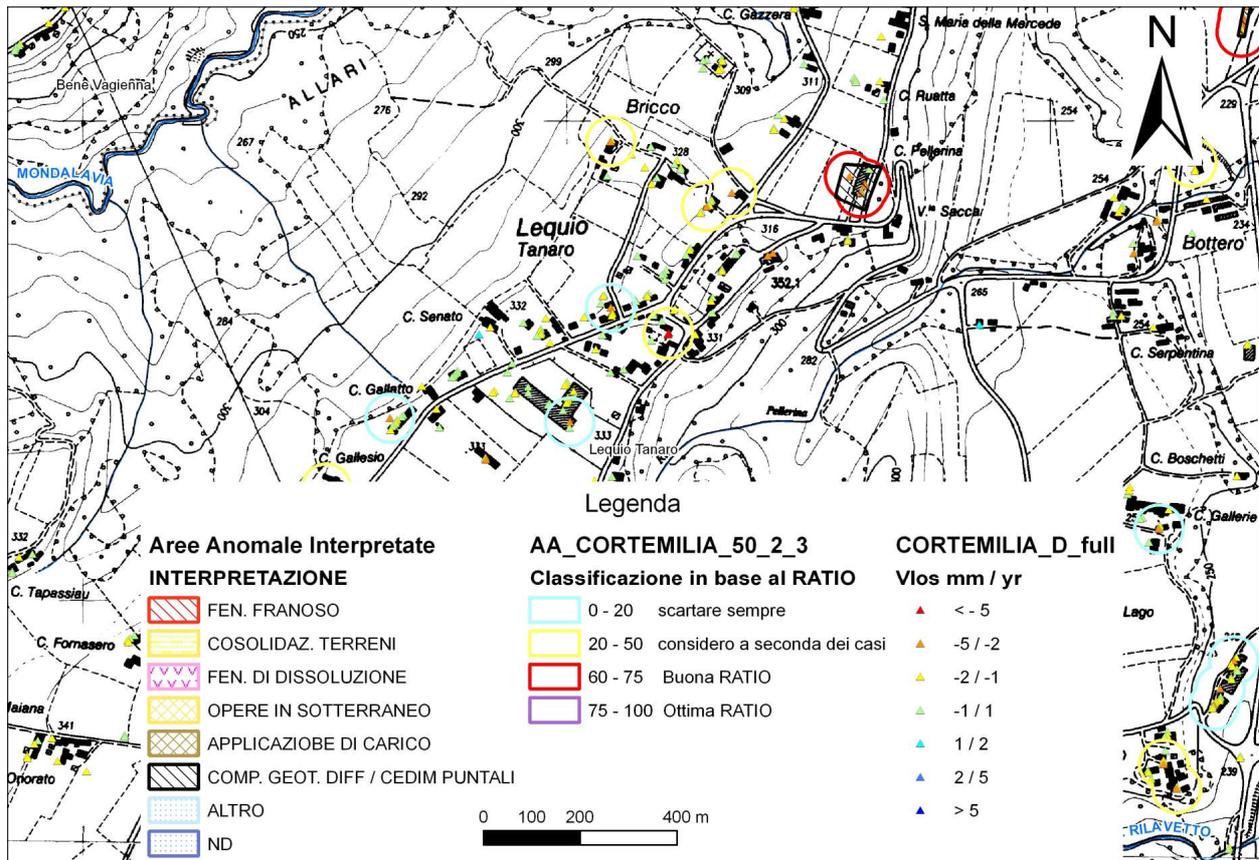


Fig.3.20: Esempio di aree anomale in parte scartate ed in parte selezionate (comune di Lequio Tanaro)

3.2 2° FASE: INTERPRETAZIONE PRELIMINARE DEI RISULTATI PSINSAR™

Questa fase della metodologia comprende le seguenti attività:

- analisi della tipologia dei movimenti possibili nei vari contesti geologici e geomorfologici della Regione Piemonte;
- sviluppo di un metodo di interpretazione preliminare a scala regionale;
- sviluppo e la compilazione di un database riguardante le aree anomale

3.2.1 ANALISI DELLA TIPOLOGIA DEI MOVIMENTI POSSIBILI NEI VARI CONTESTI GEOLOGICI E GEOMORFOLOGICI DELLA REGIONE PIEMONTE

L'interpretazione dei settori "anomali" definiti nella fase precedente dipende dalla tipologia di fenomeno, che a sua volta è funzione della velocità e del tipo di movimento (lineare e non).

Le cause dei movimenti sono state suddivise in:

1. attività neotettonica e sismica
2. fenomeno franoso
3. subsidenza naturale per consolidazione di terreni recenti sottoconsolidati o per la presenza di terreni "problematici"
4. subsidenza naturale connessa a fenomeni di dissoluzione di rocce carbonatiche o evaporitiche
5. subsidenza indotta da estrazione di fluidi dal sottosuolo
6. subsidenza indotta da attività sotterranea (scavi per gallerie, attività mineraria)
7. subsidenza indotta da applicazioni di carichi (costruzioni, grandi opere) su superfici estese
8. comportamento geotecnico differenziale del terreno di fondazione
9. strutturale

Per ognuno dei fenomeni sopra elencati vengono forniti nelle pagine seguenti:

- la scala del fenomeno (regionale, locale, puntuale);
- l'ambito geologico-geomorfologico della Regione Piemonte in cui può essere riscontrato;
- la velocità;
- il tipo di movimento (orizzontale, verticale, lineare, non lineare);
- le informazioni e i prodotti che si possono ottenere dall'applicazione della tecnica PS InSAR (analisi standard) allo studio del fenomeno (informazioni qualitative e quantitative, carte, ecc...);
- i limiti dell'applicazione della tecnica PSInSAR™.

Occorre tenere presente che i fenomeni, che causano i movimenti si possono anche sovrapporre a scale diverse, per cui l'interpretazione dei dati interferometrici può risultare difficile a causa dell'influenza di diverse componenti del movimento non sempre chiaramente distinguibili (Fig.3.21): richiamo di terreno da parte dei movimenti franosi attivi, fenomeno di ritiro-rigonfiamento della copertura argillosa, fattori geotecnici e topografici; condizioni di fondazione e caratteristiche strutturali dei fabbricati.

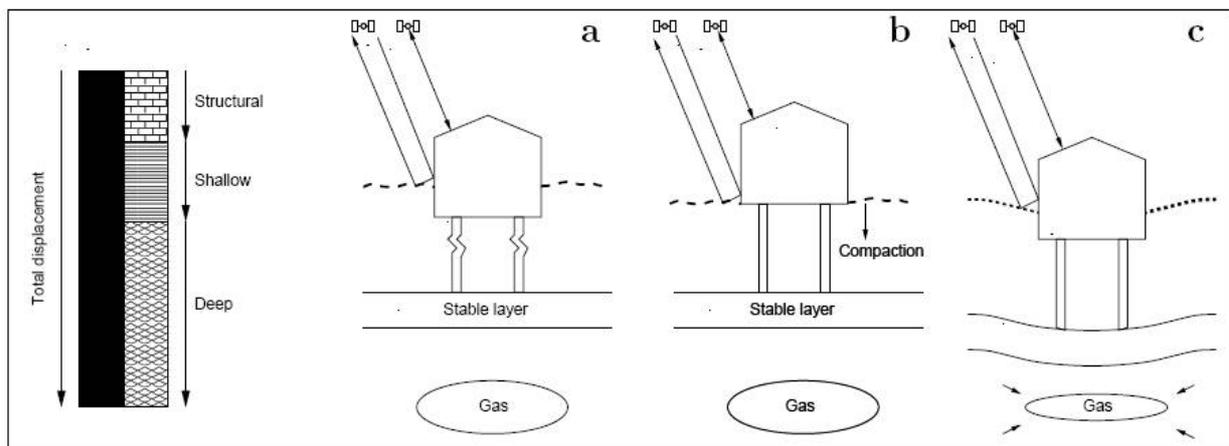


Fig.3.21. Esempio della scomposizione dello spostamento misurato dovuto a differenti cause: a) strutturali (fondazioni), b) consolidamento del terreno, c) estrazioni di gas (Ketelaar et al., 2006).

La fase di interpretazione dei dati PSInSAR™ può essere inoltre condizionata da una serie di fattori (TerraFirma, 2003; Dehls, 2004):

- Localizzazione e densità dei Permanent Scatterers

La quantità e la localizzazione dei permanent scatterers non possono essere previste prima della fase di processamento; un buon diffusore permanente dipende dalle proprietà dielettriche del materiale che costituisce il bersaglio e dalla geometria delle superfici in relazione al satellite. In un'area urbana ci si può aspettare alcuni centinaia di punti per chilometro quadrato, tuttavia questa densità diminuisce considerevolmente in ambienti rurali e soprattutto in aree a bosco.

- Copertura del territorio

Non tutto il territorio si presta all'applicazione della tecnica PSInSAR™ in relazione a:

- Deformazioni prospettiche (Tab.3.2) legate alla geometria di acquisizione del satellite: i versanti paralleli alla direzione di vista del sensore non sono analizzabili; vi sono sensibili distorsioni prospettiche dei pendii ad elevata energia di rilievo; alcuni versanti non sono illuminati in quanto coperti da altri;
- Aree vegetate;
- PS temporanei (strutture in costruzione o in ristrutturazione durante il periodo di monitoraggio satellitare);
- Moti veloci;
- Moti non lineari.

Assessment of suitability of ERS data for recognition of geological features through SAR image interpretation and for ground displacement monitoring via SAR interferometry, with reference to slope aspect and inclination (given the average incidence angle, or both the near and far range incidence angles, it is straightforward to adapt the table also to different radar sensors)

Slope aspect	Ascending ERS passes	Descending ERS passes	Notes
Slope facing East	Enhanced range resolution if $ \alpha < 67^\circ$ Shadow if $ \alpha > 67^\circ$	Foreshortening if $ \alpha < 23^\circ$ Layover if $ \alpha > 23^\circ$	Only ascending data suitable for SAR interferometry and feature extraction by means of image interpretation. Slopes exceeding 67° are not covered. 1D LOS deformation data.
Slope facing West	Foreshortening if $ \alpha < 23^\circ$ Layover if $ \alpha > 23^\circ$	Enhanced range resolution if $ \alpha < 67^\circ$ Shadow if $ \alpha > 67^\circ$	Only descending data suitable for SAR interferometry and feature extraction by means of image interpretation. Slopes exceeding 67° are not covered. 1D LOS deformation data.
Slope facing North or South	–	–	Both ascending and descending data are suitable for interferometry and feature extraction by means of image interpretation. 2D deformation analysis feasible. Low system sensitivity with respect to translational displacements along the North-South direction.

Tab.3.2.

- Movimenti relativi

I valori dei tassi di deformazioni sono relativi ad un punto di riferimento scelto arbitrariamente e assunto come stabile.

- Riflessioni multiple

Una componente del movimento dei PS può essere costituita dalle riflessioni dagli edifici o da riflessioni multiple (es. dal satellite alla pavimentazione, all'edificio, a un altro edificio e quindi di nuovo al satellite). Questi fenomeni dovrebbero essere presi in considerazione, specialmente quando si studiano punti singoli o spuri.

- Distanza dal punto di riferimento

La deviazione standard dell'errore della misura della velocità aumenta con l'aumentare della distanza dal punto di riferimento. Il punto di riferimento può anche essere distante dall'area di studio.

- Velocità lungo la LOS

La velocità data è misurata lungo la linea di vista del satellite (LOS), che è in media inclinata di 23° rispetto alla verticale. Se il movimento reale non avviene lungo la LOS la velocità misurata dal PS è sottostimata rispetto a quella reale, specialmente nel caso in cui la componente orizzontale del movimento è importante.

- Spostamenti con velocità elevate

Bersagli con velocità tali da subire spostamenti superiori ad un quarto di lunghezza d'onda (1,4 cm in banda C) tra due acquisizioni successive non vengono individuati come PS.

- **Movimenti non lineari**

L'analisi standard suppone l'esistenza di movimenti lineari, in presenza di spostamenti che non seguono il modello lineare si hanno forti perdite di coerenza che possono portare alla perdita del PS. Quando si ipotizza la presenza di movimenti non lineari occorre modificare l'algoritmo utilizzato, per esempio attraverso l'applicazione di modelli polinomiali o una riduzione dei valori della soglia di coerenza. L'adozione di modelli diversi dal lineare comporta tuttavia un notevole calcolo computazionale che rende possibile la loro applicazione solo nel caso di studi di dettaglio, limitati ad un'area circoscritta.

- **Differente filosofia di misura rispetto al monitoraggio tradizionale**

I punti di monitoraggio convenzionali in situ sono posizionati strategicamente sulla base di alcuni parametri quali il facile accesso del sito, la ripetibilità della misura, ecc...; nella tecnica PSInSARTM la localizzazione dei PS dipende dalla disponibilità di immagini SAR (temporal sampling) e dalla presenza di bersagli radar (spatial sampling).

1) Attività neotettonica e sismica

Scala del fenomeno: regionale

Ambiti geologico-geomorfologici: pianura alluvionale, aree collinari e montane.

Velocità: generalmente estremamente basse (<+-1 mm/a). Tali movimenti richiederebbero il confronto con altri dati da terra (livellazioni ottiche, GPS).

Tipo di movimento: lineare, movimenti orizzontali e verticali

Informazioni

1. Identificazione aree in sollevamento o in abbassamento (informazioni qualitative)
2. Identificazione scarpate di faglia

Prodotti:

- Curve di isovelocità ottenute dall'interpolazione dei PS.

Limiti

- 1) difficoltà nel distinguere la componente dovuta all'errore di precisione delle velocità (per il Piemonte $\pm 0.1 \div 2$ [mm/anno] per un PS distante meno di 2 km dal punto di riferimento ed in caso di dataset composto da almeno 50 immagini)

Esempi da letteratura:

Gli esempi descritti in letteratura si riferiscono a fenomeni con un'elevata velocità di movimento in regioni caratterizzate da faglie sismicamente attive e alti tassi di deformazione tettonica (i.e. Baia di San Francisco) (Burgmann *et al.*; Colesanti *et al.*, 2001; Colesanti *et al.*, 2003; Ferretti *et al.*, 2000; Ferretti *et al.*, 2004; Hilley *et al.*, 2004). In tutti i casi gli Autori hanno utilizzato dati di monitoraggio da terra (GPS, livellazioni ottiche) a confronto dei dati PSInSARTM, ottenendo una buona corrispondenza.

L'applicazione della tecnica in zone asismiche caratterizzate da movimenti neotettonici non ha finora permesso di individuare i movimenti in quanto caratterizzati da spostamenti estremamente bassi, tali da rientrare nell'ordine di grandezza dell'errore di precisione della velocità (Dehls, 2006).

2) Fenomeni franosi

Scala del fenomeno: regionale, locale

Ambiti geologico-geomorfologici: zona collinare e montana.

Velocità: velocità lente e lentissime, generalmente inferiori a 5-6 cm/yr. Movimenti di versante veloci o comunque caratterizzati da un'attività impulsiva o discreta nel tempo, difficilmente possono avere riscontro dall'analisi dei movimenti dei PS.

Tipo di movimento: movimenti traslazionali (lungo pendio) e/o rotazionali (verticali), in genere non lineari

Informazioni

- A scala regionale
 - Distinzione tra aree stabili e non stabili
 - Stato di attività dei fenomeni franosi relativamente al periodo di monitoraggio 1992-2001.
- A scala locale
 - Identificazione di settori di una frana caratterizzati da movimenti locali differenziali, individuabili solo attraverso una fitta rete di strumentazione
 - Cinematismo della frana: per movimenti di tipo rotazionale si osserva generalmente un'inversione del segno della velocità (abbassamento nella parte superiore, sollevamento nella parte inferiore) (Colesanti *et al.*, 2003; Colesanti & Wasowski, 2006)
 - Entità del movimento, soprattutto in frane molto lente con movimenti ai limiti della scala di misura degli strumenti di monitoraggio tradizionali
 - Analisi di segni precursori (previsione delle deformazioni)

Prodotti:

1. Carta inventario dei fenomeni franosi (a grande scala), con possibilità in futuro di aggiornamenti periodici;
2. Monitoraggio di singoli fenomeni franosi, attraverso il confronto dei dati di monitoraggio e le serie storiche;
3. Definizione di settori omogenei dal punto di vista cinematico (aree con medesimi tassi di deformazione), soprattutto in corrispondenza di grandi frane;

Limiti

- non tutto il territorio si presta all'applicazione della tecnica PSInSARTM in relazione alla geometria di acquisizione del satellite: i versanti paralleli alla direzione di vista del sensore (all'incirca E-W) non sono analizzabili; vi sono sensibili distorsioni prospettiche dei pendii ad elevata energia di rilievo; alcuni versanti non sono illuminati in quanto coperti da altri; un altro fattore limitante è la presenza di vegetazione;
- capacità di apprezzare deformazioni 1D solamente lungo la direzione di linea di vista del satellite; da ciò deriva una ottimale applicabilità del metodo nel caso di fenomeni franosi caratterizzati da movimenti subverticali, con componenti principali in direzione Est-Ovest; per contro, la tecnica non è adeguatamente applicabile nel caso di fenomeni franosi caratterizzati da movimenti essenzialmente suborizzontali, che vengono sottostimati, o con componenti principali in direzione Nord-Sud;
- numero a volte limitato di PS che cadono in aree in frana (bassa densità di PS in ambiente alpino e rurale in assenza di strutture antropiche o roccia affiorante);
- l'interpretazione dei risultati interferometrici, in termine di evoluzione temporale delle deformazioni è anche condizionata dal numero limitato di aree monitorate da terra (es. inclinometri, livellazioni topografiche) nel periodo 1992-2000;
- fenomeni franosi caratterizzati da movimenti relativamente rapidi o da spostamenti di entità superiore a 1,0 cm tra acquisizioni satellitari successive, in assenza di informazioni integrative derivanti da sistemi di monitoraggio complementari o alternativi, non sono attendibilmente monitorabili soltanto con il metodo dei *Permanent Scatterers*;

- i fenomeni a cinematica impulsiva, caratterizzati, cioè, da brevi fasi di attività, per lo più legate a eventi meteorologici intensi, intervallati da lunghi periodi di quiescenza, non appaiono particolarmente adatti ad essere monitorati con questa tecnica, soprattutto quando movimenti di entità centimetrica sono concentrati in pochi giorni;
- al contrario dei sistemi di monitoraggio convenzionale la posizione dei PS non può essere scelta;
- gli spostamenti superficiali nel tempo lungo un pendio non necessariamente sono causati da movimenti franosi. L'interpretazione delle deformazioni misurate dai PS lungo un pendio urbanizzato (quindi da bersagli radar costituiti da strutture antropiche) è complicato in quanto il movimento può derivare da differenti processi naturali e antropici che riflettono dei meccanismi di deformazione complessi. Di conseguenza, eccetto che per i PS naturali corrispondenti a roccia esposta, senza un'adeguata campagna sul terreno, differenti interpretazioni possono essere fornite ad uno spostamento misurato dai PS:
 - ammaloramento delle strutture antropiche
 - cedimento di strutture ingegneristiche
 - variazioni volumetriche del terreno
 - subsidenza o sollevamento per cause naturali o antropiche
 - deformazioni lungo il pendio molto lente che non conducono alla rottura (creep stagionale o continuo dovuto a fenomeni di stress relief)
 - fenomeni di dissoluzione dei gessi.

Per i fenomeni franosi occorre fare una distinzione anche in relazione alla tipologia di dissesto presente nel territorio della Regione Piemonte, dalla quale dipendono la velocità, i cinematismi e l'estensione areale. Escludendo i cinematismi veloci (es. fluidificazioni superficiali) si possono distinguere:

- grandi frane (DGPV): sono caratterizzate da estensione areale $> 0,2 \text{ km}^2$, da movimenti lenti, continui e complessi (traslazioni, rotazioni, ecc...) con occasionali accelerazioni; si possono riscontrare nelle Alpi e nell'Appennino;
- Frane di scivolamento planari (zona delle Langhe);
- Frane di colamento lento (Appennino piemontese).

Esempi da letteratura

Gli esempi riportati in letteratura sono raggruppabili in due gruppi: studi a scala regionale o sub-regionale e studi sulla singola frana

Gli studi a scala regionale o sub-regionale sono perlopiù finalizzati all'aggiornamento della carta inventario dei fenomeni franosi. Alcuni esempi sono riportati di seguito. In generale emerge che:

- solo un ridotto numero di dissesti censiti contengono PS (7% per il Bacino del F. Arno e l'Oltrepò pavese, 23% per l'area genovese spezzina);
- PS con velocità di spostamenti non nulle corrispondenti a manufatti ubicati sui versanti non necessariamente devono essere ritenuti indizi della presenza di una frana attiva, andrebbero infatti analizzate anche le condizioni dell'edificio e del terreno di fondazione.

Catani et al., 2005; Farina et al., 2006: la tecnica è stata applicata in un'area appenninica, ovvero il Bacino del F. Arno (9131 km^2). La procedura seguita per l'aggiornamento della carta inventario è stata condotta su ogni singolo comune del bacino dell'Arno, attraverso la sovrapposizione in ambiente GIS dei dati InSAR con il preesistente inventario delle frane e con tutti i dati ancillari a disposizione. Nella fase interpretativa la presenza di Permanent Scatterers all'interno di aree già mappate in frana, ha portato, nel caso di accordo tra stato di attività (attiva, quiescente, inattiva stabilizzata) e velocità media dei PS (presenza o meno di movimento negli intervalli temporali 1999-2002 e 1992-2002), ad un aggiornamento degli attributi del poligono con l'aggiunta delle velocità di movimento riscontrata, oppure, nel caso di disaccordo, è stata valutata la possibilità di modificare lo stato di attività della frana. Nel caso di Permanent Scatterers in movimento vicino ad aree mappate in frana, l'accordo tra stato di attività e la velocità media dei PS ha permesso l'ampliamento dei limiti del poligono di frana per comprendere l'area

interessata dai PS, mentre il disaccordo ha dato la possibilità di creare un nuovo poligono di frana indipendente. Infine il caso di Permanent Scatterers in movimento, ma lontani da aree in frana, ha portato alla generazione di un nuovo poligono di frana supportato da evidenze morfologiche e vegetazionali. L'applicazione della tecnica è stata limitata da alcuni fattori, quali la bassa densità di PS (36 PS/km²), e dal conseguente fatto che i PS ricadono solo sul 7% delle frane mappate dalla carta inventario.

Meisina et al., 2006: la tecnica PS è stata applicata nell'area dell'Oltrepo Pavese (1100 Km²), in ambiente appenninico. Nonostante il ridotto numero di PS che ricade in aree in frana (7 %), è stato possibile apprezzare spostamenti anche in aree in frana dove la fotointerpretazione e l'analisi di terreno non evidenziano particolari indicatori di movimento e che pertanto sono state considerate, in assenza di tale informazione, stabilizzate nella carta inventario. In altri casi, sono stati identificati dei movimenti in aree considerate non in frana dagli inventari di dissesto esistenti (aree in lento movimento ma senza evidenze sul terreno di tali deformazioni). Non è tuttora accertato, ma non è escluso, che in alcuni casi tali movimenti possano essere interpretabili come precursori d'evento sul lungo termine. Alcuni di questi movimenti sono soprattutto evidenti all'esterno dei perimetri di frana (attiva, quiescente), si tratta in questo caso di fenomeni di deformazione lenta del pendio, alla sommità del versante e localmente in fondovalle, non rilevabili dal punto di vista geomorfologico ma segnalati anche dal dissesto di diversi fabbricati. Nelle zone di bordo delle placche arenacee i risultati del monitoraggio satellitare evidenziano importanti movimenti di abbassamento e sembrano confermare l'ipotesi dell'esistenza probabili fenomeni di espansione laterale

Bottero et al., 2006: la tecnica PSInSARTM è stata applicata all'area della Provincia di Genova e La Spezia (circa 1000 km²). Circa il 23% dei dissesti censiti nell'inventario IFFI contengono PS. Le considerazioni emerse dallo studio sono le seguenti:

- la maggior parte dei bersagli radar corrispondono ad edifici che evidenziano deformazioni e/o lesioni,
- a parità di velocità di spostamento le reazioni registrate sulle costruzioni in pietra e prive di fondazioni sono molto più marcate rispetto a quelle evidenziate da edifici in c.a. di costruzione più recente, nel caso di questi ultimi gli autori hanno addirittura osservato l'assenza di cedimenti in presenza di velocità di spostamento di 3-5 mm/anno;
- oltre alle caratteristiche strutturali dei manufatti anche la loro geometria rivela un ruolo non secondario nel determinare la presenza di lesioni (il quadro fessurativo tende ad aggravarsi all'aumentare dell'assimmetria delle costruzioni).

Gli Studi sulla singola frana costituiscono attualmente la maggior parte dei casi riportati in letteratura (Colesanti et al. 2003; Colesanti & Wasowski 2004, 2006; Farina et al. 2004; Hilley et al. 2004; Ferretti et al. 2005, ecc.). In molti casi gli autori hanno utilizzato l'analisi advanced. Emergono le seguenti considerazioni:

- la velocità misurata dalla tecnica PSInSARTM è lungo LOS e quindi vi è la necessità di trasformarla in velocità lungo il pendio (vedi proposta Colesanti e & Wasowski o Hilley et al.);
- non sempre nell'intero periodo 1992-2000 sono disponibili dati di monitoraggio da terra, alcune volte di conseguenza il confronto viene fatto tra le serie storiche dei bersagli radar ed i dati da terra riferiti o ad un periodo temporale inferiore o addirittura ad un periodo successivo (posteriore al 2000);
- nella maggior parte dei casi emerge una buona capacità della tecnica PSInSARTM ad individuare aree caratterizzate da diversa magnitudo di spostamento.

3) Subsidenza naturale per consolidazione di terreni recenti sottoconsolidati o per la presenza di terreni “problematici” (torbe, terreni collassanti o soggetti al ritiro-rigonfiamento)

Si tratta di fenomeni di subsidenza dovuti alla naturale consolidazione di materiale di recente deposizione e quindi poco consolidato (es. limi di ambiente lacustre) o causati dalla presenza dei cosiddetti terreni “problematici” tra cui vi sono le torbe ed i terreni collassanti (limi spesso di origine eolica).

Particolare attenzione presenta un fenomeno poco conosciuto quale il ritiro-rigonfiamento dei terreni argillosi (terreni costituiti da più del 30 % di particelle di dimensioni inferiori ai 2µm) principalmente legato alle variazioni del loro contenuto d’acqua.

La **litologia** costituisce il fattore più importante. I terreni maggiormente suscettibili al ritiro-rigonfiamento sono costituiti, in buon accordo con la composizione mineralogica (presenza di minerali argillosi a reticolo espandibile), da:

- litotipi argillosi o a matrice argillosa con un potenziale di ritiro/rigonfiamento molto alto; marnosi o marnoso-calcarei con intercalazioni argillose con un’alta predisposizione alle variazioni di volume,
- coltri eluvio-colluviali, loess colluviati nonché suoli su depositi alluvionali antichi.

Nelle aree di pianura le **oscillazioni del livello della falda** (direttamente legate alle variazioni climatiche o a fattori antropici), sia a ciclo annuale che pluriennale, causano il rigonfiamento o il ritiro di un orizzonte di terreno, se rispettivamente, il livello si innalza o si deprime. Le periodiche variazioni del tenore in acqua, legate alle oscillazioni del livello della falda, sono causa di ciclici processi di rigonfiamento e ritiro nel terreno.

Le **variazioni climatiche** giocano un ruolo fondamentale nei processi di ritiro-rigonfiamento. Nei nostri climi temperati la profondità della zona interessata dalle variazioni del contenuto d’acqua (“zona attiva”) non supera 2 m ma può raggiungere 3 -5 m nel caso di periodi di siccità eccezionale, quale quello tra Maggio 1998 e Settembre 2000.

Scala del fenomeno: locale, puntuale

Ambiente geologico-geomorfologico: zona di pianura, zona collinare.

Velocità: lente (attenzione terreni collassanti).

Tipo di movimento: prevalentemente verticale (dipende anche dalla struttura del suolo), lineare per i terreni sottoconsolidati, altrimenti generalmente non lineare, nel caso del ritiro-rigonfiamento si può distinguere un andamento pluriennale (connesso all’alternarsi di periodi siccitosi e piovosi) e stagionale (andamento sinusoidale).

Informazioni

- Identificazione e mappatura di terreni sottoconsolidati o problematici;
- Identificazione di zone con diversa entità del movimento;
- Misura di deformazioni stagionali associate alle variazioni di volume del terreno;
- Identificazione e quantificazione delle deformazioni del terreno (abbassamenti) correlate al ritiro associato a periodi siccitosi.

Prodotti:

- Curve di isovelocità ottenute dall’interpolazione dei PS
- Tassi di abbassamento
- Correlazione tra serie storiche e dati pluviometrici (in particolare deficit idrico)

Limiti

- I movimenti sono verticali per cui la Vlos sottostima la velocità
- Il fenomeno di ritiro/rigonfiamento ha una componente stagionale, che è difficile da identificare nelle serie storiche dei PS.

Esempi da letteratura:

Gli esempi in letteratura sono piuttosto limitati. Deformazioni di carattere stagionali indotte dalle oscillazioni piezometriche nella zona di San Jose (California) sono stati studiati da Colesanti *et al.* (2003). Gli autori hanno adottato un modello sinusoidale.

Meisina et al. (2006) hanno sovrapposto la carta dei terreni argillosi soggetti a ritiro-rigonfiamento dell'Oltrepo pavese alla distribuzione dei PS, individuando alcune aree in abbassamento che potrebbero essere connesse al ritiro dei terreni argillosi successivo al periodo siccitoso 1998-2000. L'analisi di tipo advanced condotta su una di queste aree ha permesso di individuare PS non lineari. Le serie storiche di questi ultimi presentano una buona correlazione con la curva del deficit idrico del periodo 1992-2000 e con il quadro e la storia fessurativa degli edifici lesionati.

4) Subsidenza naturale connessa a fenomeni di dissoluzione di rocce carbonatiche o evaporitiche

Si riferisce a fenomeni di subsidenza connessi con dissoluzione chimica di rocce evaporitiche eventualmente presenti nel sottosuolo e non strettamente connessa, pertanto, alla presenza di cavità sotterranee vere e proprie.

Scala del fenomeno: regionale e locale

Ambiti geologico-geomorfologici: pianura alluvionale, fondovalle collinare e montano, Alpi.

Velocità: variabile (lenta nei fenomeni di dissoluzione)

Tipo di movimento: movimenti verticali.

Informazioni

- identificazione aree in abbassamento
- informazioni quantitative (quanto la superficie si abbassa ed in quanto tempo)
- identificazione di aree caratterizzate da diversa magnitudo di abbassamento

Prodotti:

- Tassi di abbassamento

Limiti

- I movimenti sono prevalentemente verticali per cui la V_{LOS} sottostima la velocità.
- Sovrapposizione di movimenti franosi.

5) Subsidenza per estrazione di fluidi dal sottosuolo.

Le cause della subsidenza sono in questo caso artificiali (estrazione nel breve termine di fluidi dal sottosuolo).

Scala del fenomeno: regionale e locale

Ambiti geologico-geomorfologici: pianura alluvionale, fondovalle collinare e montano.

Velocità: variabile

Tipo di movimento: generalmente non lineare (lineare nel lungo termine), movimenti verticali.

Informazioni

- identificazione aree in abbassamento
- informazioni quantitative (quanto la superficie si abbassa ed in quanto tempo)
- identificazione di aree caratterizzate da diversa magnitudo di abbassamento

Prodotti:

- Curve di isovelocità ottenute dall'interpolazione delle velocità annuali
- Tassi di abbassamento
- Relazione andamento V_{LOS} (serie storiche)- emungimenti – superficie piezometrica nel periodo di monitoraggio satellitare

Limiti

- I movimenti sono verticali per cui la V_{LOS} sottostima la velocità.
- Sovrapposizione di movimenti a carattere stagionale.

Esempi da letteratura:

I casi riportati in letteratura sono numerosi e riflettono l'elevata capacità della tecnica PSInSAR™ nell'identificazione di questi fenomeni soprattutto in aree di pianura dove la densità dei PS è molto elevata (200-700 PS/km²). In genere gli studi si riferiscono ad applicazioni della tecnica a scala locale-urbana; es. area di Las Vegas (Bamler *et al.*, 2005), un'area urbana in Spagna (Mora *et al.*), Bangkok (Worawattanamateekul *et al.*). I risultati interferometrici sono stati generalmente comparati a livellazioni ottiche e/o misure GPS e misure piezometriche. Le velocità utilizzate nell'analisi sono quelle lungo LOS, solo Worawattanamateekul *et al.* hanno trasformato le VLOS in velocità verticali. Bamler *et al.* (2005) hanno anche stimato la componente stagionale del movimento.

Un numero più limitato è relativo a studi a scala regionale: regione di Trondheim (Dehls, 2004); pianura delle province di Ravenna, Forlì e Cesena (1700 km²) (ARPA Emilia Romagna, 2005); bacino del F. Arno (Canuti *et al.*, 2006).

6) Subsidenza indotta da attività sotterranea (scavi per gallerie, attività mineraria)

Scala del fenomeno: locale, puntuale

Ambiti geologico-geomorfologici: pianura alluvionale, zona collinare e montana.

Velocità: veloce

Tipo di movimento: generalmente non lineare, movimenti verticali.

Informazioni

- identificazione e mappatura dell'area di influenza dei lavori in sotterraneo
- informazioni quantitative (quanto si abbassa ed in quanto tempo)
- identificazione di aree caratterizzate da diversa magnitudo di abbassamento
- analisi di segni precursori (previsione delle deformazioni)

Prodotti:

- Curve di isovelocità ottenute dall'interpolazione dei PS
- Tassi di abbassamento

Limiti

- I movimenti sono verticali per cui la V_{LOS} sottostima la velocità.
- Elevate velocità di deformazione

Esempi da letteratura:

Gli esempi riportati in letteratura sono abbastanza esigui in relazione soprattutto al fatto che si tratta di movimenti veloci, in tutti i casi si tratta di applicazioni a scala regionale (Carnec *et al.*, 2004 nel bacino ferrifero loreno; Bamler *et al.*, 2005 in un'area test vicino a Marsiglia). Gli autori sottolineano che la tecnica offre la possibilità di uno studio "a ritroso" degli spostamenti provocati dalla presenza di scavi sotterranei (analisi dei segni precursori e previsione delle deformazioni) e soprattutto permette un'analisi dell'evoluzione nel tempo del fenomeno.

7) Subsidenza indotta da applicazioni di carichi (costruzioni, grandi opere) su superfici estese

Si tratta di fenomeni di subsidenza causati dalla costruzione di insediamenti residenziali o industriali impostati su terreni argillosi sottoconsolidati.

Scala del fenomeno: locale, puntuale

Ambiti geologico-geomorfologici: pianura alluvionale, fondovalle collinare e montano.

Velocità: generalmente lenta

Tipo di movimento: generalmente lineare, movimenti verticali.

Informazioni

- identificazione aree in abbassamento
- informazioni quantitative (quanto la superficie si abbassa ed in quanto tempo)
- identificazione di aree caratterizzate da diversa magnitudo di abbassamento

Prodotti:

- Tassi di abbassamento

Limiti

- I movimenti sono verticali per cui la V_{LOS} sottostima la velocità.
- Sovrapposizione di movimenti a carattere stagionale.

8) Comportamento geotecnico differenziale del terreno di fondazione e deformazioni strutturali

Il comportamento geotecnico differenziale del terreno di fondazione si riferisce a situazioni puntuali connesse a:

- consolidazione di terreno naturale o di riporto eterogeneo (es. strutture costruite a mezza costa)
- variazioni di volume del terreno
- presenza di vegetazione
- erosione e/o sifonamento

Le deformazioni di carattere “strutturale” si riferiscono a situazioni “puntuali” in genere riguardanti il singolo edificio o la singola infrastruttura. I movimenti individuati dai PS corrispondono in genere a cause “non geologiche” riconducibili a : errori di progettazione, ammaloramento dei materiali da costruzione, variazioni di carico sulle strutture dell’edificio a seguito di lavori di trasformazione/ristrutturazione, ecc...

