



**TRE**<sup>®</sup>  
a POLIMI spin-off company

## **PSInSAR™ - Manuale d'uso**

Data: Gennaio 2008



Tele-Rilevamento Europa - T.R.E. s.r.l

Via Vittoria Colonna, 7  
20149 Milano - Italia

tel.: +39.02.4343.121

fax: +39.02.4343.1230

[www.treuropa.com](http://www.treuropa.com)

[www.psinsar.com](http://www.psinsar.com)

e-mail: [tre@treuropa.com](mailto:tre@treuropa.com)

**Sede legale**

c/o Politecnico di Milano - Dipartimento di Elettronica e Informazione

P.za Leonardo da Vinci, 32

20133 Milano - Italia

## Indice

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Generalità sul SAR .....   | 5  |
| 1.1   | Sistemi di telerilevamento radar satellitari.....                        | 5  |
| 1.2   | I satelliti ESA .....  | 6  |
| 1.3   | Il satellite Radarsat.....   | 8  |
| 1.4   | Le immagini radar.....   | 8  |
| 1.5   | Deformazioni prospettiche.....   | 9  |
| 1.6   | Interferometria radar differenziale DInSAR .....                         | 11 |
| 2     | Permanent Scatterers.....  | 15 |
| 2.1   | Galleria di esempi.....  | 18 |
| 3     | Comprendere i <i>Permanent Scatterers</i> .....                          | 24 |
| 3.1   | Cosa sono i Permanent Scatterers?.....                                   | 24 |
| 3.1.1 | Quali fattori determinano la presenza dei PS sul territorio? .....       | 25 |
| 3.1.2 | Riflettori artificiali .....   | 27 |
| 3.2   | Cosa misurano i PS?.....   | 28 |
| 3.2.1 | Misure lungo la congiungente sensore-bersaglio .....                     | 30 |
| 3.2.2 | Combinazione dei dati PS ascendenti e discendenti.....                   | 34 |
| 3.3   | Tutto è relativo!.....   | 37 |
| 3.3.1 | Punto di riferimento REF .....   | 37 |
| 3.3.2 | Processo di georeferenziazione.....                                      | 38 |
| 4     | Precisione ed Accuratezza .....  | 41 |
| 4.1   | Alcune definizioni importanti.....                                       | 41 |
| 4.2   | Sorgenti di errore.....  | 41 |
| 4.3   | Precisione delle misure .....  | 41 |
| 4.3.1 | Errore di georeferenziazione.....  | 42 |
| 4.3.2 | Errore sulle velocità medie e sulle serie storiche .....                 | 44 |
| 4.4   | Ambiguità della misura .....   | 44 |
| 5     | Vantaggi e limiti della tecnica PSInSAR™ .....                           | 47 |
| 6     | Sinergia con le tecniche di monitoraggio convenzionali .....             | 49 |
| 6.1   | Validazione del dato PS con misure di livellazione ottica e GPS .....    | 50 |
| 7     | Formato dei dati.....  | 53 |
| 7.1   | Struttura del database .....   | 53 |
| 7.2   | I parametri di qualità: Coerenza e Deviazione Standard.....              | 55 |
| 8     | Guida pratica .....  | 58 |
| 8.1   | Visualizzazione delle velocità e impostazione della scala cromatica..... | 60 |
| 8.2   | Consultazione delle serie storiche .....                                 | 61 |
| 9     | Applicazioni .....   | 65 |
| 9.1   | Subsidenza .....   | 65 |
| 9.1.1 | Estrazione di fluidi dal sottosuolo.....                                 | 66 |
| 9.1.2 | Attività mineraria.....  | 68 |
| 9.1.3 | Sinkholes.....   | 68 |
| 9.2   | Instabilità di versante.....   | 70 |
| 9.3   | Faglie sismiche e vulcani.....   | 80 |
| 9.4   | Infrastrutture, singoli edifici, beni architettonici.....                | 83 |

## Introduzione

Questo manuale nasce come una guida all'uso dei Permanent Scatterers e ha l'obiettivo di illustrare in maniera operativa la *Tecnica PS (PSInSAR™)* frutto di ricerche e studi decennali svolti dal gruppo SAR del Politecnico di Milano e da Tele-Rilevamento Europa – T.R.E. s.r.l.

I diffusori permanenti (*Permanent Scatterers, PS*) corrispondono ad oggetti già presenti sul terreno che vengono identificati dal satellite grazie a loro particolari caratteristiche elettromagnetiche e che forniscono informazioni sul moto del punto osservato. In virtù della loro estrema densità sul territorio, dell'elevata precisione delle misure e dell'ottimizzazione dei tempi di calcolo e dei costi, la tecnica PSInSAR™ si colloca nell'ambito del monitoraggio territoriale come uno strumento idoneo allo studio dei fenomeni deformativi che intervengono sulla superficie terrestre.

Per consentire al lettore di acquisire una conoscenza graduale della tecnica PSInSAR™, senza tralasciare spunti per l'approfondimento, il presente manuale è organizzato nelle seguenti sezioni:

- La *sezione 1* riporta alcuni concetti generali sul principio di funzionamento dei sistemi SAR satellitari e sull'interferometria SAR.
- La *sezione 2* fornisce una descrizione sintetica sui *Permanent Scatterers* e sulle informazioni che è possibile estrarre dalla loro analisi, allegando una sequenza di immagini esemplificative delle situazioni in cui sono maggiormente utilizzati.
- La *sezione 3* rappresenta il fulcro del manuale: in essa vengono riportati i “concetti cardine” per la corretta comprensione ed interpretazione dei dati PS, quali la modalità di acquisizione e la relatività spazio-temporale delle misure.
- La *sezione 4* affronta l'argomento della precisione e dell'accuratezza dei dati PS.
- La *sezione 5* riporta in sintesi i vantaggi ed i limiti della tecnica PS
- La *sezione 6* offre un confronto tra la tecnica PS e le comuni tecniche di monitoraggio ambientale (essenzialmente, GPS e livellazione ottica), evidenziando come un impiego combinato di queste tecniche possa garantire numerosi vantaggi nel settore della gestione e della pianificazione del territorio;
- La *sezione 7* descrive le caratteristiche principali del prodotto fornito all'utente, illustrando la struttura di ciascun file digitale consegnato al cliente.
- La *sezione 8* indica all'utente come visualizzare e gestire in ambiente GIS i dati PS illustrati nella sezione precedente.
- La *sezione 9* fornisce un quadro dettagliato delle diverse applicazioni in cui possono essere utilizzati i *Permanent Scatterers*, illustrando i risultati di alcuni casi reali.

## 1 Generalità sul SAR

### 1.1 Sistemi di telerilevamento radar satellitari

I sistemi radar satellitari forniscono immagini elettromagnetiche (a frequenze comprese tra 500MHz e 10GHz) della superficie terrestre con risoluzione spaziale di qualche metro. Rispetto ai più noti sistemi ottici operano con continuità, potendo acquisire dati in presenza di copertura nuvolosa e sia di giorno sia di notte.

Il principio di funzionamento RADAR (acronimo di radio detecting and ranging) è il seguente: un apparecchio trasmittente illumina lo spazio circostante con un'onda elettromagnetica che incidendo sulla superficie terrestre subisce un fenomeno di riflessione disordinata (diffusione, *scattering*). Una parte del campo diffuso torna verso la stazione trasmittente, equipaggiata anche per la ricezione, dove vengono misurate le sue caratteristiche. Il dispositivo è in grado di individuare il bersaglio elettromagnetico (*detecting*) e, misurando il ritardo temporale tra l'istante di trasmissione e quello di ricezione, valutare la distanza (*ranging*) a cui è posizionato, localizzandolo in modo preciso lungo la direzione di puntamento dell'antenna (direzione di *range*).

La direttività dell'antenna utilizzata per trasmettere e ricevere il segnale radar, e cioè la selettività nell'illuminazione dello spazio circostante consente di localizzare l'oggetto anche lungo l'altra dimensione (detta di *azimuth*). Quanto più grande è l'antenna, tanto più stretta è la sua impronta e, di conseguenza, tanto meglio viene localizzato il bersaglio. Chiaramente ciò avviene a scapito dell'estensione dell'area illuminata. Per ovviare questo inconveniente, le antenne molto direttive usate per i radar militari e per applicazioni di aviazione civile ruotano, in modo da "spazzare" tutta l'area circostante alla loro posizione.

L'idea alla base del SAR (Synthetic Aperture Radar - Radar ad Apertura Sintetica) consente di risolvere il compromesso risoluzione–estensione dell'area osservata. Combinando coerentemente (cioè tenendo conto di ampiezza e fase del segnale SAR, concetti il cui significato fisico si introdurrà in seguito) i dati acquisiti dal sensore in posizioni successive, si sintetizza un'antenna fittizia di grandi dimensioni detta, appunto, ad apertura sintetica. È proprio questo procedimento a garantire un'elevata risoluzione anche nella direzione di azimuth.

Poiché il sistema illumina lo spazio circostante con radiazioni elettromagnetiche proprie è detto sistema *attivo*: non è richiesta infatti illuminazione solare e le frequenze utilizzate dal radar penetrano attraverso le nuvole, evitando così i già accennati problemi di acquisizione dei sistemi ottici.

In Figura 1 è illustrato il confronto tra un'acquisizione di tipo ottico e una radar, ottenuta dai satelliti ERS dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA), della stessa area. Le informazioni geografiche di carattere generale sono le stesse, tuttavia nell'immagine radar si può notare come le strutture al suolo rispondano in modo differente alle onde elettromagnetiche emesse: le strade appaiono nere poiché riflettono specularmente il campo trasmesso, mentre strutture metalliche sono particolarmente luminose (al centro dell'immagine).

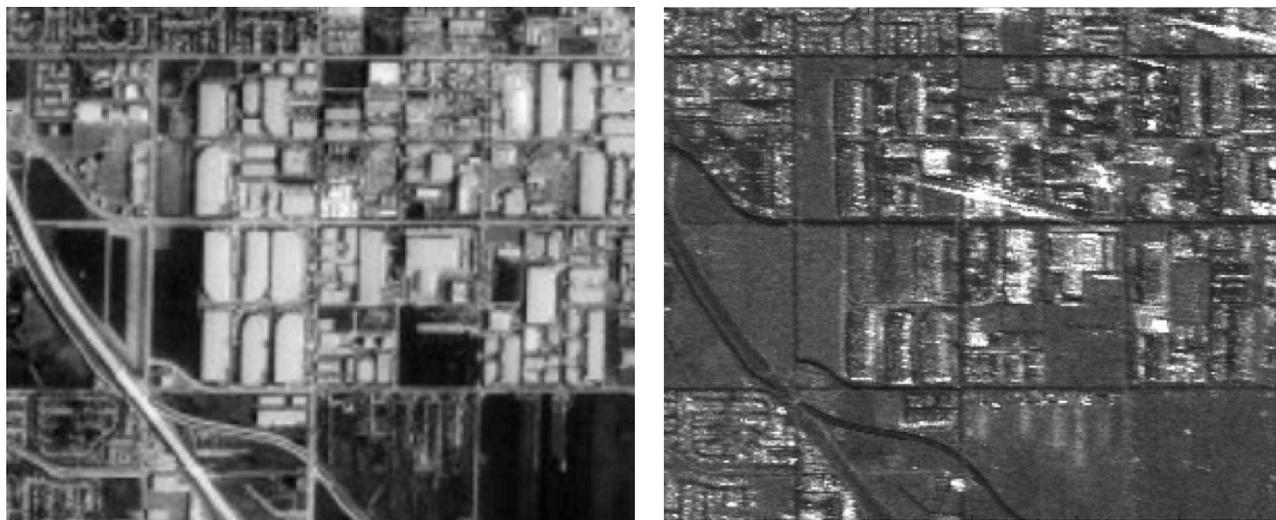


Figura 1: Confronto tra acquisizione ottica (a sinistra) e acquisizione radar di tipo SAR (a destra).

## 1.2 I satelliti ESA

Nel maggio 1991 l'Agenzia Spaziale Europea (ESA) lanciò il primo SAR europeo a bordo del satellite ERS-1 seguito nel 1995 dal gemello ERS-2 (figura2) posto sulla sua stessa orbita ma con un ritardo di un giorno.

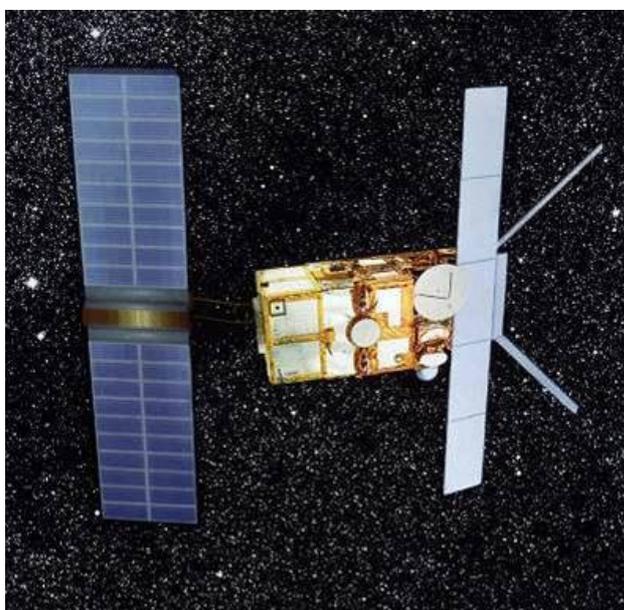


Figura 2: Immagine del satellite ERS-2.

I satelliti ERS seguono orbite eliosincrone lievemente inclinate rispetto ai meridiani, illuminando, da una quota attorno a 780 Km, una striscia di terreno (*swath*) larga circa 100 km con un sistema radar

SAR operante nel dominio delle microonde alla frequenza di 5.3 GHz, ovvero con una lunghezza d'onda  $\lambda$  pari a 5.66 cm, caratteristica fondamentale per poter apprezzare movimenti millimetrici.

La stessa orbita nominale viene ripercorsa ogni 35 giorni (*revisiting time*), consentendo così di acquisire dati relativi alla stessa scena al suolo in tempi differenti.

Grazie alla scelta di ESA di acquisire continuamente i dati a partire dal 1992, per vaste aree del pianeta, sono oggi disponibili i dataset del decennio 1992-2001 composti da un'immagine radar ogni 35 giorni. Questi costituiscono un'informazione storica di enorme rilevanza permettendo di studiare l'evoluzione della fase per ciascuna acquisizione e ricostruire la storia delle deformazioni.

In Figura 3 è rappresentata schematicamente la geometria di acquisizione dei sistemi SAR-ERS.

La direzione parallela all'orbita è detta *azimuth* e coincide approssimativamente con la direzione Nord-Sud. La risoluzione (ovvero la capacità di riconoscere come distinti due bersagli) in azimuth vale circa 5 m.

La direzione della congiungente sensore-bersaglio (perpendicolare all'orbita ed inclinata di un angolo  $\theta$  - detto *off-nadir* - rispetto alla verticale pari mediamente a  $23^\circ$ ) è detta *slant range* (o più semplicemente *range*) oppure *Line Of Sight* (LOS). La risoluzione in *range* vale circa 8 m, la sua proiezione sul piano (ground range) circa 20 m.

Le immagini radar si sviluppano pertanto lungo le direzioni di *range* e *azimuth*, dette usualmente coordinate SAR.

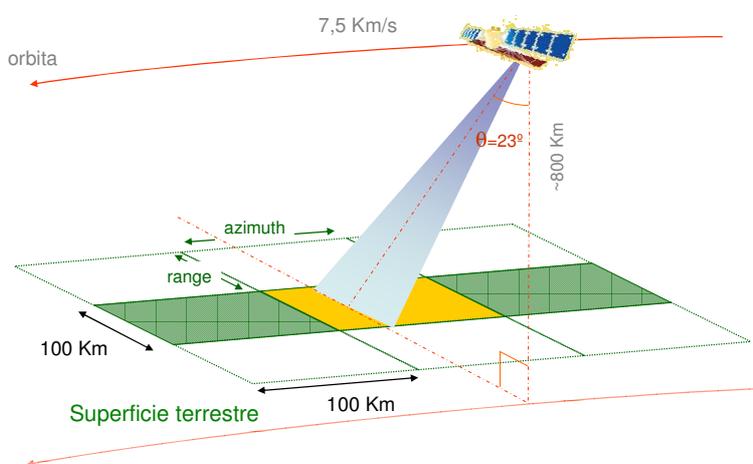


Figura 3: Geometria d'acquisizione SAR delle piattaforme ERS-1 ed ERS-2.

In data 1 Marzo 2002 è stato lanciato il satellite ENVISAT, disposto sulla stessa orbita dei satelliti ERS. Oltre a varie strumentazioni, dispone a bordo anche di un sensore SAR (*Synthetic Aperture Radar*) con caratteristiche molto simili a quelle dei sensori ERS. Purtroppo, la politica di acquisizione dei dati ENVISAT non consente ad oggi di disporre di archivi di dati continui e regolarmente aggiornati.

### 1.3 Il satellite Radarsat

RADARSAT-1 è la missione SAR satellitare della Agenzia Spaziale Canadese. Lo strumento a bordo è un radar ad apertura sintetica con caratteristiche nominali lievemente differenti da quelle delle missioni ERS ed ENVISAT. Le modalità di acquisizione sono molteplici mentre le orbite garantiscono, come nel caso dei satelliti europei, la copertura dell'intero pianeta sia secondo geometrie discendenti sia ascendenti.

La strategia di acquisizione adottata da RADARSAT è "on demand", quindi, nonostante la missione sia operativa dal 1996, non sono stati creati gli archivi storici che contraddistinguono i dati ERS. TRE ha deciso di investire nella pianificazione stipulando un accordo con il fornitore di dati canadese e il distributore italiano di dati. A partire da Marzo 2003 sono iniziate le acquisizioni sistematiche su tutto il territorio nazionale nella doppia modalità, ascendente e discendente. Si è quindi iniziata la costruzione di un archivio storico affidabile ed aggiornabile con continuità di anno in anno.



Figura 4: Archivio Italiano immagini RADARSAT disponibili da Maggio 2003 ad oggi.

### 1.4 Le immagini radar

Le immagini radar sono matrici di numeri complessi definiti dalle grandezze di ampiezza e fase. L'ampiezza individua la quantità di campo elettromagnetico retrodiffusa verso il satellite, mentre la fase dipende da diversi fattori, tra cui la distanza sensore-bersaglio. Proprio la fase costituisce l'informazione chiave per le applicazioni interferometriche volte all'identificazione di aree soggette a fenomeni di movimento superficiale.

In fase di acquisizione ogni bersaglio a terra è colpito da più impulsi elettromagnetici emessi dal sensore lungo la sua orbita. Le agenzie spaziali forniscono, su un opportuno supporto (CD), l'eco degli impulsi radar così come sono stati ricevuti dal satellite. Si parla, in questo caso, di dati grezzi (*raw data*).

Le immagini radar propriamente dette nascono solo a valle di un algoritmo di *focalizzazione*, che permette di associare alle varie celle di risoluzione (pixel) il relativo contributo di energia retrodiffusa:

ad ogni elemento della matrice corrisponde una zona a terra di 20 per 5 metri circa (su terreno piano). Ogni supporto contiene una quantità di dati relativa ad un'area di 100 x 100 Km (10000 km<sup>2</sup>).

Durante i vari passaggi lungo la stessa orbita i satelliti si discostano leggermente dalla traiettoria nominale, di fatto vi sono delle variazioni dell'ordine delle centinaia di metri descritte dal parametro *baseline geometrico* (o *normale*); di conseguenza la geometria di acquisizione per la stessa zona varia di volta in volta di angoli  $\theta$  leggermente diversi creando matrici di pixel non corrispondenti alla medesima cella di risoluzione al suolo.

Per effettuare l'analisi è necessario che a *pixel* omologhi nelle varie immagini corrisponda la stessa cella di risoluzione, si procede quindi con una fase di elaborazione dei dati detta *registrazione* (o *ricampionamento*). Operativamente, tra tutte le acquisizioni, si sceglie un'immagine, detta *master*, come riferimento; tutte le rimanenti, dette *slave*, vengono ricampionate sulla geometria della master, grazie ad un opportuno modello, in modo da avere la stessa griglia di riferimento per tutti i passaggi del satellite. Il modello utilizzato permette di compensare sia una rotazione sia una traslazione indotta sulle immagini a causa del differente angolo di vista.

La scelta dell'immagine master è dettata principalmente dall'esigenza di minimizzare i cosiddetti fenomeni di decorrelazione temporale e geometrica, come illustrato nella sezione 1.61.4. Per tale ragione, in fase iniziale la serie storica di ciascun PS ha valore nullo di spostamento in corrispondenza della data di acquisizione dell'immagine master. Nell'analisi PSInSAR™ prima della consegna dei risultati al committente, allo scopo di facilitare la lettura dei diagrammi delle serie storiche di spostamento dei PS, il tempo  $t_0$  viene fatto coincidere con la data della prima immagine disponibile (cfr.7.1).

## 1.5 Deformazioni prospettiche

La modalità di acquisizione, non perpendicolare al suolo ma secondo un angolo di vista  $\theta$ , descritta precedentemente, dà origine nelle immagini focalizzate a delle deformazioni prospettiche dovute alla topografia del terreno. In base alla pendenza del terreno si distinguono tre differenti tipi:

1. *foreshortening*: si verifica quando la pendenza del terreno tende ad essere perpendicolare alla congiungente sensore-bersaglio (pendenza positiva pari all'angolo di off-nadir  $\theta$ ); in questi casi il contributo di più punti si concentra in poche celle producendo pixel molto luminosi nell'immagine di ampiezza.
2. *layover*: si verifica quando la pendenza del terreno è maggiore dell'angolo  $\theta$ ; questo produce una forte distorsione dell'immagine che impedisce la corretta interpretazione del segnale e ogni analisi quantitativa.
3. *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).

In Figura 5 sono riportate le geometrie dei diversi fenomeni.

In Figura 6 è rappresentata la mappa di riflettività multi-immagine (composta da più immagini focalizzate) di un'area montuosa, in cui si evidenzia molto bene la presenza di fenomeni di *foreshortening* (linee bianche) per i versanti orientati verso il satellite.

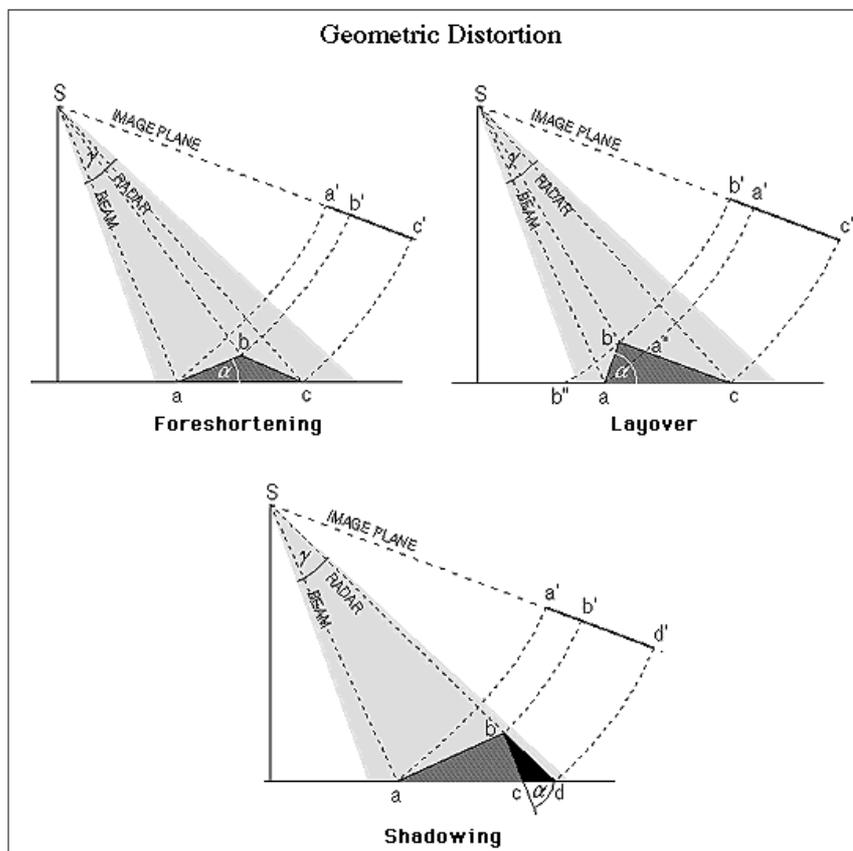


Figura 5: Deformazioni prospettive: foreshortening, layover, shadowing



Figura 6: Fenomeni di deformazione prospettica in immagini focalizzate SAR. Al centro della figura, versanti in *foreshortening* (linee bianche).

## 1.6 Interferometria radar differenziale DInSAR

La tecnica tradizionale per lo studio di dati SAR è l'interferometria differenziale (DInSAR), che si basa sull'analisi dell'evoluzione del valore di fase tra due distinte acquisizioni in modo tale da mettere in luce eventuali differenze riconducibili a fenomeni di deformazione, topografia o disturbi atmosferici. L'interferogramma è la matrice di dati ottenuta dal confronto tra le due distinte acquisizioni della stessa area e racchiude in sé le informazioni relative ai vari contributi che generano il valore di fase.

Come accennato, il segnale radar relativo ad un bersaglio è caratterizzato da due valori: l'ampiezza e la fase. La fase racchiude l'informazione più importante ai fini delle applicazioni interferometriche: la distanza sensore-bersaglio. I termini che contribuiscono alla fase di una singola immagine SAR sono molteplici e possono essere riassunti nella seguente equazione:

$$\phi = \psi + \frac{4\pi}{\lambda} \cdot r + \alpha + n$$

dove  $\psi$  è il termine di fase dovuto alla riflettività del bersaglio (dipendente dal materiale e dalla sua geometria),  $\alpha$  è un contributo di fase dovuto all'atmosfera,  $r$  è la distanza sensore-bersaglio (questo valore, moltiplicato per il fattore riportato nell'equazione, viene indicato con il termine di *propagatore*) e  $n$  è un inevitabile rumore proprio del sistema di acquisizione.

L'obiettivo della tecnica interferometrica è quello di isolare gli effettivi contributi di fase dovuti al movimento del bersaglio e non imputabili a disturbi, ovvero stimare accuratamente la differenza di cammino ottico  $\Delta r$  dell'onda elettromagnetica trasmessa in due successive acquisizioni e retrodiffusa dal bersaglio a terra.

La fase di una singola immagine SAR non è di fatto utilizzabile, perché risulta impossibile discriminare un contributo dall'altro. Se si hanno, però, due acquisizioni relative alla stessa area, accuratamente registrate sulla stessa griglia di riferimento, è possibile utilizzare l'informazione contenuta in esse. In questo caso, infatti, si genera un interferogramma sottraendo la fase di un'immagine a quella dell'altra. Tipicamente, un interferogramma presenta una serie di frange colorate, in cui i diversi colori rappresentano diversi valori di fase (Figura 7). Ciascuna frangia rappresenta un ciclo di variazione della fase interferometrica.

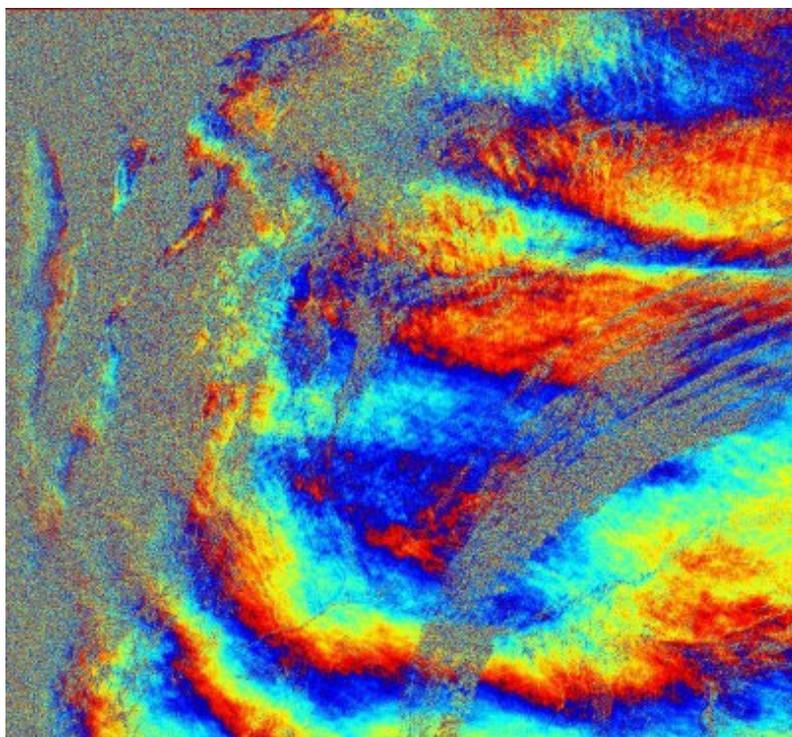


Figura 7: Esempio di interferogramma

Se non avvengono particolari cambiamenti nel periodo tra le due acquisizioni, i contributi dovuti alla riflettività si elidono e la fase dell'interferogramma dipende, con buona approssimazione, solo dalla distanza sensore-bersaglio e quindi da eventuali movimenti intercorsi tra le due acquisizioni (a parte i contributi spuri dovuti all'atmosfera e al rumore). In condizioni ideali dunque l'interferogramma può essere assimilato ad una mappa degli spostamenti.

In realtà diversi effetti riducono (o addirittura compromettono) la qualità dei risultati ottenuti con l'analisi DInSAR.

In primo luogo i fenomeni di decorrelazione temporale che sono causati dalla variazione delle proprietà elettromagnetiche (riflettività) dei bersagli radar nel tempo: in questo caso l'ipotesi che il contributo  $\Psi$  si elida generando l'interferogramma non è più verificata. Questi fenomeni risultano più marcati al crescere dell'intervallo di tempo tra le due acquisizioni utilizzate, definito *baseline temporale*. Le zone coperte da vegetazione, facilmente influenzabili dal vento e di diverso aspetto a seconda della stagione, sono fonte di decorrelazione, mentre i centri urbani e le rocce esposte rimangono maggiormente stabili nel tempo.

La qualità dell'interferogramma dipende anche dalla distanza tra le due orbite effettivamente percorse dal sensore durante l'acquisizione delle due immagini (detta *baseline normale* o *geometrica*). Si può dimostrare che maggiore è il valore assoluto del *baseline*, minore è la banda comune tra i due segnali e quindi minore è il rapporto segnale-rumore relativo all'interferogramma da esse generato. Questo disturbo è denominato: decorrelazione geometrica.

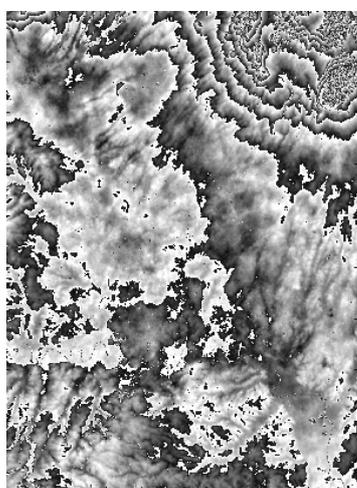
In Figura 8 è mostrato un esempio riassuntivo.

L'interferogramma a) è stato ottenuto utilizzando due acquisizioni a distanza di 1 giorno e con differenza nell'orbita nominale, pari a 123 m. Visto il limitato intervallo di tempo le condizioni della

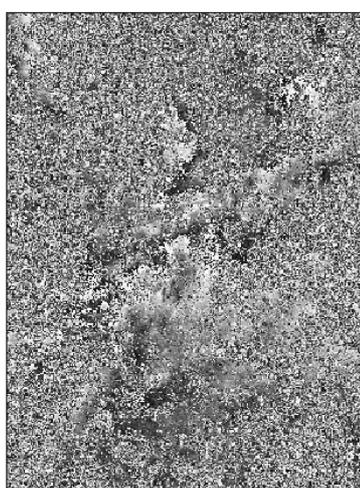
scena non mutano sensibilmente, infatti l'interferogramma presenta una buona coerenza, ovvero sono pressoché assenti nell'immagine fenomeni di rumore. Le frange ben visibili corrispondono a variazioni di fase, e quindi alla variazione della distanza sensore-bersaglio, pari ad un ciclo. Di fatto costituite solamente dalla componente topografica della zona campione.

Si può osservare nell'interferogramma b) come, aumentando l'intervallo temporale, pari ora a 1984 giorni, ma mantenendo quasi inalterata la componente di *baseline normale* (149 m), subentrino sensibili disturbi dovuti a decorrelazione temporale e viene a mancare la coerenza presente nel caso a).

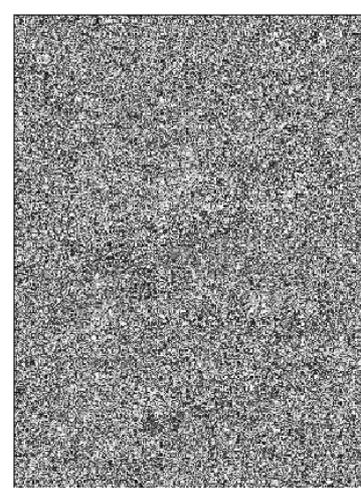
Nell'interferogramma c) i valori di *baseline temporale* e *normale* sono entrambi elevati: l'immagine appare del tutto rumorosa e si perde completamente coerenza.



a)  $B_n = 123$  [m],  $B_t = 1$  [gg]



b)  $B_n = -149$  [m],  $B_t = 1984$  [gg]



c)  $B_n = -712$  [m],  $B_t = 1774$  [gg]

Figura 8: Interferogrammi e disturbi dovuti a decorrelazione temporale e geometrica.

La variazione delle condizioni atmosferiche durante le due acquisizioni si può tradurre in un ulteriore termine di fase ( $\alpha$ ), difficilmente discriminabile da eventuali fenomeni di movimento (Figura 9). In pratica l'attraversamento della troposfera<sup>1</sup> determina un ritardo nella propagazione del segnale, i cui effetti possono essere erroneamente interpretati come spostamenti superficiali del terreno. I valori dei parametri fisici (umidità, temperatura e pressione) della troposfera variano lentamente nello spazio (ad esempio, in un raggio di qualche km), mentre possono essere totalmente diversi da un giorno ad un altro; per questa ragione si è soliti dire che il disturbo atmosferico è correlato nello spazio ma non nel tempo.