Le deformazioni di carattere “strutturale” degli edifici (ad esempio quelle che si manifestano su edifici “antichi”, in muratura di pietrame “quasi a secco” o per effetto di interventi di adeguamento e ristrutturazione che comportino anche una differente interazione terreno-struttura) hanno, in generale, modalità evolutive e gradienti di velocità di entità tale da poter essere agevolmente rilevate con la tecnica dei PS.

Scala del fenomeno: puntuale

Ambiti geologico-geomorfologici: pianura alluvionale, fondovalle collinare e montano.

Velocità: variabile

Tipo di movimento: generalmente non lineare, movimenti prevalentemente verticali.

Informazioni

- identificazione aree in abbassamento
- informazioni quantitative (quanto la superficie si abbassa ed in quanto tempo)

Prodotti:

- Tassi di abbassamento

Limiti

- Sovrapposizione di movimenti a carattere stagionale.

3.2.2 SVILUPPO DI UN METODO DI INTERPRETAZIONE PRELIMINARE A SCALA REGIONALE

Occorre premettere che l'interpretazione dei dati PSInSAR™ interessa scale diverse:

- scala regionale: riguarda i fenomeni franosi (identificazione), la subsidenza e l'attività neotettonica. Lo studio di quest'ultima non rientra nel presente rapporto, è attualmente oggetto di analisi da parte di tecnici di ARPA Piemonte e richiede l'utilizzo di tecniche geostatistiche e del confronto con il dato geologico-strutturale;
- scala locale: riguarda il monitoraggio di fenomeni franosi e della subsidenza;
- scala puntuale: è relativa allo studio di infrastrutture, edifici, ecc....

Nonostante le aree anomale precedentemente individuate possano interessare scale diverse (Fig.3.22-3.23) in questo capitolo verrà presentato un metodo di interpretazione preliminare valido a scala regionale. Le aree anomale non danno alcuna informazione sull'attività neotettonica per l'entità dei movimenti di quest'ultima (<1 mm/a) che generalmente si trova al di sotto del valore soglia utilizzato per l'identificazione delle suddette aree. Per l'interpretazione delle aree anomale che rappresentano fenomeni a scala puntuale (Fig.3.22) si rimanda al capitolo 3.3. riguardante l'interpretazione di dettaglio.

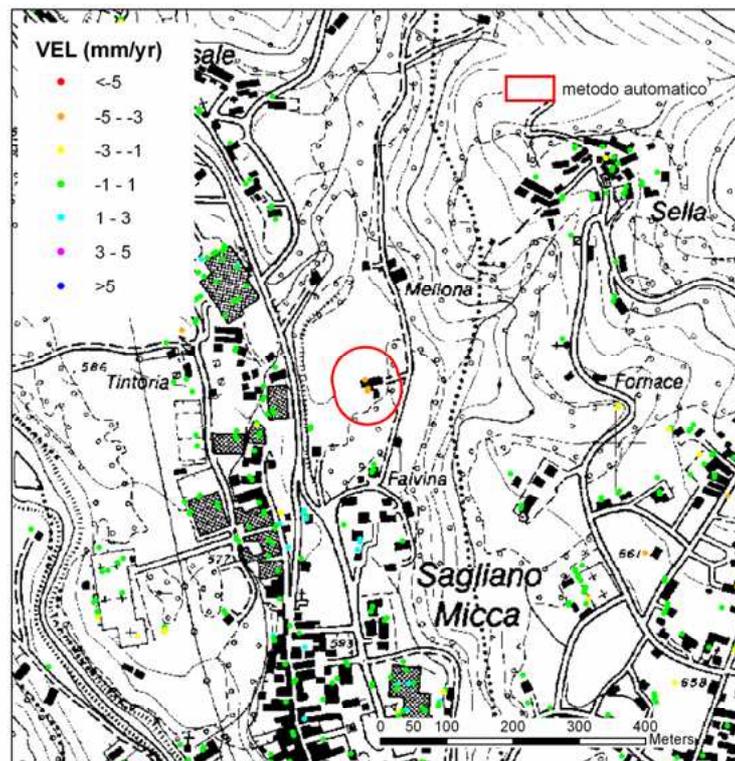


Fig.3.22 Esempio di area anomala indicante un fenomeno a scala puntuale (edificio) (dataset alagna_summer).

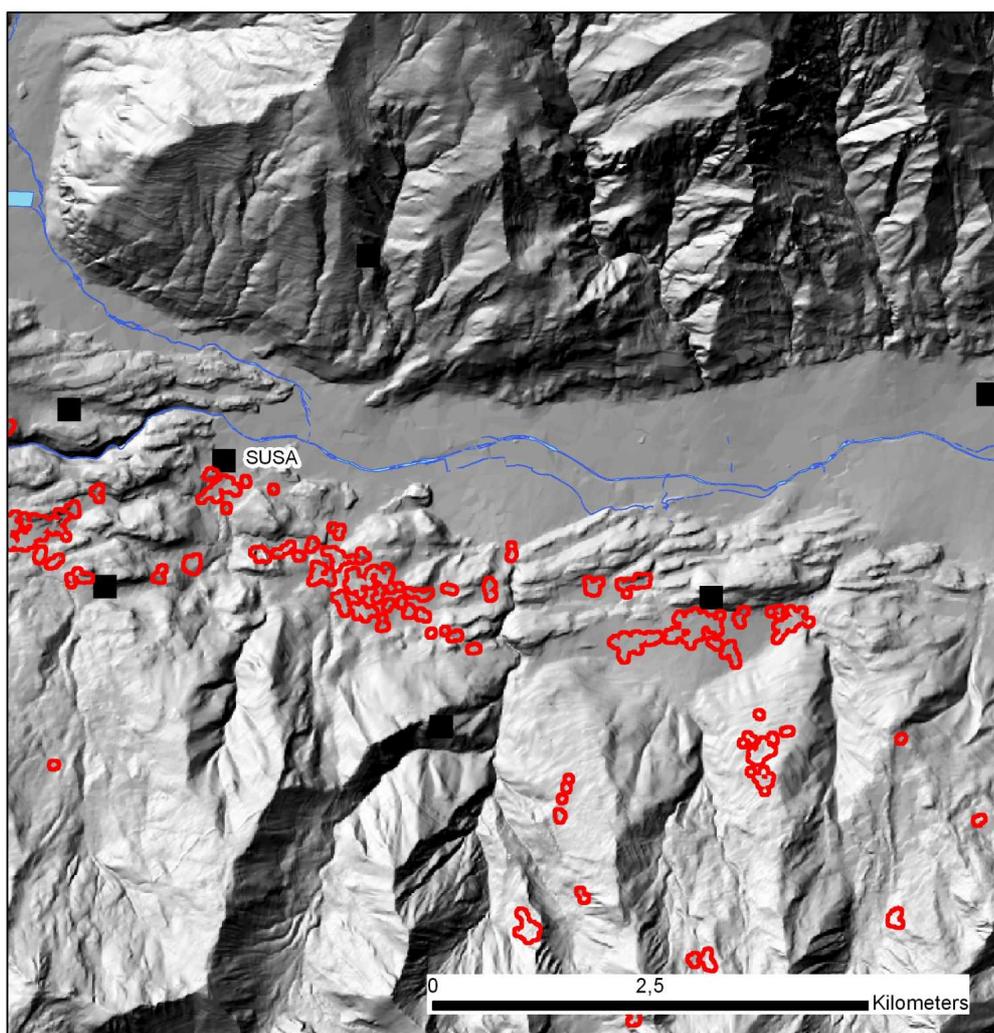


Fig.3.23. Esempio di aree anomale indicanti fenomeni di subsidenza localizzati sul fondovalle della Dora Riparia (dataset Prigelato_summer).

Le aree anomale vengono relazionate a processi e forme geologiche al fine di individuare/ipotizzare le cause delle deformazioni misurate. Si tratta di un'interpretazione geologica preliminare a scala regionale che andrà successivamente verificata con l'analisi di dettaglio descritta nel capitolo successivo. L'interpretazione avviene mediante l'integrazione in ambiente GIS delle informazioni PSInSAR™ con altri dati "convenzionali" costituiti da (Fig.6.24):

- carte topografiche (CTR 1:10.000);
- carte geologiche-litologiche 1:100.000 o 1:50.000 (progetti CARG);
- inventario dei fenomeni franosi e database correlati (progetto IFFI);
- DTM, dal quale è possibile produrre la carte delle pendenze e quella dell'esposizione dei versanti. La mappa delle pendenze è utile per evidenziare possibili anomalie nella morfologia (terrazzamenti, nicchie di distacco, accumuli di frana). La carta dell'esposizione è invece fondamentale nella lettura dei PS al fine di comprendere il significato del segno dei PS;
- ortofoto IT 2000 eventualmente proiettate sul DTM mediante un opportuno software (es. ArcScene, il modulo 3D di ArcGIS);
- censimento delle attività estrattive in superficie ed in sottoterraneo;
- censimento discariche (www.webgis.csi.it);
- banca dati geotecnica ARPA Piemonte;
- banca dati monitoraggio fenomeni franosi ARPA Piemonte.

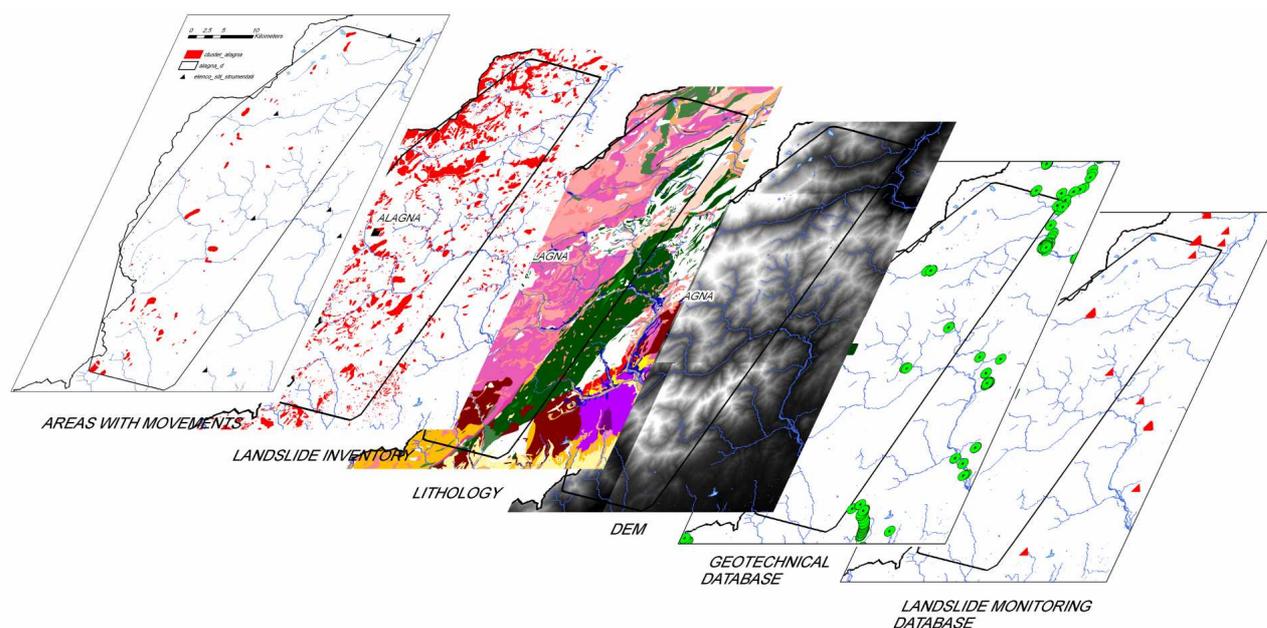


Fig.6.24: Dati utilizzati per l'interpretazione delle aree anomale

Le cause dei movimenti sono state suddivise come descritto nel capitolo 3.2.1. in:

1. fenomeno franoso
2. subsidenza naturale per consolidazione di terreni recenti sottoconsolidati o per la presenza di terreni "problematici" (torbe, terreni collassanti o soggetti al ritiro-rigonfiamento);
3. subsidenza naturale connessa a fenomeni di dissoluzione di rocce carbonatiche o evaporitiche;
4. subsidenza indotta da estrazione di fluidi dal sottosuolo;
5. subsidenza indotta da attività sotterranea (scavi per gallerie, attività mineraria);
6. subsidenza indotta da applicazioni di carichi (costruzioni, grandi opere) su superfici estese;
7. comportamento geotecnico differenziale del terreno di fondazione;
8. strutturale;
9. altro;
10. non determinato.

Ai fini dell'interpretazione occorre innanzitutto fare una distinzione tra le aree anomale ubicate in corrispondenza dei versanti in zona collinare e alpina e quelle localizzate in pianura e nei fondovalle.

3.2.3 AREE ANOMALE UBICATE IN CORRISPONDENZA DEI VERSANTI IN ZONA COLLINARE E MONTANA

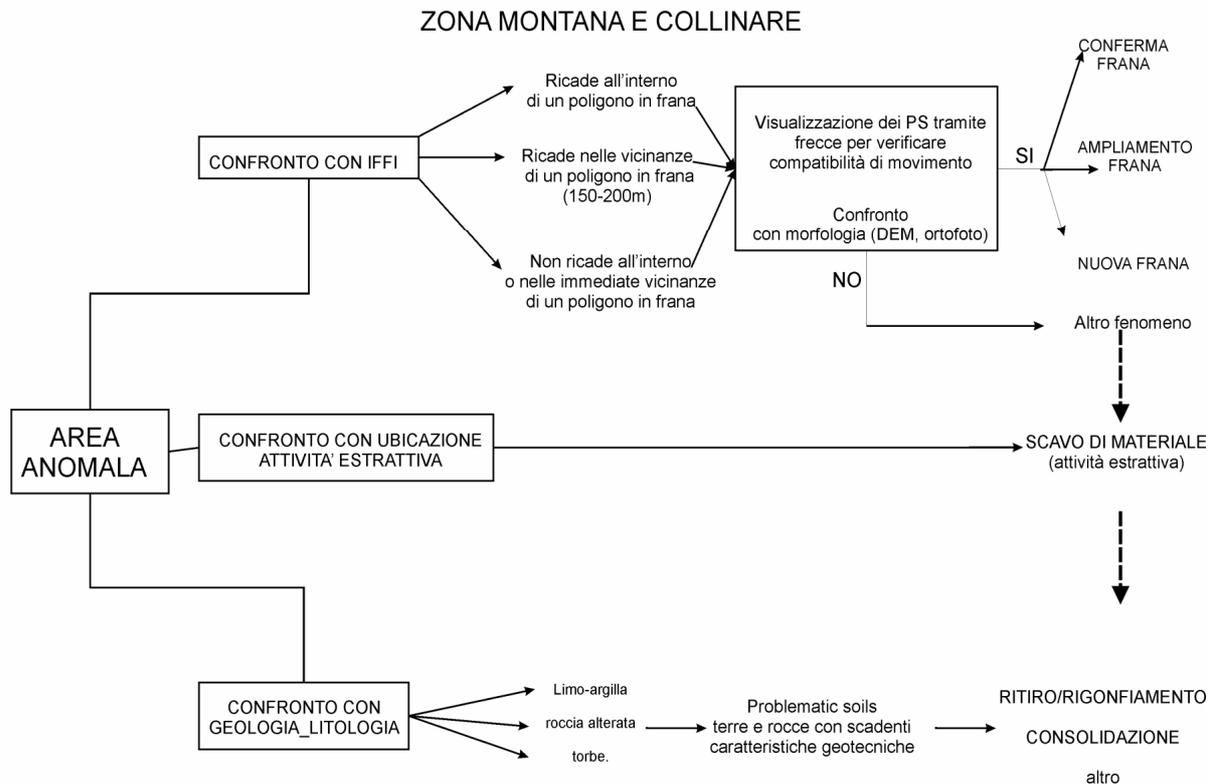


Fig.3.25. Metodologia di interpretazione delle aree anomale nel settore montano e collinare.

Il confronto con l'inventario IFFI (Fig.3.25.) è il primo passo per relazionare le aree anomale con possibili movimenti di versante e permette contemporaneamente un aggiornamento del censimento dei fenomeni franosi.

I possibili casi che possono verificarsi sono schematizzati come segue:

- 1) aree anomale all'interno di aree già mappate in frana (Fig.3.26). Occorre trovare delle indicazioni sulla consistenza dei movimenti indicati dai PS con la presenza del corpo franoso. Per esempio combinando l'uso di curve di livello e della mappa di esposizione dei versanti con la proiezione sul piano orizzontale dei PS (frecce che indicano la direzione ed il verso lungo i quali è stato misurato il movimento dai PS) è possibile definire la probabile direzione di movimento nel piano orizzontale. Il cinematismo della frana dedotto dalla classificazione riportata nel progetto IFFI può fornire un valido supporto in questa fase.

E' necessario tenere presente che le deformazioni ottenute con la tecnica PSInSARTM si riferiscono al bersaglio e quindi tali valori possono essere determinati anche da altri fenomeni non connessi a movimenti di versante. Occorre di conseguenza fare un'analisi del tipo di bersaglio, distinguendo in particolare se si tratta di PS naturali (roccia), generalmente più attendibili, o artificiali (edifici, antenne, ecc...) le cui condizioni di fondazione e caratteristiche strutturali possono essere responsabili delle deformazioni registrate.

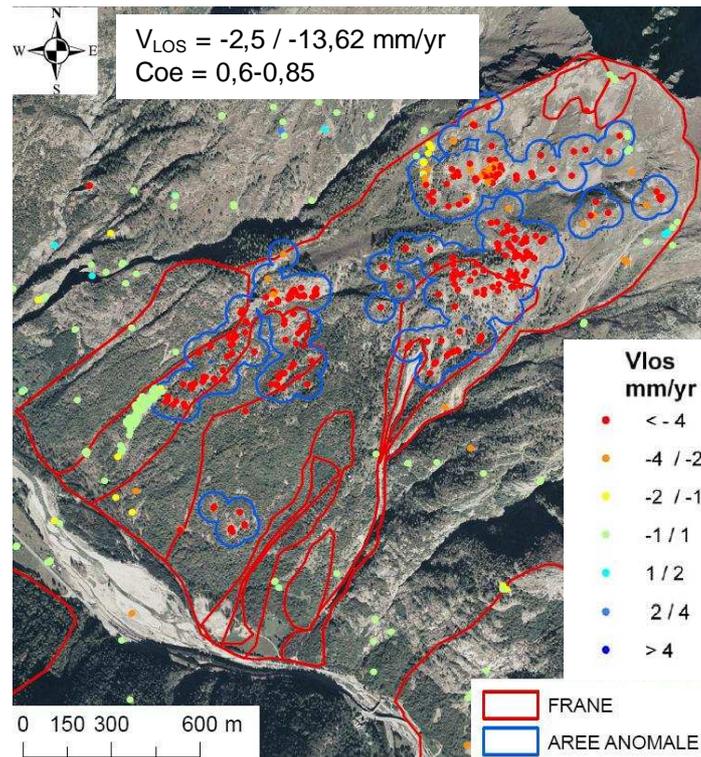


Fig.3.26: Esempio di area anomala all'interno di un'area già mappata in frana: DGPV di Riva Valdobbia, Val Sesia (BI), Zona dioritico-kinzingitica Area: 2 Km² 190 PS/km² (summer dataset)

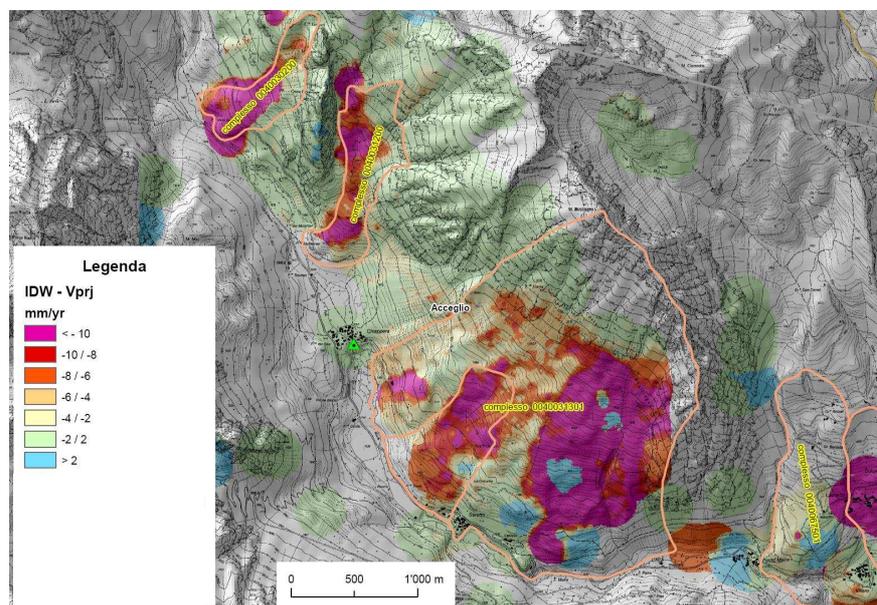


Fig.3.27: Frana di Acceglio (dataset Argentera full): suddivisione delle frane in diversi settori caratterizzate da differenti velocità. Laddove la densità dei PS è particolarmente elevata la distribuzione delle V_{LOS} può permettere la suddivisione del fenomeno franoso in diversi settori (Fig.3.27).

- 2) Aree anomale prossime ad aree mappate in frana (Fig.3.28). L'analisi della morfologia dell'area attraverso la carta delle pendenze, dell'esposizione e le ortofoto permettono di valutare la

possibilità di modificare i limiti del poligono in dissesto per comprendere l'area interessata dai PS. Se gli elementi morfologici non consentono di evidenziare la presenza di elementi che possano suggerire l'appartenenza ad un unico dissesto si può creare un nuovo poligono indipendente.

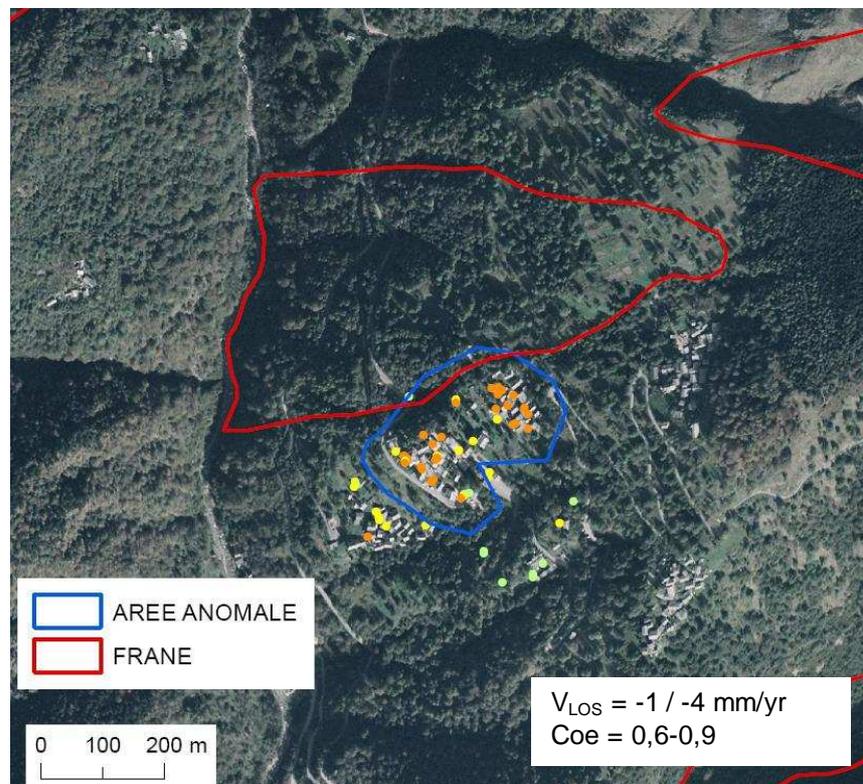


Fig.3.28: Alpi: Grondo (VC)

3) Aree anomale non in aree di dissesto

- identificazione e perimetrazione di nuove aree instabili non individuate con tecniche tradizionali (Fig.3.29)
- identificazione di nuovi fenomeni di dissesto – attività mineraria, cedimento terreno di fondazione per l'esistenza di terreni problematici, ecc. (Fig.3.30).

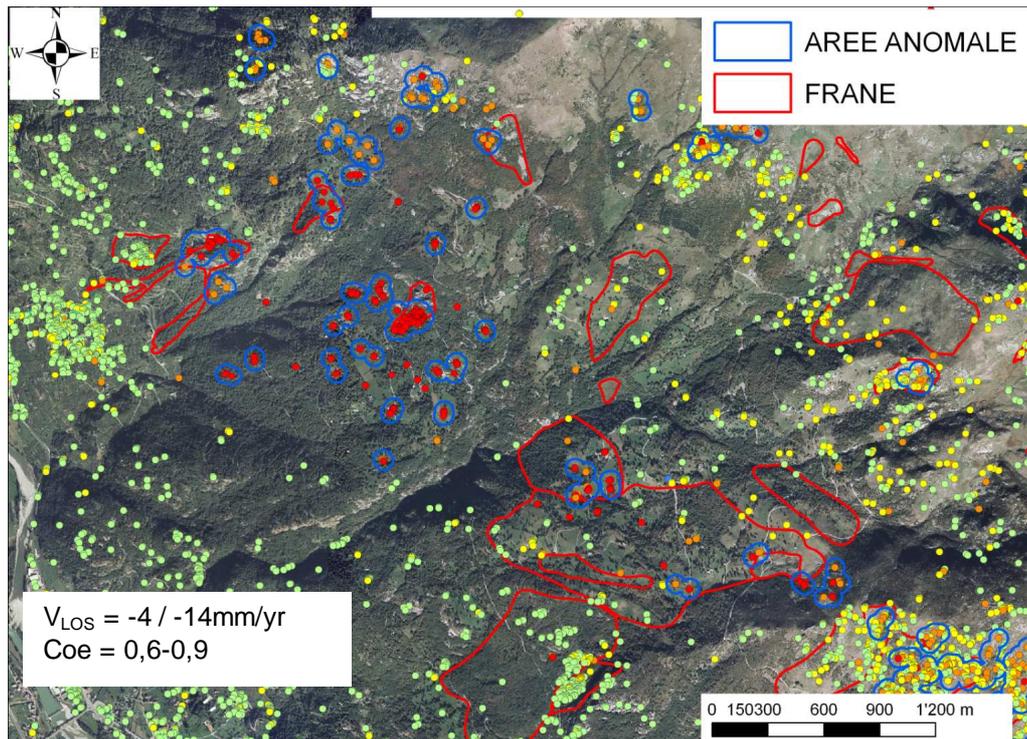


Fig.3.29: Carema (TO): L'Inventario IFFI ha individuato alcuni fenomeni rapidi e di limitate proporzioni, principalmente crolli in roccia e colamenti superficiali. L'analisi PSInSARTM ha messo in evidenza probabili movimenti più profondi non ancora conosciuti.

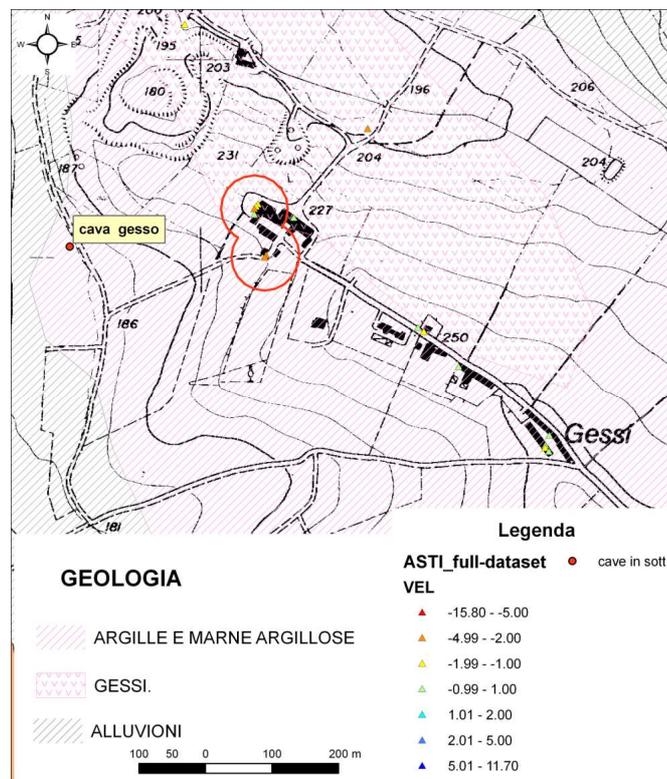


Fig.3.30 : La sovrapposizione con la carta inventario delle attività minerarie ha permesso l'identificazione di movimenti causati da attività estrattive in sotterraneo

Problematiche:

- L'individuazione di nuove frane e la modifica dei limiti di frane (Fig.3.31) già mappate richiede tuttavia un'indagine geomorfologia accurata tramite DEM e carte derivate, la fotointerpretazione e i rilievi di terreno. Infatti la distribuzione e densità dei PS è legata all'uso del territorio ed in particolare alla presenza di zone urbanizzate o rocce esposte e non sempre di conseguenza è possibile definire tramite l'analisi PSInSARTM dei limiti tra zone stabili e instabili.

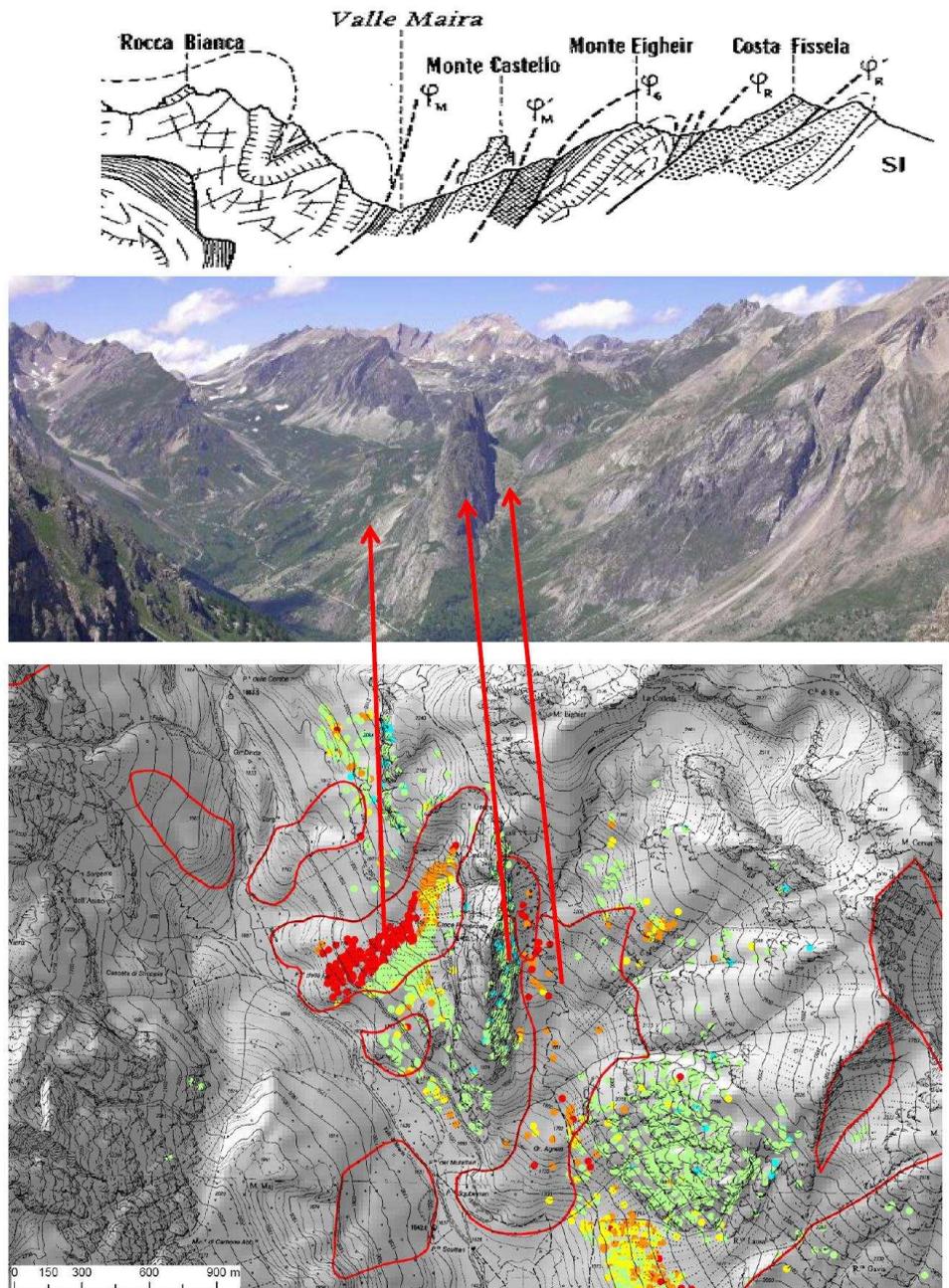


Fig.3.31: Frane di Acceglio. L'elevata densità dei PS ($1227 \text{ PS}/\text{km}^2$) permette di ripеримetrare il fenomeno franoso (di tipo complesso) sulla base delle differenze di velocità misurate dai bersagli radar.

- Non tutti i movimenti identificati in corrispondenza di fenomeni franosi sono direttamente attribuibili a frana. L'interpretazione dei dati interferometrici è risultata in alcuni casi difficile a causa dell'influenza di diverse componenti del movimento non sempre chiaramente distinguibili (es. sovrapposizione interazione terreno-struttura, dissoluzione di rocce solubili). Tale difficoltà è soprattutto evidente in ambiente appenninico e nelle Langhe.

Un esempio è l'area anomala ubicata in corrispondenza del paese di Sant'Agata in Appennino (Fig.3.32). La zona dal punto di vista geologico è caratterizzata dalla Formazione Gessoso-Solfifera su cui è impostato il paese e dai sovrastanti Conglomerati di Cassano Spinola. Una frana complessa è situata nel paese, è monitorata ed è attiva. Il movimento registrato dai PS si estende su un'area molto più vasta, non interessata da movimenti di versante (come evidenziato da rilevamenti di terreno), si tratta di un abbassamento probabilmente associato ad un fenomeno di dissoluzione dei gessi facenti parte della Formazione Gessoso-Solfifera.