<sup>1</sup> La troposfera è la fascia dell'atmosfera a diretto contatto con la superficie terrestre, il cui spessore varia in funzione della latitudine (dai 6-7 km ai poli fino ai 17 km all'equatore). In essa sono concentrati i  $\frac{3}{4}$  dell'intera massa gassosa e quasi tutto il vapore acqueo dell'atmosfera. È lo strato dove avvengono la maggior parte dei fenomeni meteorologici, causati dalla circolazione delle masse d'aria e che danno vita ai venti, alle nuvole ed alle precipitazioni.

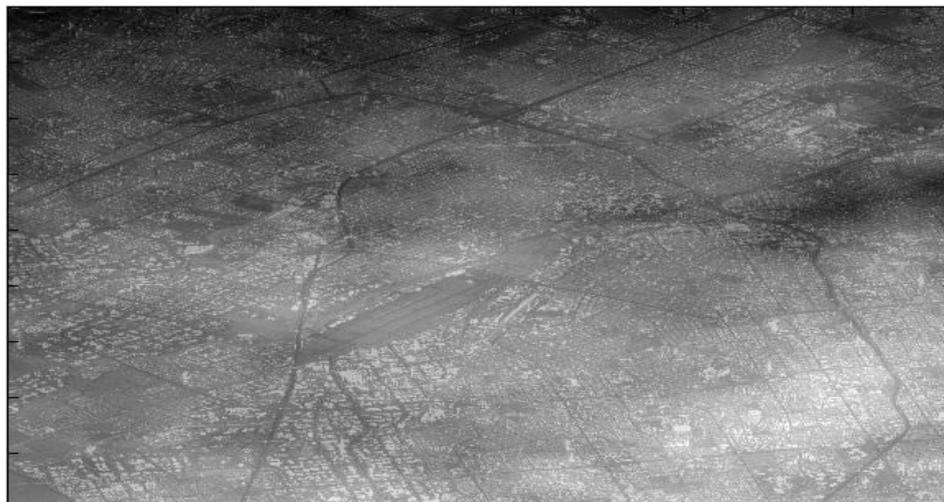


Figura 9: Componente atmosferica di fase sovrapposta all'immagine di ampiezza.

Riassumendo:

- con l'interferometria DInSAR si possono stimare movimenti dell'ordine del centimetro; inoltre, in genere non è possibile effettuare stime puntuali, ma solo analisi areali (estensione  $> 0.2 \text{ km}^2$ ).
- i limiti dell'interferometria DInSAR sono legati ai fenomeni di decorrelazione e al disturbo atmosferico; queste difficoltà sono in gran parte risolte dalla tecnica dei diffusori permanenti o Permanent Scatterers (PSInSAR™).

La tecnica PSInSAR™ è basata sull'osservazione che un piccolo sottoinsieme di bersagli radar, costituito dai PS, è praticamente immune agli effetti di decorrelazione geometrica (i PS sono bersagli molto più piccoli della cella di risoluzione) e temporale (sono stabili nel tempo). Tali bersagli preservano coerenza di fase e possono essere utilizzati per ricostruire e compensare efficacemente il disturbo atmosferico sull'intera immagine radar, sfruttando il fatto che le condizioni atmosferiche variano lentamente nello spazio, e non sono correlate nel tempo. Affinché ciò sia possibile è necessario disporre di data set di almeno 25-30 immagini, e che la densità spaziale di PS sia sufficientemente elevata (maggiore di  $5 \text{ PS/km}^2$ ).

## 2 Permanent Scatterers

I diffusori permanenti (*Permanent Scatterers, PS*) sono bersagli radar identificati sulla superficie terrestre dal satellite, in corrispondenza dei quali è possibile eseguire misure di spostamento con precisione millimetrica. Questi punti vengono individuati mediante un complesso algoritmo di elaborazione numerica dei segnali, ideato dal gruppo SAR del Politecnico di Milano alla fine degli anni '90 e perfezionato da TRE.

I PS corrispondono ad elementi già presenti al suolo, quali manufatti (edifici, monumenti, strade, linee ferroviarie, antenne, tralicci, elementi metallici, etc.) oppure elementi naturali (affioramenti rocciosi, accumuli di detrito, etc.), che si distinguono nell'area esaminata, per il fatto di possedere una elevata stabilità nel tempo della risposta elettromagnetica ("firma radar").

L'idea di base è illustrata in Figura 10. Il sensore radar montato sul satellite invia un impulso elettromagnetico verso la superficie terrestre; gli elementi a terra riflettono il segnale, rinviandone verso il satellite una porzione (retrodiffusione o *backscattering*). Misurando il tempo trascorso tra l'invio del segnale e la ricezione del segnale retrodiffuso (informazione associata alla fase dell'onda elettromagnetica), il sistema radar è in grado di determinare la distanza intercorrente tra il sensore ed il bersaglio. Dunque, se l'oggetto si trova in un'area affetta da fenomeni di deformazione superficiale, il sensore rileva tra una acquisizione e l'altra una variazione di distanza e quindi lo spostamento del bersaglio. Questo è possibile grazie al fatto che l'algoritmo PSInSAR™ consente di depurare il segnale dai disturbi di decorrelazione e atmosferici come illustrato nel paragrafo precedente (cfr.1.6).

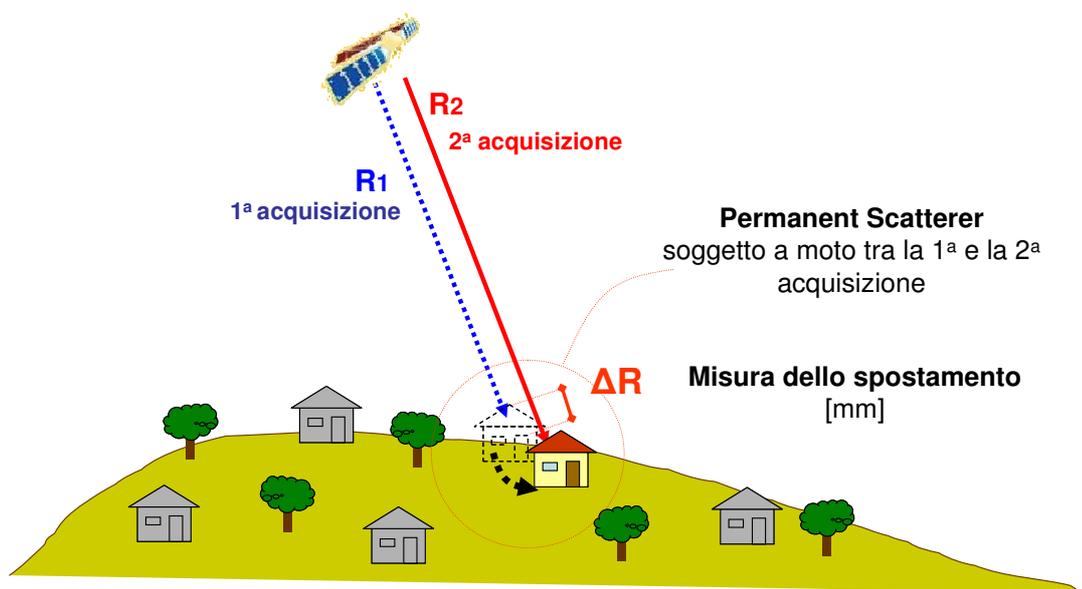


Figura 10: principio di funzionamento della tecnica PSInSAR™ basato sulla misura di variazione di distanze.

I PS offrono una copertura territoriale ampia, anche migliaia di km<sup>2</sup>. La densità spaziale dei PS risulta variabile a seconda del sensore utilizzato per l'analisi, dell'uso del suolo e della morfologia del terreno (sezione 3.1.1). In generale, i PS raggiungono una densità molto elevata in corrispondenza dei centri urbani e delle aree antropizzate, mentre sono assenti nelle zone vegetate o innevate.

Tutte le misure di spostamento, associate a ciascun PS, sono rilevate lungo la linea di vista del sensore (ossia, la congiungente sensore-bersaglio o *Line Of Sight, LOS*; sezione 3.2.1) e sono di tipo differenziale, ovvero riferite spazialmente ad un punto a terra di coordinate note, detto *reference point*, e temporalmente alla data di acquisizione della prima immagine; le informazioni di movimento fornite dai PS sono pertanto relative e non assolute. Inoltre, i dati vengono acquisiti con cadenza variabile da sensore a sensore (*revisiting time*); in riferimento ai satelliti attualmente operanti, si ricorda che ERS ed ENVISAT hanno un tempo di rivisitazione uguale a 35 giorni, RADARSAT pari a 24 giorni.

Sul territorio l'insieme dei PS può essere visto come una rete naturale di "capisaldi radar", concettualmente analoga ad una rete di stazioni GPS (*Global Positioning System*), utile sia per conoscere lo spostamento di un singolo bersaglio a terra (ad esempio, un edificio), sia per ricostruire, a livello regionale, la distribuzione territoriale e l'evoluzione dei fenomeni deformativi superficiali legati a subsidenza, instabilità di versante, faglie, attività vulcanica, ecc. La differenza sostanziale è che la densità dei PS è di gran lunga superiore a quella dei capisaldi di una rete geodetica tradizionale e che i PS non necessitano di alcuna monumentazione. Inoltre, la tecnica PS consente di campionare aree molto ampie in tempi relativamente ristretti, condizione assolutamente irrealizzabile con le altre tecniche di monitoraggio.

Un ulteriore vantaggio della tecnologia satellitare rispetto alle comuni tecniche di rilevamento degli spostamenti superficiali è costituito dalla possibilità di disporre di una cospicua serie di immagini radar già acquisite sull'intero territorio nazionale. Infatti, grazie agli archivi dell'ESA (*European Space Agency*) e della CSA (*Canadian Space Agency*), è possibile ricostruire la dinamica dell'area di interesse a partire dal 1992. Questo può rivelarsi un elemento decisivo per l'indagine, soprattutto laddove le tecniche convenzionali richiederebbero anni prima di poter dare misure significative.

I PS rappresentano quindi uno strumento operativo ideale per studiare e monitorare, con una frequenza mensile di aggiornamento del dato ed una precisione millimetrica, i fenomeni deformativi della superficie terrestre su una griglia ad elevata densità spaziale di bersagli radar. Inoltre, grazie all'automatismo dell'elaborazione che li produce e all'ottimizzazione dei tempi di calcolo, i risultati ottenuti con l'analisi PSInSAR™ permettono di ottenere un quadro sinottico dei fenomeni in atto a costi decisamente competitivi rispetto alle analisi convenzionali, dato che il sensore rileva punti di misura che si trovano già sul terreno e che non richiedono alcun intervento di installazione e manutenzione.

È infine opportuno precisare che, per le particolari caratteristiche della tecnologia utilizzata (cfr.4.4), la tecnica consente di apprezzare con grande precisione movimenti deformativi lenti, con velocità di spostamento (lungo la linea di vista del sensore) tipicamente inferiori a circa 20 cm/a, mentre può non risultare adatta al monitoraggio di fenomeni più veloci.

Le applicazioni condotte su aree di grande estensione, finalizzate alla perimetrazione di fenomeni franosi a livello regionale, hanno mostrato un'ottima complementarità tra i risultati dell'analisi PS e quelli ottenuti con il tradizionale approccio geologico-geomorfologico. Grazie alla disponibilità di informazioni quantitative sull'evoluzione del territorio nell'arco temporale di almeno un decennio è stato infatti possibile verificare la perimetrazione dei fenomeni e soprattutto definirne il grado di attività

in base alle velocità di spostamento superficiale rilevate. Senza l'apporto del dato PS un simile risultato poteva finora essere ottenuto solo dopo aver installato su ciascun fenomeno di interesse una rete di monitoraggio appropriata ed effettuato campagne di misura di medio-lungo periodo. Alcuni esempi, tratti dal recente censimento dei fenomeni franosi italiani effettuato nell'ambito del Progetto nazionale IFFI, verranno illustrati nella sezione 9.2.

Le informazioni basilari associate a ciascun PS, raccolte in file digitali (sezione 7), sono:

- la posizione del bersaglio a terra, ovvero le sue coordinate spaziali (latitudine/est, longitudine/nord, quota);
- la velocità media annua di spostamento (misurata lungo la congiungente sensore-bersaglio), espressa in mm/a, calcolata nell'intervallo di acquisizione delle immagini elaborate ed in relazione al punto di riferimento (sezione 3.3);
- la serie storica di spostamento, ossia una serie di valori che rappresenta, acquisizione per acquisizione, l'evoluzione dello spostamento subito da ciascun PS, espresso in mm e misurato nella direzione di vista del sistema.

Mentre la posizione del punto di misura, passibile di monitoraggio, è solitamente nota con una precisione di qualche metro, le velocità medie e le serie storiche degli spostamenti del terreno possono essere stimate con precisione millimetrica sul singolo PS (sezione 4).

## 2.1 Galleria di esempi

Nella presente sezione sono riportate immagini raffiguranti alcuni dei numerosi casi in cui è stata applicata la tecnica PS (per approfondimenti si rimanda il lettore alla sezione 9):

- La Figura 11 mostra la griglia di PS rilevati sulla città di Bologna, notoriamente affetta da intensi fenomeni di subsidenza. L'interpretazione dei dati PS ha condotto all'individuazione di una zona in abbassamento molto estesa, con una marcata differenza tra il comportamento dell' area pianeggiante e quella appenninica.

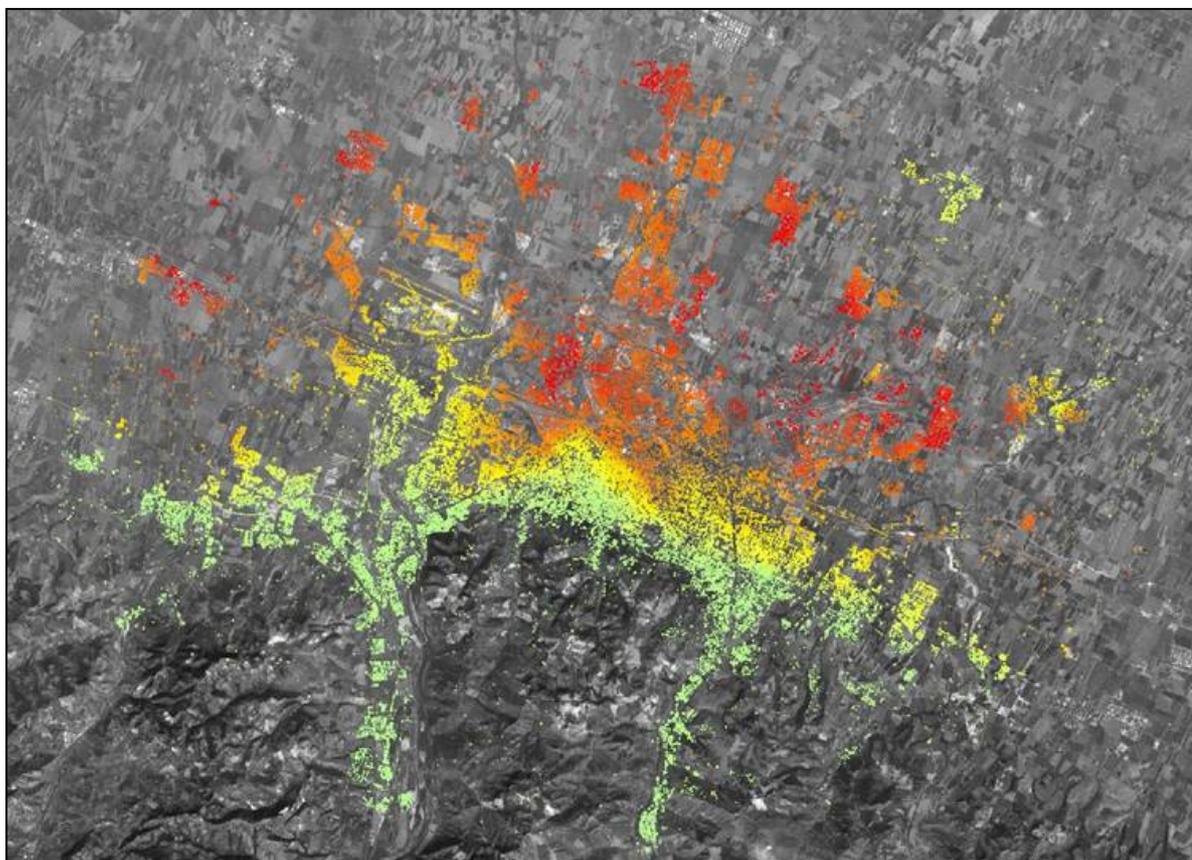


Figura 11: Esempio di applicazione di dati PS nello studio di fenomeni di subsidenza (Bologna, Italia). Velocità saturate tra -30 (rosso) e +30 mm/a (blu)

- L'analisi PSInSAR™ consente lo studio dei fenomeni di instabilità di versante sia a livello di dettaglio che di area vasta, anche in aree difficilmente accessibili in condizioni di sicurezza, dove un monitoraggio con le metodologie convenzionali sarebbe praticamente irrealizzabile. In Figura 12 sono riportati i risultati ottenuti da uno studio di dettaglio eseguito sul versante N

del Monte Padrio Varadega (Valtellina), interessato da un fenomeno gravitativo di grandi dimensioni (30 km<sup>2</sup>); come si può osservare la densità superficiale dei PS è molto elevata e consente di discriminare le aree in movimento relativo.

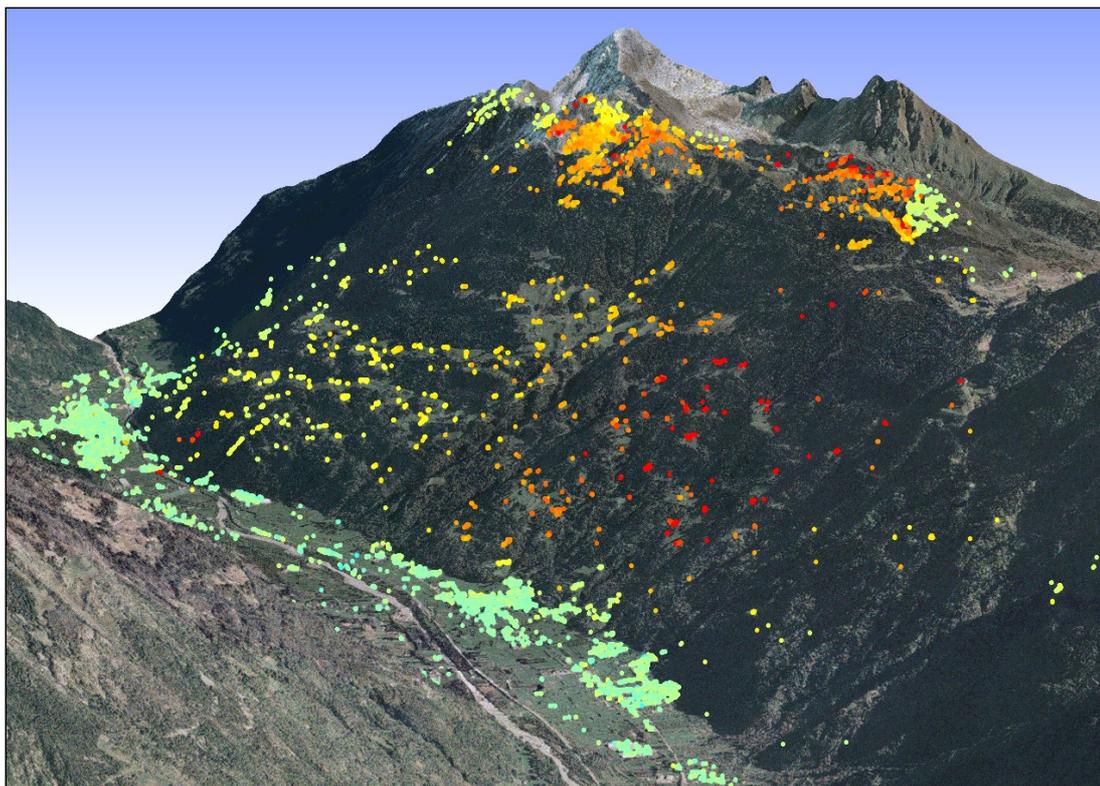


Figura 12: Esempio di applicazione di dati PS nello studio di fenomeni di instabilità di versante (Monte Padrio Varadega, Valtellina).

- I dati PS permettono di monitorare l'evoluzione di aree vulcaniche e tettonicamente attive, solitamente soggette a fenomeni deformativi che la tecnica PS è in grado di rilevare con estrema precisione. A tal proposito, si riporta il caso esemplificativo del vulcano Etna (Figura 13).

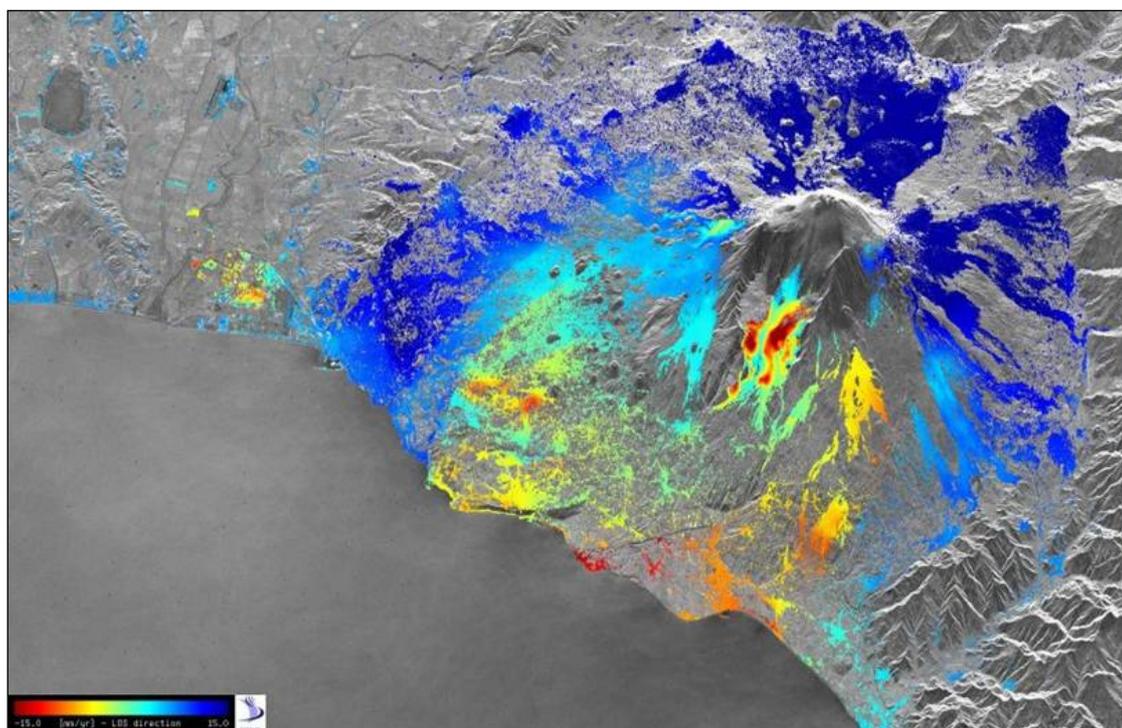


Figura 13: Esempio di applicazione di dati PS nello studio di fenomeni attivi in corrispondenza di aree vulcaniche (Etna, Sicilia).

- La tecnica PS è uno strumento idoneo alla pianificazione di grandi opere infrastrutturali ed al monitoraggio dei fenomeni indotti dalla loro realizzazione, capace di fornire informazioni prima dell'inizio dei lavori (caratterizzazione del sito), in corso d'opera e dopo la loro ultimazione. La tecnica PS si pone quindi come efficace strumento operativo per valutazioni di impatto ambientale. La Figura 14 illustra un esempio evidente degli effetti derivanti dallo scavo di una tratta della rete metropolitana a Milano.

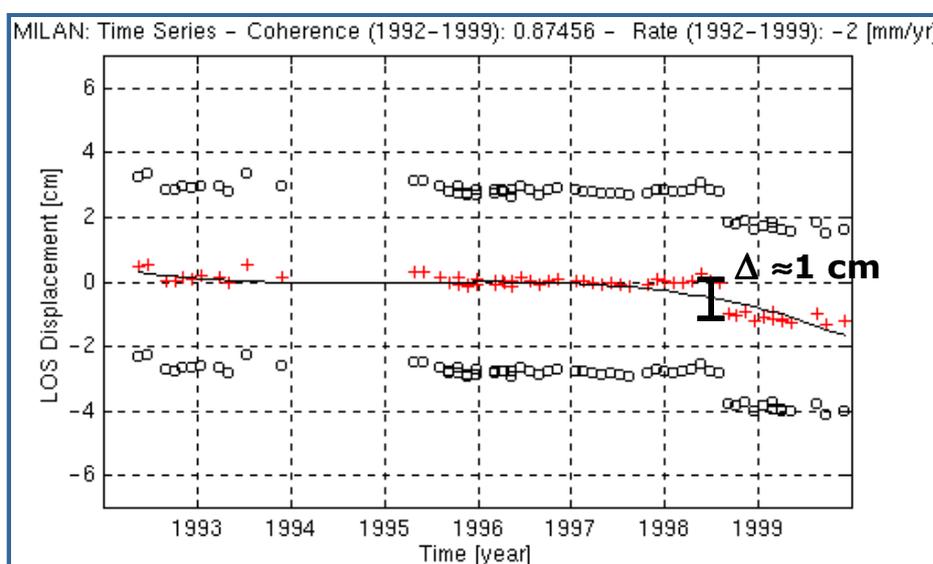


Figura 14: Esempio di applicazione di dati PS nel monitoraggio dei fenomeni indotti dalla realizzazione di grandi opere infrastrutturali (Milano).

- L'analisi PSInSAR™ è stata utilizzata anche per accertare eventuali responsabilità in caso di danni provocati da lavori di costruzione. L'esistenza di un archivio storico di immagini ERS-ESA consente di verificare, congiuntamente a perizie strutturali *in situ*, i legami di causa-effetto tra lavori di costruzione ed eventuali danni subiti dagli edifici nelle zone limitrofe. La tecnica PS è uno strumento capace di compiere analisi retrospettive, da utilizzare anche in ambito giudiziario, come ha dimostrato il caso Rovigo (Figura 15).



**1995: scavi per la costruzione di un parcheggio sotterraneo  
Chiesa della Rotonda e altri monumenti danneggiati**

**Analisi PS  
Serie storica delle deformazioni**

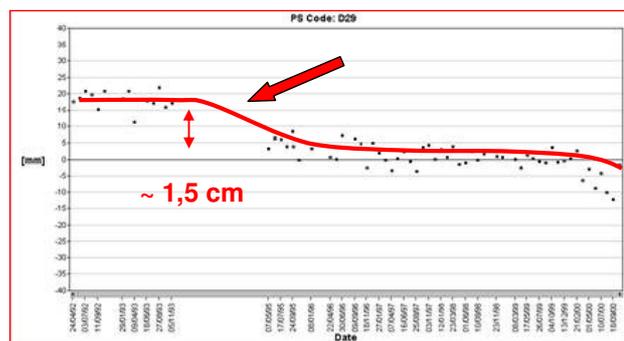


Figura 15: Esempio di applicazione di dati PS nello studio delle condizioni di instabilità di singoli edifici provocati da lavori di costruzione di un parcheggio sotterraneo (Rovigo).

- In Figura 16 è illustrato un caso in cui i dati PS sono stati usati per verificare la stabilità di beni architettonici. La tecnica PS non sostituisce le perizie di tipo strutturale, ma costituisce una base informativa importante per individuare le porzioni su cui è necessario eseguire un'azione mirata ed immediata, riducendo di conseguenza i costi complessivi di intervento.



Figura 16: Esempio di applicazione di dati PS nello studio di stabilità di beni architettonici di particolare rilievo (Duomo, Milano).

### 3 Comprendere i *Permanent Scatterers*

Nella sezione 2 il concetto di diffusore permanente (*Permanent Scatterer, PS*) è stato introdotto in modo operativo, senza alcuna trattazione tecnica specifica. Una volta spiegato cosa sono fisicamente i *Permanent Scatterers* (sezione 3.1) verranno trattati due argomenti basilari per la comprensione dell'analisi PSInSAR™: la modalità di acquisizione dei dati PS (sezione 3.2) e la relatività delle misure (sezione 3.3).

#### 3.1 Cosa sono i *Permanent Scatterers*?

I PS corrispondono ad elementi artificiali o naturali già esistenti sulla superficie terrestre, quali ad esempio porzioni di edifici (terrazzi, tetti), monumenti, strade, linee ferroviarie, antenne, pali, strutture metalliche oppure affioramenti rocciosi, coni e falde detritiche.



Figura 17: esempi di strutture o elementi naturali con comportamento PS

Si tratta dunque di oggetti già presenti sul terreno, che sono illuminati dal satellite e restituiscono verso di esso un segnale di risposta elettromagnetica caratterizzato da una elevata stabilità nel tempo, proprietà che consente di identificare i bersagli a terra come *Permanent Scatterers*. Il sistema radar è in grado di determinare, ad ogni suo passaggio sull'area di interesse, la distanza esistente tra il sensore ed il bersaglio a terra (Figura 10). Se l'oggetto si trova in un'area sottoposta a fenomeni deformativi superficiali, il sensore rileverà tra una acquisizione e l'altra una variazione della distanza sensore-bersaglio lungo la linea di vista del satellite (LOS) e quindi il suo spostamento.

### 3.1.1 Quali fattori determinano la presenza dei PS sul territorio?

La distribuzione dei PS sulla superficie terrestre varia in funzione dei seguenti fattori:

- *uso del suolo*: in generale i valori di densità più elevati ( $>100$  PS/km<sup>2</sup>) si riscontrano in corrispondenza dei centri urbani, caratterizzati da numerosi bersagli radar che preservano nel tempo le loro caratteristiche, mentre le aree vegetate o periodicamente innevate, le cui proprietà elettromagnetiche sono soggette a forti cambiamenti anche in brevi intervalli di tempo, non presentano PS al loro interno.

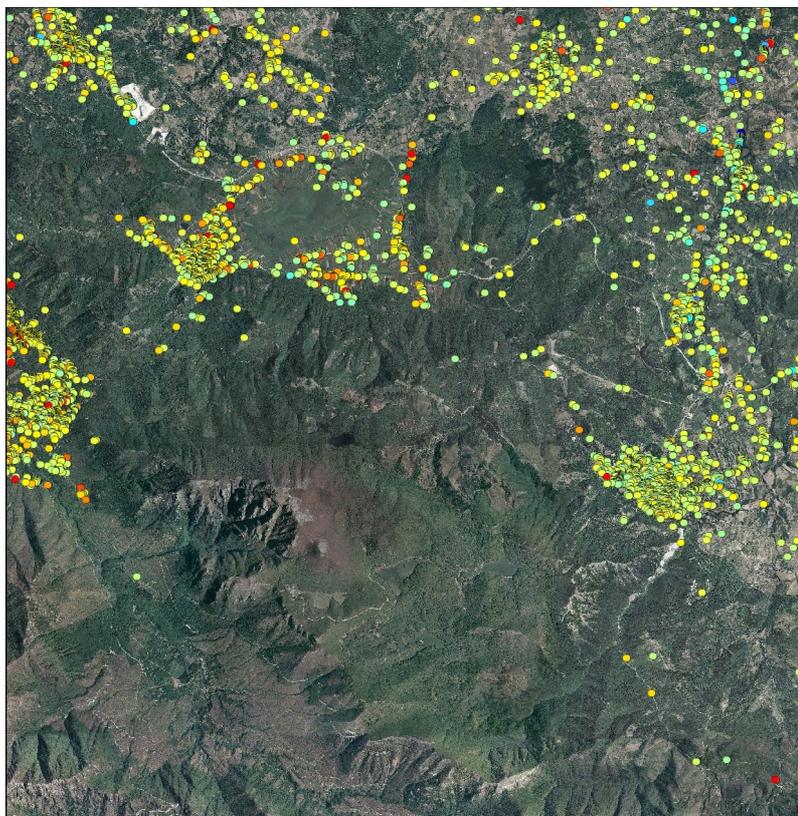


Figura 18: esempio di copertura PS. Risulta evidente la concentrazione dei PS sulle zone urbanizzate mentre le zone vegetate non risultano coperte da punti di misura.

- *topografia dell'area investigata*: le immagini radar di zone con morfologia prevalentemente montuosa sono affette da una serie di distorsioni geometriche derivanti dalla particolare interazione tra il segnale elettromagnetico inviato dal satellite (lungo una linea di vista inclinata) e la superficie topografica (nello specifico, pendenza ed esposizione del versante rispetto al sensore). Due sono le situazioni che precludono la possibilità di trovare PS: quando il versante risulta nascosto alla vista del satellite oppure quando ha una pendenza tale da determinare la sovrapposizione dei segnali di risposta degli oggetti a terra e quindi una non corretta interpretazione del segnale. Tali effetti legati alle deformazioni prospettiche sono già stati illustrati nella sezione 1.5 e sono sinteticamente rappresentati in Figura 19.