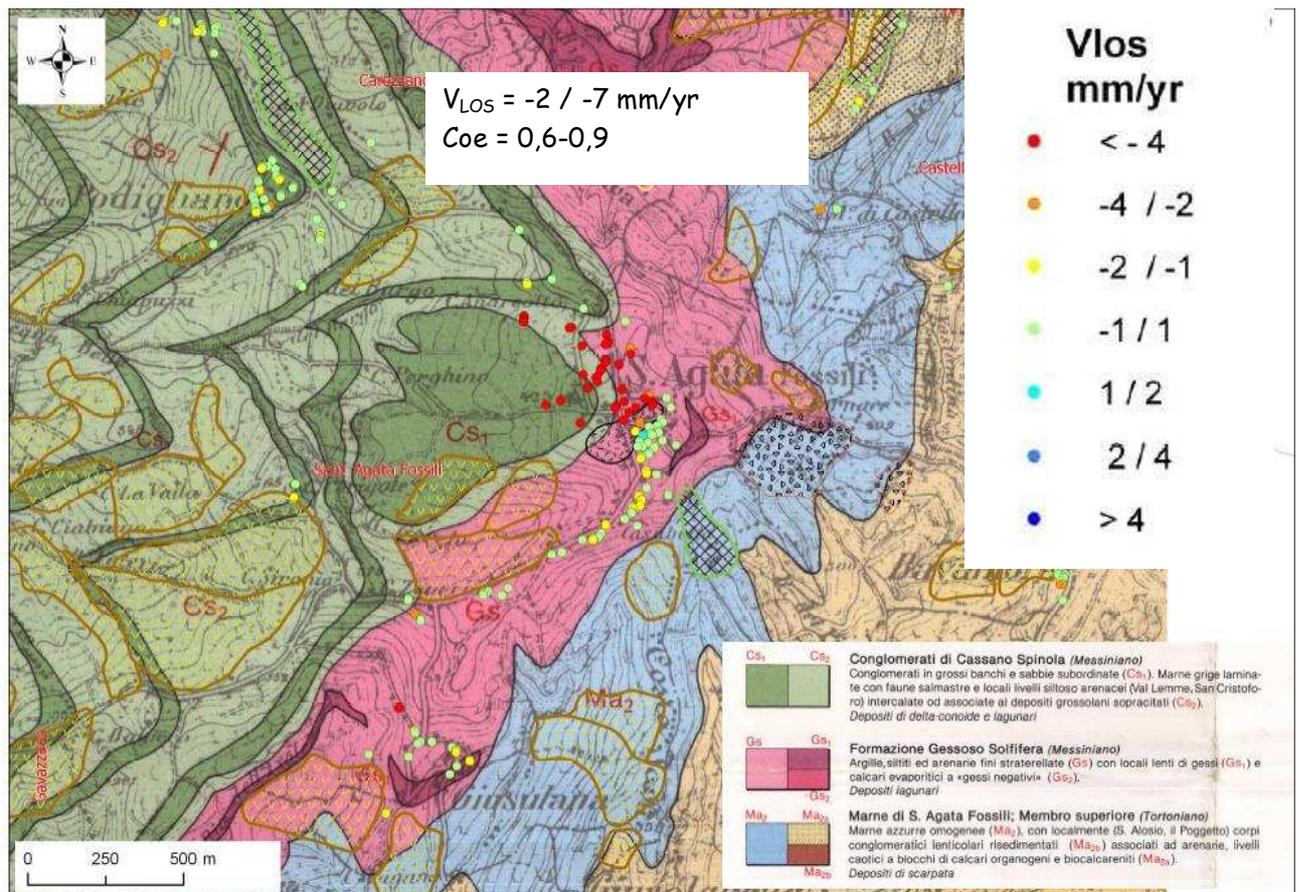


Fig.3.32: Probabile fenomeno di dissoluzione dei gessi (da Clari & Ghibaudo, 1983)

- Un numero elevato di aree anomale ricade in corrispondenza di accumuli detritici di versante (detriti di falda, ecc..) (Fig.3.33, 3.34). I PS in queste zone sono caratterizzati da movimenti anche significativi. E' assai probabile che si tratti di movimenti superficiali stagionali del detrito. La difficoltà di interpretazione potrebbero sorgere nel caso in cui tali coltri detritiche si trovino sul corpo di frana (Fig.3.34), risulterebbe infatti difficile la distinzione tra i fenomeni superficiali sopra descritti e gli eventuali movimenti più profondi dovuti al fenomeno franoso.

Tale peculiarità andrà studiata su alcuni casi significativi tramite la ricerca di correlazioni tra litotipo (proprietà del materiale), geometria delle discontinuità e distribuzione dei PS.

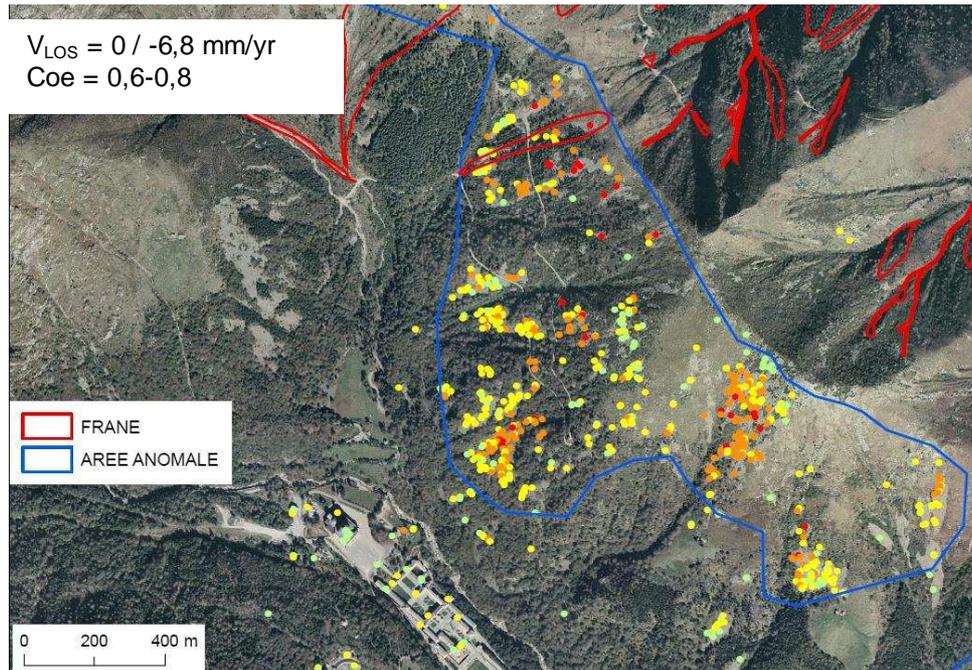


Fig.3.33: Alpi: Santuario di Oropa (BI)

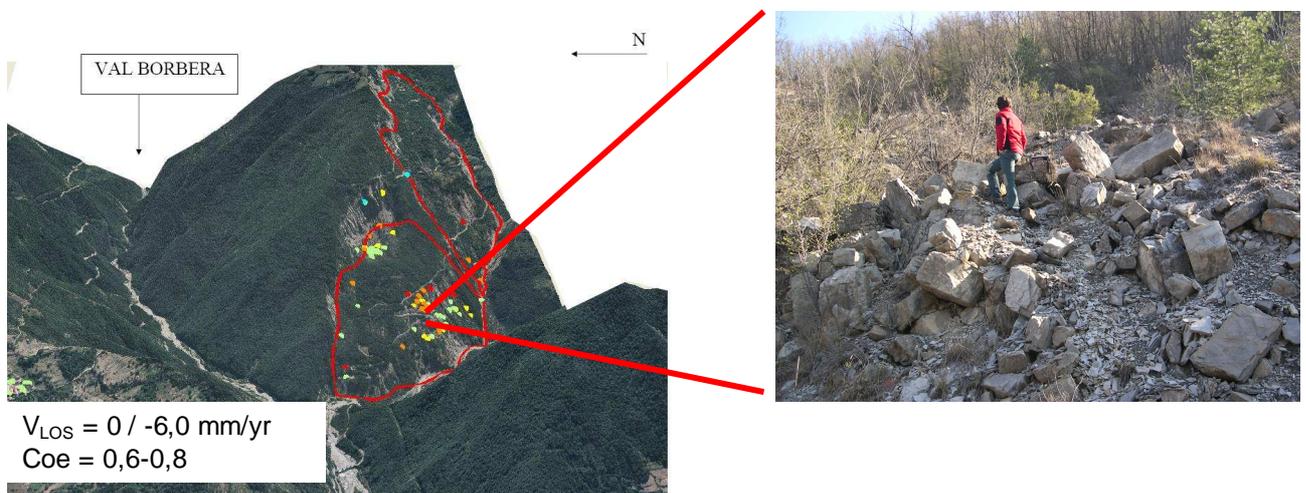


Fig.3.34: Appennino: Val Borbera (AL) Calcari di M. Antola

3.2.4 AREE ANOMALE UBICATE IN PIANURA E NEI FONDOVALLE

La fig.3.35. illustra l'interpretazione preliminare delle aree anomale localizzate in pianura e nei fondovalle. Considerato che i movimenti dei PS critici in ambiente di pianura o di fondovalle alluvionale sono sostanzialmente dovuti a fenomeni di "abbassamento" l.s., sono necessarie conoscenze relativamente dettagliate in ordine alla costituzione litologica di superficie e di sottosuolo, in particolare occorre conoscere:

- Aree con terreni dotati di scadenti caratteristiche geotecniche;
- Discariche di materiali inerti e discariche indifferenziate;
- Aree caratterizzate dalla presenza di terreni di riporto.

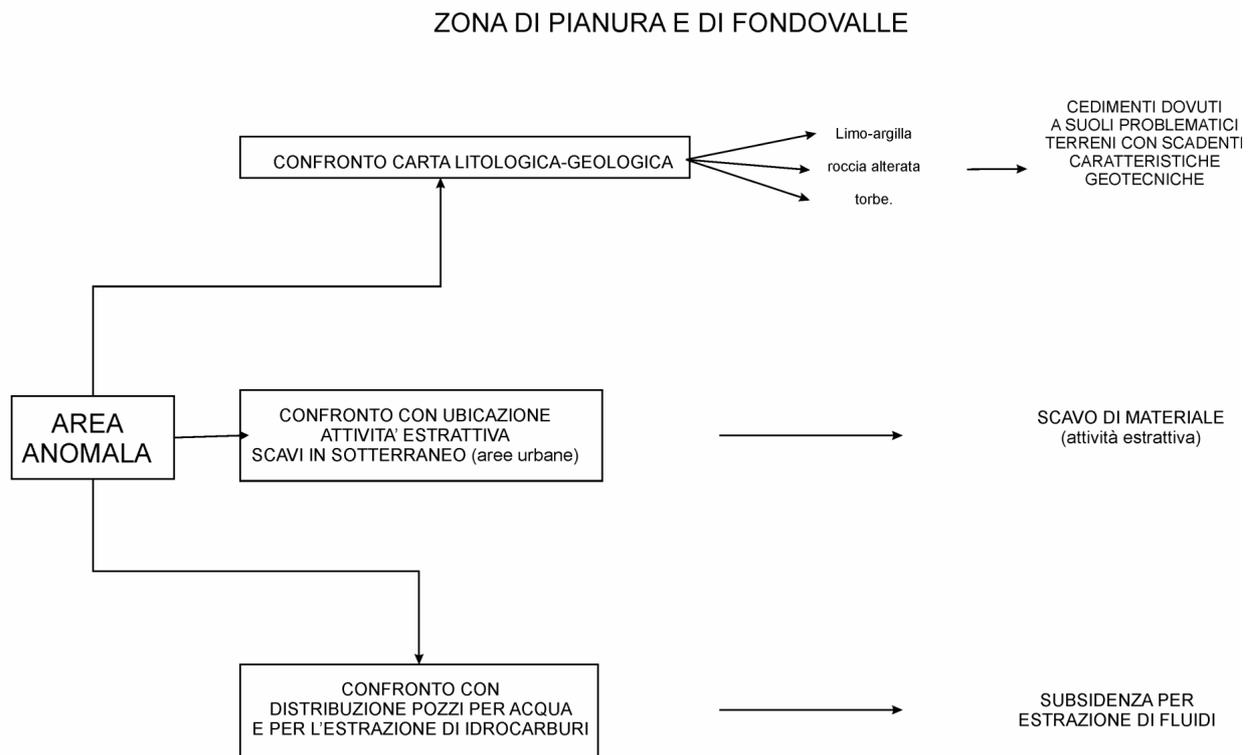


Fig.3.35. Metodologia di interpretazione delle aree anomale in pianura e nei fondovalle.

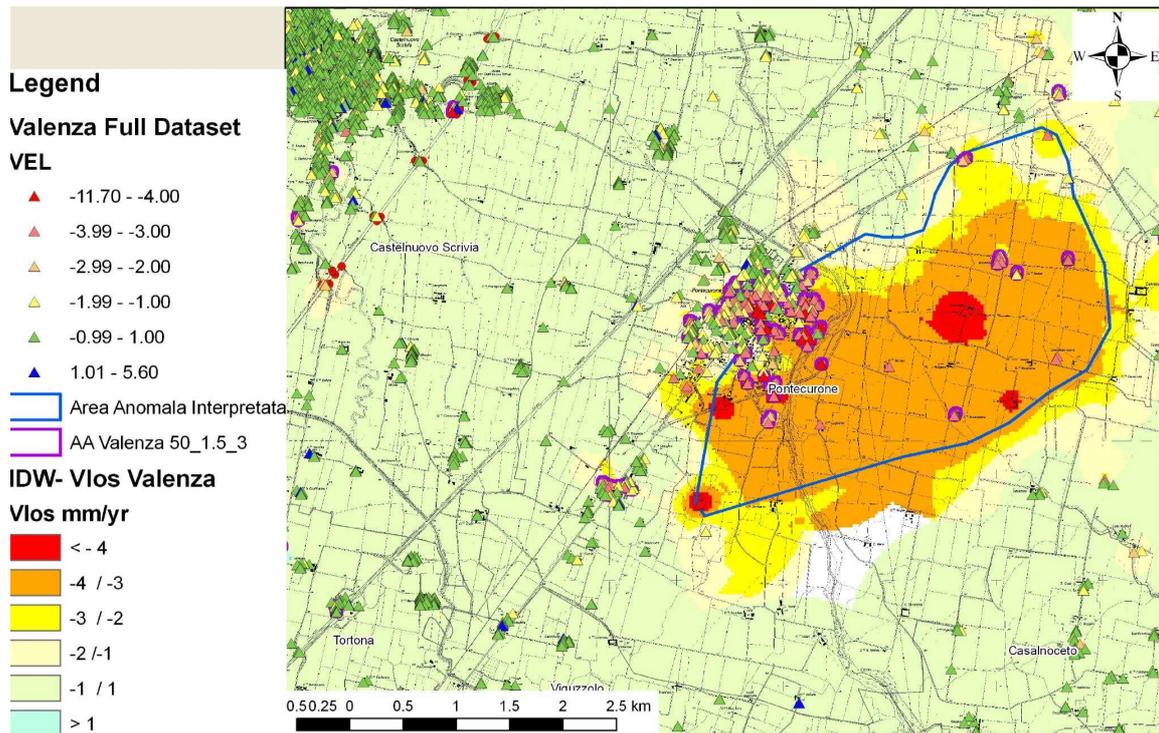


Fig.3.36: Esempio di area in subsidenza per estrazione di fluidi

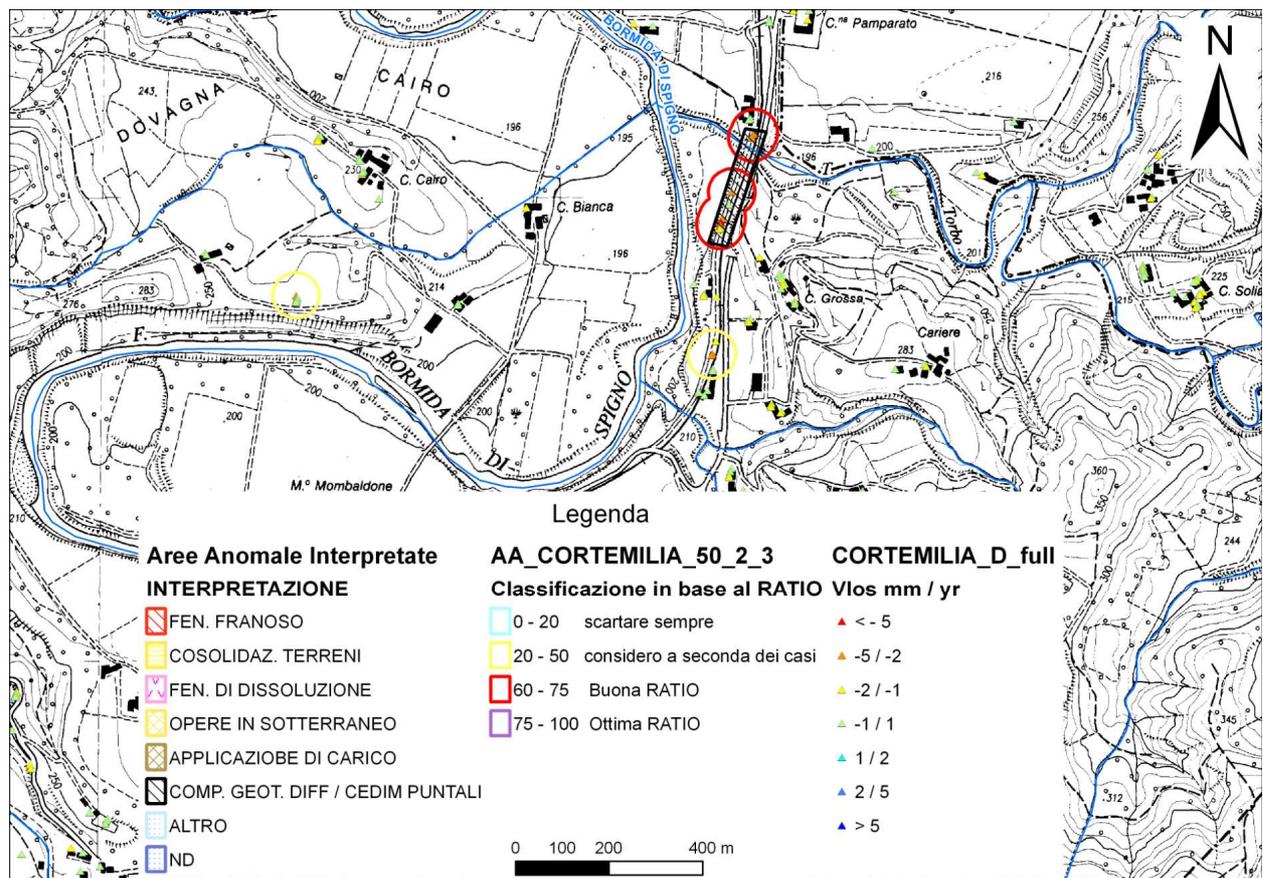


Fig. 3.37: Esempio di cedimento di rilevato ferroviario

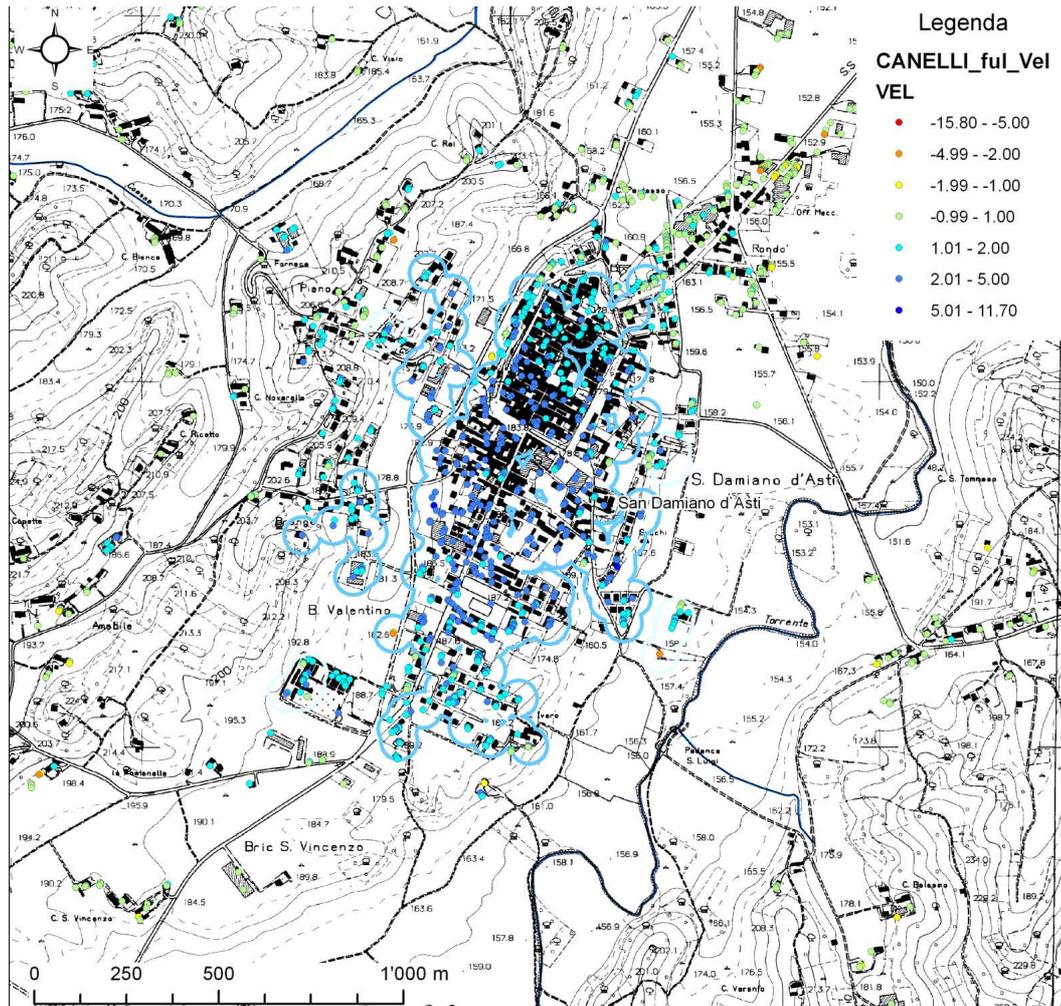


Fig. 3.38: Esempio di area anomala in sollevamento di cui non è stata determinata la causa.

3.3 SVILUPPO E COMPILAZIONE DI UN DATABASE RIGUARDANTE LE AREE ANOMALE

Il processo di analisi descritto nei paragrafi precedenti sia esso di tipo automatico che manuale, porta alla formazione di aree di interesse-anomale, caratterizzate come nel capitolo 3.1, da particolari pattern dei PS sia in termini di numerosità, di spazialità (relazione con strutture antropiche e morfologiche) che in termini di valori di velocità e coerenza.

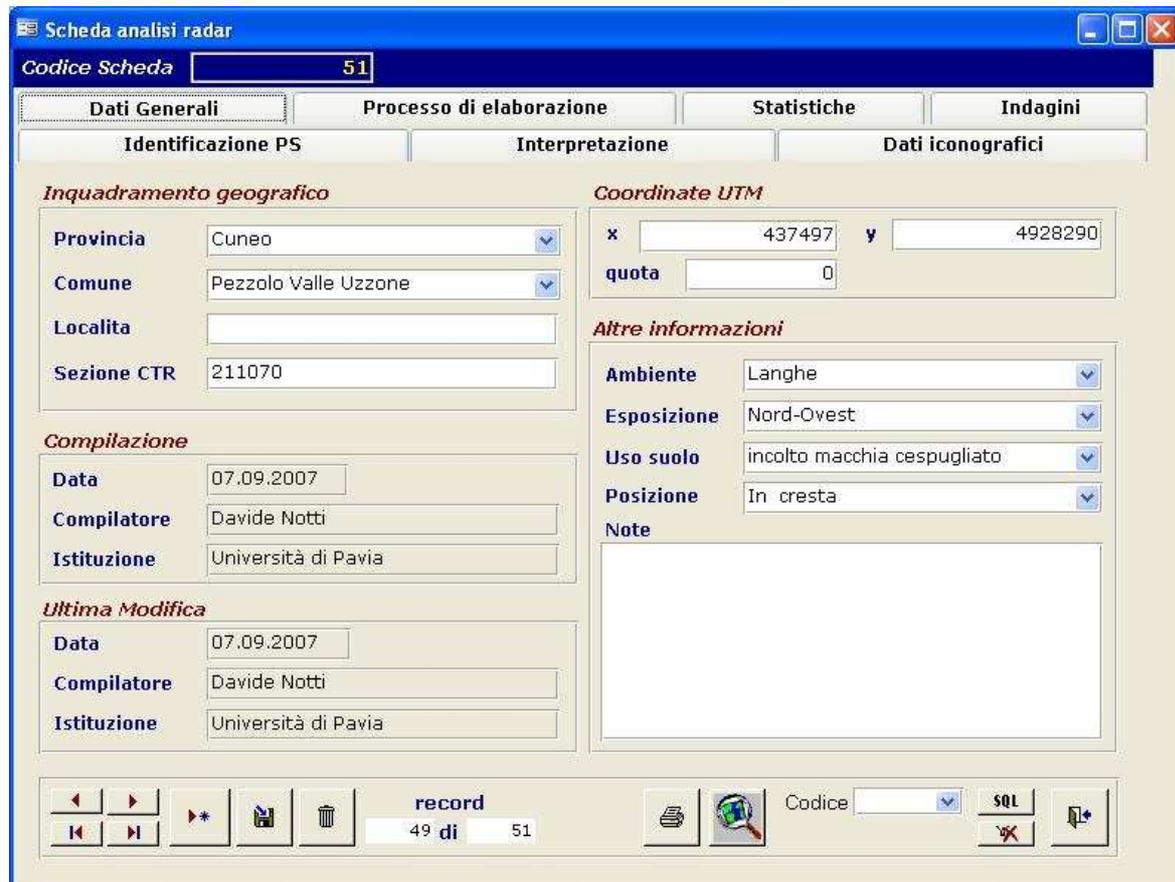
Queste aree di interesse non rappresentano dei prodotti geologici pronti all'uso, anzi nella maggior parte dei casi sono state "segnalate" dal complesso operatore-sistema come degni di nota, su cui operare analisi specifiche finalizzate all'interpretazione preliminare descritta nel capitolo 3.2.

Per un utilizzo delle informazioni raccolte sotto forma di "aree anomale", sulla base dell'esperienza della Regione Lombardia, si è sviluppato un sistema costituito da un database integrato ad un GIS.

L'intento è quello di fornire agli utenti un'interfaccia semplice ma capace di arricchire il prodotto dalla fase 1, mettendo a disposizione un ambito capace di portare alla vista tutte le informazioni disponibili, a concretizzare l'iniziativa di interpretazione geologica e rappresenta quindi un ambito a valore aggiunto. Di fondamentale importanza, inoltre, la possibilità di poter archiviare una serie di informazioni indirette legate alla tecnica PSInSAR™. Tra queste si possono annoverare le informazioni legate ai bersagli che identificano PS, la loro posizione nello spazio, la tipologia dell'elemento fisico o antropico ecc.. Inoltre esso permette:

- la gestione del complesso di informazioni del 2 livello di flusso di lavoro
- la pubblicazione e reportistica

Il database è in fase di validazione e implementazione.



The screenshot shows a software window titled "Scheda analisi radar" with a "Codice Scheda" field containing the value "51". The interface is divided into several sections:

- Dati Generali**: Includes "Identificazione PS" (Provincia: Cuneo, Comune: Pezzolo Valle Uzzone, Località, Sezione CTR: 211070).
- Processo di elaborazione**: Includes "Compilazione" (Data: 07.09.2007, Compilatore: Davide Notti, Istituzione: Università di Pavia) and "Ultima Modifica" (Data: 07.09.2007, Compilatore: Davide Notti, Istituzione: Università di Pavia).
- Statistiche**: Includes "Coordinate UTM" (x: 437497, y: 4928290, quota: 0).
- Indagini**: Includes "Dati iconografici" (Ambiente: Langhe, Esposizione: Nord-Ovest, Uso suolo: incolto macchia cespugliato, Posizione: In cresta) and a "Note" text area.

At the bottom, there is a navigation bar with icons for back, forward, search, and other functions, along with a "record" indicator showing "49 di 51" and a "Codice" dropdown menu.

Fig.3.39. Schema database DB-RADAR

3.4 3° FASE: INTERPRETAZIONE DI DETTAGLIO

L'interpretazione di dettaglio riguarda quelle aree anomale che, per grado di rischio associato, richiedono uno studio più approfondito. La tipologia e la quantità dei dati necessari per l'interpretazione varia a seconda del tipo di fenomeno che causa i movimenti (Tab.3.6).

L'interpretazione può essere suddivisa in tre fasi:

1° fase . La fase è rivolta alla ricerca e al recupero dei dati "convenzionali", tra i quali rivestono particolare importanza i dati topografici, rappresentati da:

- cartografia comunale 1:2000 o 1:5000 (ove disponibile), carte CTR (1:10.000),
- ortofoto,
- DTM.

Le carte geologiche 1:100.000 o 1:50.000 (progetti CARG) sono sufficienti nell'interpretazione speditiva preliminare, in quella di dettaglio occorre invece disporre di dati più completi consistenti in rilevamenti di terreno geologici, idrogeologici e geotecnici, stratigrafie derivanti da sondaggi geognostici, prove di laboratorio ed in situ (geofisiche e geotecniche).

Dati	ground motion trigger								
	neotectonic activity	groundwater extraction	oil-gas extraction	mining	landslide	collapsible soils	swell-shrinking soils	tunnelling	waste disposal
Topographical data	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Geology 2D	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Geology 3D	x	x	x	x	x	x	x	x	
Lithology		x	x	x	x	x	x	x	x
Superficials thickness					x	x	x		x
Mineralogical properties					x	x	x		
Local borehole data		x	x		x	x	x	x	x
Quarries / Underground Works				x					
Geotechnical properties		x		x	x	x	x	x	
Water Table		x			x	x	x		
Soil Moisture deficit							x		
temporal and spatial rainfall distribution					x		x		
Spring lines									
Extraction records		x	x						
Well locations		x	x						
Drainage Patterns					x		x		
Hydrogeological properties		x							
RS Optical Images	x	x	x	x	x	x	x	x	x
visible cracks / signs of ground deformation on buildings	x	x	x	x	x	x	x	x	

Tab.3.6 (Terrafirma, 2006)

Altri dati comprendono:

- l'inventario dei fenomeni franosi (progetto IFFI),
- la carta pedologica (utile nell'identificare per esempio i vertisuoli soggetti a fenomeni di variazione di volume),
- la carta geomorfologica (es. utile nell'identificazione di paleovalvei),
- la carta delle formazioni superficiali;
- la carta della distribuzione dei terreni soggetti a variazione di volume,
- l'inventario delle cave e miniere,
- l' inventario degli edifici lesionati;
- i dati di monitoraggio topografico, geotecnico e idrogeologico.

2° fase . Questa fase consiste nell'elaborazione dei dati precedentemente raccolti al fine di elaborare un modello geologico dell'area in cui sono stati individuati i movimenti "anomali". Il modello deve essere validato attraverso rilevamenti sul terreno, mirati a:

- verificare il quadro del dissesto eventualmente segnalato dalla documentazione pregressa, anche mediante interviste agli abitanti, agli amministratori locali o a tecnici (geologi), operanti sul posto;
- verificare le condizioni geomorfologiche e geologiche del sito;
- rilevare eventuali ulteriori dissesti o fenomeni non cartografati precedentemente;
- esaminare e rilevare fotograficamente, in relazione al numero dei PS critici presenti ed alle loro caratteristiche (velocità media, coerenza), l'eventuale presenza di fessurazioni negli edifici o deformazioni in manufatti di vario tipo (sedi stradali, muretti a secco o di sostegno, muri di recinzione e quant'altro);
- esaminare e rilevare fotograficamente eventuali deformazioni superficiali del terreno, riconducibili a fenomeni di versante, superficiali o profondi (ondulazioni, trincee, ecc.);
- rilevare gli indizi ritenuti significativi ai fini della interpretazione delle deformazioni eventualmente riscontrate sui manufatti presenti (ad esempio, insediamenti realizzati su terreni "compressibili" appena prima dell'inizio del periodo di misurazione satellitare; ecc.).

Il modello è assunto come base per lo sviluppo di scenari di deformazione (subsidenza, ritiro del terreno a causa di periodi siccitosi, fenomeni di dissoluzione, ecc..) che possono essere confrontati con i risultati della tecnica PSInSARTM.

3° fase. Le informazioni raccolte, omogeneizzate ed elaborate vengono sovrapposte in ambiente GIS ai dati interferometrici. Questi ultimi possono essere interpolati per facilitare il confronto. Alla fine di tale fase viene identificato e quantificato il fenomeno che ha provocato la deformazione.

4 ESPERIENZE DELLE SINGOLE REGIONI

4.1 UTILIZZO DEI DATI PSINSAR™ PER LO STUDIO DEI FENOMENI FRANOSI PIEMONTE

Come già anticipato lo scopo di questa prima sperimentazione è consistito nel verificare l'efficacia della tecnica dei *Permanent Scatterers* per il monitoraggio in remoto dei versanti; tale tecnologia infatti presentava in linea teorica buone potenzialità in una regione dove sono alquanto diffusi i centri abitati edificati sui corpi di "grandi antiche frane", le quali presentano alcune caratteristiche interessanti per la tecnica di monitoraggio satellitare, sono infatti arealmente estese e caratterizzate da parziali riattivazioni frequentemente con cinematica lenta, per lo più legata ai cicli stagionali.

Il primo obiettivo della sperimentazione è stato quello di verificare la presenza e diffusione dei riflettori radar sul territorio indagato.

Utilizzando una procedura di back-analysis, si è posta l'attenzione del comportamento dei PS su fenomeni già conosciuti per confrontare le risultanze dell'analisi satellitare con i dati già in nostro possesso. L'attività condotta su questi fenomeni ha avuto diversi punti focalizzanti che di seguito verranno descritti. La procedura di individuazione di tali fenomeni franosi è stata eseguita manualmente dall'operatore rispettando un criterio di conoscenza pregressa.

4.1.1 1 VALUTAZIONE IN SITU E IDENTIFICAZIONE DEI BERSAGLI RADAR

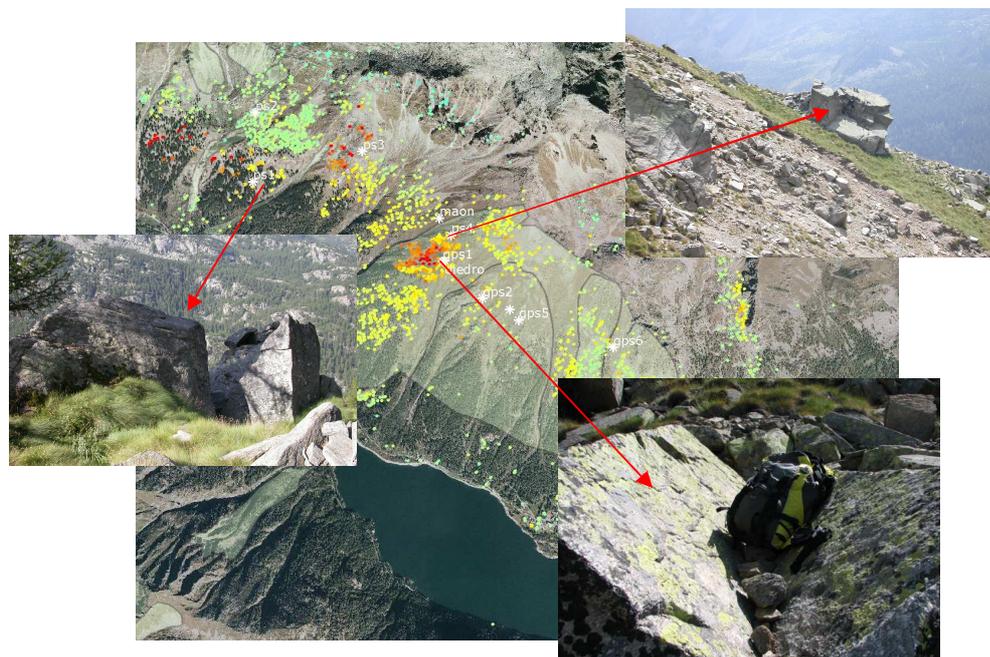


Fig 4.1 identificazione PS sulla frana di Ceresole Reale

In questo caso l'analisi condotta durante un sopralluogo sulla frana di Ceresole Reale ha permesso di mettere ben in evidenza quali fossero effettivamente in natura i bersagli candidati ad divenire PS. Nella fattispecie si può notare come elementi lapidei di grosse dimensioni e con particolari geometrie di fatturazione fossero ben visibili dall'elaborazione del dato satellitare. L'analisi è stata condotta utilizzando un ricevitore GPS con funzione di goto che ha permesso di raggiungere la posizione del bersaglio. Da mettere in evidenza anche il fatto che il posizionamento del PS sulla carta rispecchia i margini di errore di posizionamento del ricevitore GPS.