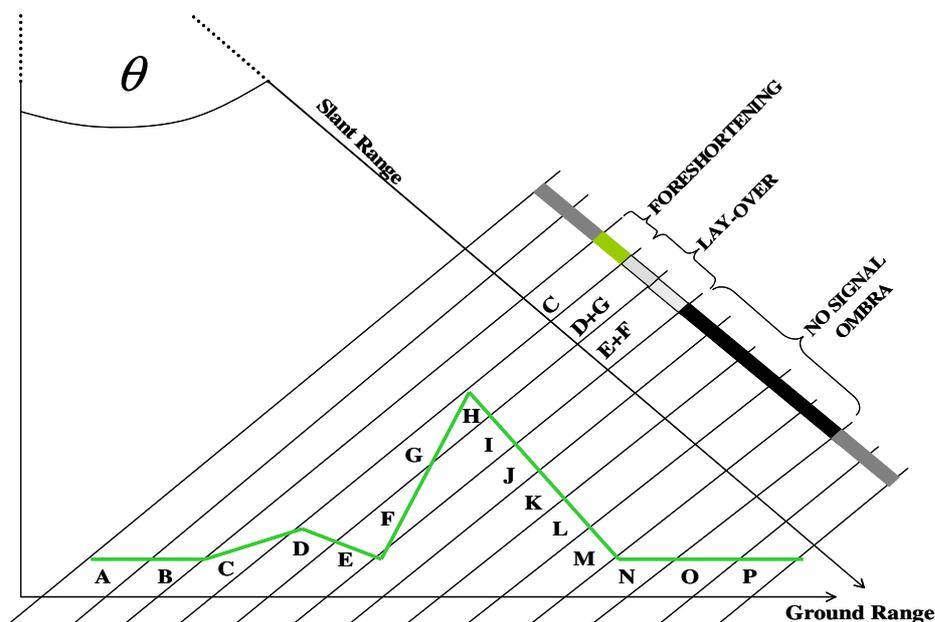


Figura 19: fenomeni legati alla deformazione prospettica

- *tipo di sensore*: di fatto si osserva che la densità dei PS varia in funzione dei peculiari parametri di funzionamento che contraddistinguono i vari sensori come ad esempio frequenza delle acquisizioni e risoluzione a terra del sensore.

Esistono altre condizioni oltre a quelle citate che determinano l'assenza di PS in aree teoricamente favorevoli:

- *variazione delle proprietà elettromagnetiche del bersaglio radar nell'intervallo di acquisizione*: esistono particolari tipologie di bersagli radar che si comportano come PS solo in un sottoinsieme dell'intervallo di acquisizione chiamati PS temporanei e semi-PS. I PS temporanei sono punti che nelle immagini del dataset compaiono ad intermittenza, come luci che si accendono e si spengono ripetutamente. Tipico esempio di PS temporaneo è rappresentato dalle aree in alta montagna che nella stagione invernale sono innevate e di conseguenza non presentano PS, mentre in primavera ed estate dopo la fusione del manto nevoso mostrano affioramenti rocciosi, coni e falde detritiche, ottimi diffusori del segnale radar; quindi, nelle immagini del dataset, che solitamente copre un arco temporale di vari anni, i diffusori a terra appaiono e scompaiono a seconda della stagione. I semi-PS sono bersagli radar che compaiono o scompaiono da un certo momento in poi, come può accadere nel caso di un edificio costruito su un'area che in precedenza era vegetata oppure la cui struttura subisce sostanziali modifiche o viene demolita.
- *entità del moto dell'oggetto a terra*: il fatto che il bersaglio a terra sia soggetto ad uno spostamento molto veloce (con velocità superiore a 20 cm/a) o fortemente non lineare può portare il sistema a non riconoscere l'oggetto stesso come Permanent Scatterer e quindi impossibilitandone di fatto il monitoraggio.

Nel primo caso, depurando il dataset complessivo dalle immagini acquisite in presenza del manto nevoso o limitando l'analisi a un periodo di tempo più ristretto, si può recuperare informazione sui PS temporanei o sui semi PS. Questa operazione può presentare dei limiti dovuti al numero minimo di immagini necessarie per un'elaborazione statistica robusta.

### 3.1.2 Riflettori artificiali

Nel caso in cui la zona di studio non presenti alcun PS al suo interno, è sempre possibile installare degli oggetti, noti come riflettori artificiali, che in virtù delle loro peculiari caratteristiche costruttive si comportano come capisaldi radar. Si tratta di manufatti metallici di tipo passivo che offrono il vantaggio di non richiedere alcuna alimentazione o manutenzione successiva all'installazione. I riflettori artificiali si propongono quindi come soluzione al monitoraggio a medio-lungo termine di aree naturalmente prive di bersagli radar ma, non essendo presenti negli archivi storici, hanno il limite di non consentire analisi pregresse.

Esistono varie tipologie di riflettori artificiali :

- specchio piano (*planar*): è composto da una sola lastra di forma quadrata (dimensioni: 120x120 cm<sup>2</sup>), che ben si adatta ad una collocazione in ambiente urbano dato il limitato impatto ambientale;
- diedro: è costituito da due superfici metalliche quadrate (lunghezza lato: 100 cm ca.), disposte a 90 gradi;
- triedro (*corner*): esistono due tipi di triedro: (1) triedro triangolare, realizzato combinando tre superfici metalliche in modo da formare una piramide a base triangolare e (2) triedro rettangolare, costituito da tre lastre di metallo (lunghezza lato: 170 cm ca.) perpendicolari tra loro. Questa tipologia di riflettore è idoneo per installazioni extra-urbane.



Figura 20: Principali tipologie di corner reflectors..

La loro forma e dimensione è studiata per poter fornire una risposta radar ben visibile e stabile nel tempo. Grazie a queste caratteristiche elettromagnetiche, ciascun riflettore artificiale installato permette di fornire delle misure di spostamento.

La tipologia di riflettore artificiale da installare varia in base all'applicazione richiesta. Ciascuno di questi oggetti, infatti, è caratterizzato da precise proprietà elettromagnetiche, che lo diversificano dagli altri. Affinché questi oggetti possano essere identificati come PS, è necessario che siano soddisfatti specifici requisiti sulla dimensione del riflettore e sulla precisione richiesta nella fase di puntamento dello stesso.

### 3.2 Cosa misurano i PS?

Questa sezione presenta un argomento chiave del manuale, in cui verranno illustrate le differenti geometrie con cui viene acquisito il dato PS e le problematiche ad esse legate, cercando di rispondere ai quesiti più frequenti proposti dall'utente, specialmente sulla combinazione dei dati ascendenti e discendenti.

I satelliti attualmente disponibili per l'acquisizione di immagini SAR percorrono ripetutamente una traiettoria fissa attorno alla Terra, inclinata di pochi gradi rispetto ai meridiani, ad una altezza dalla superficie terrestre di circa 800 km.

Mentre il satellite percorre la sua orbita, la Terra ruota intorno al proprio asse. La particolare combinazione dei due moti permette al sensore di rilevare la stessa area geografica con due differenti geometrie (Figura 21):

- in modalità ascendente, ossia percorrendo l'orbita da S verso N ed illuminando l'area da W verso E;
- in modalità discendente, ossia percorrendo l'orbita da N verso S ed illuminando l'area da E verso W.

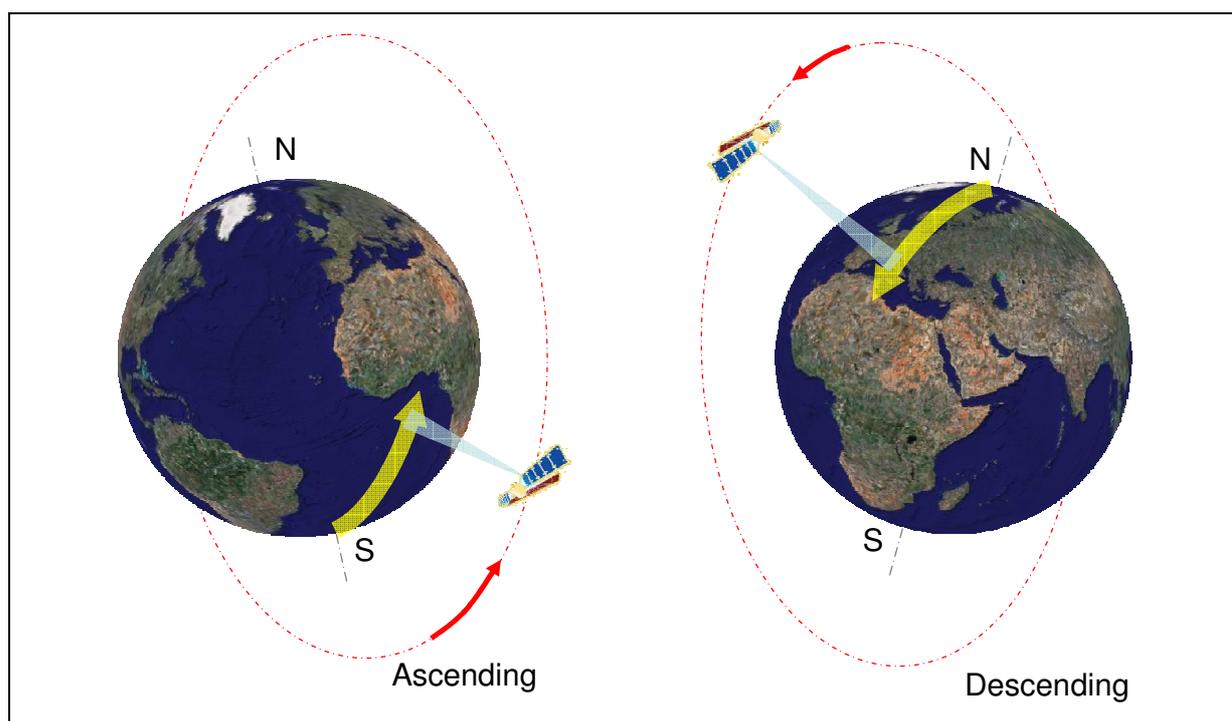


Figura 21: modalità di acquisizione. A sinistra modalità ascendente, a destra modalità discendente.

I sistemi radar inviano impulsi elettromagnetici lateralmente (a differenza dei sensori ottici che li acquisiscono in verticale), lungo una linea inclinata di un angolo  $\theta$  rispetto alla verticale, che prende il nome di *Line Of Sight*, *LOS*.

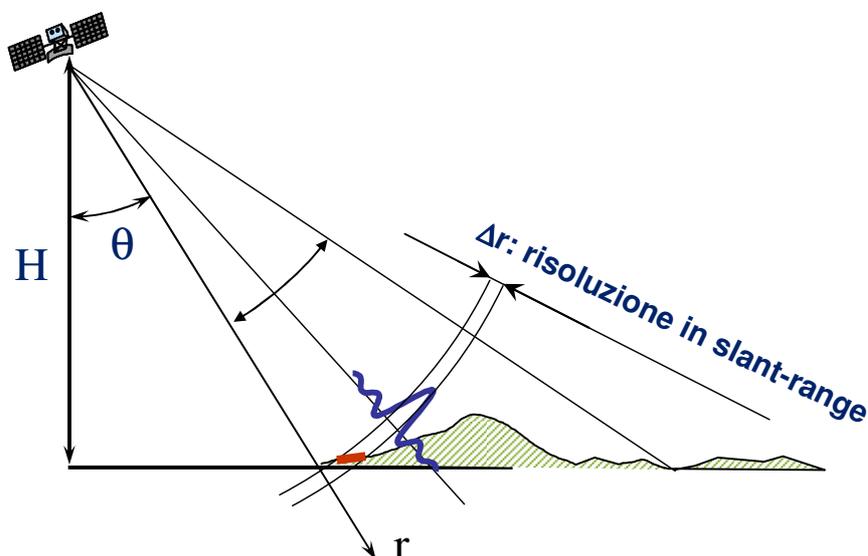


Figura 22: Line Of Sight. Direzione, inclinata di  $\theta$  rispetto alla verticale, lungo la quale il sensore misura gli spostamenti.

Facendo riferimento alla Figura 19 e alla Figura 22 si comprende come questa configurazione geometrica fa sì che i versanti esposti verso E siano ben visibili in geometria ascendente mentre quelli con esposizione verso W siano rilevati dal sensore in modalità discendente (a meno che porzioni di territorio non risultino nascoste alla vista del satellite, come già menzionato nella sezione 3.1.1). In Figura 23 sono riportati graficamente questi effetti e si può notare come in caso di versanti esposti in direzione est o ovest risulti fondamentale un'attenta scelta della geometria di acquisizione. Per quanto riguarda i versanti esposti a nord o sud, questi risultano visibili in entrambe le geometrie.

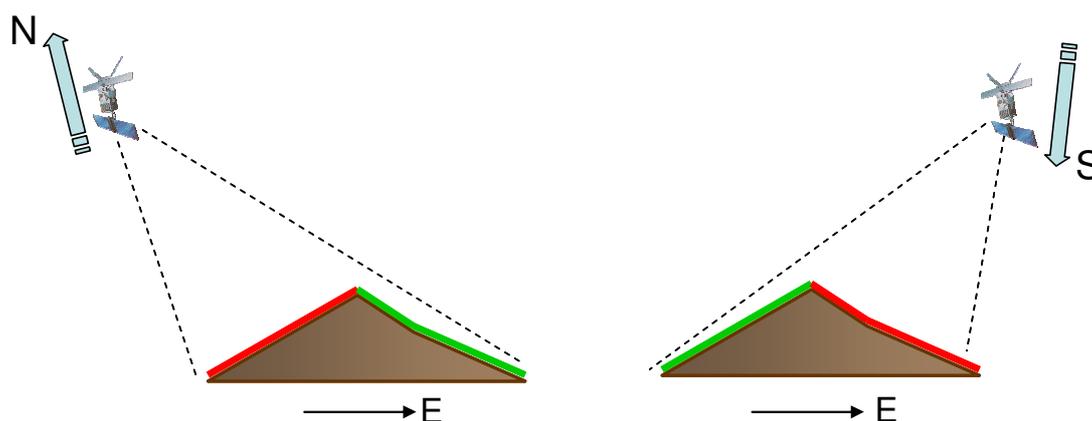


Figura 23: versanti monitorabili con le due diverse geometrie di acquisizione. A sinistra è illustrata la geometria ascendente mentre a destra quella discendente. In verde sono evidenziati i versanti monitorabili in rosso quelli non rilevati.

### 3.2.1 Misure lungo la congiungente sensore-bersaglio

La tecnica PS è in grado di misurare la componente dello spostamento, a cui è sottoposto l'oggetto a terra, lungo la congiungente sensore-bersaglio (LOS). Per un dato PS, questo valore è tanto minore quanto più la direzione del vettore spostamento reale si discosta dalla direzione di puntamento del sensore; al limite, nel caso di moto perpendicolare alla linea di vista del satellite, lo spostamento misurato risulta essere nullo. In Figura 24 sono rappresentati tre casi che illustrano come al variare della direzione reale del moto (vettore rosso) il sistema misuri una componente, lungo la LOS, (vettore blu) che può variare notevolmente in modulo e avere segni opposti. Si ricorda che la componente del moto lungo la direzione N-S non è rilevabile dai sistemi SAR proprio per la geometria di acquisizione descritta.

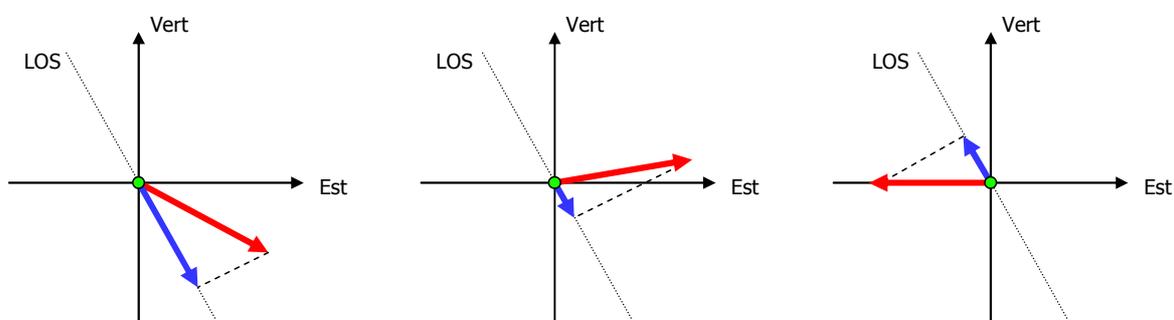


Figura 24: componente di spostamento rilevata dal sensore in funzione delle diverse direzioni dello spostamento reale. In rosso è rappresentato il vettore di spostamento reale mentre in blu quello rilevato dal sistema.

I dati SAR, siano essi acquisiti in geometria ascendente o discendente, sono elaborati mediante l'algoritmo PSInSAR™ in modo da fornire la velocità media annua di ogni PS, calcolata a partire dai valori di spostamento misurati lungo la linea di vista del sensore, acquisizione dopo acquisizione.

In base a quanto visto nel paragrafo 3.2.1 i vettori di velocità stimati nelle due differenti geometrie (rispettivamente, ascendente  $V_a$  e discendente  $V_d$ ) possono mostrare modulo e verso differenti in base al tipo di fenomeno deformativo superficiale in essere. Nel caso si disponga su una stessa area sia dell'elaborazione ascendente che discendente, visualizzati entrambi i campi di velocità, l'utente può osservare notevoli differenze fra i due risultati sia in termini di intensità che di segno (per convenzione, il segno positivo o negativo assegnato alle misure di spostamento o di velocità si riferisce a moti rispettivamente in avvicinamento o in allontanamento dal satellite). Tale evidenza si spiega col fatto che il sensore nelle due geometrie rileva il moto dell'oggetto osservato a terra in maniera diversa.

Per capire meglio, esaminiamo due tipologie di movimento: moto puramente verticale e moto puramente orizzontale in direzione E-W.

Supponiamo che nella realtà il bersaglio a terra sia soggetto al solo abbassamento verticale (per semplicità di calcolo consideriamo uno spostamento effettivo,  $D_{REALE}$ , di 1 cm) e di utilizzare il sensore ERS come sistema di telerilevamento (angolo di incidenza,  $\theta$ , pari a  $23^\circ$  per entrambe le geometrie).

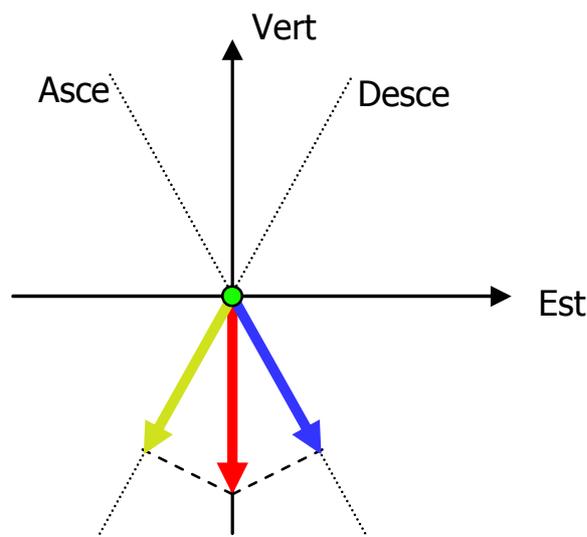


Figura 25: esempio di moto puramente verticale. In rosso è riportato lo spostamento reale del PS mentre in blu e giallo rispettivamente le componenti ascendente e discendente stimate

Sotto queste condizioni, il verso del movimento percepito dal sensore ERS è lo stesso sia in modalità ascendente che discendente (Figura 25); in particolare, in ciascuna delle due geometrie il modulo dello spostamento rilevato, indicato con  $D_{LOS}$ , è dato da:

$$D_{LOS} = D_{REALE} \cdot \cos \theta = 1 \cdot \cos 23^\circ = 0.92 \text{ cm} .$$

Dunque, in questo esempio il sensore rileva in entrambe le geometrie un movimento di allontanamento dell'oggetto (valori negativi di velocità).

Nel caso in cui si verifichi un sollevamento verticale, il sensore rileva in entrambe le geometrie di vista uno spostamento  $D_{LOS}$  di pari ampiezza (se lo spostamento  $D_{REALE}$  vale 1 cm, analogamente a prima, il vettore  $D_{LOS}$  ha modulo pari a 0.92 cm), che però esso percepisce come un avvicinamento del bersaglio (valori positivi di velocità).

Diversamente, un moto nel piano orizzontale in direzione E-W è caratterizzato da valori di spostamento con verso opposto nelle due distinte geometrie. A titolo di esempio, consideriamo un oggetto che si muove nel piano orizzontale da W verso E (Figura 26); in geometria ascendente verrà osservato un aumento della distanza sensore-bersaglio (valore negativo di velocità); al contrario, in modalità discendente il sensore misura una diminuzione della distanza, che risulta come un avvicinamento del bersaglio al satellite (valore positivo della velocità).

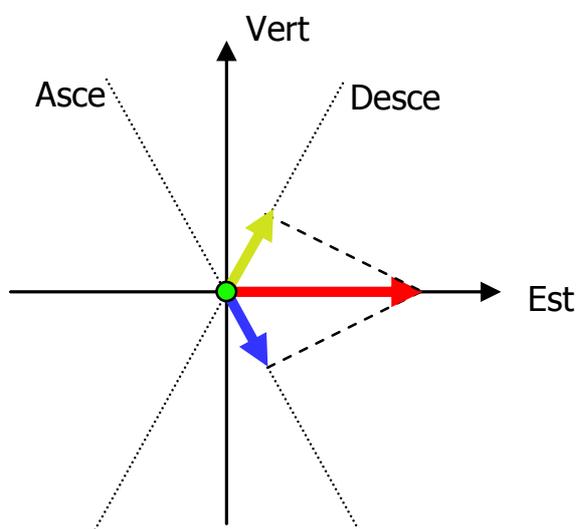


Figura 26: esempio di moto puramente orizzontale. In rosso è riportato lo spostamento reale mentre in blu e giallo rispettivamente le componenti ascendente e discendente.

Nell'ipotesi di uno spostamento puramente orizzontale  $D_{REALE}$  di 1 cm da W verso E, il modulo del vettore  $D_{LOS}$  vale in entrambe le geometrie :

$$D_{LOS} = D_{REALE} \cdot \sin \theta = 1 \cdot \sin 23^\circ = 0.39 \text{ cm} ,$$

ma la componente ascendente  $V_a$  della velocità avrà segno negativo e quella discendente  $V_d$  positivo.

L'utente non deve quindi stupirsi se l'area di interesse mostra alcuni PS con valori di velocità  $V_a$  e  $V_d$  di segno opposto. Anzi, questa circostanza permette di individuare a prima vista se il fenomeno investigato comporta l'esistenza di componenti del moto anche in direzione orizzontale.

In Figura 27 è riportato un esempio relativo ad un'area in frana. Osservando le due immagini risulta evidente come sullo stesso versante i valori di velocità  $V_a$  e  $V_d$  assumano segno opposto. Ciò è dovuto al fatto che in geometria ascendente il satellite rileva un avvicinamento nel tempo del bersaglio radar ed un allontanamento in configurazione discendente. Per questa ragione è consigliabile visualizzare in ambiente GIS, con una simbologia diversa, i due dataset, ascendente e discendente, così da non confondere i due tipi di informazione.

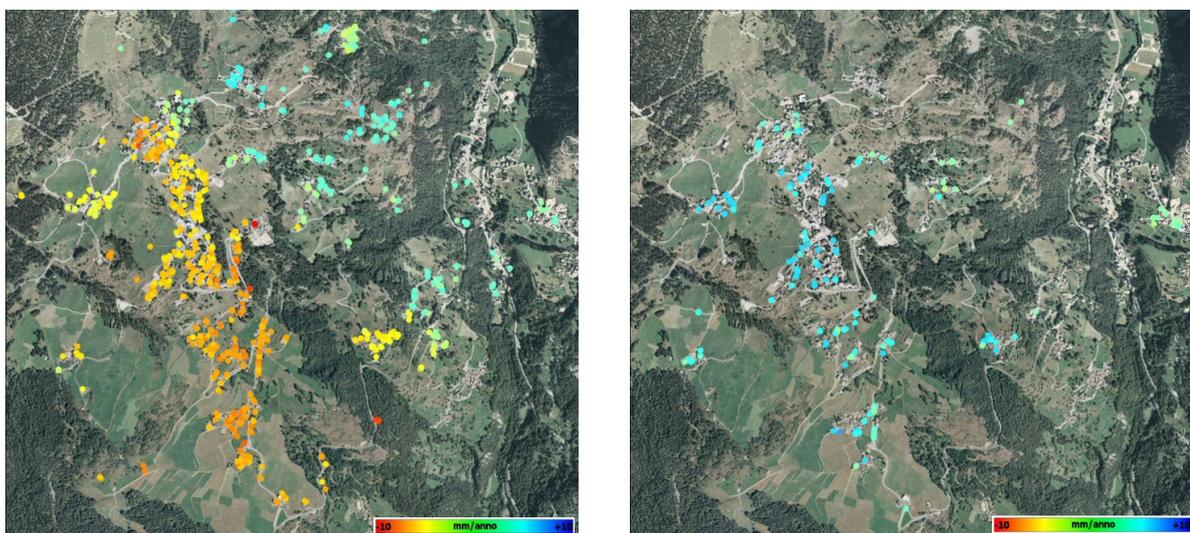


Figura 27: Visualizzazione dei dati PS su un versante esposto verso E soggetto a movimenti con elevata componente orizzontale in direzione E-W: (sx) campo di velocità dei PS rilevati in geometria ascendente (punti in allontanamento dal satellite, velocità negative); (dx) campo di velocità dei PS rilevato in geometria discendente (punti in avvicinamento al satellite, velocità positive).

Nelle argomentazioni esposte finora abbiamo considerato come sistema di telerilevamento solo il sensore ERS. C'è un altro aspetto da considerare, ossia che sensori differenti forniscono per lo stesso fenomeno deformativo misure diverse dal momento che cambiano i parametri di puntamento del satellite. Ad esempio, il sensore RADARSAT, il quale presenta un angolo di incidenza maggiore rispetto ad ERS (circa  $34^\circ$  in modalità *Standard S3* e valori compresi tra  $37^\circ$  e  $48^\circ$  in modalità *Fine Beam*), è più sensibile al rilevamento dei moti orizzontali, in quanto la percentuale della componente orizzontale del moto misurata da RADARSAT è maggiore di quella misurata da ERS.

Sotto le stesse ipotesi dell'esempio fatto precedentemente per ERS per un moto puramente orizzontale  $D_{REALE}$  di 1 cm da W verso E, nel caso di osservazioni effettuate con RADARSAT in modalità *Standard S3* il modulo del vettore  $D_{LOS}$  vale:

$$D_{LOS} = D_{REALE} \cdot \sin \theta = 1 \cdot \sin 34^\circ = 0.56 \text{ cm} ,$$

ossia maggiore di circa il 44% rispetto a quanto calcolato con ERS.

In generale, nell'utilizzo congiunto di dati PS acquisiti da sensori differenti (ERS, ENVISAT E RADARSAT) bisogna prestare massima attenzione a causa sia della non coincidenza dei periodi di acquisizione (i dati di ERS utilizzati si riferiscono fino a gennaio 2001, mentre quelli RADARSAT sono stati acquisiti da aprile 2003 ad oggi) sia dei diversi parametri di puntamento dei sensori (angoli di incidenza differenti).

### 3.2.2 Combinazione dei dati PS ascendenti e discendenti

Un aspetto interessante della tecnica PS consiste nella possibilità di combinare il dataset ascendente con quello discendente (qualora per l'area in esame si disponga di dati acquisiti dal sensore radar sia in geometria ascendente sia discendente) perché permette di risalire all'orientazione del vettore velocità nel piano EST,  $z$  come illustrato di seguito. Si ricorda che un eventuale spostamento in direzione N-S non può essere rilevato per ragioni intrinseche alla geometria del sistema (cfr.3.2.1).

Il problema può essere compreso meglio se inquadrato da un punto di vista geometrico. Si consideri a tal proposito un sistema di riferimento cartesiano  $x, y, z$ , in cui le tre direzioni coincidono nella realtà rispettivamente con quella orizzontale E-W, orizzontale N-S e verticale.

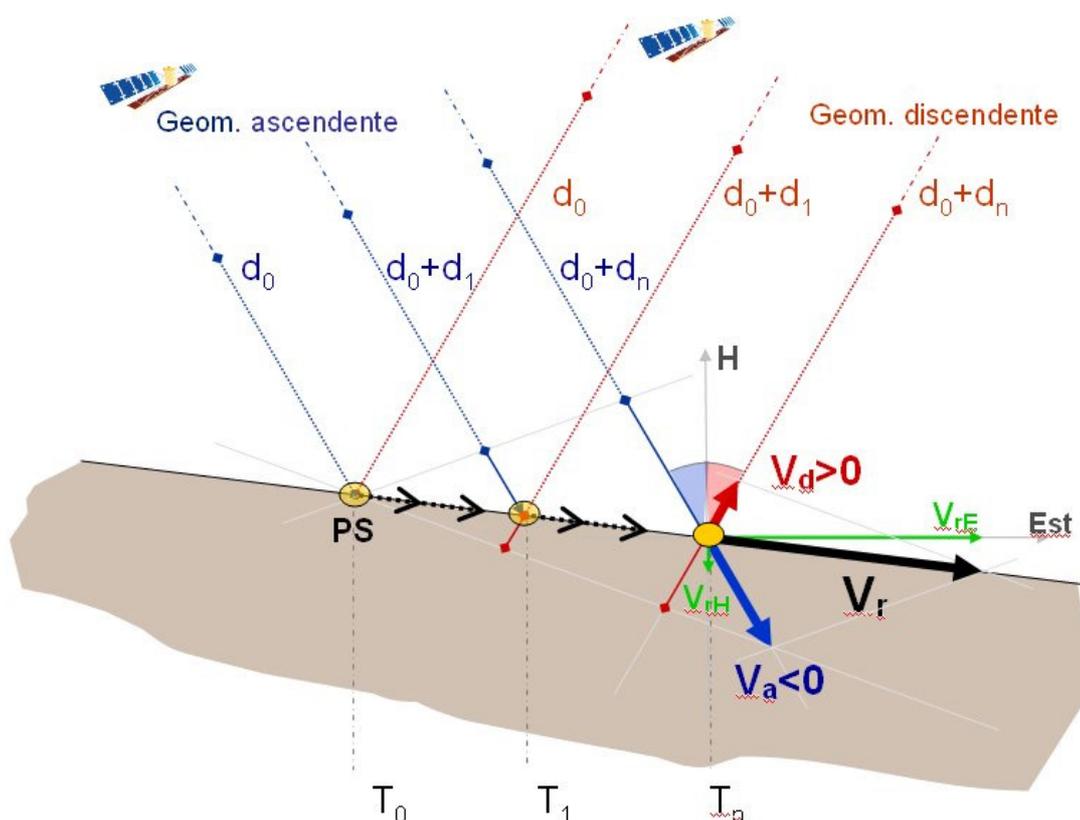


Figura 28: Esempio di scomposizione del moto combinando i dati di velocità ascendente e discendente

Si consideri un PS, corrispondente alla stessa struttura a terra, individuato sia nel dataset discendente che in quello ascendente. La tecnica PS fornisce per questo elemento le corrispondenti velocità  $V_a$  e  $V_d$  rilevate dai due diversi punti di vista.

Nel sistema di riferimento x, y, z, il vettore velocità  $V$  può essere espresso in generale come:

$$\vec{V} = V_x \cdot \vec{s}_x + V_y \cdot \vec{s}_y + V_z \cdot \vec{s}_z,$$

dove  $V_x$ ,  $V_y$  e  $V_z$  sono le componenti del vettore velocità  $V$  lungo le direzioni orizzontale E-W, orizzontale N-S e verticale e  $s_x$ ,  $s_y$ ,  $s_z$  i versori dei tre assi coordinati del sistema cartesiano.

I dati orbitali del satellite consentono di stabilire l'orientamento nel sistema di riferimento x, y, z della congiungente sensore-bersaglio (LOS) nelle due differenti geometrie e quindi i coseni direttori dei rispettivi vettori  $V_a$  e  $V_d$ . Dunque, utilizzando le stime di velocità derivanti dall'elaborazione delle due diverse geometrie di acquisizione (ascendente e discendente), si può scrivere il seguente sistema:

$$\begin{cases} V_a = V_x \cdot s_{xasce} + V_y \cdot s_{yasce} + V_z \cdot s_{zasce} \\ V_d = V_x \cdot s_{xdesce} + V_y \cdot s_{ydesce} + V_z \cdot s_{zdesce} \end{cases},$$

in cui  $s_{xasce}$ ,  $s_{yasce}$ ,  $s_{zasce}$  e  $s_{xdesce}$ ,  $s_{ydesce}$ ,  $s_{zdesce}$  rappresentano i coseni direttori dei rispettivi vettori velocità  $V_a$  e  $V_d$  e quindi i coseni degli angoli che il vettore  $V_a$  o  $V_d$ , misurato lungo la LOS, forma con i tre assi coordinati.

Come si può osservare nel precedente sistema il numero di incognite ( $V_x$ ,  $V_y$  e  $V_z$ ) è superiore a quello delle equazioni e quindi esso non è risolvibile. Tuttavia, dal momento che il sensore risulta molto poco sensibile agli spostamenti in direzione N-S (coincidente con la direzione y), considerare il moto in questa direzione uguale a zero ( $V_y=0$ ) è un'approssimazione accettabile e permette di risolvere il precedente sistema in modo da risalire all'entità delle componenti del moto in direzione E-W e in direzione verticale (corrispondenti alle direzioni x e z).

È importante specificare che, per le caratteristiche orbitali (inclinazione dell'orbita rispetto ai meridiani terrestri) e di acquisizione del segnale (vista del satellite laterale ed inclinata), il sensore durante una data acquisizione è in grado di misurare le componenti del moto effettivo prevalentemente nelle direzioni orizzontale E-W e verticale, mentre la componente del moto rilevata nella direzione orizzontale N-S è minima risultando quindi trascurabile anche in presenza di forti spostamenti in direzione N-S.

In definitiva, sotto l'ipotesi di spostamento nullo in direzione N-S, noti i parametri di puntamento del satellite (ossia, i coseni direttori) al momento dell'acquisizione nelle due rispettive geometrie e a condizione che i valori ascendente e discendente della velocità siano riferiti allo stesso bersaglio radar, è possibile calcolare le componenti verticale,  $V_v$ , ed orizzontale in direzione E-W,  $V_E$ , del vettore velocità reale esplicitando il precedente sistema nella forma:

$$\begin{cases} V_a = V_v \cdot \cos \theta_{asce} + V_E \cdot \sin \theta_{asce} \\ V_d = V_v \cdot \cos \theta_{desce} + V_E \cdot \sin \theta_{desce} \end{cases},$$

in cui  $V_a$  e  $V_d$  sono rispettivamente i valori di velocità ascendente e discendente relativi al bersaglio,  $\theta_{asce}$  e  $\theta_{desce}$  gli angoli di incidenza nelle due geometrie e  $V_v$  e  $V_E$  le incognite da esplicitare.