4.1.2 IDENTIFICAZIONE DEL MOVIMENTO IN UNA DEFORMAZIONE GRAVITATIVA PROFONDA DI VERSANTE

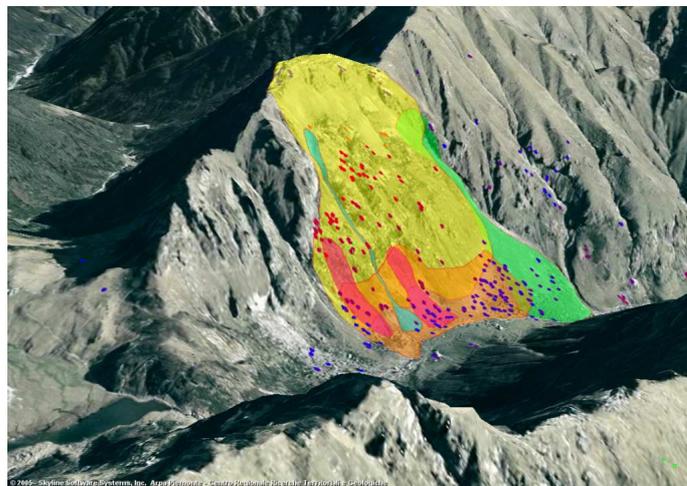


Fig. 4.2 frana dell'Alpe Baranca

L'esempio riportato in questo ambito ci pone di fronte alla DGPV dell'Alpe Baranca. L'immagine sopra riportata mette in luce due tipologie di movimento caratteristiche delle deformazioni gravitative profonde di versante. Nella porzione medio alta del versante infatti si può notare un notevole allontanamento dal satellite messo in luce da una nuvola di PS di colore rosso che stanno ad indicare in questo caso uno spostamento negativo maggiore di 7 mm all'anno. Nella parte di fondovalle invece i PS colorati in blu indicano deformazioni lungo linea sensore bersaglio (LOS) prossime allo 0. L'interpretazione qualitativa del dato PSInSARTM in questo caso, tenuto conto delle geometrie del versante in oggetto, mette in luce un progressivo abbassamento del versante nella parte medio alta del versante mentre la porzione di fondovalle manifesta un progressivo rigonfiamento che da luogo ad una serie di crolli in massa sulla parte frontale.

Un'ulteriore prova di questo movimento si è espressa alcuni mesi dopo l'alluvione dell'ottobre 2000 quando una grossa **trenche** si è aperta nella porzione alta del versante.



Fig. 4.3 trincea nella parte alta del versante dell'Alpe Baranca

Il dato PSInSARTM che si riferisce all'arco temporale 1992-2000, e quindi pre-evento, nella porzione alta del versante si interrompe proprio dove successivamente si è sviluppata la **trenche**.

Inoltre, dall'analisi di questa porzione di valle è interessante notare come la densità dei PS in area di frana risulti essere decisamente più cospicua rispetto alle porzioni di versante considerate stabili. Tale particolarità può essere giustificata dalla maggior pervasività della fatturazione delle rocce in zona di frana e anche dalla varietà delle superfici esposte che spesso danno origine a riflettori naturali.

4.1.3 LA TECNICA PSINSAR™ CONFERMA I DATI PRECEDENTEMENTE RILEVATI

L'analisi condotta in questo caso conferma i risultati derivanti dall'approccio classico di rilevamento che definisce un settore limitato del versante con un diverso stato di attività.

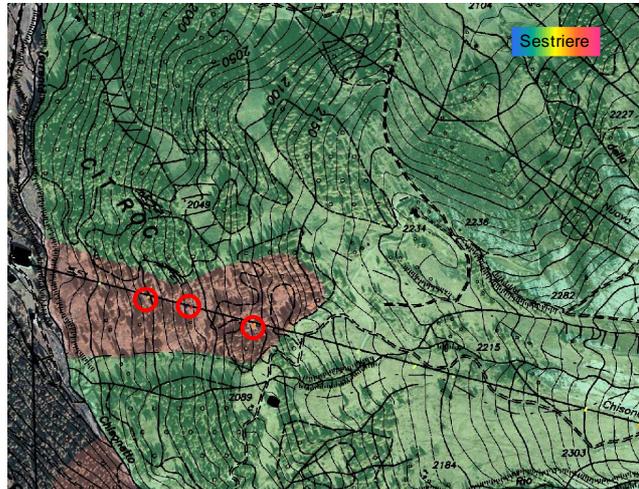


Fig. 4.4 Ps in movimento identificano i piloni della seggiovia in località Sestriere

L'area in esame mette in evidenza pochissimi PS rappresentati dai pali di un impianto di risalita del comprensorio sciistico del Sestriere. Lungo la linea dell'impianto i PS risultano sostanzialmente stabili nell'area verde precedentemente interpretata come quiescente mentre i tre cerchiati in rosso evidenziano un allontanamento dal satellite con velocità maggiore di 5 mm/anno e ricadono nel settore in frana di colore marrone che è stato interpretato dai rilievi di terreno precedentemente eseguiti come porzione di versante più instabile e attiva.

4.1.4 IDENTIFICAZIONE DI AREE A DIFFERENTE STATO DI ATTIVITÀ

In questo caso l'analisi PSInSAR™ si è stata focalizzata sull'individuazione di porzioni di versante a differente stato di attività.

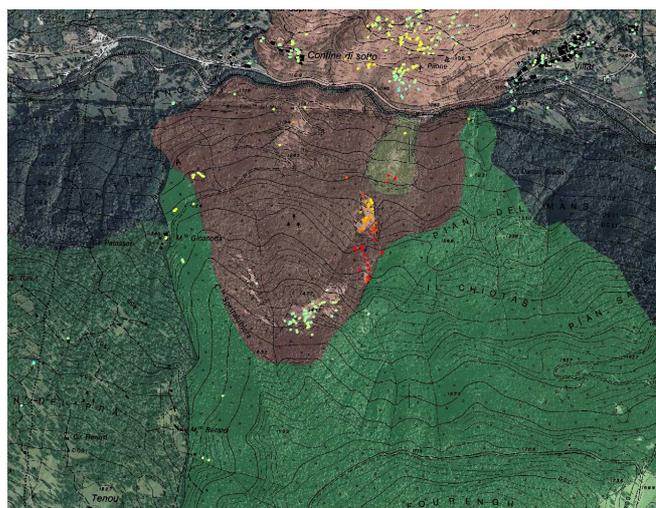


Fig 4.5 Area a differente stato deformativi in valle PO

Le nuvole di **Permanent Scatterers** mettono in luce, in questo caso, una piccola porzione di versante all'interno di questo fenomeno franoso in Val Varaita che mostra un differente stato di attività. Il fenomeno di deformazione posto sul lato sinistro, cerchiato in rosso, evidenzia dei significativi movimenti che

superano i 7 mm/anno. Grazie a questa analisi è stato possibile reinterpretare sia la geometria sia lo stato di attività del fenomeno franoso.

4.1.5 VALUTAZIONE DEI MOVIMENTI IN AREA CARATTERIZZATA DA FENOMENI COMPLESSI



Fig 4.6 versante prospiciente l'abitato di Carema (TO)

In quest'area posta allo sbocco della Valle d'Aosta il nostro inventario dei Fenomeni Franosi definiva alcuni fenomeni rapidi e di limitate proporzioni, principalmente crolli in roccia e colamenti superficiali.

L'analisi PSInSARTM ha avuto un duplice utilizzo; da una parte ha identificato settori di versante in movimento all'intorno delle nicchie di distacco dei crolli. Tale individuazione ha permesso di rivalutare la dimensione dell'area di sorgente di questi fenomeni.

Dall'altra, se si prende in considerazione tutto il versante, l'analisi PSInSARTM mette in evidenza chiaramente che i fenomeni superficiali rilevati sono da mettere in relazione ad un movimento più profondo che finora non era mai stato rilevato.

4.1.6 RILEVAMENTO DI FENOMENI FRANOSI NON ANCORA RILEVATI

L'esempio riportato qui sotto si riferisce ad un tratto di versante in Valle Pellice.

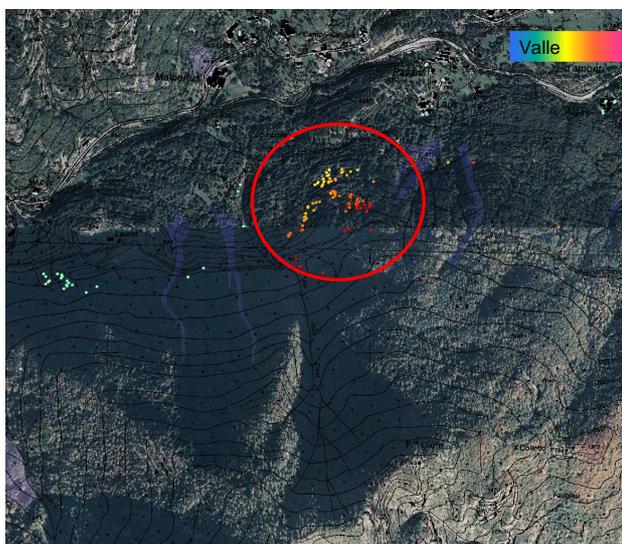


Fig 4.7 Area della valle Pellice di difficile interpretazione

In questo caso l'analisi PSInSARTM ci ha permesso di rilevare una zona soggetta a deformazione laddove la fotointerpretazione non mostrava chiari indizi morfologici unitamente alla difficoltà dell'area per un rilievo di terreno nonché l'assenza di materiale d'archivio aveva indotto il rilevatore a non considerare quest'area in frana.

4.1.7 RILEVAMENTO DI AREE DOVE LA FOTOINTERPRETAZIONE NON È RESA POSSIBILE

Grazie al fatto che l'analisi PSInSARTM non risente delle condizioni atmosferiche e del grado di insolazione del territorio (riprese anche in notturna) è stato possibile andare a rilevare fenomeni di deformazione anche dove le immagini ottiche non potevano essere utilizzate a causa dell'ombreggiamento della porzione di versante.

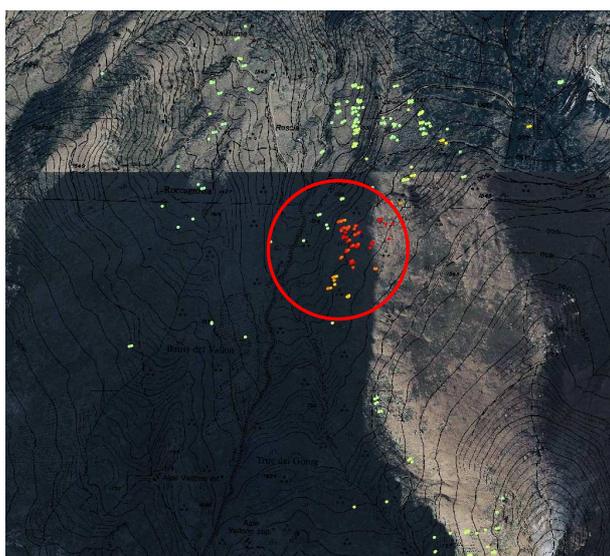


Fig 4.8 l'analisi PS permette di evidenziare fenomeni anche nelle zone in ombra delle foto aeree

4.2 Identificazione dei fenomeni franosi

La metodologia proposta si riferisce all'utilizzo della tecnica PSInSARTM nell'identificazione dei fenomeni franosi a scala regionale e alla definizione del loro stato di attività relativamente al periodo di monitoraggio satellitare (1992-2001).

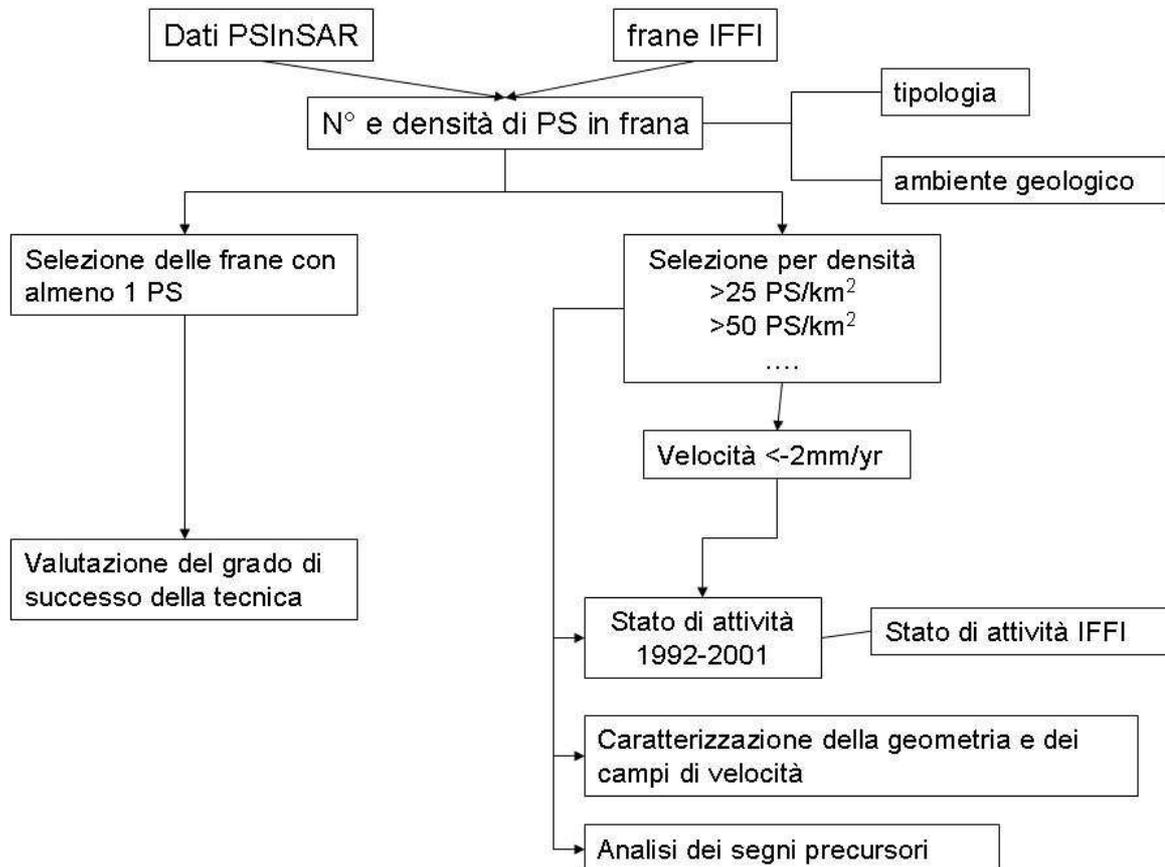


Fig.4.9: Identificazione di fenomeni franosi a scala regionale mediante la tecnica PSInSARTM

4.2.1 NUMERO E DENSITÀ DEI PS IN FRANA

L'analisi della distribuzione dei dati PSInSARTM rispetto ai fenomeni franosi è stata condotta in relazione ai diversi ambiti geologici della Regione Piemonte (Alpi e Prealpi, Langhe e Monferrato, Appennino e collina) e alla diversa tipologia. La semplice sovrapposizione in ambiente GIS dei due layer, ovvero i datasets PSInSARTM (full) e l'inventario IFFI, ha permesso di individuare la percentuale di fenomeni franosi che dispongono di informazioni interferometriche sia in termini di numero di PS presenti sul corpo di frana che in termini di percentuale di area in frana con PS (Tab. 4.1, 4.2, 4.3).

Nel settore alpino e prealpino il 19% dei fenomeni franosi presenta almeno 1 PS; i dati interferometrici sono per lo più localizzati (83,5% in termine areali) in corrispondenza delle cosiddette "grandi frane" (frane profonde caratterizzate da un'estensione maggiore di 0,2 km² e da movimenti lenti e continui che ben si prestano all'applicazione della tecnica PSInSARTM) (Tab.4.1.). Per questa tipologia di frana nel 60% dei casi i PS hanno registrato movimenti significativi (<-+2 mm/a).

TIPOLOGIA		% frane con PS	% area in frana con PS	% frane con densità > 50 PS/km ²
non classificato	0	1,9	0,9	1,7
crollo/ribaltamento	1	9,8	1,1	13,1
scivolamenti rotazionali/traslazionali	2	6,7	0,8	6,6
colamenti lenti	4	1,9	0,2	2,3
colamenti veloci	5	3,7	0,3	5,7
sprofondamenti	6	0,0	0,0	0,0
complesso	7	6,5	1,0	7,1
DGPV	8	0,6	0,1	0,8
aree soggette a crolli/ribaltamenti	9	41,1	11,2	45,8
aree soggette a frane superficiali	11	5,4	0,9	7,2
“grandi frane”		22,3	83,5	9,7

Tab.4.1. Distribuzione dei dati PSInSARTM in corrispondenza di fenomeni franosi in ambiente alpino e prealpino.

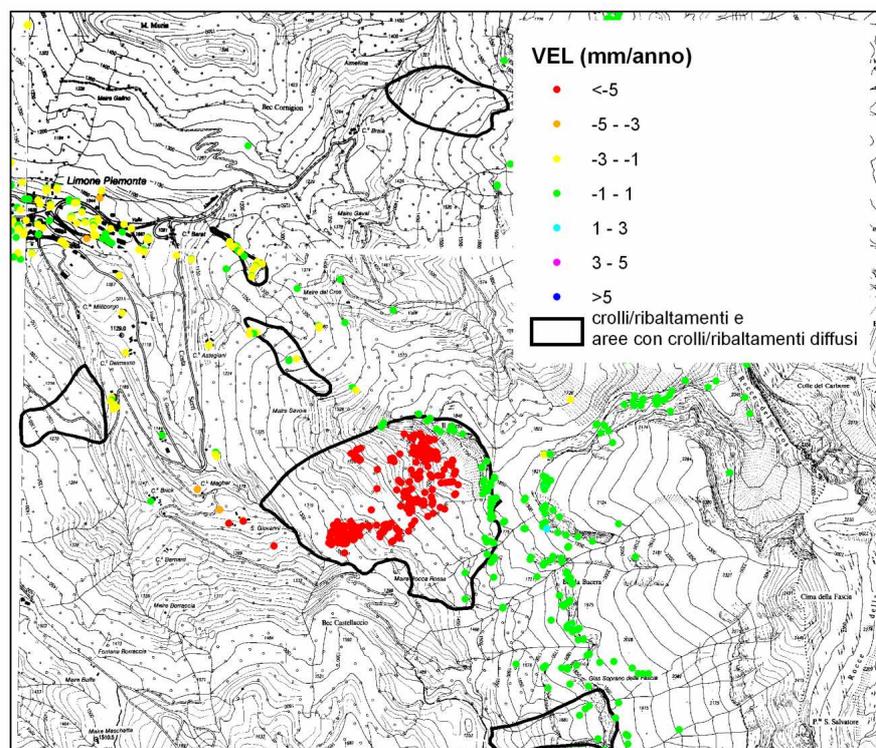


Fig.4.10. Esempio di frana di crollo con PS caratterizzati da movimenti significativi

E' da sottolineare la presenza elevata di PS (con densità molto alta, in alcuni casi anche >1000PS/ km²) in corrispondenza di crolli/ribaltamenti e di aree soggette a crolli/ribaltamenti diffusi, ovvero di frane a cinematiso rapido. I PS sono generalmente localizzati in corrispondenza delle pareti di roccia e degli accumuli di detrito al piede del versante, che, per le loro caratteristiche geometriche e per il fatto di essere costituiti da roccia nuda o da blocchi di roccia, sono dei buoni riflettori. Solo il 18% delle frane di questa tipologia con informazioni interferometriche presenta PS con significativi movimenti di abbassamento (<-2mm/a) (Fig.4.10).

In Appennino la percentuale di frane con informazioni interferometriche scende 12 % e si abbassa ulteriormente nella zona delle Langhe e del Monferrato (8%) (Tab. 4.2. e 4.3).

TIPOLOGIA		% frane con PS	% area in frana con PS
non classificato	0	10,3	3,0
crollo/ribaltamento	1	0,0	0,0
scivolamenti rotazionali/traslazionali	2	27,1	8,0
colamenti lenti	4	24,3	27,4
colamenti veloci	5	9,1	2,1
sprofondamenti	6	0,6	0,1
complesso	7	25,4	54,3
aree soggette a crolli/ribaltamenti	9	0,3	0,1
aree soggette a frane superficiali	11	2,9	5,0

Tab.4.2. Distribuzione dei dati PSInSARTM in corrispondenza di fenomeni franosi in ambiente collinare e appenninico.

TIPOLOGIA		% frane con PS	% area in frana con PS
non classificato	0	0,2	0,0
crollo/ribaltamento	1	0,0	0,0
scivolamenti rotazionali/traslazionali	2	24,9	12,5
colamenti lenti	4	4,0	1,1
colamenti veloci	5	0,0	0,0
sprofondamenti	6	0,1	0,1
complesso	7	3,4	1,3
aree soggette a crolli/ribaltamenti	9	0,5	0,1
aree soggette a frane superficiali	11	32,6	9,9
frane settore CARG	12	34,4	75,1

Tab.4.3. Distribuzione dei dati PSInSARTM in corrispondenza di fenomeni franosi nelle Langhe e nel Monferrato.

I risultati ottenuti indicano il buon successo della tecnica nell'identificazione dei fenomeni franosi soprattutto in ambiente alpino, dove la presenza di frane a cinematismo lento ed estremamente lento (Fig.4.11) e situate su versanti esposti a W-NW (situazione ottimale nel caso di orbita discendente) ha sicuramente contribuito alla presenza di un numero elevato di PS.

Le percentuali inferiori riscontrate negli altri ambienti sono attribuibili a:

- aree vegetate che limitano la presenza di PS (Appennino);
- frane a cinematismo intermittente, caratterizzate da movimenti rapidi connessi ad eventi alluvionali intensi (Appennino);
- evento alluvionale del Novembre 1994, che ha portato alla riattivazione/attivazione di fenomeni franosi rapidi (Langhe).

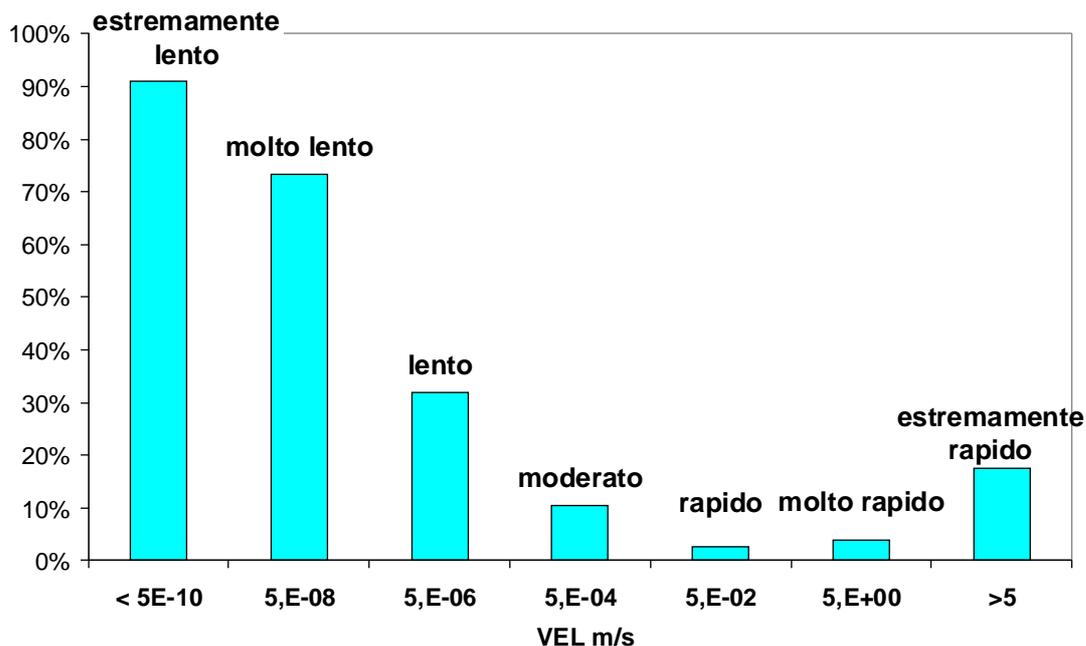


Fig. 4.11: Percentuale frane classificate in funzione della loro velocità con almeno 1 PS (velocità desunte da IFFI). Si osserva che nel caso di fenomeni lenti ed estremamente lenti il 90 % presenta almeno 1 PS.

4.2.2 DETERMINAZIONE DELLO STATO DI ATTIVITÀ

Lo stato di attività determinato mediante la tecnica PSInSARTM si riferisce al periodo di monitoraggio 1992-2001. A scala regionale la sua definizione richiede la selezione delle frane caratterizzate da una certa densità di bersagli permanenti (almeno 25 PS/km²) e l'individuazione di una soglia di velocità critica (sono state considerate attive le frane con $V_{LOS\ minima} < -2\text{mm/a}$).

La definizione dello stato di attività dei fenomeni gravitativi risente profondamente dell'approccio metodologico utilizzato nella fase di rilevamento dei caratteri cinematici propri di ogni frana, in quanto ogni metodo fornisce indicazioni di differente dettaglio ed affidabilità. L'inventario IFFI Piemonte ha definito lo stato di attività delle frane mediante un approccio essenzialmente geomorfologico, principalmente basato sulla fotointerpretazione. Questo ha reso difficoltoso il confronto con lo stato di attività desunto dai dati PSInSARTM.

4.2.3 CONTRIBUTO DELLA TECNICA PSINSARTM ALL'IDENTIFICAZIONE E ALLO STUDIO DEI FENOMENI FRANOSI IN RELAZIONE ALLA TIPOLOGIA DI FRANA E ALL'AMBIENTE GEOLOGICO

1) Grandi frane permanenti nelle Alpi

Si tratta di fenomeni che si sviluppano nel tempo e nello spazio in modo permanente con dislocazione di tutta la massa o di parte di essa e spostamenti lenti e contenuti (Ramasco *et al.* 2002). Le grandi frane permanenti presentano le seguenti caratteristiche (Fig.4.12.):

- Estensione > 0,2 km²
- Superfici di movimento profonde in roccia
- Velocità ridotte (da pochi millimetri ad alcuni centimetri anno)
- Movimenti tendenzialmente regolari e lineari con delle accelerazioni localizzate nel tempo
- Possibilità di fenomeni secondari più superficiali ad essi interconnessi (crolli, ribaltamenti, *debris flow*, fenomeni istantanei in genere).

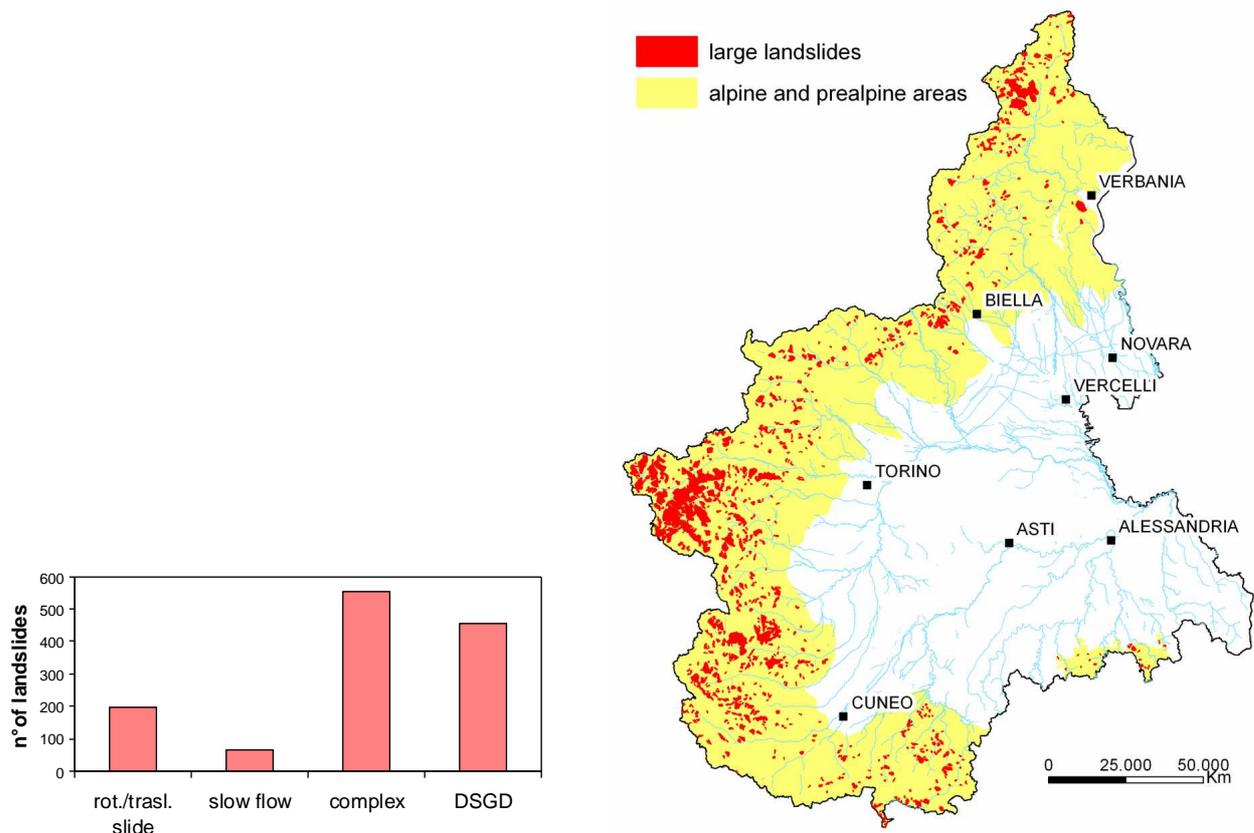


Fig. 4.12: Distribuzione e tipologie delle grandi frane permanenti in ambiente alpino e pre-alpino.

Lo studio e la comprensione di questi fenomeni risultano difficoltosi a causa di una serie di fattori quali:

- Difficoltà nella caratterizzazione della loro geometria e dei campi di velocità (difficoltà nel definire un limite netto tra aree interessate dalla DGPV ed aree indenni)
- Difficoltà nel comprendere a fondo i loro cinematismi
- La probabilità che si verifichi un evento parossistico che coinvolga l'intero ammasso è molto bassa, ma le conseguenze di un evento del genere possono essere disastrose (es. Val Pola, Vajont)
- Movimenti talmente lenti (quasistatico) in taluni casi al di sotto dell'errore strumentale delle tecniche di monitoraggio tradizionale.

Sono riportati di seguito alcuni esempi illustranti il contributo che la tecnica PSInSARTM può fornire allo studio e alla comprensione di tali fenomeni.

a) Identificazione dei fenomeni

Tali frane sono in molti casi ubicate su versanti esposti a N-NW e ben si prestano di conseguenza all'applicazione della tecnica PSInSARTM (orbita discendente), come comprovato dal fatto che il 21% delle grandi frane è caratterizzato da una densità di PS superiore a 50PS/km² (Fig.4.13). Le principali problematiche sono rappresentate da

- presenza di detrito superficiale, che come già più volte detto, può rendere difficile discriminare tra movimenti superficiali stagionali, creep e movimenti profondi;
- la presenza di aree vegetate e innevate, le quote elevate possono talora comportare una densità bassa di PS, spesso concentrati nella zona di fondovalle (Fig.4.14).

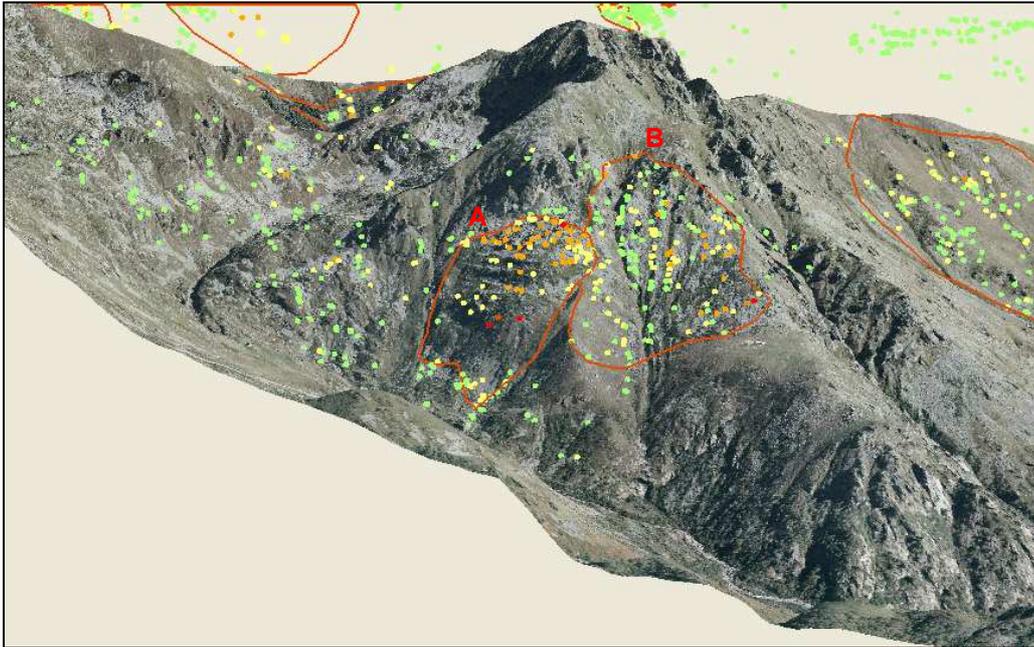


Fig. 4.13. DGPV del M. Mucrone A (dataset alagna, comune di Pollone- BI)

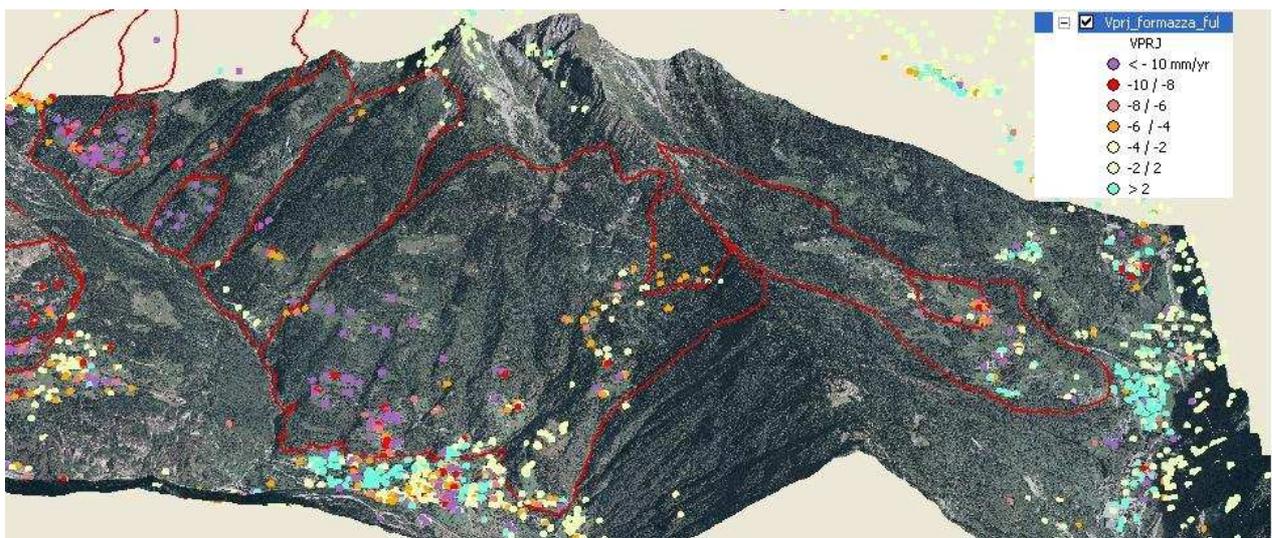


Fig.4.14.: Settore della Valdossola tra Baceno, Crodo e Varzo, caratterizzato dalla presenza di deformazioni gravitative profonde di versante.

b) Caratterizzazione della geometria e dei campi di velocità

L'elevata densità dei PS può fornire un contributo nella caratterizzazione della geometria della frana (distinzione tra aree stabili e non stabili, suddivisione in diversi settori a partire dalla distribuzione dei PS e delle loro velocità) e di conseguenza nella comprensione dei cinematismi.