Si noti che, in generale, la condizione che le due geometrie di acquisizione identifichino a terra esattamente lo stesso PS non è quasi mai verificata: per procedere alla scomposizione del moto descritta è quindi necessario sottocampionare i PS su una griglia geografica regolare. L'area di interesse viene suddivisa in celle quadrate di 50 m di lato a ciascuna delle quali viene assegnata la media dei valori di velocità dei PS che ricadono nella cella. Questa operazione viene applicata ad entrambi i dataset ascendente e discendente così da consentire la scomposizione del moto su una griglia comune di 'pseudo-PS' (cfr figura)

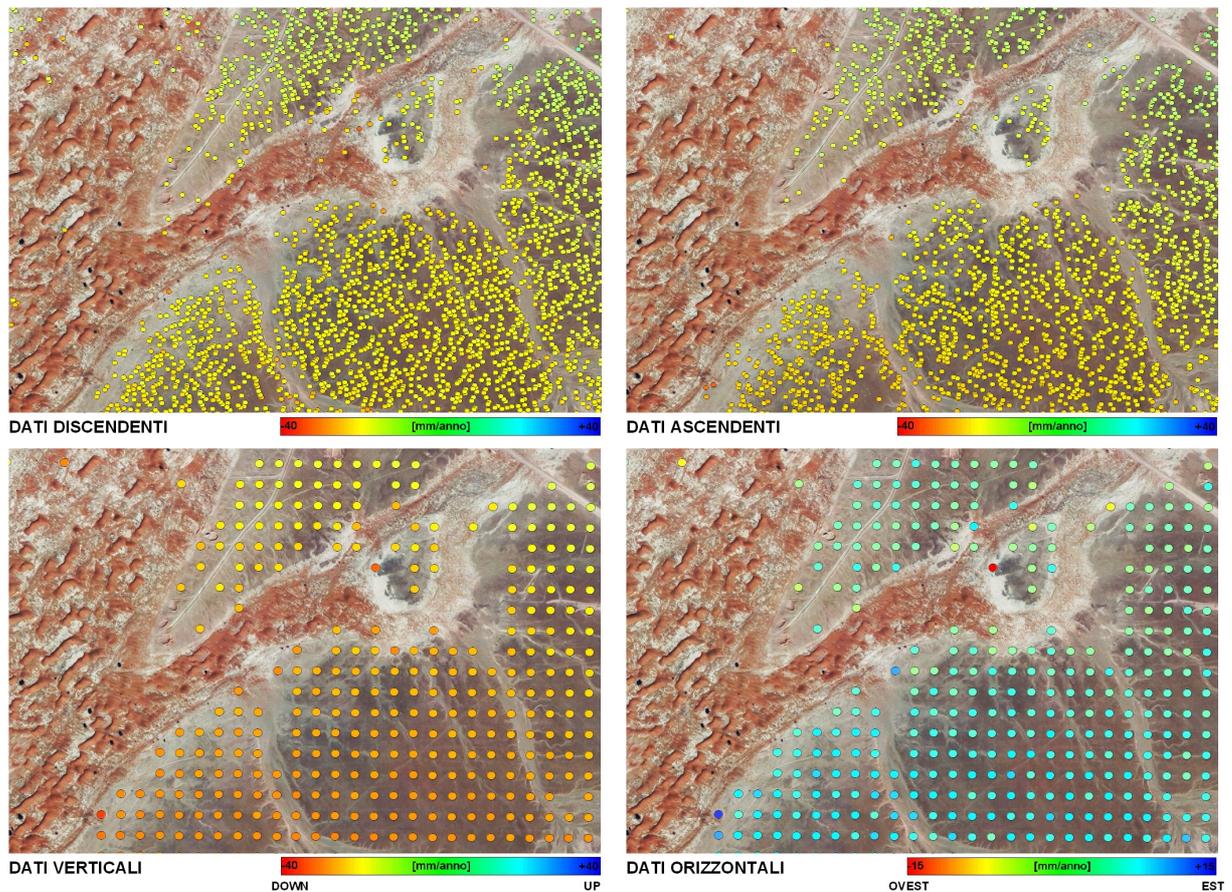


Figura 29: esempio di scomposizione del moto su griglia regolare

Concludendo, la disponibilità di dati sia ascendenti che discendenti per una determinata area offre due vantaggi fondamentali:

- il numero di informazioni riguardanti le dinamiche superficiali aumenta considerevolmente, poiché utilizzando due geometrie è possibile illuminare anche quei bersagli che non sono visibili da una sola prospettiva;
- il campo di velocità può essere scomposto lungo la direzione verticale e orizzontale E-W

In Figura 30 è riportato un esempio relativo al vulcano Etna. La scomposizione del campo velocità consente all'utente di visualizzare il fenomeno deformativo in maniera più intuibile, mettendo in risalto le zone in cui una componente del moto prevale sull'altra.

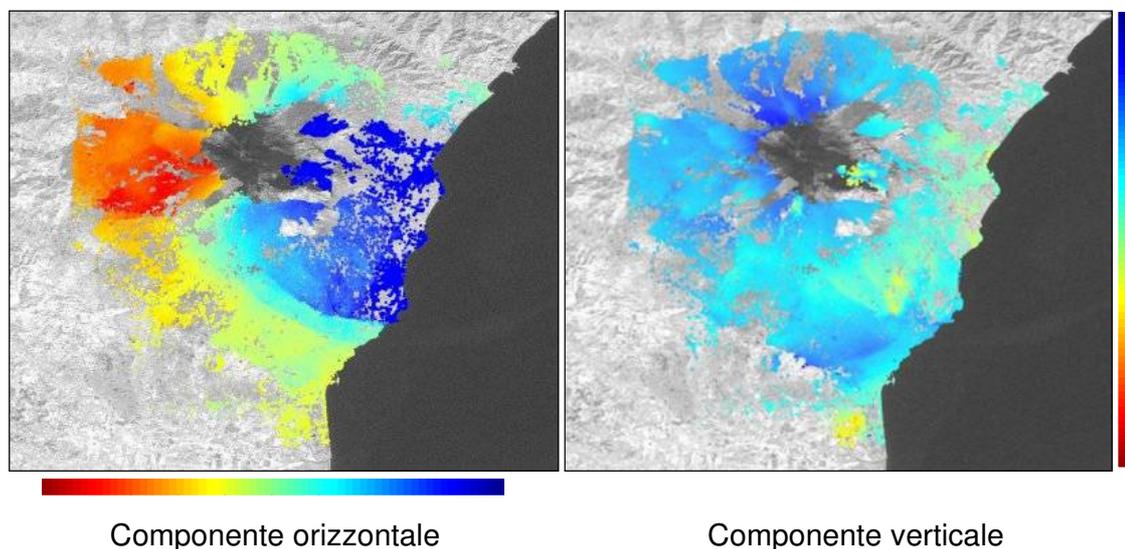


Figura 30: esempio di scomposizione del moto. Velocità orizzontale (W-E) e verticale del Vulcano Etna.

### 3.3 Tutto è relativo!

Le misure di spostamento fornite dall'analisi PSInSAR™ sono differenziali nello spazio e nel tempo, nel senso che sono riferite spazialmente ad un punto preso come riferimento (REF) e temporalmente alla data della prima acquisizione satellitare disponibile.

#### 3.3.1 Punto di riferimento REF

In analogia con le reti geodetiche, l'insieme dei PS presenti in un territorio può essere considerato come una fitta rete naturale di punti di misura, le cui posizioni e velocità di movimento sono riferite ad un punto di emanazione assunto come riferimento stabile nel tempo. In fase di elaborazione la velocità del punto di riferimento è posta per convenzione uguale a zero, senza conoscere informazioni *a priori* sulle dinamiche in atto nel territorio in esame.

Successivamente alla fase di elaborazione (cioè, in fase di *post-processing*) può risultare opportuno spostare il punto di riferimento, soprattutto nel caso in cui all'interno della zona considerata siano presenti punti di cui è nota l'entità del movimento, come ad esempio stazioni GPS. Dal momento che le misure di velocità ottenute dall'analisi PSInSAR™ sono differenziali, è sufficiente scalare i valori di velocità di tutti i punti che ricadono nella zona investigata di una quantità costante, pari alla velocità del punto scelto come nuovo riferimento. Questo cambio di riferimento non inficia l'informazione sulle velocità dei PS; dato che a tutti i valori di velocità viene sommato quello relativo al nuovo riferimento, l'entità dello spostamento differenziale registrato tra due punti prima e dopo il cambio del punto di riferimento rimane inalterata come nell'esempio di Figura 31.

Si sottolinea che, mentre i tempi di verifica della effettiva stabilità del punto di riferimento di una rete geodetica, tradizionale o GPS, richiede tempi lunghi di osservazione, generalmente anni, l'analisi

PSInSAR™, coprendo un intervallo temporale pluriennale ed in genere un'area ben più vasta rispetto a quella controllabile con una singola rete geodetica, offre possibilità di verifica immediate.



Figura 31: cambio di reference point. Nelle due immagini sono illustrate le velocità dei singoli PS utilizzando due punti di riferimento differenti. Da notare come indipendentemente dal punto scelto come riferimento, le differenze relative di velocità tra PS non cambiano.

### 3.3.2 Processo di georeferenziazione

In termini generali, la georeferenziazione è una procedura che permette di assegnare le coordinate standard (secondo una data proiezione) ai punti di una immagine, utilizzando dei punti di controllo (Ground Control Point o GCP) di una carta topografica o di una immagine già georeferenziata. Viene effettuata applicando una deformazione all'immagine (trasformazione conforme, affine, etc.) che ha lo scopo di riportare i punti di controllo al posto giusto, cioè di adattare l'immagine originaria alle coordinate grafiche/cartografiche attribuitegli con i GCP e di restituire agli oggetti le dimensioni reali in scala.

In origine ciascun Permanent Scatterers appartiene ad una singola cella di campionamento propria del sistema SAR definita da due valori di coordinate dette range ed azimuth. Grazie al processo di georeferenziazione, cioè al collegamento al sistema di coordinate assunto come riferimento per la rappresentazione dell'area di studio, l'insieme dei PS acquista un reale significato cartografico.

L'operazione di georeferenziazione consta di due passaggi:

- Passaggio da coordinate nel sistema SAR a coordinate geografiche nel GCS WGS84
- Allineamento dei PS sul supporto cartografico disponibile mediante traslazione rigida

I risultati dell'analisi PSInSAR™ sono visualizzati solitamente su supporti cartografici forniti dal committente (carte tecniche regionali, ortofoto digitali, immagini satellitari ottiche), che sono generalmente inquadrati in sistemi di coordinate e *datum*<sup>2</sup> diversi dal sistema WGS84, al quale sono riferiti i dati PS una volta effettuata la necessaria trasformazione da coordinate SAR a geografiche.

<sup>2</sup> Il *datum* consiste in una superficie ellissoidica orientata di riferimento, esprimibile con semplici formule analitiche. In base al tipo di orientamento si distinguono un datum geocentrico o globale (con centro coincidente con quello di massa della Terra) ed un datum locale (orientato in modo da coincidere localmente con il geoide).

Per tale ragione è solitamente necessaria la conversione delle posizioni dei PS da WGS84 ad altri sistemi di riferimento; tali trasformazioni vengono solitamente effettuate utilizzando librerie commerciali o routine implementate all'interno dei GIS. I risultati delle trasformazioni sono generalmente affetti da errori sistematici che possono essere di entità da metrica a decametrica, in relazione al software di trasformazione utilizzato. Nella pratica l'errore sistematico viene eliminato in fase di allineamento finale sul supporto cartografico utilizzato come base di rappresentazione dei risultati applicando una traslazione rigida rispetto ad un GCP individuato sul supporto cartografico stesso e verificando la distribuzione dei PS rispetto a quella dei manufatti presenti sul territorio (edifici, infrastrutture di comunicazione, linee elettriche, ecc.). La qualità del risultato finale dipende dalla scala e dalla qualità della base cartografica fornita dal committente; l'esperienza finora acquisita ha mostrato tuttavia che l'errore di georeferenziazione risulta in genere contenuto in alcuni metri (si veda per approfondimenti la sezione 4).

Ne consegue che, se si visualizza il dato PSInSAR™ su un layer cartografico differente da quello fornito a TRE in fase di esecuzione dello studio, può accadere che la distribuzione dei PS non sia perfettamente allineata rispetto al supporto alternativo utilizzato. Questo è dovuto alle inevitabili discrepanze esistenti tra cartografie o immagini ottiche restituite in sistemi di riferimento diversi o talvolta a deformazioni presenti all'interno di uno stesso elaborato cartografico. In questi casi ci si trova in presenza di fenomeni come quello illustrato in Figura 32 dove si può notare come i PS, georeferenziati in origine rispetto ad una base cartografica diversa da quella utilizzata per la visualizzazione, risultano traslati in blocco rispetto all'ortofoto su cui sono stati rappresentati. In tal caso l'allineamento deve essere ripetuto utilizzando come riferimento la nuova base cartografica prescelta per la visualizzazione. E' proprio per evitare questo tipo di problemi che viene sempre richiesto al committente di fornire a TRE la base cartografica sulla quale dovranno poi essere rappresentati i risultati dell'analisi PSInSAR™.



Figura 32: Disposizione dei PS non consistente con il layer usato come supporto cartografico.



Figura 33: Disposizione dei PS correttamente georeferenziati sul layer usato come supporto cartografico.

## 4 Precisione ed Accuratezza

### 4.1 Alcune definizioni importanti

Il termine precisione, relativamente ad una serie di misure, indica il grado di convergenza dei valori misurati intorno alla loro media, mentre l'accuratezza quantifica la distanza tra le misure e il dato reale (ovvero ciò che si vorrebbe misurare). Facendo un'analogia con una successione di frecce scagliate su un bersaglio, tanto più le frecce sono raggruppate, quanto più la serie di tiri è precisa, mentre più il centro del gruppo di frecce si avvicina al centro del bersaglio, più la serie di tiri è accurata. Da ciò si deduce che una misura potrebbe essere precisa, ma non accurata.

La deviazione standard è un indice che misura il grado di dispersione di una popolazione di dati attorno al valore medio. Questa misura (indicata con  $\sigma$ ) è solitamente utilizzata per quantificare il grado di precisione di un insieme di misure. Ipotizzando infatti di conoscere la deviazione standard e supponendo una distribuzione normale degli errori (ovvero gaussiana), il 95% dei valori tende ad essere incluso nell'intervallo  $\pm 2\sigma$  rispetto al valor medio. In assenza di errori sistematici, precisione e accuratezza coincidono.

La misura PSInSAR™, al pari di una misura di spostamento con tecnica geodetica tradizionale o GPS, è tipicamente una misura relativa. È pertanto più appropriato ragionare in termini di precisione piuttosto che di accuratezza.

### 4.2 Sorgenti di errore

La qualità delle misure PS risulta dipendente da diversi fattori. I principali sono i seguenti:

- Numero di immagini disponibili e loro frequenza: maggiore il numero dei dati, più elevata è la probabilità di identificare punti di misura; più frequenti nel tempo le misure, migliore la stima degli spostamenti differenziali dei PS.
- Problemi di decorrelazione legati all'incertezza dei parametri orbitali dei satelliti e all'eventuale variazione nel tempo delle proprietà elettromagnetiche del bersaglio, come già descritto nel paragrafo 1.6
- Rumore atmosferico: la tecnica PS consente di rimuovere quasi totalmente l'errore legato all'atmosfera; eventuali errori residui possono presentarsi in caso di condizioni atmosferiche non perfettamente simulabili durante il processo.
- Distanza dal punto di riferimento: similmente a quanto succede nelle rete geodetiche tradizionali, la precisione delle misure diminuisce con l'aumentare della distanza dal punto di riferimento ed è espressa dal valore di deviazione standard associato a ciascun PS (cfr. 7.2)

Il lettore esperto di rilievi GPS differenziali troverà senza dubbio questo elenco simile a quanto avviene in quel campo. Nel dato PS la maggiore densità spaziale delle misure consente una individuazione più semplice e affidabile di eventuali inconsistenze o errori locali, ma la minore frequenza temporale delle misure non permette di adottare alcune tecniche di filtraggio che sono invece comunemente adottate nei dati GPS.

### 4.3 Precisione delle misure

Le problematiche relative all'accuratezza ed alla precisione dei risultati forniti dalla tecnica PSInSAR™, riguardano tre aspetti distinti:

- la georeferenziazione dei PS

- la determinazione della velocità media di spostamento
- la determinazione delle serie storiche degli spostamenti

I tre aspetti elencati saranno trattati in maggior dettaglio nei paragrafi che seguono. È importante segnalare che i valori di precisione forniti sono da considerarsi validi per punti distanti dal punto di riferimento (qui di seguito indicato "REF") meno di 2 km in caso di dataset composto da almeno 40 immagini.

Un riepilogo dei valori di precisione del dato PS è riportato in Tabella 1.

|  |              |
|--|--------------|
| Coordinata Nord  | $\pm 2$ m    |
| Coordinata Est   | $\pm 5$ m    |
| Quota ellissoidica   | $\pm 1.5$ m  |
| Velocità media di spostamento  | $\pm 1$ mm/a |
| Misure differenziali di spostamento  | $\pm 5$ mm   |
| Tabella 1: Precisione delle misure ( $1\sigma$ ) fornite sotto ipotesi di dataset di 40 immagini e distanza dal punto di riferimento inferiore a 2 km. |              |

#### 4.3.1 Errore di georeferenziazione

Come descritto in precedenza l'operazione di georeferenziazione consta di due passaggi:

- Passaggio da coordinate nel sistema SAR a coordinate geografiche nel GCS WGS84
- Allineamento dei PS sul supporto cartografico disponibile mediante traslazione rigida

La procedura complessiva è affetta da due tipi di errori, di seguito descritti, uno variabile per ciascun PS e l'altro comune all'intero set di PS individuati nell'elaborazione.