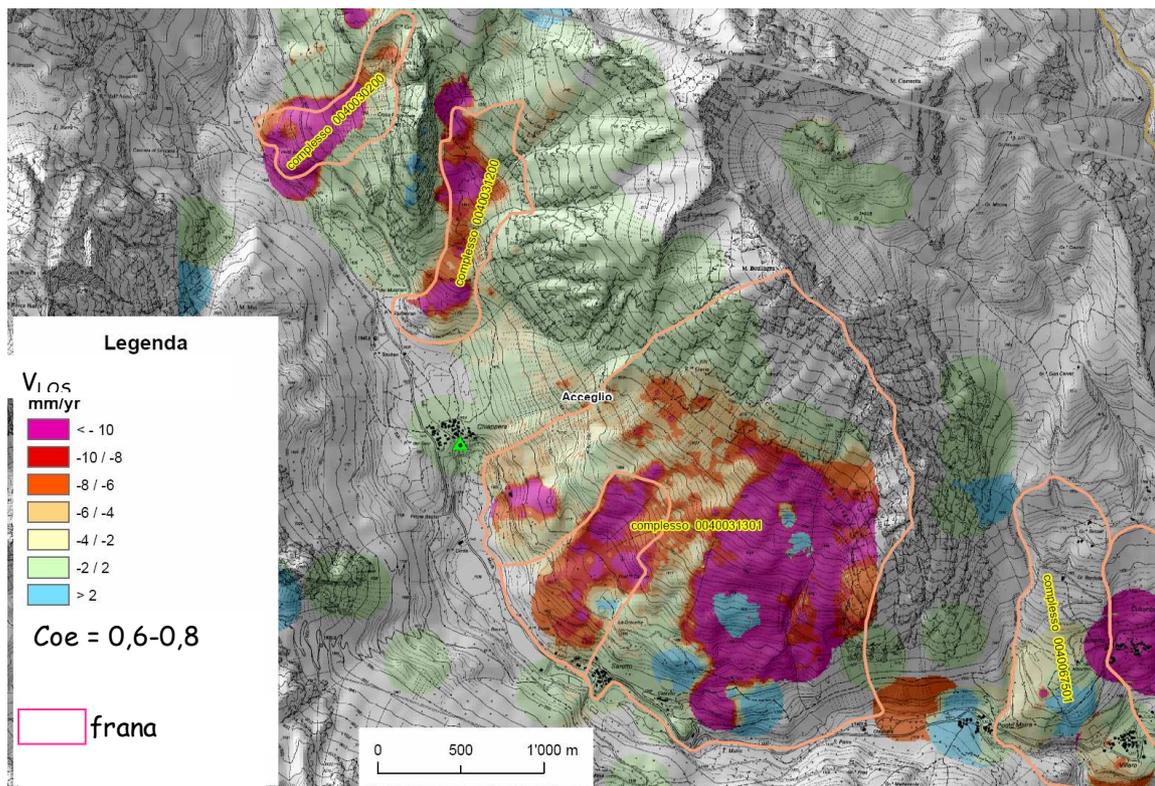


Fig.4.15. Frana di Acceglio (CN) (Area: 5,1 km²). La frana è caratterizzata da una densità di PS molto elevata (96 PS/km²). La V_{LOS} è stata interpolata con metodo IDW e ha permesso di evidenziare settori della frana caratterizzati da velocità differenti.

c) Analisi dei segni precursori (previsione delle deformazioni) Sono in grado i PS di identificare la fase di pre-rottura?

La DGPV dell'Alpe Baranca si sviluppa sul versante sinistro dell'alta Val Mastallone coinvolgendo totalmente un tratto di questo versante dalla cresta spartiacque fino al fondovalle. Il fenomeno ha coinvolto rocce appartenenti alla Serie Sesia-Val di Lanzo, rappresentate da micascisti e gneiss minuti, localmente molto fratturati, talora tettonizzati.

La Deformazione Gravitativa Profonda di Versante è caratterizzata da due settori nettamente differenziati dal punto di vista geomorfologico e dalla distribuzione delle V_{LOS} dei bersagli permanenti (Fig.4.15):

- un settore sommitale dove una serie di trench e sdoppiamenti di cresta dislocano la parte più francamente rocciosa della dorsale spartiacque
- un settore centrale di maggiori dimensioni, contornato da una fascia di pareti rocciose che costituiscono una sorta di coronamento e caratterizzato da un marcato rigonfiamento dovuto a fenomeni di dilatanza dell' ammasso roccioso, al piede del quale si trovano consistenti falde di detrito.

Nella primavera del 2001 è comparsa una frattura che si estende per circa 650 m con un rigetto di 4-6 m verosimilmente riferibile all'evento dell'ottobre 2000.

In figura 3.66 vengono confrontate le variazioni della V_{LOS} lungo il profilo topografico in asse frana. Il settore sommitale della DGPV risulta stabile ($V_{LOS}=0$), la parte intermedia presenta delle velocità elevate (>-16 mm/a) rispetto al settore sommitale e al piede della frana. La brusca variazione di V_{LOS} nella porzione intermedia appare correlata alla frattura che si è formata nella primavera 2001. In questo caso quindi le deformazioni pre-rottura sono ben visibili nel profilo delle V_{LOS} .

Analisi dei segni precursori (previsione delle deformazioni)

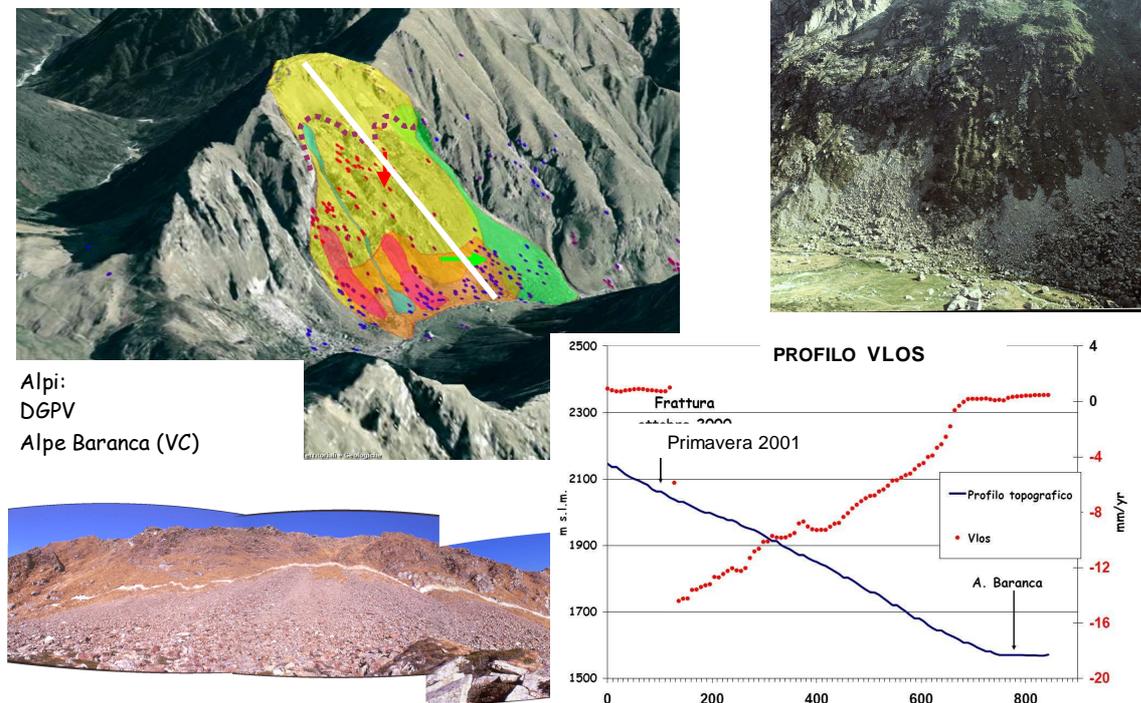


Fig. 4.16.: DGPV Alpe Baranca

2) Scivolamenti planari nelle Langhe

Il territorio delle Langhe è costituito da una vasta area collinare interessata da una serie di processi di instabilità per traslazione (scivolamenti planari). Le forme del rilievo sono condizionate dalla situazione strutturale, che ha portato alla formazione di un paesaggio a valli asimmetriche caratterizzate da versanti “lunghi” a scarsa pendenza (10° - 12°) immergenti a Nord-Ovest con stratificazione a franapoggio, e versanti “corti” ad elevata pendenza (30° - 40°) immergenti a Sud-Est con stratificazione a reggipoggio. Gli scivolamenti planari si attivano nelle formazioni tardo mioceniche, costituite in prevalenza da litotipi marnosi, marnoso-siltosi ed arenaceo-sabbiosi in successioni ritmiche e disposte con una giacitura monoclinale immergente verso NW con debole inclinazione (8 - 12°). La quota del piano di scivolamento varia da 2-3 m al di sotto del piano di campagna ad oltre 15 m, con massime profondità di circa 40 m Tali movimenti si originano lungo giunti aventi inclinazioni prossime a quelle dei pendii disposti a franapoggio e sono caratterizzati da un’alta ripetitività. I fattori scatenanti possono essere ricondotti essenzialmente alle particolari condizioni idrodinamiche che si instaurano lungo i versanti in seguito ad eccezionali eventi infiltrativi (Forlati & Campus, 1996).

Per quanto riguarda il cinematismo, questo passa attraverso:

- Una prima fase preparatoria che può perdurare nel tempo anche per alcuni decenni ma che si può ridurre a scarsi segnali premonitori precedenti di poche ore o minuti il collasso vero e proprio.
- Il movimento propriamente detto, cioè la traslazione in massa di uno o più blocchi solidali che dura in genere da alcune ore, nei fenomeni più ampi, sino a pochi minuti, in quelli più circoscritti.
- Una terza ed ultima fase comprende poi movimenti relativi di adattamento e demolizione delle zolle traslate fino a giungere, in tempo relativamente breve e per gran parte dei fenomeni, alla costituzione di una copertura detritica continua che oblitera il piano di scorrimento già visibile e nella quale mal si distinguono vaghe prominente derivate dalle masse più voluminose.

a) Identificazione dei fenomeni

Durante il periodo di monitoraggio satellitare l'evento alluvionale del Novembre 1994 ha comportato situazioni di stabilità generalizzate a vaste porzioni di versante, in particolare sono stati censiti oltre 1000 fenomeni di scivolamento planare.

In Fig.4.17 sono riportate le frane dell'evento del 1994 e le aree anomale individuate nel presente studio. Dal loro confronto emerge che nessuna area anomala si trova in corrispondenza delle frane dell'evento 1994. Tale fatto è probabilmente dovuto alle elevate deformazioni (durante la fase di collasso si registrano velocità variabili da alcuni decimetri a centinaia di metri all'ora) che hanno comportato la perdita di coerenza dei PS.

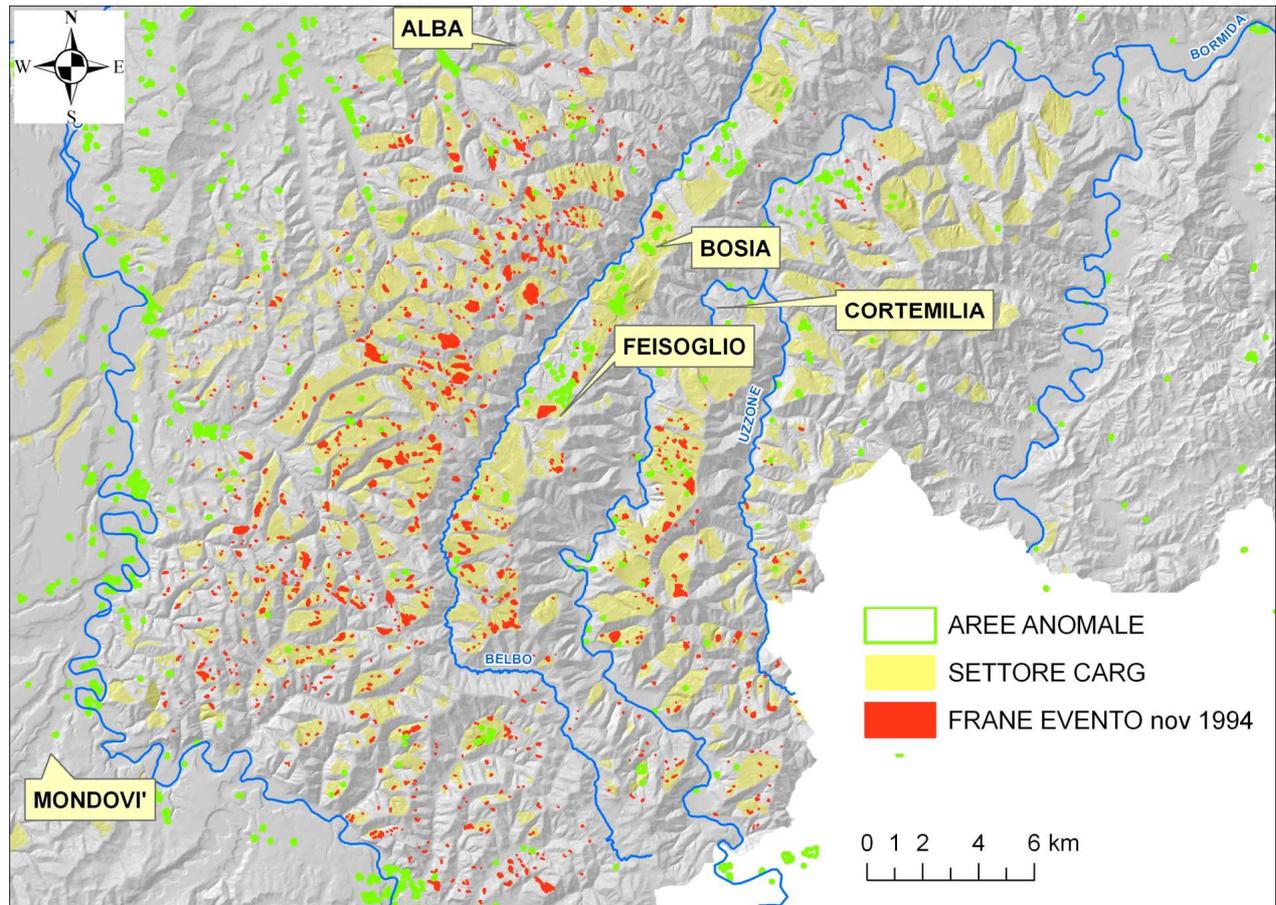


Fig.4.17.: Confronto tra la distribuzione delle aree anomale, le frane dell'evento alluvionale del Novembre 2004 e i "settori Carg"

Il progetto CARG ha introdotto il concetto di "settore" definito come unità morfologica, che si può estendere a interi versanti, individuata dalla presenza di frane pregresse, di elementi morfo-strutturali non databili legati alla dinamica gravitativa. Tale unità rappresenta la normale evoluzione dei versanti per frane di scivolamento planare, secondo uno stile successivo e/o multiplo, ma talora può coincidere con un unico corpo di frana di grandi dimensioni.

Molte delle aree anomale individuate ricadono in corrispondenza di questi settori. In particolare appare interessante la concentrazione di queste aree in un tratto di versante tra Bosia e Feisoglio (Fig.4.18). In questa zona sono presenti alcune delle frane di maggiori dimensioni che si sono attivate in epoca storica. Le velocità che in questo caso sono state proiettate lungo il pendio (vedi capitolo successivo) ed interpolate mettono in evidenza movimenti anche superiori ai 5 mm/a che potrebbero essere in relazione a movimenti di assestamento post-rottura (terza fase dell'evoluzione di questi fenomeni).

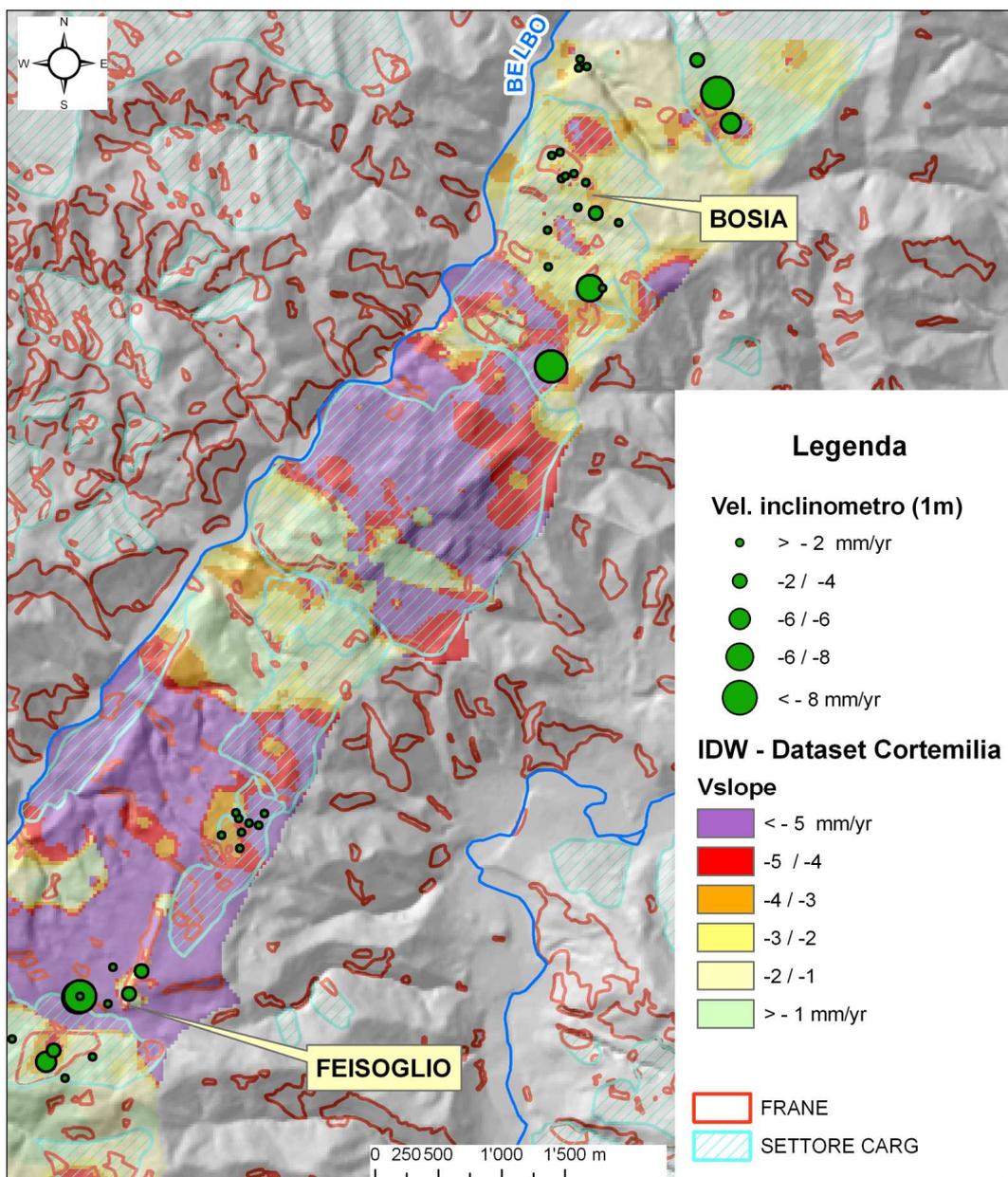


Fig. 4.18: Particolare della zona tra Bosia e Feisoglio

In generale le frane di scivolamento planare ben si prestano all'applicazione della tecnica PSInSAR™ per i motivi di seguito esposti:

- si sviluppano su versanti esposti verso NW con scarsa pendenza, quindi ottimali per orbite discendenti;
- si tratta di movimenti traslativi paralleli al pendio, in questa situazione è possibile proiettare la VLOS lungo pendio (vedi capitolo successivo);
- movimenti lenti durante la fase preparatoria (pre-rottura) e la fase finale (post-rottura).

Le principali problematiche risultano legate all'elevata velocità del movimento nella fase di collasso con conseguente perdita dei PS.

3) Frane complesse e colamenti lenti in Appennino

I movimenti di versante più importanti in Appennino corrispondono a frane complesse (movimenti rotazionali che evolvono in colamenti lenti) e a colamenti lenti per lo più in detrito (molti sono caratteristici dei Calcari di Monte Antola). L'attività di tali fenomeni è caratterizzata da movimenti lenti con riattivazioni stagionali o in occasioni di eventi meteorici intensi.

a) Identificazione dei fenomeni

Un esempio è costituito dalla frana in località Montaldo di Cosola e Aie di Cosola (Comune di Cabella Ligure, Provincia di Alessandria). Si tratta di una frana complessa che si è riattivata a seguito degli eventi alluvionali dell'autunno 1993. Il movimento di versante si è sviluppato su un accumulo detritico, di spessore variabile tra i 20 ed i 35 m attribuibile ad un antico episodio franoso, localizzato sopra un substrato calcareo-marnoso. La frana, innescata dall'incisione del Rio Montaldo, si esplica attraverso lenti ma continui movimenti. La superficie di scivolamento più superficiale è localizzata a circa 13,5 metri di profondità, in corrispondenza di uno strato argilloso intercalato tra due strati di limo-sabbioso (Fig.4.19.).

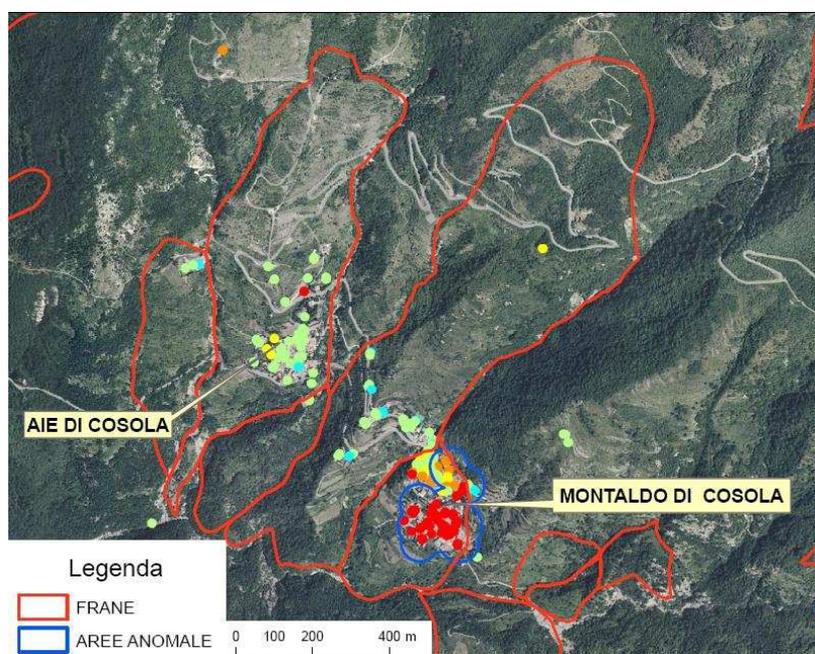


Fig. 4.19.: Frana di Montaldo e Aie di Cosola

L'analisi interferometrica ha identificato due settori nettamente distinti in corrispondenza del paese di Montaldo di Cosola, il settore di SE è caratterizzato da movimenti estremamente levati (>10 mm/anno) che sono in buon accordo con il quadro fessurativo degli edifici.

I colamenti lenti e le frane complesse dell'Appennino sono quindi caratterizzate da movimenti lenti che ben si prestano al monitoraggio satellitare e permettono laddove presenti di distinguere diversi settori caratterizzati da V_{LOS} differenti.

Le principali problematiche sono legate ai seguenti motivi:

- esistenza, specialmente in corrispondenza della placca del M. Antola, di vaste aree vegetate che limitano il numero di PS;
- PS corrispondenti nella maggior parte dei casi ad infrastrutture antropiche e quindi concentrati nei nuclei urbani, ne è conseguenza la bassa densità di PS che di solito si riscontra in corrispondenza dei fenomeni franosi;
- riattivazioni dei fenomeni a seguito di eventi alluvionali stagionali o pluriennali (movimenti non lineari).

4.2.4 ANALISI COPERTURE DATI PSINSAR™ SULLE FRANE MONITORATE DEL PIEMONTE

La metodologia di analisi dei dati PS-INSAR nei siti strumentati proposta consiste in un'analisi quantitativa delle velocità segnalate dai PS rispetto alle velocità ricavate dalle misure dei diversi strumenti installati e può essere riassunta nello schema seguente.

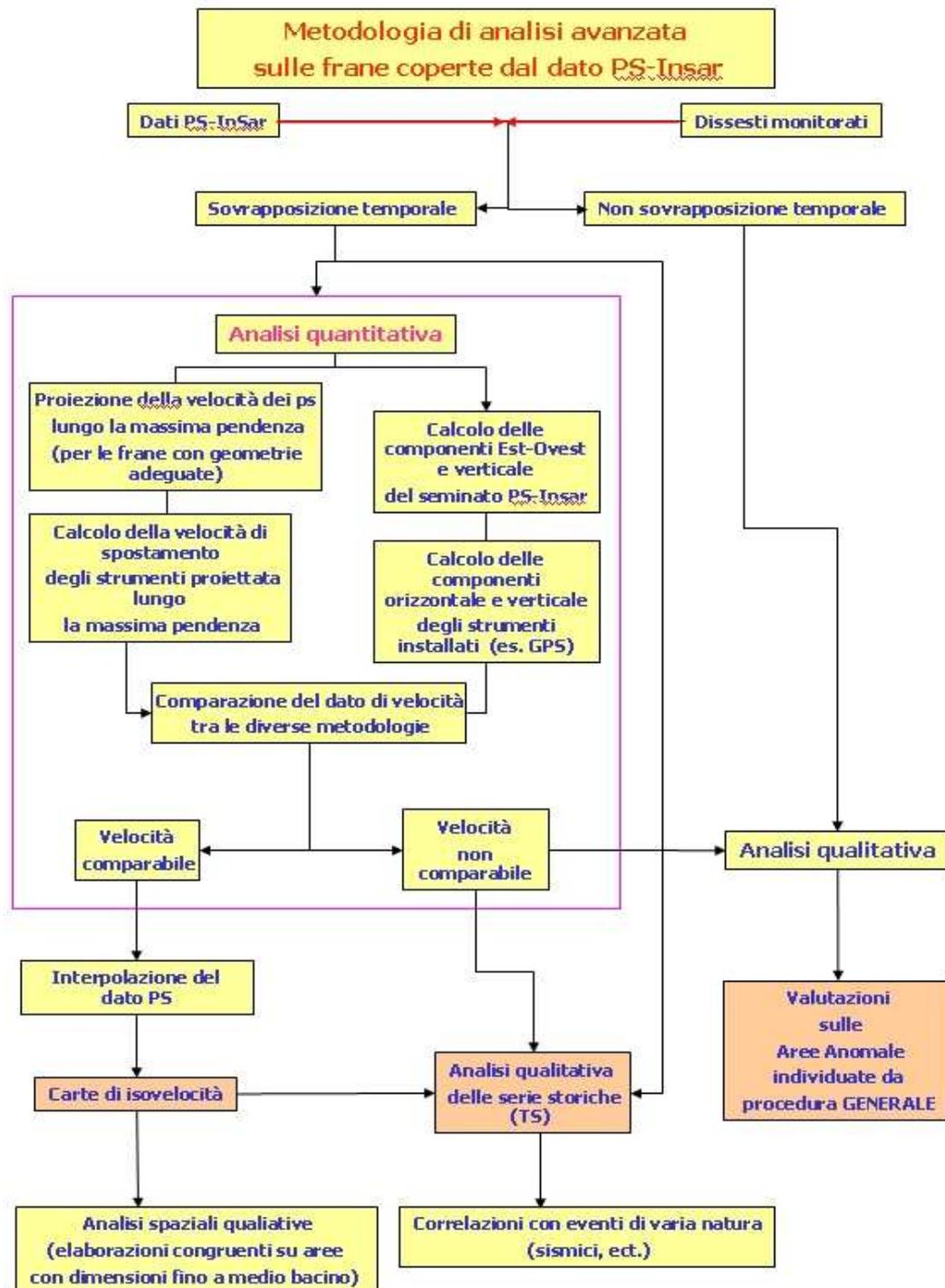


Fig.4.20 schema per l'analisi di dettaglio

In particolare

- Analisi della copertura dei dati PS-Insar sui siti monitorati;
- Controllo e scelta dei siti monitorati su cui ricadono PS;
- Analisi della strumentazione installata nel sito;
- Calcolo delle velocità dagli spostamenti misurati dagli strumenti installati
- Proiezione delle velocità determinate dal PS-Insar lungo la massima pendenza;
- Scomposizione delle velocità del dato PS-Insar nella componente Est-Ovest e verticale;
- Comparazione quantitativa delle velocità;
- Analisi quantitativa del dato PS-Insar.

I dati PSInSAR™ coprono il periodo dal 1991 al 2001; la loro distribuzione sul territorio non è molto uniforme soprattutto nelle zone montane collinari. Dalla sovrapposizione, in ambiente GIS, dei tematismi PSInSAR™ (nuvole di PS) e quelli delle frane monitorate si sono identificate le frane su cui ricadevano dei PS.

I dissesti monitorati dal Centro Regionale per le ricerche territoriali e geologiche, Struttura -Valutazione di Pericolosità e rischio geologico di Arpa Piemonte, sono circa 300 sul territorio regionale; il monitoraggio di questi fenomeni franosi è attuato tramite vari sistemi, dai più tradizionali come verticali inclinometriche e sistemi topografici, ai più recenti come laser-scanner e GB-Insar.

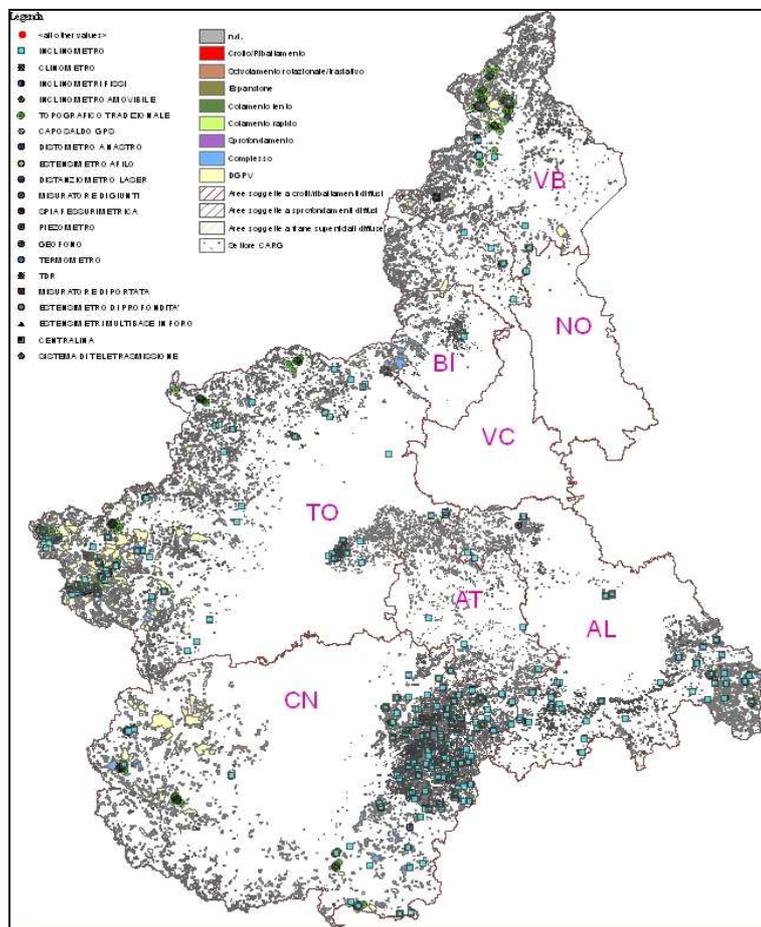


Fig 4.21 Stato della strumentazione installata sui dissesti franosi

L'analisi dei siti ritrovati dopo lo screening iniziale è avvenuto verificando, in ordine d'importanza, il periodo di installazione, di inizio monitoraggio e la tipologia di strumenti installati.

I siti risultanti presentano le peculiarità principali di essere tutti strumentati con tubi inclinometrici nel corpo di frana, di essere stati attrezzati in periodi tra il 1980 e 1997, e di avere almeno tre anni di raccolta dati.

La discriminante dei tre anni di misure è da ricercare nel numero di dati a disposizione (l'Arpa Piemonte svolge normalmente due misure inclinometriche annue per ogni verticale, e misure straordinarie in caso di eventi parossistici) che per identificare un movimento e poterne definire la velocità media di spostamento.

Le frane monitorate ritrovate dopo queste analisi sono circa novanta (vedi allegato) con una elevata densità ubicata nelle Langhe; questo fatto è da ricercare nella presenza di buone caratteristiche radaristiche dell'area (oggetti riflettenti, esposizione, ecc.) e nella presenza di molti siti strumentati (attrezzati per lo più con inclinometri) in occasione dell'alluvione del 1994.

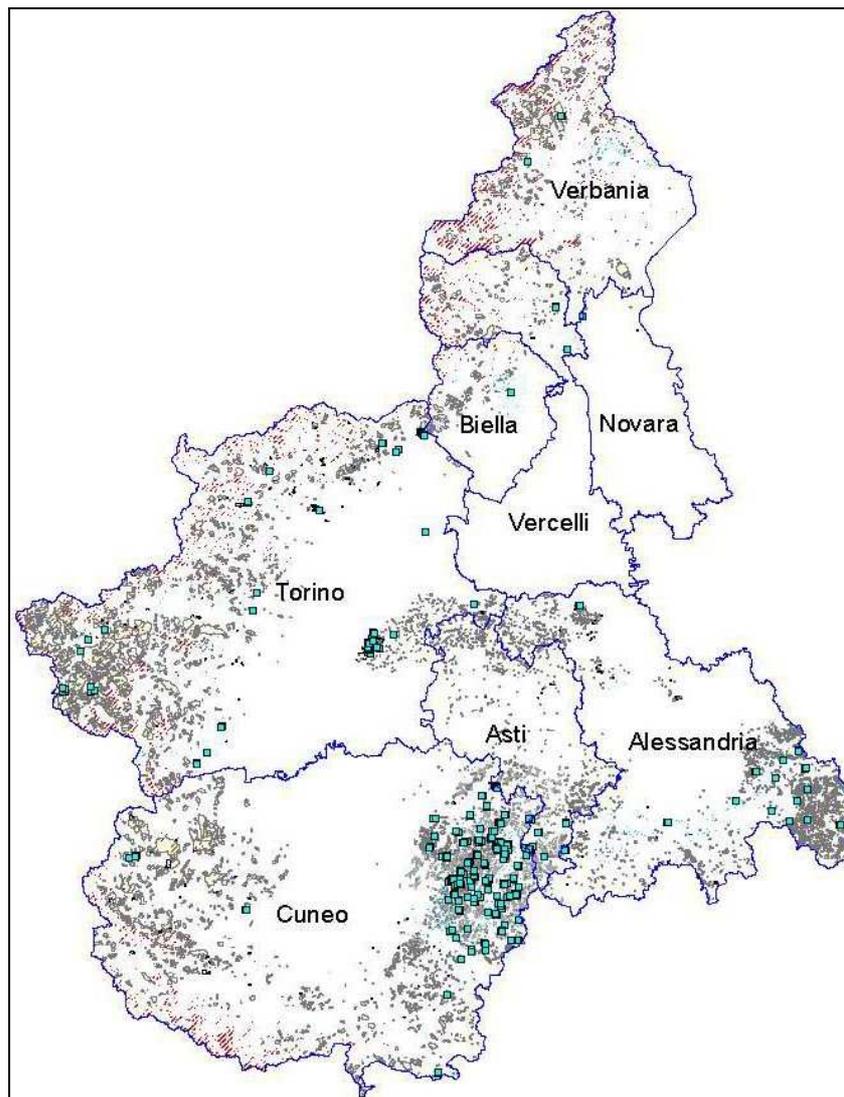


Fig 4.22 Quadro dei siti risultanti dallo screening con i dati PSInSAR™

Per ogni sito individuato la metodologia proposta prevede l'analisi dei dati strumentali al fine di determinare la velocità media di spostamento, espressa in mm/y; affinché sia possibile confrontare le due tipologie di informazioni, è necessario verificare che la direzione di spostamento sia compatibile con la direzione di massima pendenza (compatibile con la proiezione dello spostamento dei PS).

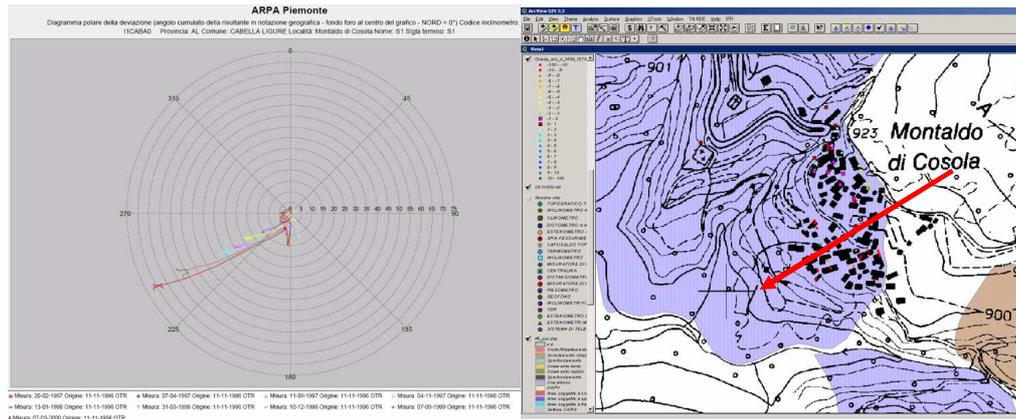


Fig 4.23 area investigata per la frana di Montaldo di Cosola

Il seminato PSInSARTM definisce la velocità media di spostamento, inteso come abbassamento-innalzamento, di un punto “fotografato” lungo la direttrice di osservazione (LOS) di un radar ad apertura sintetica posto su un satellite in orbita; questo significa che lo spostamento definito dai PS è la componente del moto effettivo del punto lungo la LOS. Conoscendo gli angoli di incidenza del radar rispetto al punto PS identificato e definendo la morfologia del territorio su cui ricadono i PS è possibile proiettare il vettore velocità lungo la direzione di massima pendenza.

Gli spostamenti indicati dalla tecnica PSInSARTM sono riferiti a oggetti superficiali/affioranti che si abbassano/innalzano lungo la direzione di osservazione del radar PSInSARTM (LOS) rispetto la posizione del satellite. I dati di spostamenti derivati dalle misure degli strumenti devono essere riferiti quindi alla superficie; per gli inclinometri si analizzano i dati più superficiali (-0.5;-1.0m)

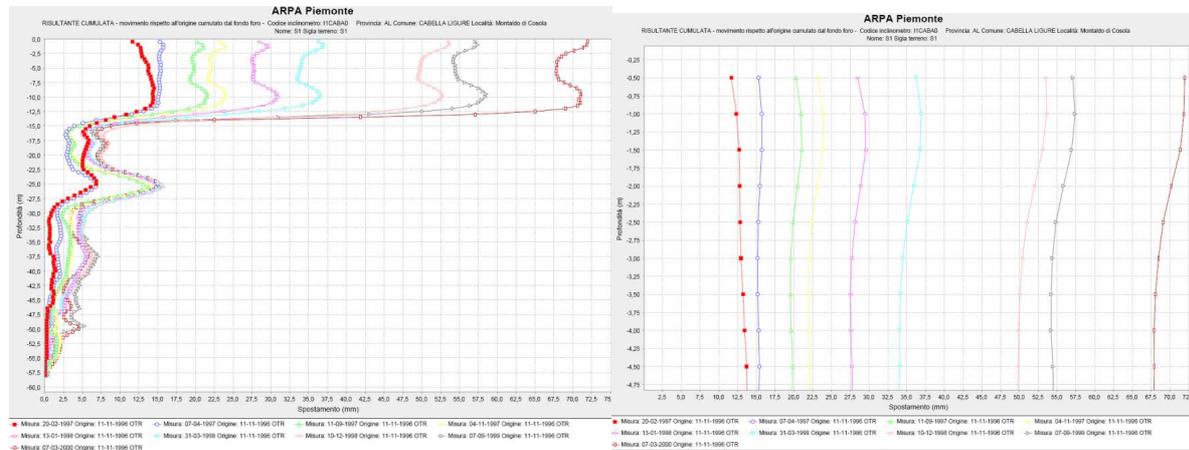


Fig 4.24 Grafici inclinometrici

L'area di influenza del movimento definisce una porzione di territorio attorno agli inclinometri esaminati che sicuramente è influenzato dal movimento profondo rilevato dall'inclinometro stesso.

Nel caso analizzato, dopo una verifica sul terreno degli effetti del movimento nell'intorno degli inclinometri osservati, si è definito un'area di influenza di 50 m attorno alla strumentazione analizzata.

Definiti quali PS elaborare nel calcolo della velocità di spostamento lungo la direzione di massima pendenza, si deve definire la morfologia del territorio su cui ricadono. Attraverso un modello digitale del terreno DEM si vanno a elaborare delle carte derivate che vanno a definire la pendenza e l'esposizione.

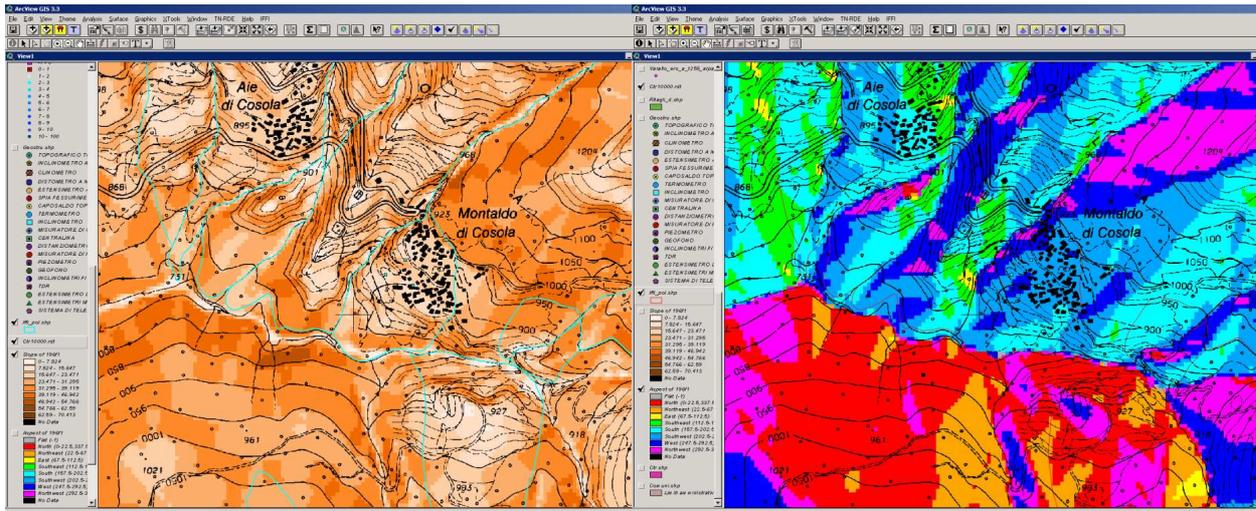


Fig 4.25 Carte derivate della pendenza e dell'esposizione del versante

Ottenuti i parametri pendenza e esposizione, elaborando le velocità indicate dai PS considerati con gli angoli di incidenza del radar rispetto al punto PS identificato, si può definire la componente della velocità lungo la direzione di massima pendenza tramite una correlazione trigonometrica .

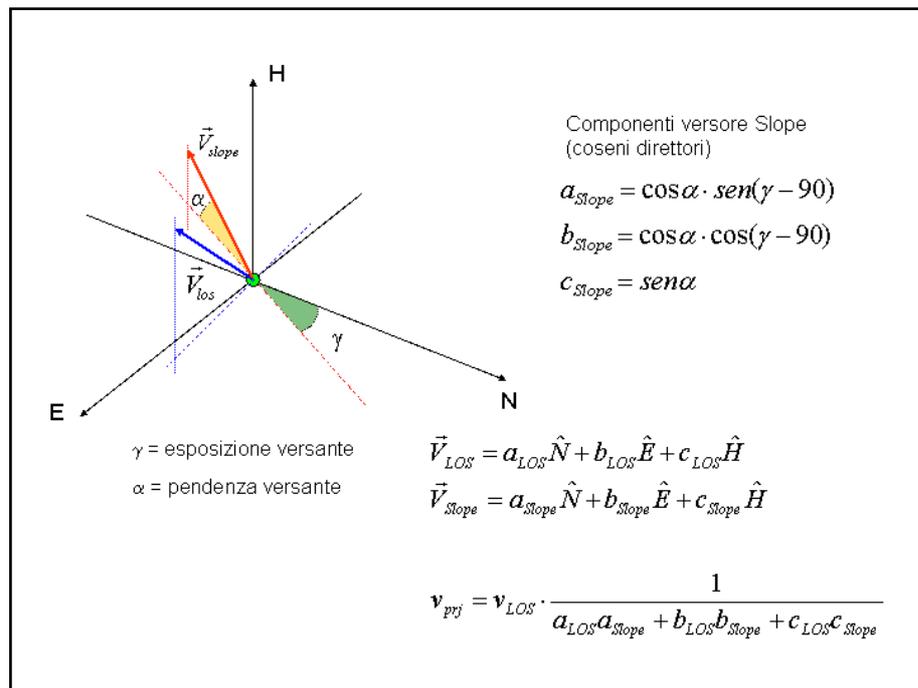


Fig 4.26 Espressione di calcolo della velocità proiettata lungo la direzione di massima pendenza (Fonte TRE)

La velocità indicata dai PS, proiettata sulla direzione di massima pendenza, corrisponde quindi alla velocità determinata dall'analisi degli spostamenti superficiali derivati dai dati inclinometri considerati.

Questa velocità è valida per un'area nell'intorno degli inclinometri considerati in quanto sussistono delle variabili locali nei fenomeni profondi che possono determinare delle discordanze spaziali nei movimenti in superficie.

Al fine di un suo corretto utilizzo si prevedono alcune condizioni e strumenti:

- Nell'area esaminata vi sia un adeguato numero di inclinometri e PS;
- Le misure inclinometriche devono avere una certa cadenza e prosecuzione nel periodo considerato dal dataset di immagini PSInSARTM considerate;
- Le informazioni derivate (slope e aspect) devono essere adeguatamente precise, quindi il modello digitale del terreno (DEM) deve avere una maglia molto piccola (celle min. 10x10m) e rappresentare il periodo del dataset PSInSARTM;
- La definizione dell'area di influenza del movimento deve essere verificata sul terreno con osservazioni geomorfologiche e da eventuali danni presenti.

Se le velocità, quella proiettate dei PS e quella desunta dagli inclinometri, risultano comparabili si può supporre che il dato PS rappresenti realmente l'evoluzione del dissesto analizzato. Al fine di avere un quadro più omogeneo del movimento all'interno del dissesto si può attuare un'interpolazione di tipo deterministico (Inverse Distance Weight IDW) del dato PS proiettato.

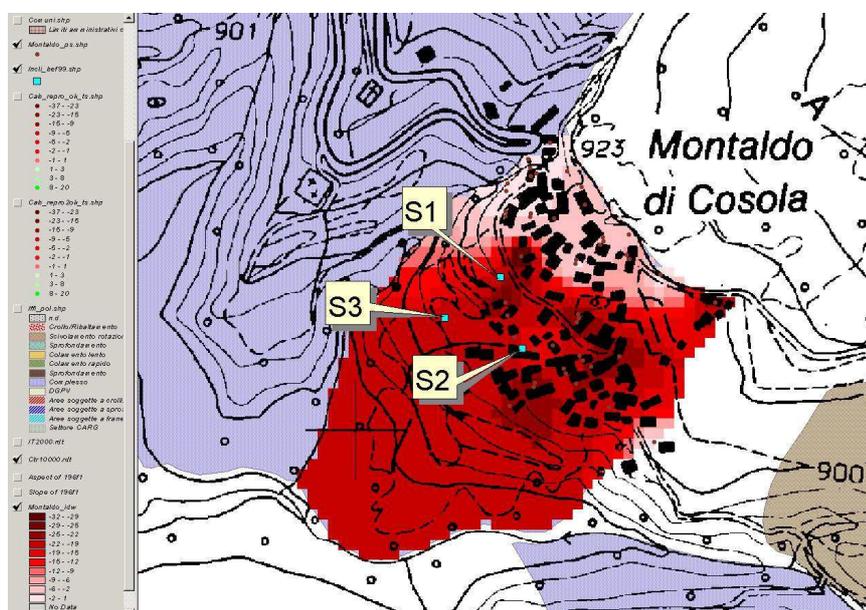


Fig 4.27 Distribuzione delle velocità medie proiettate

Dall'interpolazione ottenuta è possibile:

- analizzare gli spostamenti identificati dai PS e definire se esiste una correlazione logica tra di loro all'interno dell'area in esame.
- correlare il profilo topografico con in profilo delle velocità
- analizzare i dati interpolato con altri sistemi di misura

Oltre all'analisi globale del movimento del dissesto è possibile attuare un'analisi puntuale usando la serie storica legata ad alcuni PS dalle caratteristiche radaristiche. In tali dati è possibile visualizzare le velocità relative, a una funzione lineare, di spostamento del PS a ogni passaggio del satellite

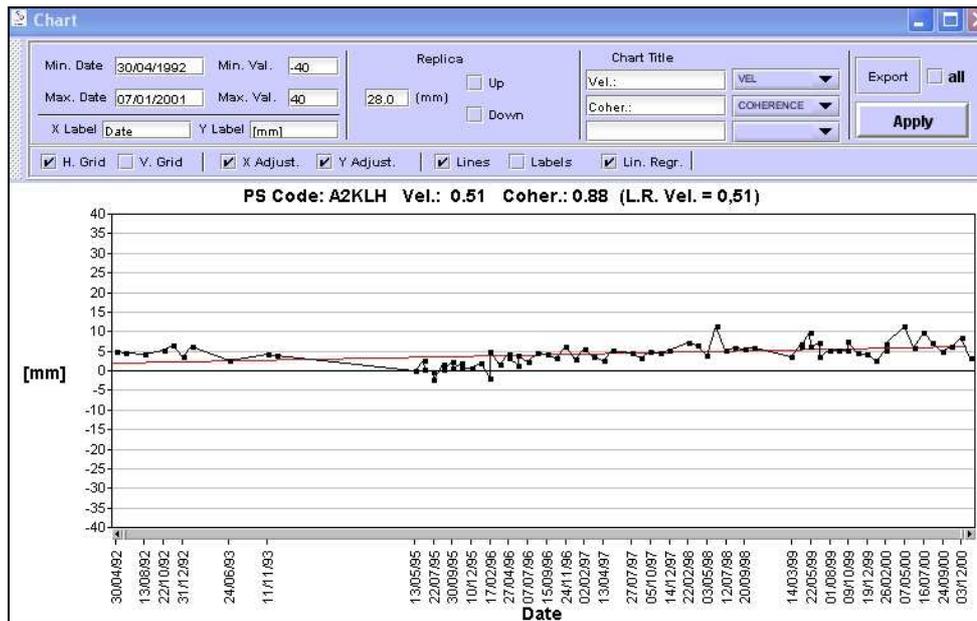


Fig. 4.28 tracciato della serie storica di un punto PS

Dal dato grezzo lineare può essere estrapolato il valore della funzione lineare e sottratto facendo risaltare la non linearità del dato TS.

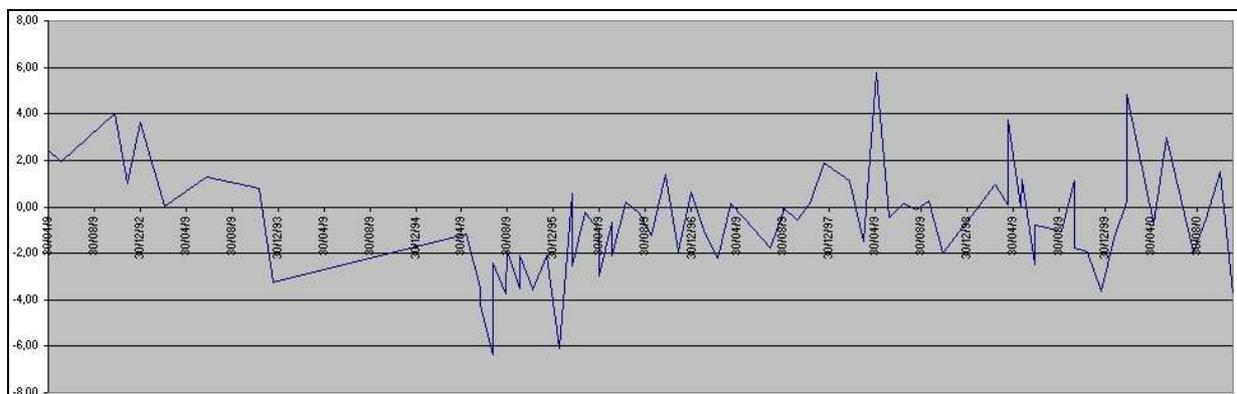


Fig. 4.29 Estrapolazione della porzione non lineare dall'analisi della serie temporale

Il dato non lineare può essere poi confrontato e correlato a eventi meteorici e valutarne gli spostamenti relativi.

4.2.5 SCOMPOSIZIONE DEL VETTORE VELOCITÀ NELLE COMPONENTI VERTICALE E ORIZZONTALE

Nelle zone ove si possiede una copertura di dati PS-InSar in orbita ascendente e discendente è possibile ottenere la scomposizione del moto nella sua componente orizzontale E-O e Verticale.

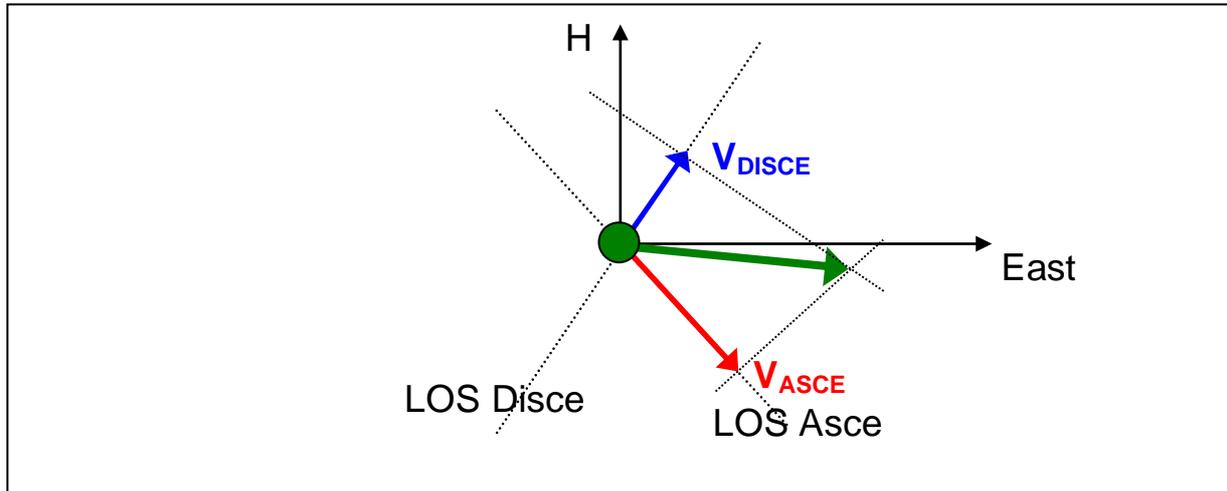


Fig 4.30 scomposizione del vettore velocità dati i vettori lungo le due orbite satellitari

I dati da utilizzare sono le coperture ascendenti e discendenti (i vettori rosso e blu) e i coseni direttori della LOS presenti all'interno della metadocumentazione TRE.

Per poter effettuare la scomposizione è necessario individuare coppie di misure (una discendente e una ascendente) che descrivono il moto dello stesso oggetto (o area) fisico: un'operazione del genere richiederebbe continue e onerose campagne di individuazione dei riflettori.

Al fine di ottenere un risultato qualitativo e in aree ove la densità di ps ascendenti e discendenti in sovrapposizione non permette di ottenere una correlazione per singoli oggetti nel territorio, è possibile utilizzare la metodologia rappresentata dalla flow-chart sottostante.

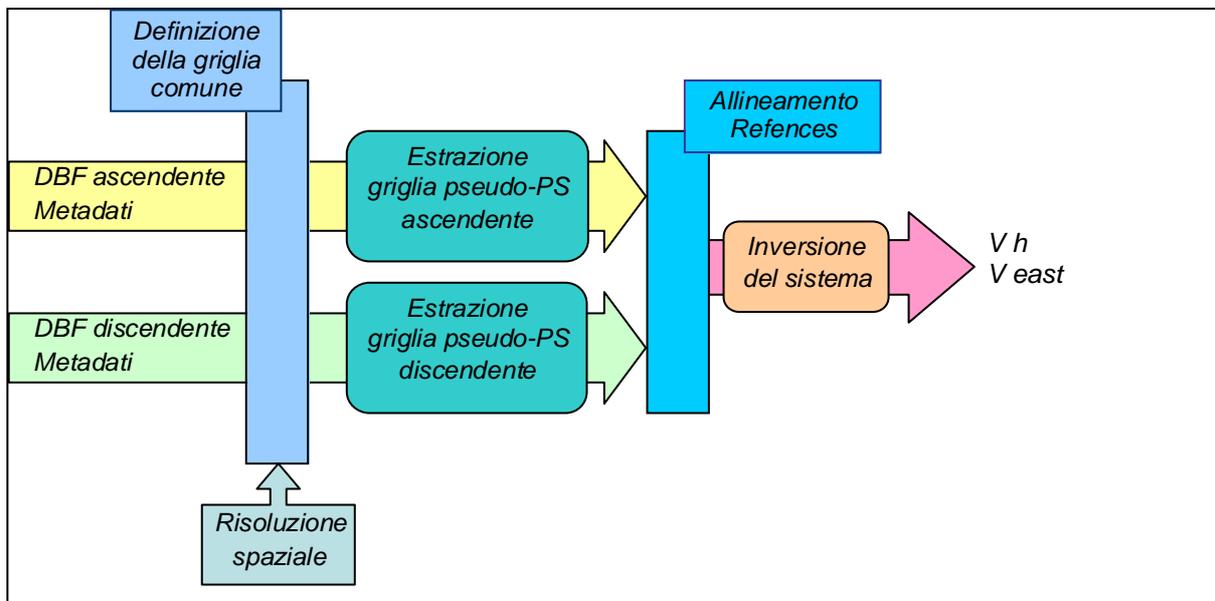


Fig 4.31 schema di flusso del procedimento di scomposizione

4.2.5.1 Generazione della griglia regolare

I cluster PS sono intrinsecamente generati come una griglia sparsa di punti nello spazio.

Si definisce allora una griglia regolare di punti nello spazio che copre sia l'area del cluster ascendente, sia quella del cluster discendente.

Si consideri che la risoluzione della griglia impostata in questa fase è la risoluzione spaziale del dato scomposto.

A ciascun punto P della griglia corrisponde una cella di risoluzione: si considerino tutti i PS di un singolo cluster che cadono nella cella stessa.

Si associ al punto P di coordinate note, un valore di velocità pari alla media delle velocità dei PS afferenti alla cella di P: la stessa operazione sulle deviazioni standard. Si annoti anche il numero di punti che concorrono alla media.

Si definisce così una griglia regolare di pseudo-PS, ciascuno dei quali ha associato:

- *Latitudine e Longitudine*
- *Velocità media*
- *Deviazione standard media*

Al termine dell'operazione si avranno a disposizione due cluster di pseudo-PS (uno ascendente e uno discendente), definiti su griglia comune.

4.2.5.2 Allineamento dei punti di riferimento.

Definite le griglie, le misure a disposizione sono tuttavia relative a due riferimenti indipendenti.

E' necessaria una fase in cui, fissato uno dei due riferimenti (ad esempio il REF del cluster ascendente) si scalano i valori di velocità dell'altro cluster (nel nostro esempio il discendente), in modo da rendere comune il riferimento delle misure.

4.2.5.3 Scomposizione delle misure.

Le operazioni finora condotte consentono a questo punto di invertire il sistema visualizzato nella prima immagine e rappresentato dal sistema di equazioni sottostante.

$$\begin{cases} V_a = \cos(\theta_{asce}) \cdot V_{rH} - \sin(\theta_{asce}) \cdot V_{rE} \\ V_d = \cos(\theta_{desce}) \cdot V_{rH} + \sin(\theta_{desce}) \cdot V_{rE} \end{cases}$$

Risolvendo le due equazioni, conoscendo per ogni pseudo-PS la V_{asce} , la V_{disce} e i coseni direttori dei cluster, le componenti di moto reale V_H (velocità in H) e V_E (velocità in Est).

Le due equazioni risultanti sono:

$$V_h = \frac{(V_d / \coseno E_{disce}) - (V_a / \coseno E_{asce})}{(\coseno H_{disce} / \coseno E_{disce}) - (\coseno H_{asce} / \coseno E_{asce})}$$

$$V_{East} = \frac{(V_d / \coseno H_{disce}) - (V_a / \coseno H_{asce})}{(\coseno E_{disce} / \coseno H_{disce}) - (\coseno E_{asce} / \coseno H_{asce})}$$

Lo sviluppo di tale metodologia ha avuto come input fondamentale le esperienze pregresse del gruppo di TRE di milano al quale si deve la gentile concessione delle formule sopra citate.

4.2.6 ESEMPIO: FRANA DI MONTALDO DI COSOLA NEL COMUNE DI CABELLA LIGURE.

La frana di Montaldo di Cosola ricade nella tipologia del dissesto complesso che si sviluppa come scivolamento nella parte sommatatale per poi evolversi a colamento lento.

I dati PS sono stati confrontati con le misure inclinometriche storiche.

I dati inclinometrici ricavati dalle letture effettuate vengono analizzati e diagrammati al fine di ottenere la direzione di spostamento e lo spostamento cumulato nel tempo.

La direzione di spostamento è determinata tramite l'azimut di spostamento misurato ad ogni lettura e nei casi analizzati corrisponde alla direzione di massima pendenza

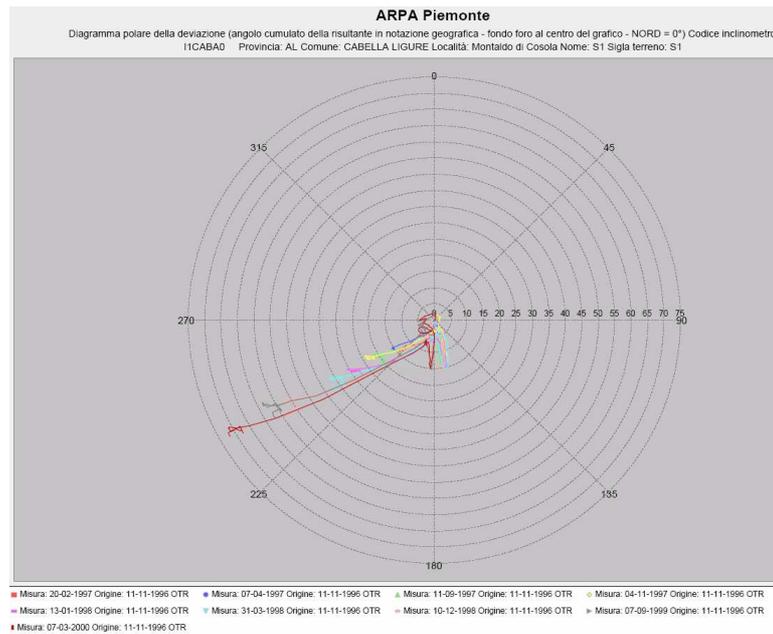


Fig 4.32 Diagramma polare della deviazione (angolo cumulato della risultante in notazione geografica –fondo foro al centro del grafico- Nord=0°)

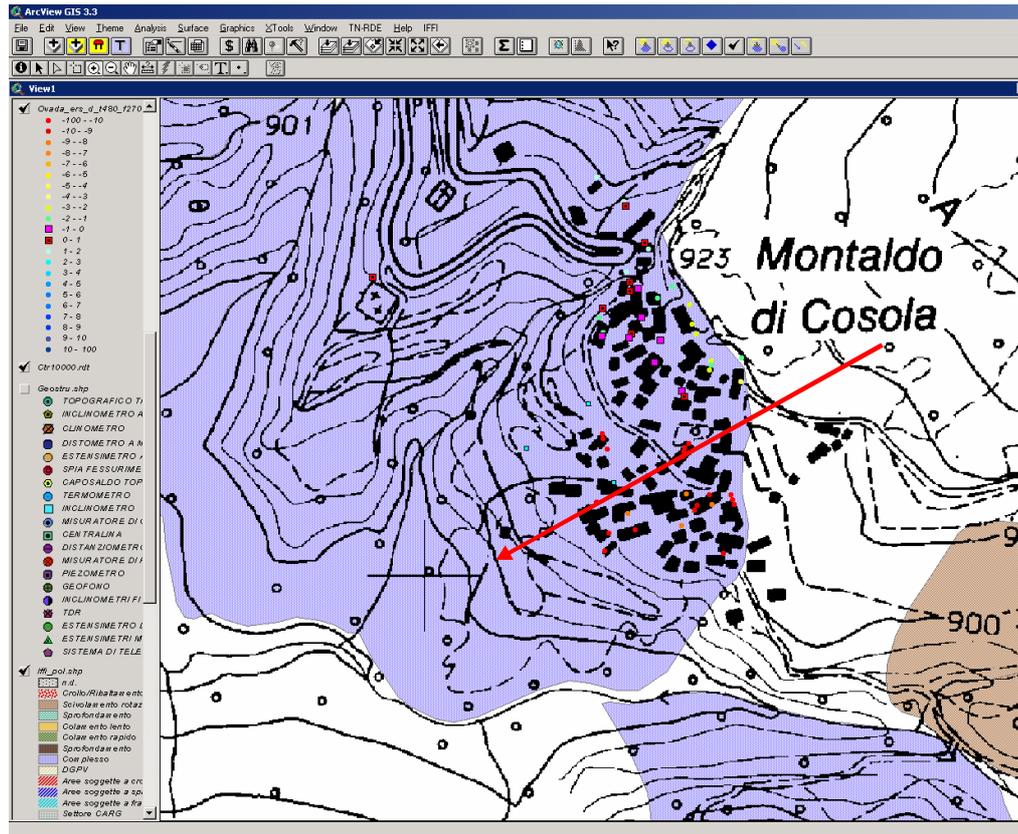


Fig 4.33 Topografia della zona in esame, la freccia indica la direzione media di massima pendenza

Gli spostamenti indicati dalla tecnica PSInSARTM sono riferiti a oggetti superficiali/affioranti che si abbassano/innalzano lungo la direzione di osservazione del radar PSInSARTM (LOS) rispetto la posizione del satellite, mentre i dati inclinometrici sono riferiti a tutta la colonna inclinometrica.

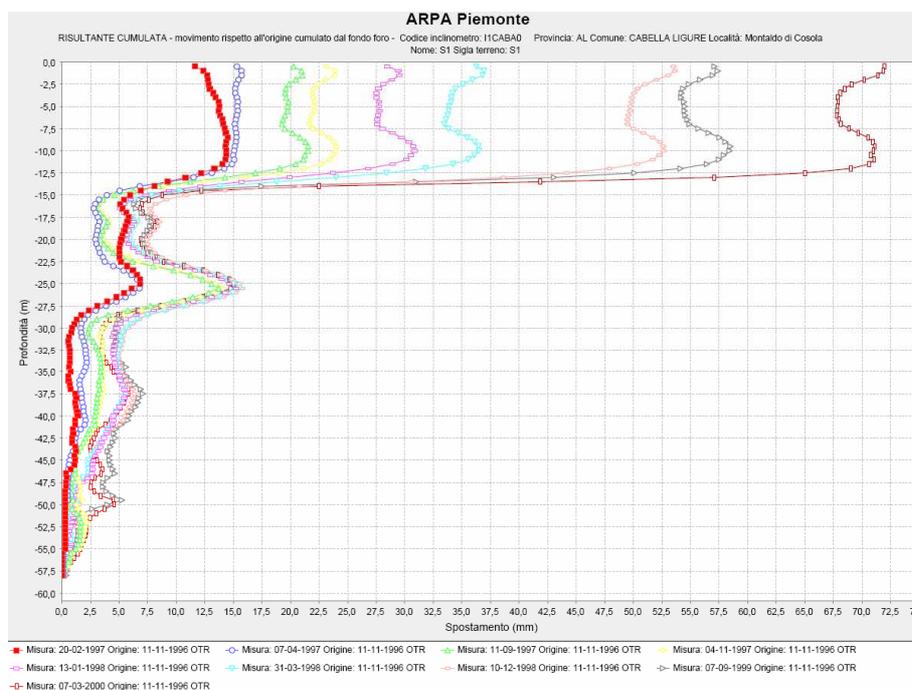


Fig 4.34 Risultante cumulata degli spostamenti lungo tutta l'asta inclinometrica

Gli spostamenti delle colonne inclinometriche sono relativi alle profondità di -0.50m e -1.00m ; questo è stato definito per ovviare alla superficialità del dato PSInSARTM e per definire la componente lungo la direzione di massima pendenza del versante, tenendo conto del fatto che esiste un certo grado di correlazione tra movimenti profondi e quelli superficiali.

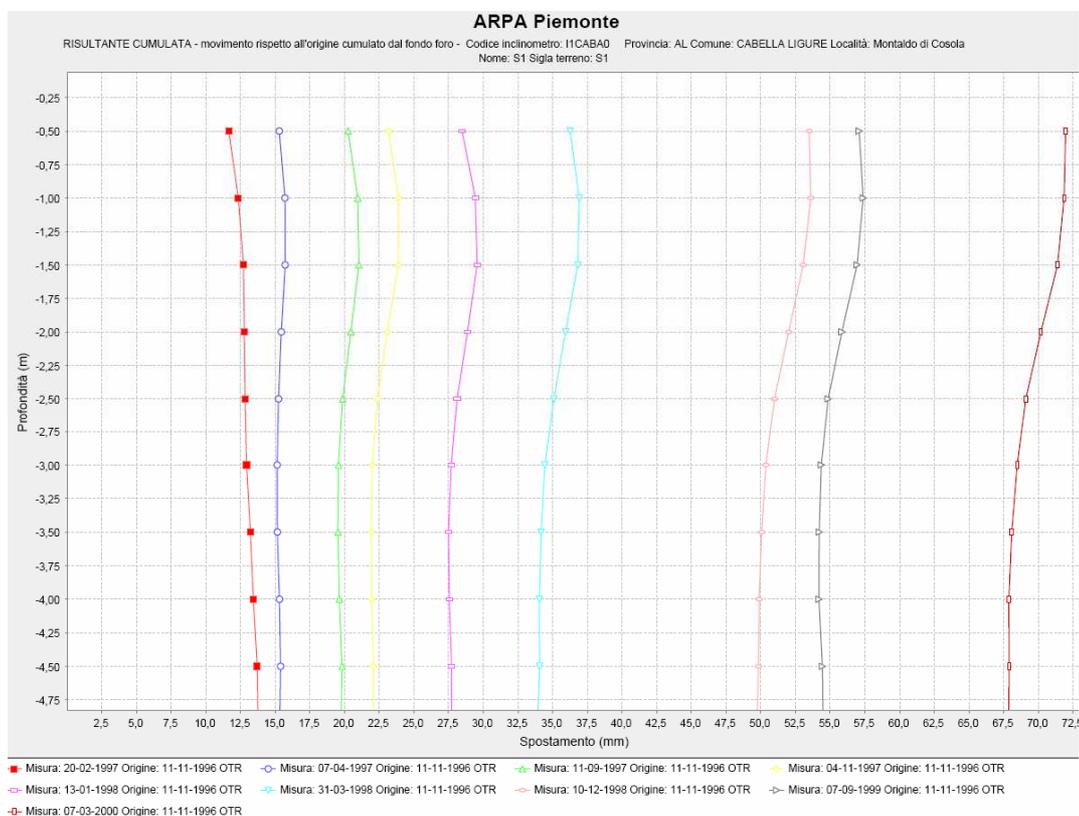


Fig 4.35 Risultante cumulata degli spostamenti lungo i primi metri dell'asta inclinometrica

Spostamento a -0.5m	Data lettura	Spostamento a -1m
11.66	feb-97	12.35
15.31	apr-97	15.72
20.26	set-97	20.96
23.16	nov-97	23.9
28.48	gen-98	29.43
36.23	mar-98	36.91
53.49	dic-98	53.61
57.09	set-99	57.38
71.97	mar-00	71.86

Tab 4.4 Tabella degli spostamenti rilevati

I dati di spostamento da utilizzare devono essere riferiti alla ultima lettura ricadente nel periodo del dataset di immagini radar utilizzato al fine di avere una correlazione temporale tra i dati PSInSARTM e inclinometrici.

Il seminato PSInSARTM definisce la velocità media di spostamento, inteso come abbassamento-innalzamento, di un punto "fotografato" lungo la direttrice di osservazione (LOS) di un radar ad apertura

sintetica posto su un satellite in orbita; questo significa che lo spostamento definito dai PS è la componente del moto effettivo del punto lungo la LOS. Conoscendo gli angoli di incidenza del radar rispetto al punto PS identificato e definendo la morfologia del territorio su cui ricadono i PS è possibile proiettare il vettore velocità lungo la direzione di massima pendenza.

Attraverso un'analisi spaziale del seminato PS ritrovato all'interno del poligono delle frane monitorate, si vanno a definire quali PS verranno usati nella definizione delle velocità lungo la direzione di massima pendenza. La loro determinazione viene effettuata in ambiente GIS tramite un'analisi di sovrapposizione dei PS con un'area di influenza del movimento franoso attorno agli inclinometri analizzati.

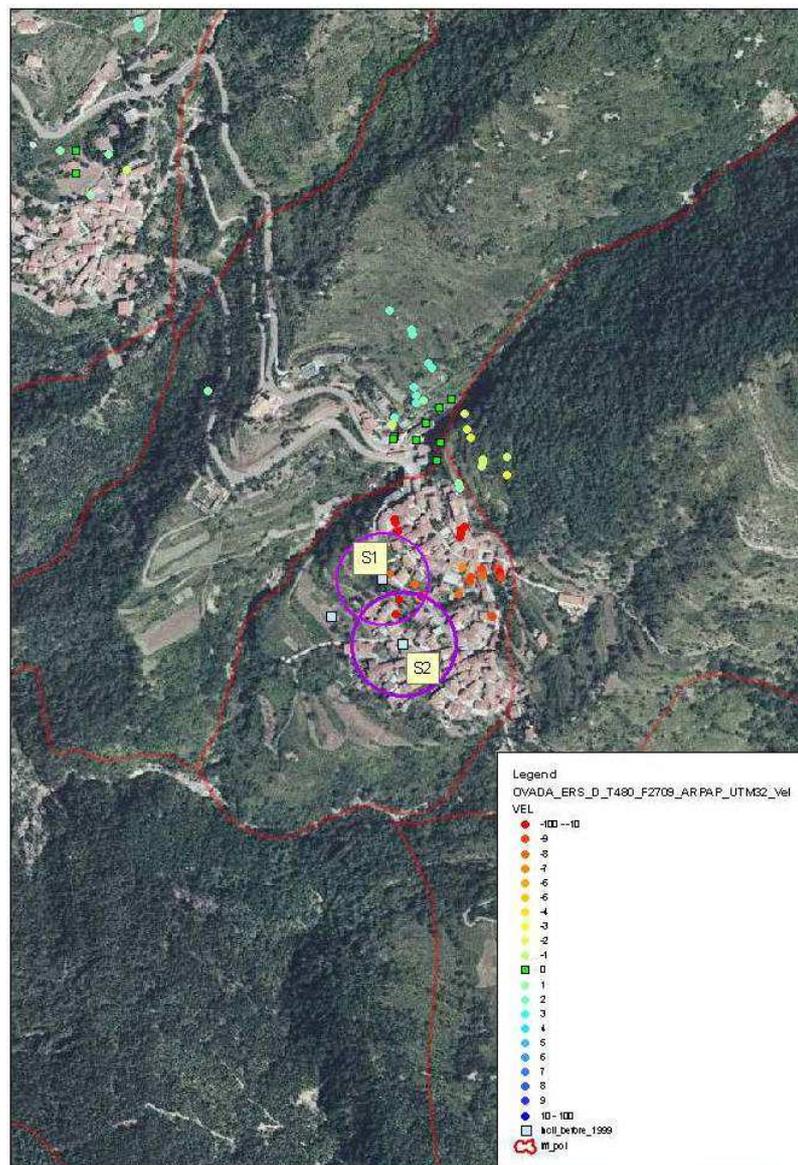


Fig 4.36 Esempio di sovrapposizione tra area di influenza e seminato PSInSAR™

L'area di influenza del movimento definisce una porzione di territorio attorno agli inclinometri esaminati che sicuramente è influenzato dal movimento profondo rilevato dall'inclinometro stesso.

Nel caso analizzato, dopo una verifica sul terreno degli effetti del movimento nell'intorno degli inclinometri osservati, si è definito un'area di influenza di 50m attorno alla strumentazione analizzata.

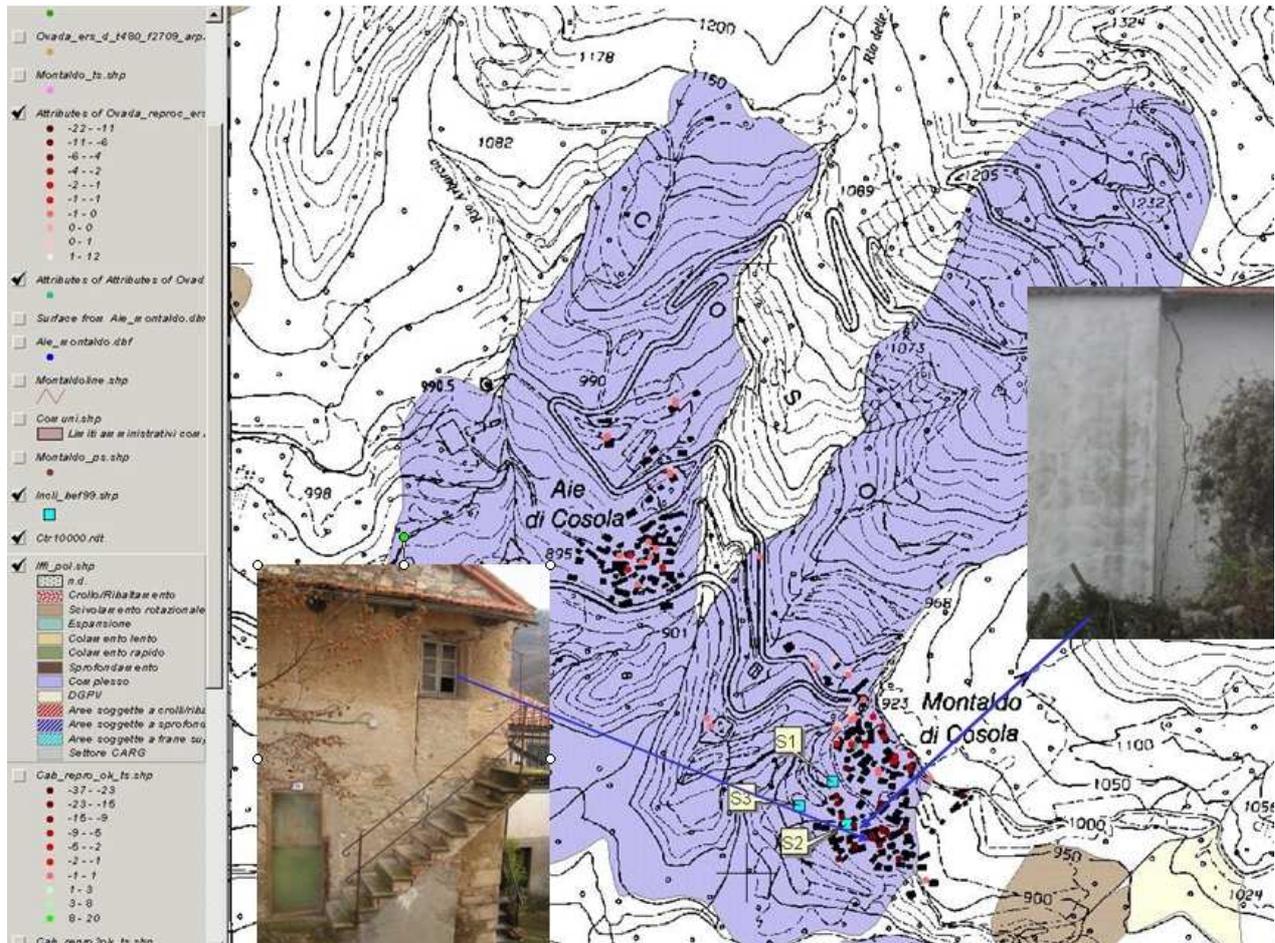


Fig 4.37

	Spostamenti tra 1997 al 2000 (mm)		vel calcolata (mm/a)	
	S1	S2	S1	S2
prof-05m	71.97	75.4	22	20.43
prof-1m	71.86	74.5	21.9	20.18

Tab. 4.5

I PS individuati nelle due aree di influenza del movimento presentano velocità e velocità proiettate (esprese in mm/a):

Area di influenza	vel PS	vel. Slope
S1	-8.60	-20.77
	-8.40	-19.09
S2	-11.10	-20.27
	-11.80	-21.24
	-11.30	-21.06

Tab. 4.7

Le velocità lineari determinate dalle misure inclinometriche a profondità differenti vengono poi mediate tra loro per limitare le possibili influenze della misurazione manuale (soprattutto alla profondità di -0.5m). Anche le velocità proiettate dei singoli PS ricadenti nelle aree di influenza vengono mediate tra loro al fine di smorzare le possibili influenze locali degli oggetti riflettenti il segnale radar.

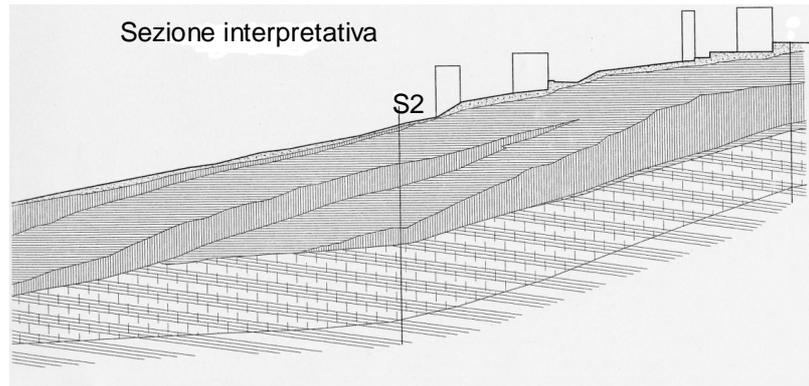


Fig 4.40

Nel seminato PS presente sull'abitato vi sono alcuni TS su cui è stato possibile attuare una analisi temporale.

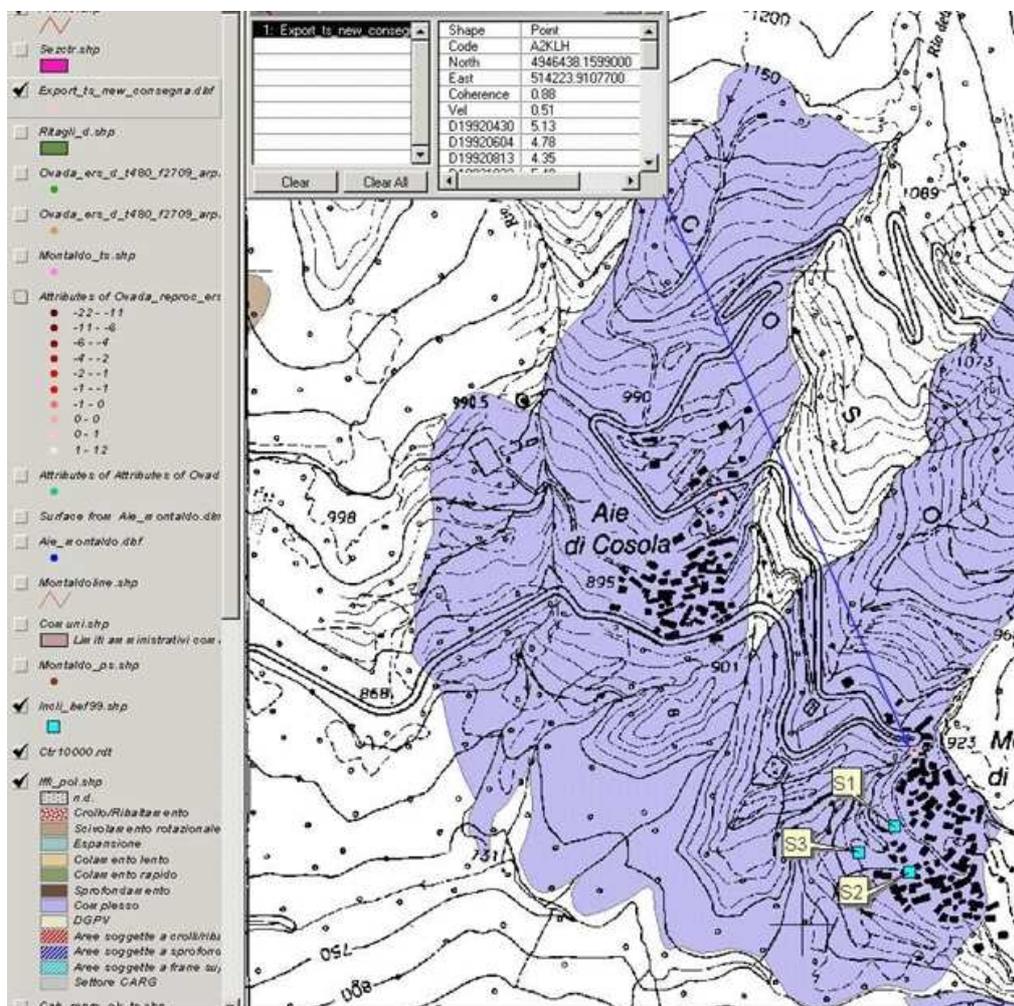


Fig 4.41

Dal dato temporale si è eliminata la componente lineare intrinseca al dato e messo a confronto con le precipitazioni si è potuto correlare i picchi di piovosità con gli spostamenti negativi (vedi ellissi gialli figura sotto).

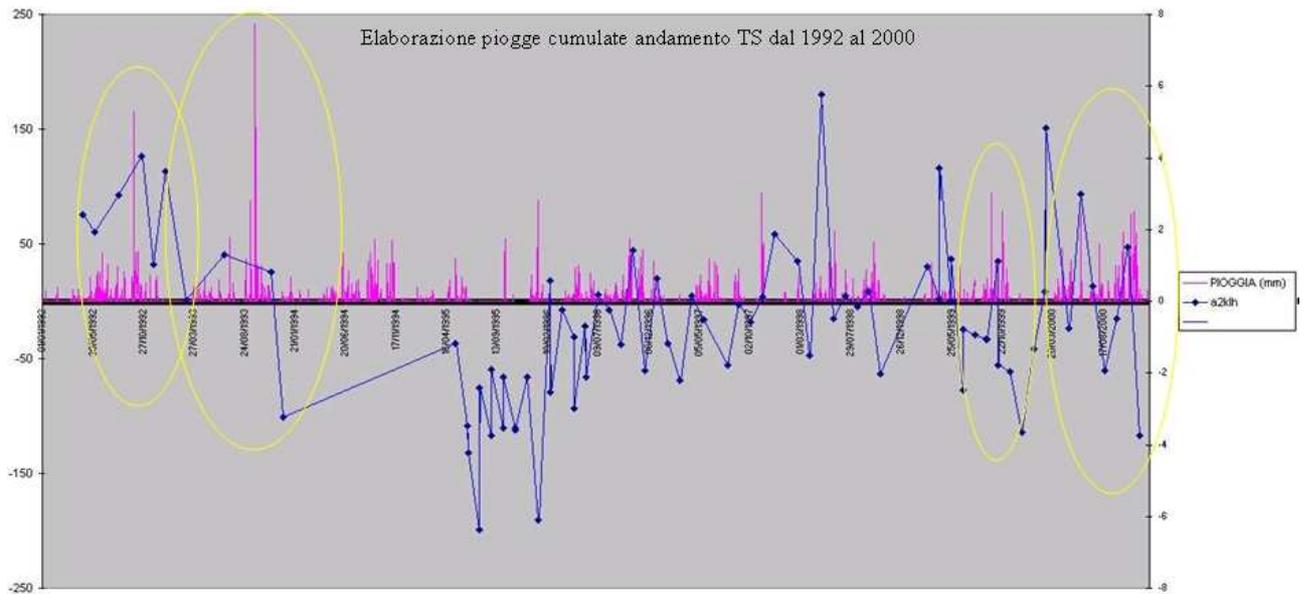


Fig 4.42

In particolare è ben evidenziato nella figura sottostante come vi sia un abbassamento di circa 4mm nel periodo successivo all'alluvione dell'ottobre 2000.

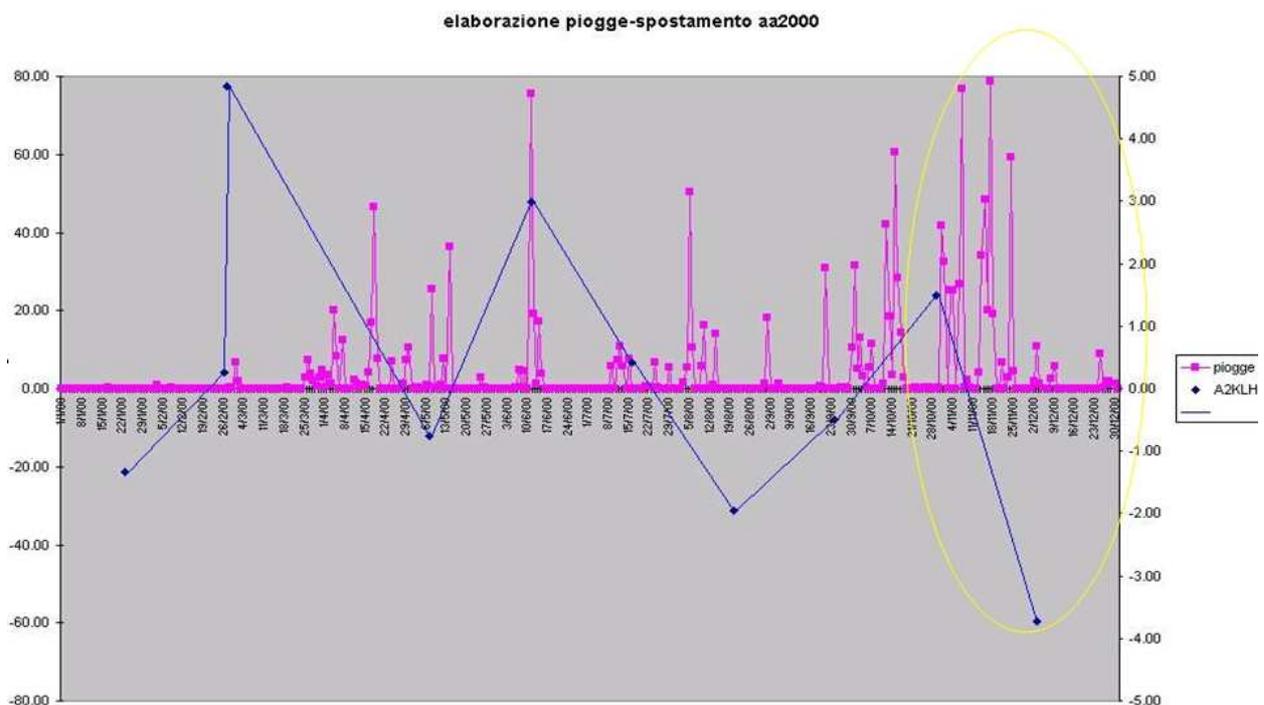


Fig 4.43

4.2.7 ESEMPIO: FRANA DI FEISOGGIO (CN)

La frana in oggetto è classificabile come scivolamento planare che si sviluppa sulla successione monoclinale delle Langhe. Il seminato PS si presenta uniformemente distribuito sul territorio in frana.

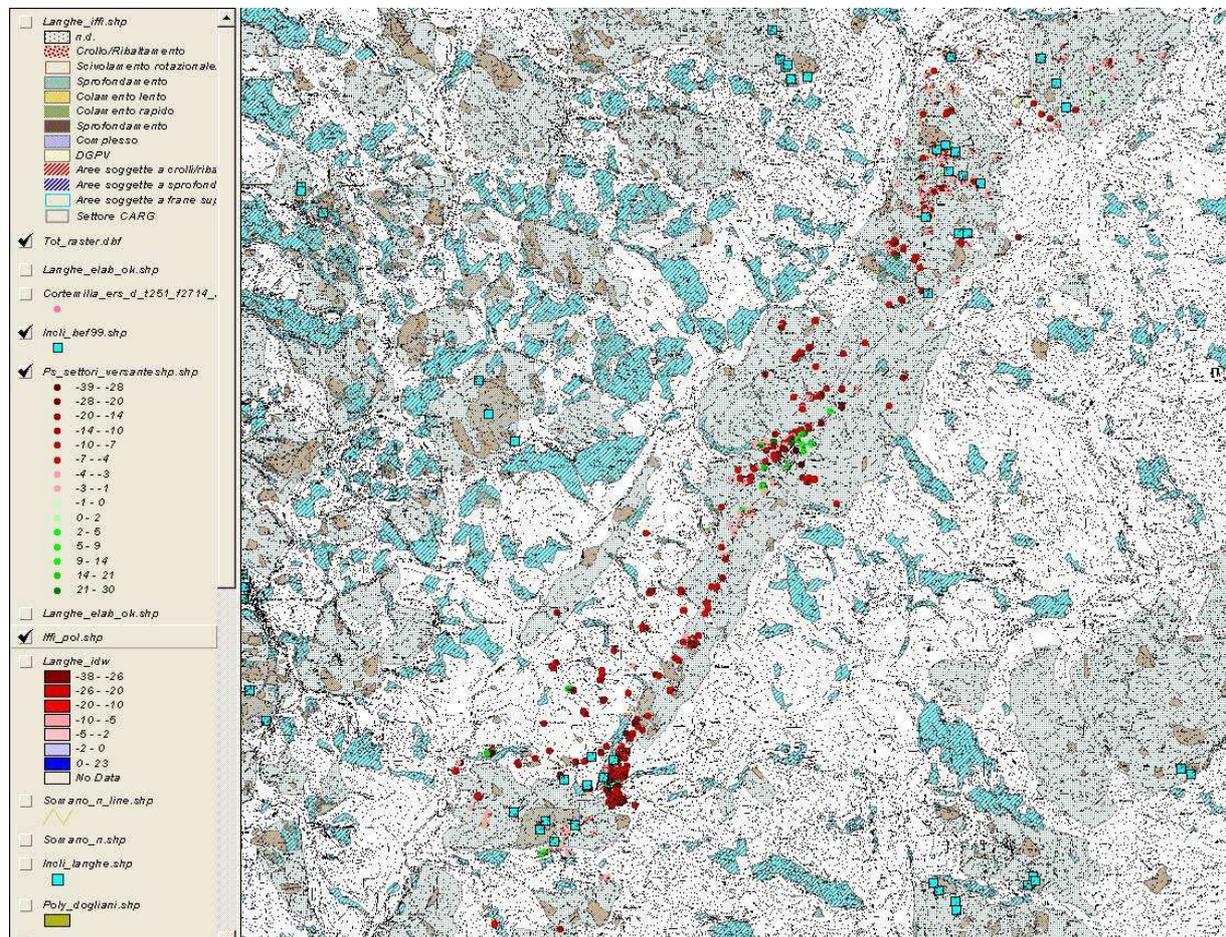


Fig. 4.44 PS sulla frana di Feisoglio

Il settore analizzato comprende l'intero versante, al fine di identificare le zone che hanno comportamenti deformativi simili. Dall'immagine sotto si può osservare che anche l'abitato di Cravanzana (ad est di Feisoglio) ha comportamenti deformativi simili a quelli dell'area sopra specificata, mentre la frana nel territorio di Bosia ha velocità di spostamento minori. Nell'abitato di Cravanzana, a seguito dei movimenti osservati è stato allestito un sistema di monitoraggio .

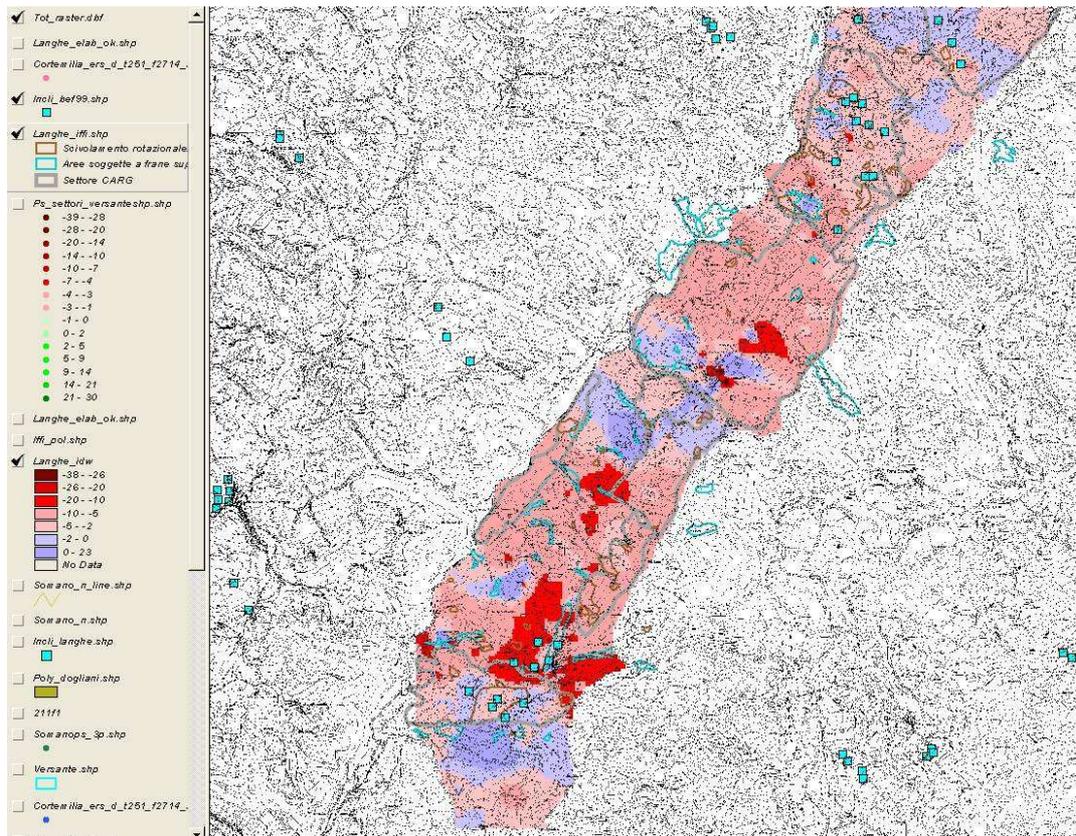


Fig. 4.45 analisi IDW

Analizzando in particolare l'area nel territorio di Feisoglio si osserva una zona a maggior movimento (zona concentrico) e una a movimento quasi nullo (località Piazza).

La conformazione geologico -strutturale dell'area presuppone che il movimento del dissesto sia conforme alla linea di massima pendenza.

Correlando i dati dei tubi inclinometrici presenti nel territorio con i dati dei PS (proiettati lungo la linea di massima pendenza) non sempre vi è una correlazione tra i due dati, ciò è dovuto a una carenza di dati inclinometrici (installazione dal 1999) su tutto il periodo coperto dai PS.

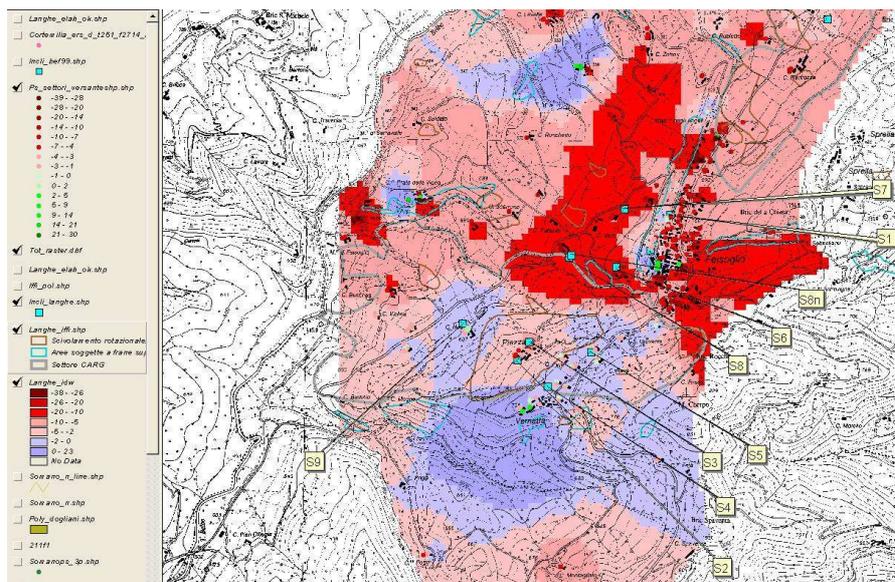


Fig. 4.46 confronto tra analisi geostatistica e valori inclinometrici

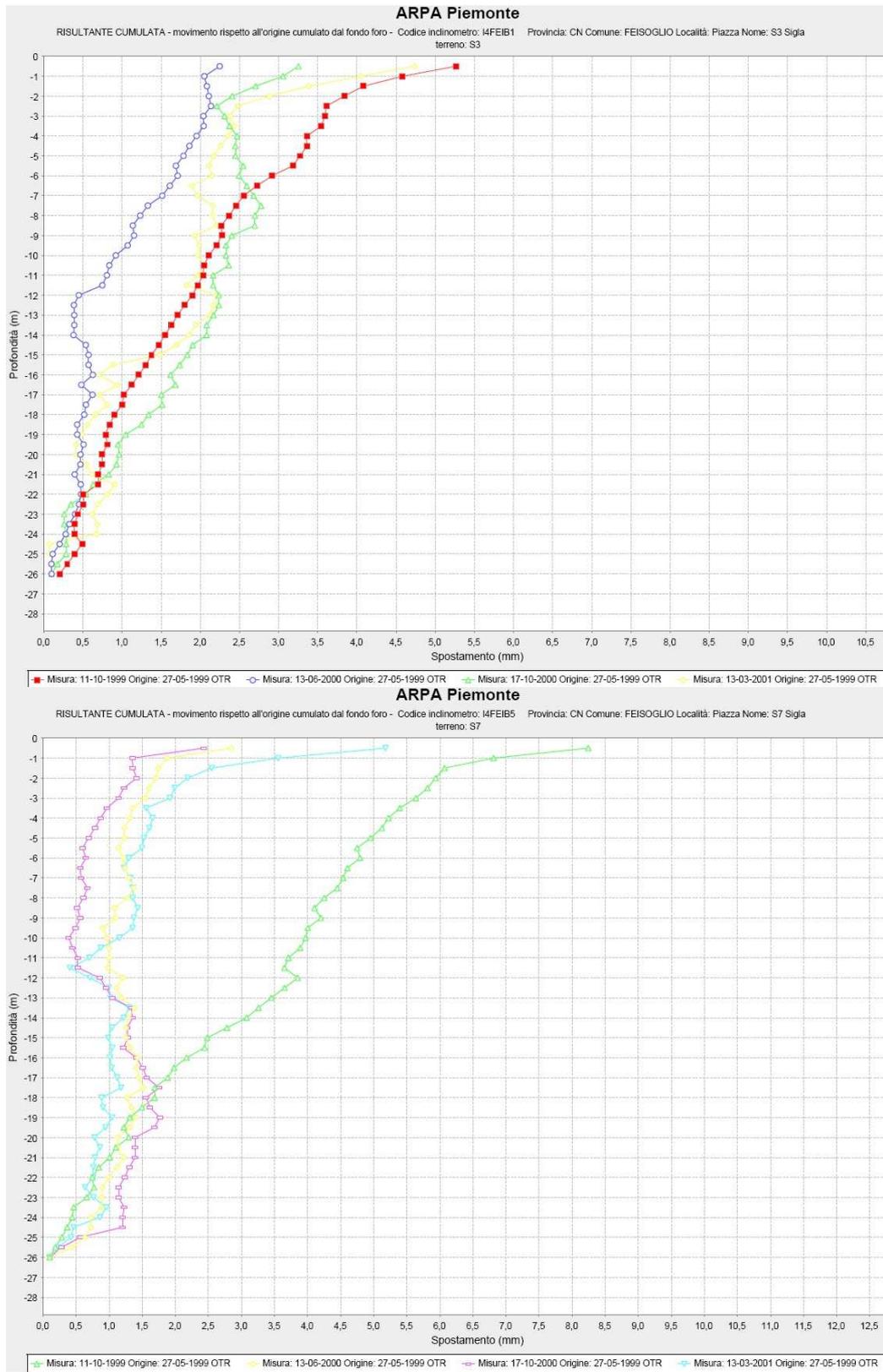


Fig 4.47

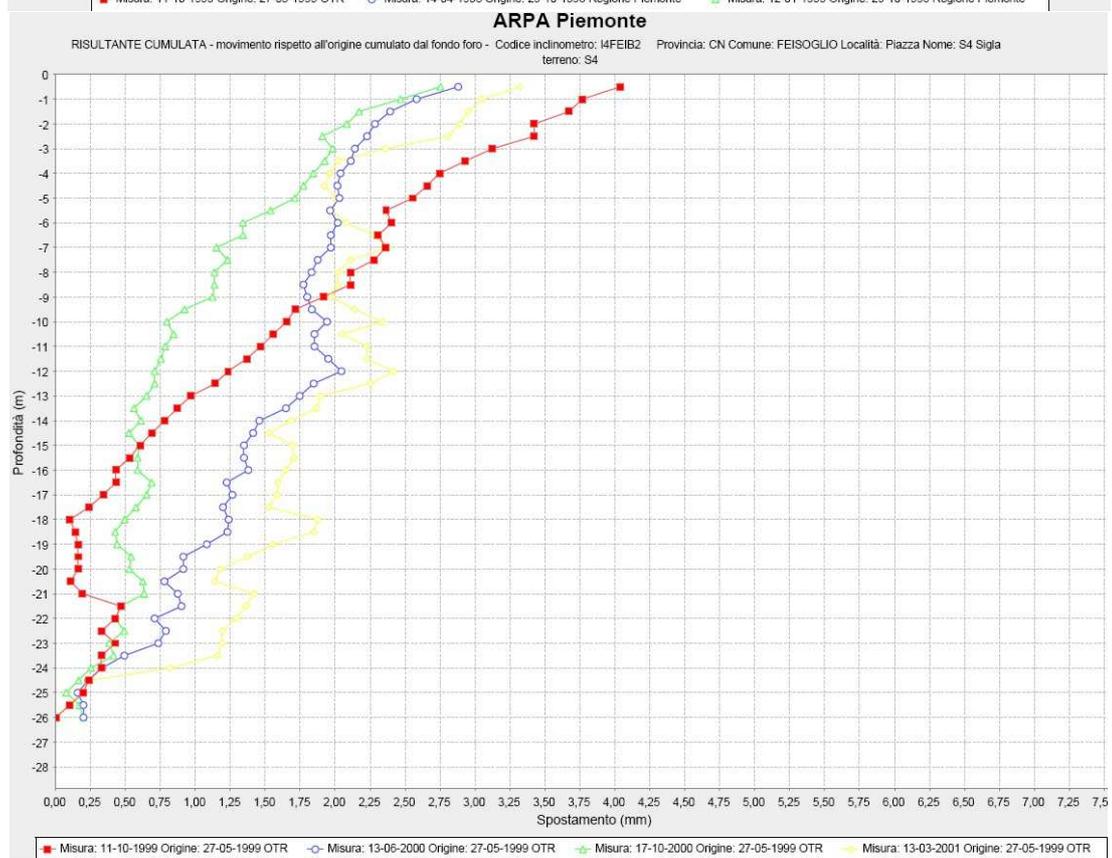
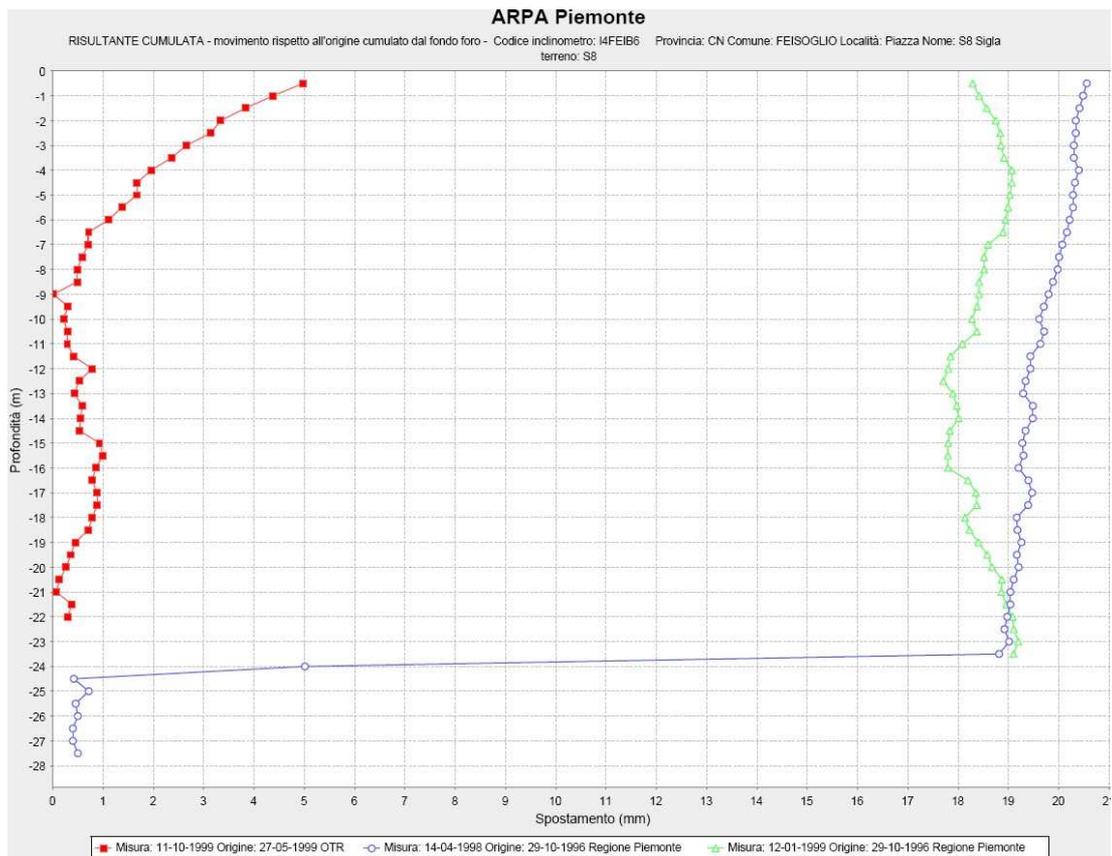


Fig 4.48

4.2.8 ESEMPIO: FRANA DI SAUZE D'OULX

Il dissesto in esame è classificato come deformazione gravitativa profonda (DGPV), la zona coperta dal seminato PS è quella dell'abitato di Sauze d'Oulx. In questo caso non è stato possibile attuare un'analisi di confronto con i dati inclinometrici in quanto non vi è sovrapposizione temporale tra i dati.

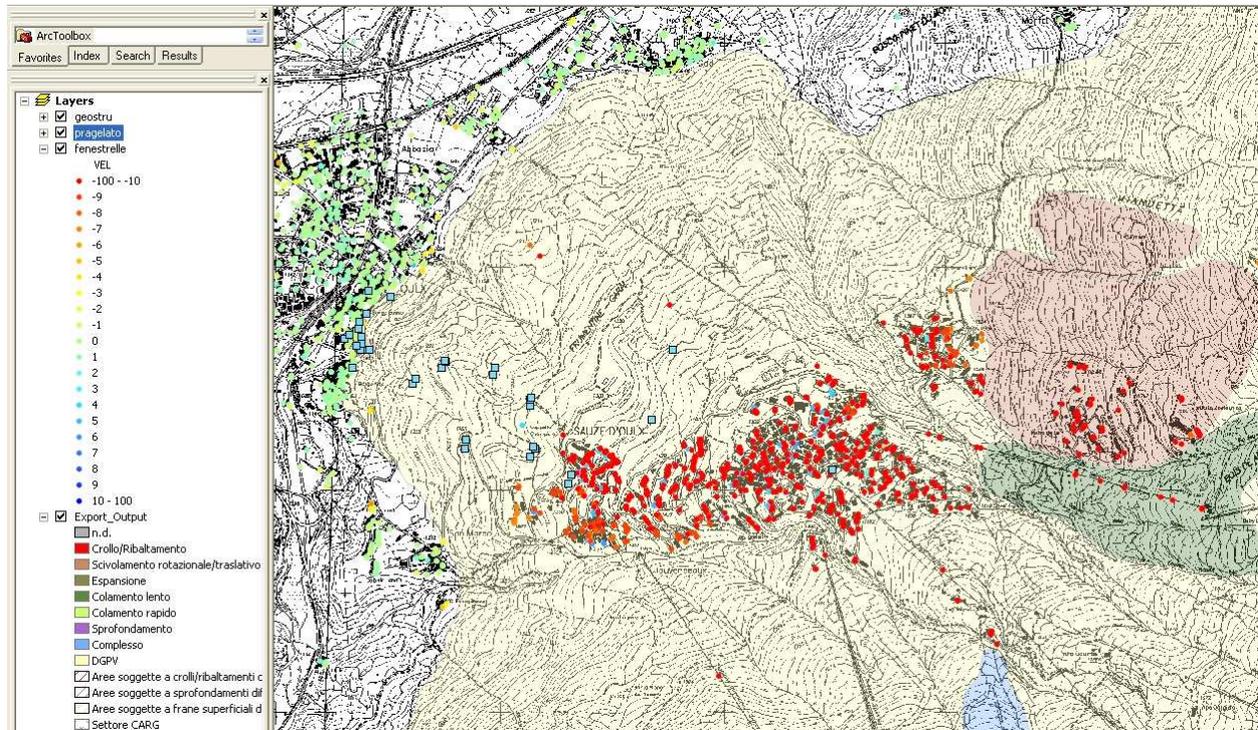


Fig 4.50

Ai dati PS sono stati comunque proiettati lungo la linea di massima pendenza al fine di ottenere un indice dello spostamento in atto

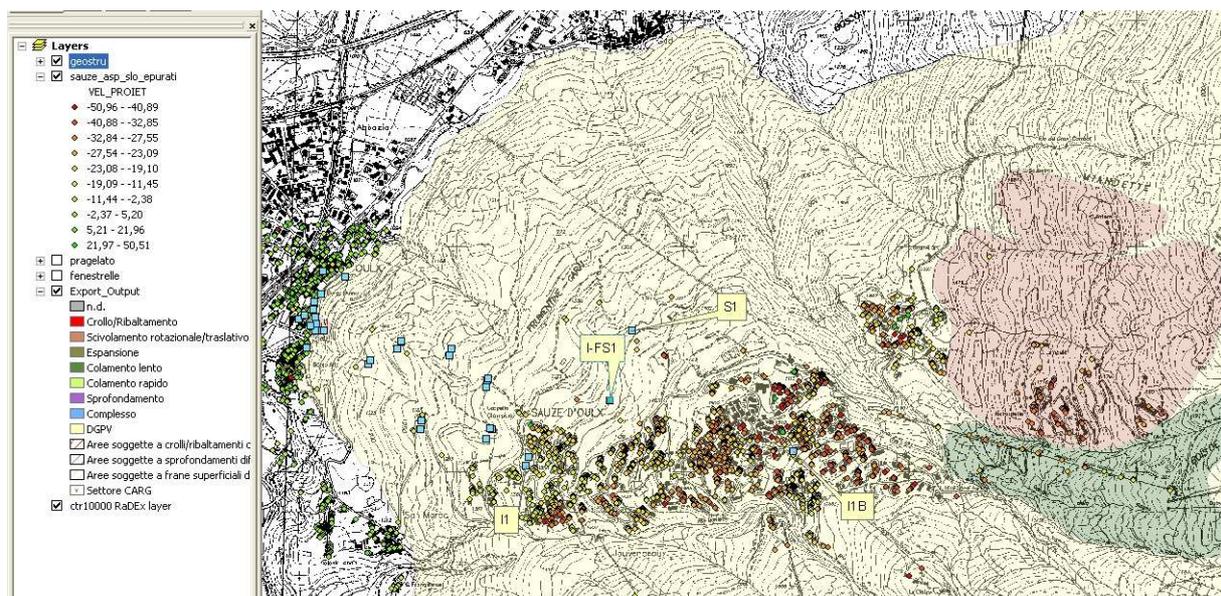


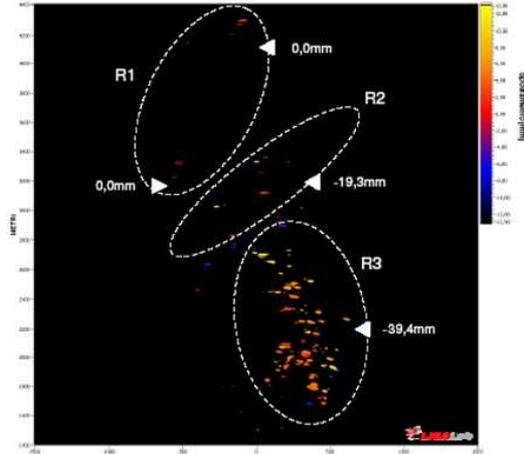
Fig 4.51

Sulla frana, oltre agli inclinometri, è presente un sistema di monitoraggio basato sulla tecnologia GB-InSar (LISA system della LISALAB) che permette di definire lo spostamento del dissesto rispetto il punto di analisi posto sul versante opposto di quello in frana

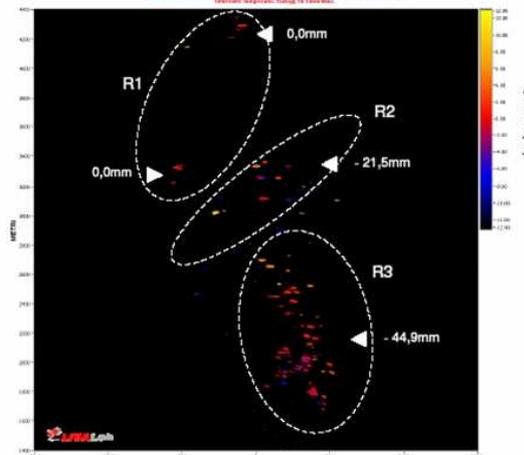


Fig 4.52

I valori che si ottengono dalla tecnologia GB-InSar sono stati suddivisi in regioni a diverso cinematiso R1, R2, R3.



Mapa di deformazione a intervallo di 45 mesi relativa alle campagne di Settembre 2002 e Giugno 2006



Mapa di deformazione a intervallo di 50 mesi relativa alle campagne di Settembre 2002 e Novembre 2006

Fig 4.53

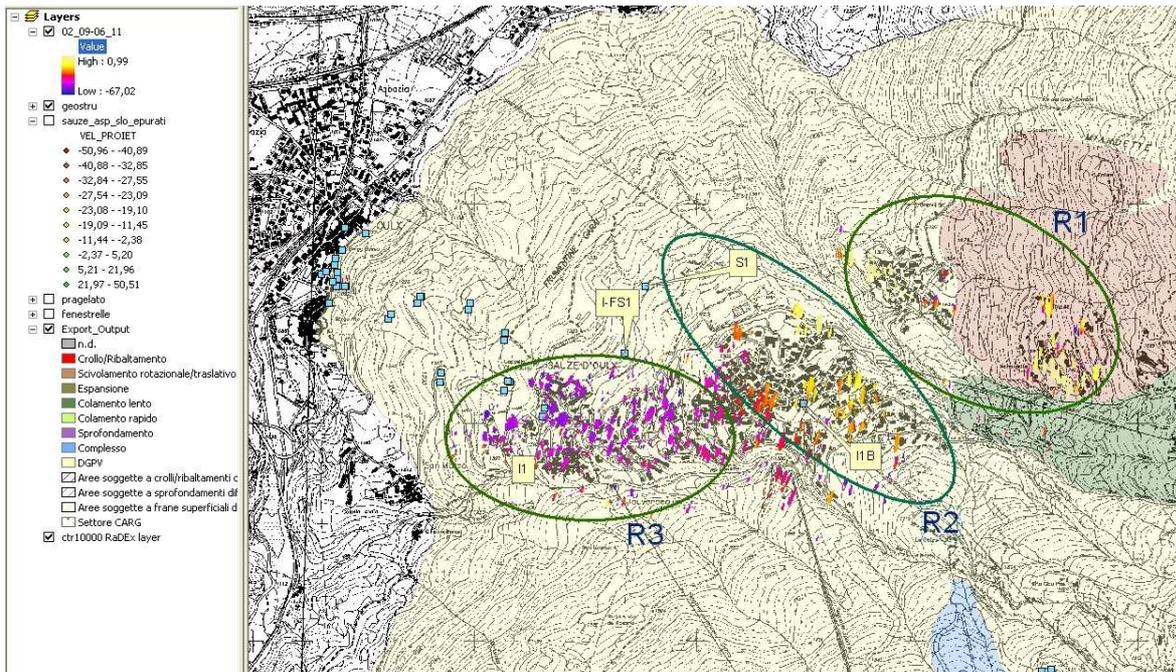


Fig 4.54

I dati sono espressi in spostamenti, riportando il dato in velocità (mm/a) i valori per le diverse regioni cinematiche avrò:

data misura	01/11/02	01/05/03	01/05/04	01/10/04	01/05/06	01/11/06	
R1 (mm)	0	0	0	0	0	0	spostamenti misurati nelle tre regioni cinematiche (segno negativo =avvicinamento a sorgente)
R2 (mm)	0	-4,7	-10,4	-12,8	-19,3	-21,5	
R3 (mm)	0	-7,2	-18,9	-23,8	-39,4	-44,9	
R1 V (mm/a)	0	0	0	0	0	0	velocità desunte dagli spostamenti misurati (segno negativo =avvicinamento a sorgente del segnale sar)
R2 V (mm/a)	0	-9,48	-6,94	-6,67	-5,52	-5,37	
R3 V (mm/a)	0	-14,52	-12,61	-12,41	-11,26	-11,22	

Tab. 4.8

L'area in esame è coperta dal seminato PS sia ascendente che discendente e attraverso la procedura sopra spiegata si sono ottenute le componenti orizzontali (Est-Ovest) e verticale; il segno negativo nel calcolo della componente orizzontale indica uno spostamento verso ovest e nella componente verticale l'abbassamento.

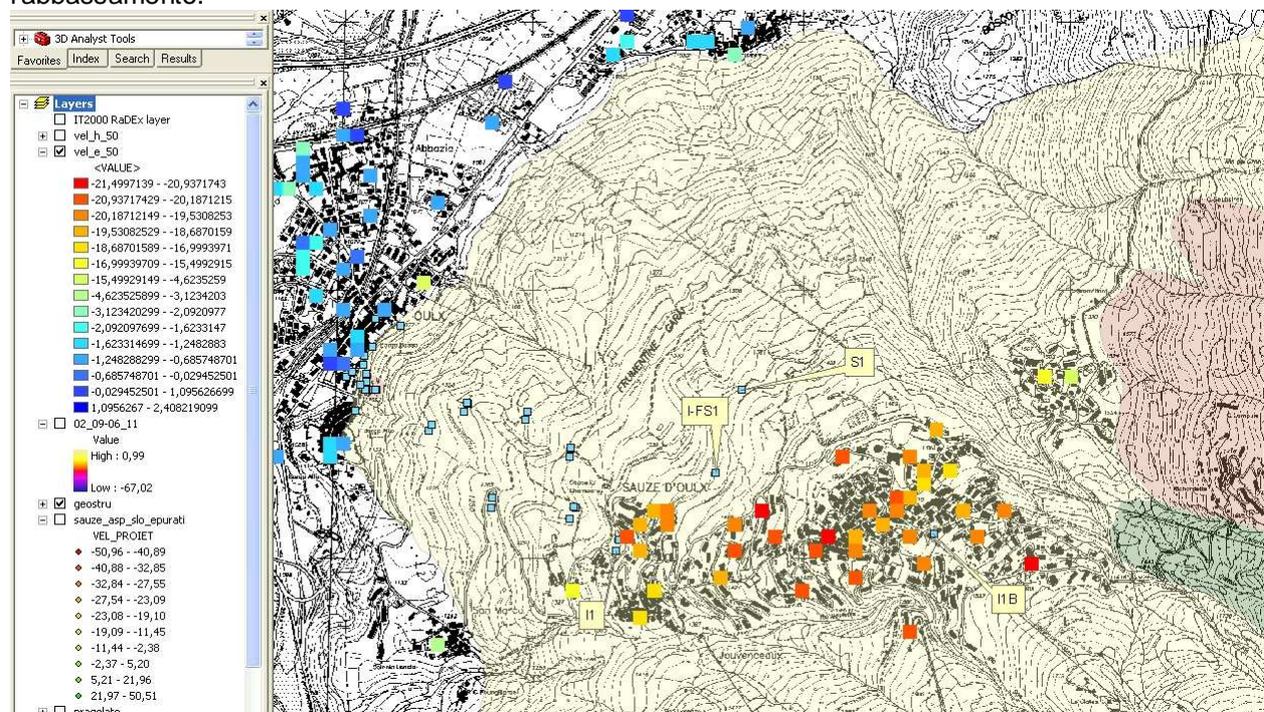


Fig 4.55 Componente orizzontale Est-Ovest del seminato PS sul corpo di frana

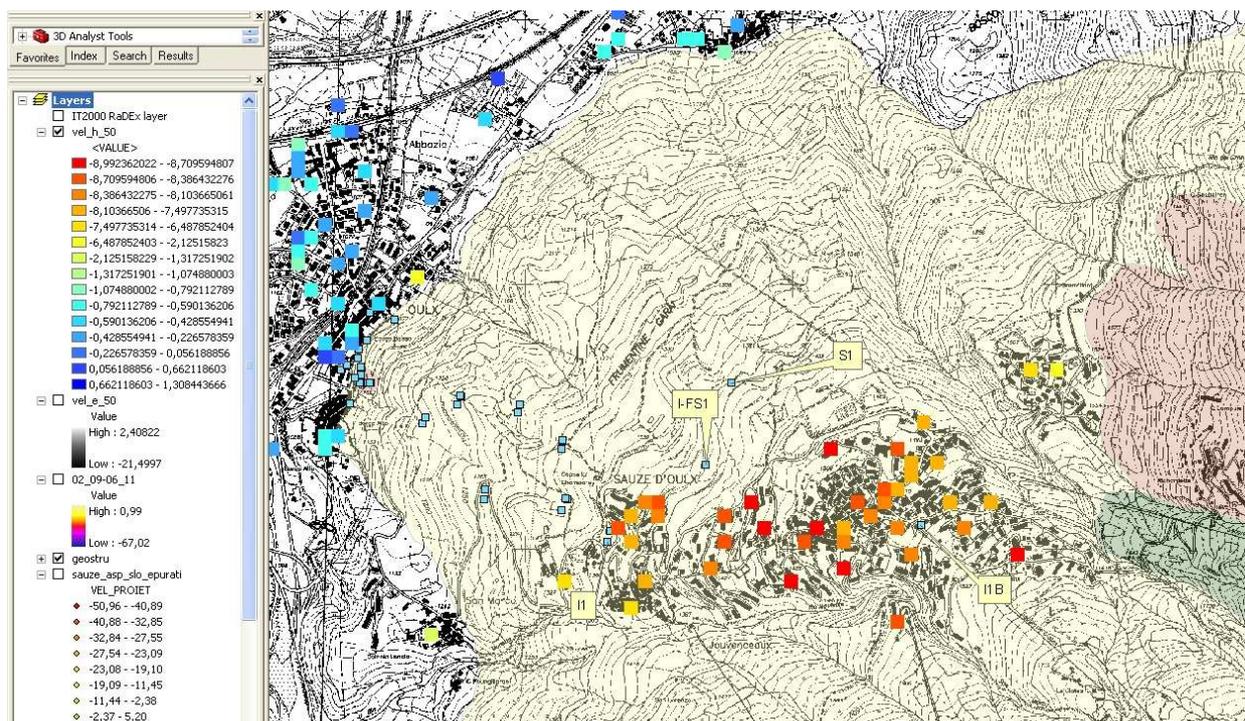


Fig 4.56 Componente verticale del seminato PS sul corpo di frana

I risultati ottenuti dalla scomposizione del dato PS (componente orizzontale) con i dati del GB-Insar risultano dello stesso ordine di grandezza. Le elaborazioni successive sull'area sono in fase di elaborazione.

4.2.9 TABELLA DEI SITI MONITORATI SU CUI RICADONO PS IN PIEMONTE

Cod. ISTAT	COMUNE	Prov	Località	Data installazione	Data inizio	SAR
006025	CABELLA LIGURE	AL	Montaldo di Cosola	17-Apr-97	97	SI
006028	CANTALUPO LIGURE	AL	Cimitero	19-Giu-98	99	SI
006041	CASASCO	AL	Polverola	01-Feb-99	99	SI
006060	CONIOLO	AL	C.na Frati	06-Mar-97	98	SI
006079	GARBAGNA	AL	Agliani	13-Feb-97	99	SI
006085	GRONDONA	AL	Torre	08-Giu-98	99	SI
006098	MOMPERONE	AL	Zerbi	22-Mag-91	99	SI
006147	ROCCA GRIMALDA	AL	Concentrico	01-Jan-82	95	SI
006146	ROCCAFORTE LIGURE	AL	Corti	26-Giu-98	99	SI
006148	ROCCHETTA LIGURE	AL	Celio Sud	23-Lug-96	97	SI
006156	SANT'AGATA FOSSILI	AL	Concentrico	14-Apr-94	99	SI
005037	CESSOLE	AT	Giaronetto	01-Jan-96	99	SI
005060	LOAZZOLO	AT	Fogliano	17-Dic-96	99	SI
005098	SAN GIORGIO SCARAMPI	AT	Boglioli	29-Feb-96	99	SI
005105	SESSAME	AT	Concentrico	09-Mar-95	99	SI
096074	VALLE SAN NICOLAO	BI	Berchelle	01-Jan-87	89	SI
004003	ALBA	CN	Gabutto	11-Apr-96	99	SI
004004	ALBARETTO DELLA TORRE	CN	Concentrico	27-Sep-96	99	SI

004013	BAROLO	CN	Vergne	05-Dic-97	98	SI
004018	BELVEDERE LANGHE	CN	Casanova	21-Ott-97	98	SI
004020	BENEVELLO	CN	C.na Bonelli	25-Feb-98	99	SI
004021	BERGOLO	CN	C.na Burone	10-Feb-97	99	SI
004023	BONVICINO	CN	Lovera	11-Giu-98	99	SI
004024	BORGOMALE	CN	Pistone	21-Dic-95	97	SI
004026	BOSIA	CN	Concentrico	08-Set-95	99	SI
004027	BOSSOLASCO	CN	Cimitero	09-Ott-98	99	SI
004035	CAMERANA	CN	Bricot	06-Mar-96	99	SI
004039	CAPRAUNA	CN	Concentrico	13-Nov-87	90	SI
004050	CASTELLETTO UZZONE	CN	Valentini	08-Nov-95	99	SI
004052	CASTELLINO TANARO	CN	Argiolo	02-Giu-98	99	SI
004057	CASTINO	CN	Ferrera	25-Set-98	99	SI
004063	CERRETTO LANGHE	CN	S.Rocco	23-Mag-96	99	SI
004066	CEVA	CN	Costa Canile	25-Gen-96	99	SI
004070	CISSONE	CN	Pianezza	05-Feb-96	97	SI
004073	CORTEMILIA	CN	Castella	06-Ago-97	99	SI
004080	DIANO D'ALBA	CN	Servetti	11-Lug-96	99	SI
004081	DOGLIANI	CN	Pianezzo	21-Dic-86	89	SI
004082	DRONERO	CN	Concentrico	01-Gen-83	89	SI
004088	FEISOGLIO	CN	Piazza	04-Giu-96	99	SI
004098	GOTTASECCA	CN	Valle	01-Ott-96	99	SI
004105	LA MORRA	CN	Concentrico	13-Mar-98	99	SI
004109	LEVICE	CN	Lanternazza	26-Giu-96	99	SI
004115	MANGO	CN	Concentrico	15-Mag-96	99	SI
004131	MONESIGLIO	CN	Noceto	10-Feb-98	99	SI
004132	MONFORTE D'ALBA	CN	Bettola	30-Gen-97	99	SI
004137	MONTELUPO ALBESE	CN	Bersano	10-Ott-95	99	SI
004145	MURAZZANO	CN	Concentrico	01-Ott-96	98	SI
004148	NEIVE	CN	Serra Capelli	01-Ott-98	99	SI
004150	NIELLA BELBO	CN	Marazzetti/Amabile	01-Giu-96	97	SI
004161	PERLETTO	CN	Concentrico	07-Nov-95	99	SI
004164	PEZZOLO VALLE UZZONE	CN	Vivai Negro	30-Gen-96	99	SI
004178	PRUNETTO	CN	Bricco	01-Apr-96	99	SI
004195	RODDINO	CN	C.na NoP	10-Nov-95	99	SI
004196	RODELLO	CN	Da Vichi / Cagnassi	01-Dic-95	99	SI
004199	SALE DELLE LANGHE	CN	Albaretto	11-Ott-97	99	SI
004201	SALICETO	CN	S.Sebastiano	28-Ago-95	99	SI
004206	SAN BENEDETTO BELBO	CN	Borgaletto	01-Gen-96	99	SI
004219	SERRAVALLE LANGHE	CN	C.na Manera	27-Mar-96	99	SI
004221	SOMANO	CN	Pedrotti	22-Nov-95	99	SI
004229	TORRESINA	CN	Cimitero	17-Set-96	99	SI
004231	TREZZO TINELLA	CN	Sot- Barone	17-Giu-96	99	SI
004249	VIOLA	CN	Castello	16-Feb-95	95	SI
001010	ANDRATE	TO	Piste	01-Gen-86	98	SI
001036	BROSSO	TO	Vallarera	14-Mar-95	96	SI
001047	CALUSO	TO	Scuola	01-Lug-98	99	SI

001069	CAVAGNOLO	TO	Casamosso	04-Nov-92	94	SI
001075	CHIALAMBERTO	TO	Balmavenera	28-Mar-85	90	SI
001107	FORNO CANAVESE	TO	Milani	01-Jan-88	92	SI
001139	LUSERNA S. GIOVANNI	TO	Magistrorum	11-Nov-97	99	SI
001175	OULX	TO	Liceo Des Ambrois	02-Giu-98	99	SI
001229	RUBIANA	TO	Mompellato	01-Dic-82	89	SI
001232	SALBERTRAND	TO	SapP	20-Apr-98	98	SI
001258	SAUZE DI CESANA	TO	Grange Sises	28-Giu-82	89	SI
001272	TORINO	TO	c.so Casale Meisino	28-Jan-98	98	SI
001272	TORINO	TO	c.so Chieri Sud	08-Feb-98	98	SI
001272	TORINO	TO	Chiantore	02-Dic-98	98	SI
001272	TORINO	TO	Giacomassi	25-Feb-98	98	SI
001272	TORINO	TO	Lauro	08-Mar-98	98	SI
001272	TORINO	TO	Mainero	14-Nov-98	98	SI
001272	TORINO	TO	Podere Romano	29-Nov-98	98	SI
001272	TORINO	TO	Rei	04-Mar-98	98	SI
001272	TORINO	TO	Strada Fenestrelle	07-Feb-98	98	SI
001272	TORINO	TO	Strada Lauretta	11-Mar-98	98	SI
001272	TORINO	TO	Viale S.Martino Sud	13-Mar-98	98	SI
001272	TORINO	TO	Valpiana	16-Mar-98	98	SI
001272	TORINO	TO	c.so Chieri Nord	26-Feb-98	98	SI
001278	TRAVERSELLA	TO	Combadora	01-Jan-80	92	SI
001297	VICO CANAVESE	TO	Balemella/Coste	07-May-97	98	SI
103012	BOGNANCO	VB	S.Lorenzo - Graniga	01-Dic-96	98	SI
103040	MADONNA DEL SASSO	VB	Santuario	01-Jan-91	91	SI
002043	CIVIASCO	VC	Perracino	01-Jan-87	91	SI

5 BIBLIOGRAFIA

- ARPA EMILIA ROMAGNA, 2005. L'uso del telerilevamento satellitare per lo studio della subsidenza nei territori nella bassa pianura romagnola. Rilevamento del territorio.
- Bamler R., Kampes B., Adam N., Suchandt S. (2005) - Assessment of Slow Deformations and Rapid Motions by Radar Interferometry 'Photogrammetric Week 05' Dieter Fritsch, Ed. Wichmann Verlag, Heidelberg 2005.
- Berardino, P., Constantini, G., Franceschetti, G., Iodice, L., Pietranera, L., Rizzo, V., 2003. Use of differential SAR interferometry in monitoring and modelling large slope instability at Matera (Basilicata, Italy). *Engineering Geology* 68/1–2, 31–51.
- Bovenga, F., Nutricato, R., Refice, A., Wasowski, J., 2006. Application of multi-temporal differential interferometry to slope instability detection in urban/peri-urban areas. *Engineering Geology* 88, 219–240.
- Bürgmann, R., Hilley, G. E., and Ferretti, A., Resolving Vertical Tectonics in the San Francisco Bay Area from Permanent Scatterer InSAR and GPS Analysis, *Geology*, 34(3), p.221-224.
- Canuti P., Casagli N., Farina P., Ferretti A., Marks F., Menduni G. 2006. Analisi dei fenomeni di subsidenza nel bacino del fiume Arno mediante interferometria radar. *Giornale di Geologia Applicata*, 4, 131-136,
- Carnec, C., Delacourt, C., 2000. Three years of mining subsidence monitored by SAR interferometry, Gardanne, France. *Applied Geophysics* 43, 43–54.
- Catani F., Colombo D., Farina P., Fumagalli A., Kukavcic M., Marks F., Menduni G., Moretti S., 2006. Utilizzo di dati telerilevati nella mappatura e nel monitoraggio dei fenomeni franosi e nell'analisi della suscettibilità da frana. *Giornale di Geologia Applicata*, 3, 173-180.
- Colesanti C. & Wasowski J, 2006. Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. *Engineering Geology*, 88, 173-199.
- Colesanti C., Ferretti A., Prati C. and Rocca F. (2001). Seismic Faults Analysis in California by Means of the Permanent Scatterers Technique. Keynote Paper, Proceedings of the Third International Symposium on Retrieval of Bioand Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications, Sheffield (United Kingdom) 11-14 September 2001, ESA SP-475, January 2002, 125-131
- Colesanti, C., Ferretti, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., 2003b. SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the Permanent Scatterers technique. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41, 1685–1700.
- Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 2003a. Monitoring landslides and tectonic motion with the Permanent Scatterers technique. *Engineering Geology* 68/1–2, 3–14.
- Colesanti, C., Wasowski, J., 2004. Satellite SAR interferometry for wide-area slope hazard detection and site-specific monitoring of slow landslides. Proceedings of the ninth International Symposium on Landslides, Rio de Janeiro (Brazil), 28 June– 2 July 2004, vol. 1, pp. 795–802.
- Dehls J. (2006) - Permanent Scatterer InSAR processing: Forsmark. SKB Rapport R-06-56.
- Dehls, 2004, Preliminary analysis of InSAR data over Trondheim with respect to future road development. Report n°2004.043, GSN.
- Farina P., Colombo D., Fumagalli A., Marks F., Moretti S., 2006. Permanent Scatterers for landslide investigations: outcomes from the ESA-SLAM project. *Engineering Geology*, 88, 200-217.
- Ferretti A., Colesanti C., Ferrucci F., Prati C., Rocca F. (2000). Monitoring Known Seismic Faults Using the Permanent Scatterers(PS)Technique. Proceedings of the IEEE International Geoscience and

- Remote Sensing Symposium, IGARSS 2000, Honolulu (USA) 24-28 July 2000, VOL. 5, 2221-2223
- Ferretti, A., Novali, F., Burgmann, R., Hilley, G. & Prati C. 2004. InSAR Permanent Scatterer Analysis Reveals Ups and Downs in San Francisco Bay Area. *EOS*, 85(34), 1-3.
- Hilley, G., Burgmann, R., Ferretti, A., Novali, F. & Rocca F. 2004. Dynamics of Slow-Moving Landslides from Permanent Scatterer Analysis. *Science* 2004-304: 1952-1955.
- Hilley, G.E., Burgmann, R., Ferretti, A., Novali, F., Rocca, F., 2004. Dynamics of slow-moving landslides from Permanent Scatterer analysis. *Science* 304, 1952–1955.
- <http://dude.uibk.ac.at/projects/muscl/>.
- Ketelaar, V.B.H., R.F.Hanssen, A.P.E.M. Houtenbos, R.C. Lindenbergh, 2006. Idealization precision of point scatterers for deformation modelling. In Proceedings of: 4th International Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications, Innsbruck, Austria, 16-19 Nov 2004, pp. 320-327 (2005).
- Meisina, Zucca F., Fossati D., Ceriani M, Allievi J.(2006). Ground deformations monitoring by using the Permanent Scatterers Technique: the example of the Oltrepo Pavese (Lombardia, Italy), *Engineering Geology*, 88, 240-259.
- Mora O., Mallorquí J. J., Duro J., Broquetas A. Long-term subsidence monitoring of urban areas using differential interferometric SAR techniques
- Nagler, T., 2002. Monitoring Urban Subsidence, Cavities and Landslides by Remote Sensing (MUSCL). Technical Report WP330 "DInSAR Methods for Alpine Valleys", available online:
- Nagler, T., Rott, H., Kamelger, A., 2002. Analysis of landslides in Alpine Areas by means of SAR Interferometry. Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2002), Toronto (Canada), 24–28 June 2002, vol. 1, pp. 198–200.
- Rocca, F., 2003. 3D Motion recovery with multi-angle and/or left right Interferometry. Proceedings of the third International Workshop on ERS SAR Interferometry (FRINGE 2003), Frascati (Italy), 2–5 December 2003. ESA SP-550, available also online: <http://earth.esa.int/fringe03/proceedings/>.
- Rott, H., Mayer, C., Siegel, A., 2000. On the operational potential of SAR interferometry for monitoring mass movements in Alpine areas. Proceedings of the 3rd European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR 2000), Munich, Germany.
- Rott, H., Scheuchl, B., Siegel, A., Grasmann, B., 1999. Monitoring very slow slope movements by means of SAR interferometry: a case study from a mass waste above a reservoir in the Ötztal Alps, Austria. *Geophysical Research Letters* 26, 1629–1632.
- Singhroy, V., Molch, K., 2004. Characterizing and monitoring rockslides from SAR techniques. *Advances in Space Research* 33, 290–295.
- Telerilevamento Europa, 2006. Rapporto di elaborazione. Regione Piemonte. Ref: 05.0J6C-REP1.0.
- Worawattanamateekul J., Hoffmann J., Adam N., Kampes B. Urban deformation monitoring in Bangkok metropolitan (Thailand) using permanent scatterer and differential interferometry techniques.