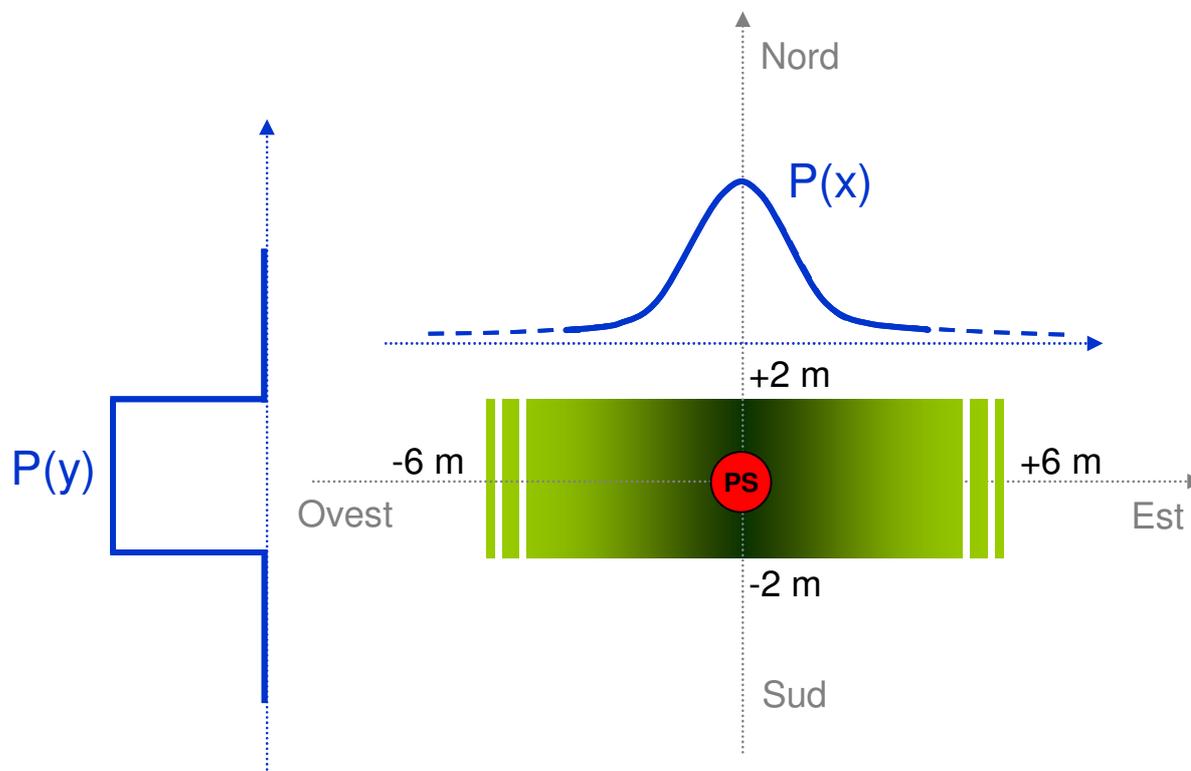


Figura 34: schematizzazione degli errori di posizionamento del PS in geometria SAR.

Per quanto riguarda il passaggio da coordinate SAR a coordinate geografiche, il posizionamento del PS in direzione Nord-Sud risulta affetto da un errore con distribuzione statistica di tipo uniforme compresa tra  $\pm 2$  m, mentre in direzione Est-Ovest da un errore con distribuzione statistica di tipo gaussiano a valor medio nullo e deviazione standard pari a ca. 6 m, come illustrato in Figura 34. 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 la trasformazione. 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.

L'errore associato all'operazione di allineamento infine dipende dalle caratteristiche del supporto utilizzato, pertanto è sempre consigliabile l'utilizzo di ortofoto digitali o di carte tecniche almeno in scala 1:10000 per ottenere buoni risultati. Pur non essendo possibile descrivere statisticamente l'errore residuo, dipendente anche da un fattore umano in quanto è l'operatore che definisce la traslazione da imporre, si può affermare che esso risulta dell'ordine di pochi metri qualora il riferimento cartografico sia di buona risoluzione e siano ben visibili gli elementi tipici corrispondenti ai Permanent Scatterers, ovvero edifici, rocce esposte, infrastrutture lineari, antenne o altri manufatti.

A fronte della procedura di georeferenziazione sopra descritta, la precisione complessiva sulla posizione dei PS può essere considerata (sempre per data-set di almeno 40 dati) pari rispettivamente a  $\pm 2\div 5$  m nella componente Est-Ovest ed a  $\pm 5\div 6$  nella componente Nord-Sud.

### 4.3.2 Errore sulle velocità medie e sulle serie storiche

Come specificato in precedenza le principali cause che concorrono a degradare la stima degli spostamenti dei PS sono il disturbo atmosferico e il rumore di decorrelazione. La presenza di questi due disturbi introduce un errore nella misura della velocità dei PS, tanto minore quanto maggiore è il numero di acquisizioni a disposizione. In considerazione della variabilità di queste sorgenti di errore non è possibile calcolare una legge generale di propagazione dell'errore e pertanto per ogni PS vengono forniti i parametri di qualità (coerenza e deviazione standard) che consentono di valutarne la distribuzione caso per caso.

L'errore sulla velocità media annua di ciascun PS è espresso dalla deviazione standard ad esso associato (cfr.7.2); tale valore è funzione della distanza dal punto di riferimento. Se si considerano due PS vicini tra loro la loro velocità relativa avrà invece una deviazione standard contenuta, tipicamente inferiore a 1 mm/a ed indipendente dalla distanza dal punto di riferimento .

Per quanto riguarda la precisione delle serie storiche degli spostamenti, sulla base dell'esperienza finora acquisita si può ritenere che la precisione (1 sigma) del singolo valore della serie storica sia compresa tra  $\pm 5$  mm.

### 4.4 Ambiguità della misura

È importante infine ricordare che, nel caso di fenomeni di deformazione con evoluzione particolarmente rapida (ad esempio, un fenomeno di subsidenza particolarmente veloce), si può presentare il problema dell'equivocazione di fase che può complicare l'interpretazione dei risultati come in tutti i sistemi di tipo coerente. La tecnica interferometrica SAR consente infatti di valutare con precisione millimetrica variazioni di distanza sensore-bersaglio pari ad una frazione della lunghezza d'onda (i satelliti ERS e Radarsat lavorano con lunghezza d'onda pari a 5.66 cm), ma eventuali "salti" di diversi centimetri vengono "equivocati" ovvero non è possibile "contare" il numero intero di lunghezze d'onda. Al limite, se il bersaglio si muovesse esattamente di mezza lunghezza d'onda (2.8 cm per i satelliti ERS) non risulterebbe possibile rilevare alcuna variazione di fase rispetto al caso di bersaglio fermo. Il passaggio dei satelliti (revisiting time) pari a 35/24 giorni impedisce inoltre di osservare situazioni di pericolo che richiedono un monitoraggio in tempo reale.

Per meglio comprendere in cosa consiste il fenomeno di equivocazione del moto si osservi la Figura 35. In questo caso, il solido grigio rappresenta un bersaglio del sistema radar di acquisizione.

Il bersaglio è rappresentato in uno stato iniziale  $T_0$  (in blu), mentre in rosso sono rappresentati tre possibili casi A, B e C di spostamento di diversa entità ( $S_a$ ,  $S_b$  e  $S_c$ ) all'istante  $T_1$  successivo. Il grafico sinusoidale rappresenta la fase dell'onda elettromagnetica incidente sul bersaglio. In figura L rappresenta la distanza che l'onda deve percorrere affinché la sua fase ritorni al valore iniziale.

Nel caso A all'istante  $T_1$  l'oggetto si è spostato di una quantità  $\Delta R$  inferiore a  $L$ . Il sistema radar è in grado di rilevare senza ambiguità questo spostamento  $S_a$  misurando il valore della fase dell'onda all'istante  $T_1$ .

Supponiamo invece che all'istante  $T_1$  (caso B) l'oggetto compia un percorso  $S_b = L + \Delta R$ . Il valore della fase dell'onda rende conto anche in questo caso dello spostamento  $\Delta R$  ma, osservando il valore della fase all'istante  $T_1$ , non è in nessun modo possibile risalire al fatto che l'onda ha già compiuto un ciclo completo. In definitiva, il sistema di acquisizione misura uno spostamento pari a  $\Delta R$ , mentre lo spostamento reale è  $L + \Delta R$ .

Nel caso C si ha una situazione analoga al caso B, ma adesso la fase dell'onda compie un numero intero  $n$  di cicli di fase, prima di compiere la variazione corrispondente a  $\Delta R$ . Benché lo spostamento effettivo dell'oggetto sia  $S_c = nL + \Delta R$ , per il sensore radar l'oggetto si è mosso solamente di  $\Delta R$ . Anche in questo caso si è caduti in una situazione di equivocazione del moto.

Dunque, i casi A, B e C sono del tutto equivalenti per il sistema di acquisizione, che misura in tutte e tre le situazioni uno spostamento dell'oggetto di  $\Delta R$ .

In conclusione, affinché non si commettano errori nella valutazione dello spostamento dell'oggetto, è necessario che tra i due istanti di osservazione l'oggetto non subisca spostamenti superiori a  $L$ . Per essere più precisi, per essere sicuri di misurare correttamente non solo lo spostamento ma anche il verso del moto (cioè, l'oggetto si è avvicinato o allontanato di una quantità  $\Delta R$ ?), è necessario che l'oggetto non si sposti più di  $L/2$ .

Applicando questa considerazione geometrica al caso specifico dei satelliti ERS, ENVISAT e RADARSAT (lunghezza d'onda  $\lambda$  di 5.6 cm) la distanza  $L$  dell'esempio di Figura 35 è pari a  $\lambda/2$ , cioè 2.8 cm (il fattore  $1/2$  tiene conto del fatto che il segnale percorre per due volte lo stesso cammino, dal sensore al bersaglio e viceversa). Pertanto la distanza massima misurabile tra un'acquisizione e la successiva ( $L/2$ ) sarà pari a  $\lambda/4$ , ovvero 1.4 cm. Considerando che i sensori ERS e ENVISAT hanno un *revisiting time* di 35 giorni e RADARSAT di 24 giorni, sotto l'ipotesi ideale (cioè, di assenza di rumore) di acquisizioni regolari e di moto del PS perfettamente lineare, è possibile misurare rispettivamente velocità annue massime pari a circa 140 [mm/anno] e 210 [mm/anno].

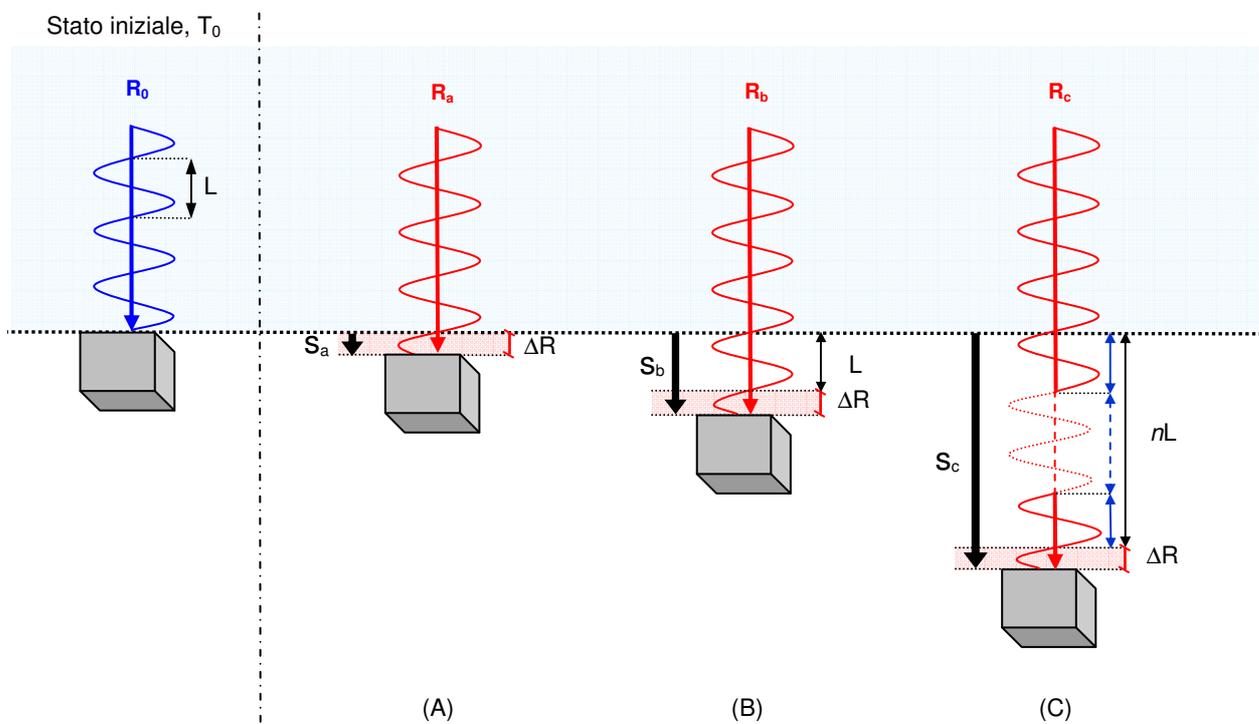


Figura 35: Esempio di equivocazione del moto del PS

## 5 Vantaggi e limiti della tecnica PSInSAR™

A fronte di quanto esposto in maggior dettaglio nei paragrafi precedenti, si propone nel seguito una sintesi dei principali vantaggi e limiti della tecnica PSInSAR™ applicata allo studio delle deformazioni della superficie terrestre.

Principali punti di forza:

- La tecnica PS consente di superare i problemi dell'interferometria DInSAR. In particolare, per quanto riguarda il disturbo atmosferico, l'approccio PS, sfruttando lunghe serie temporali di immagini radar acquisite su una determinata area, è in grado di stimare e rimuovere il contributo atmosferico da ogni immagine del dataset. Inoltre, come già ricordato in precedenza, i PS possono essere considerati praticamente immuni dagli effetti di decorrelazione.
- Grazie alla tecnica PS, l'interferometria diventa a tutti gli effetti una tecnica applicabile con successo allo studio ed al monitoraggio dei movimenti superficiali, consentendo di apprezzare spostamenti di entità millimetrica su vaste aree quali ad esempio le DGPV (Deformazioni Gravitative Profonde di Versante).
- La tecnica PS consente di misurare movimenti in due dimensioni: verticale ed orizzontale in direzione E-W, grazie alla disponibilità di dati di spostamento in due geometrie (ascendente e discendente).
- Per l'intero territorio italiano sono disponibili due archivi storici: l'archivio ESA-ERS che copre in modo pressoché continuo l'intervallo 1992-2001 e, grazie ad uno specifico accordo tra TRE, il fornitore di dati canadese e il distributore italiano, un archivio di dati RADARSAT-1 a partire da Marzo 2003, nella doppia modalità, ascendente e discendente.
- La complementarità con l'approccio geomorfologico classico: la disponibilità di informazioni di spostamento su un arco temporale decennale consente di definire il grado di attività dei fenomeni, soprattutto nel caso di fenomeni lenti, che nella maggior parte dei casi non presentano indizi di movimento osservabili sul terreno.

Principali punti deboli:

- L'assenza di misure in aree prive di bersagli radar; il problema può essere risolto mediante l'installazione di riflettori artificiali.
- L'impossibilità di stabilire a priori il numero dei PS e la loro distribuzione areale: questa informazione può essere ottenuta solo al completamento dello studio, poiché rappresenta uno dei risultati dell'elaborazione.
- E' richiesta l'elaborazione di un numero minimo di 25-30 immagini radar.

- L'ambiguità della misura: trattandosi di una misura interferometrica le differenze tra un'acquisizione e la successiva possono essere calcolate solo come frazione di un ciclo d'onda.
- Il tempo di rivisitazione elevato (35 giorni per i satelliti ERS, 24 per i satelliti Radarsat): si tratta di una conseguenza di quanto osservato al punto precedente, che limita l'applicabilità della tecnica a movimenti caratterizzati da velocità di spostamento annuo di ordine centimetrico
- La mancanza di informazioni di spostamento in direzione N-S

Nel complesso, considerato l'elevato contenuto informativo, la possibilità di ricostruire l'evoluzione pregressa dell'area in esame, l'elevata precisione dei risultati e la complementarietà con l'approccio geomorfologico, l'indagine PSInSAR™ rappresenta uno strumento ineguagliabile per studiare movimenti lenti ad ampia scala spaziale e temporale.

## 6 Sinergia con le tecniche di monitoraggio convenzionali

Rispetto alle convenzionali tecniche di monitoraggio, la tecnica PS offre numerosi vantaggi, tra cui:

- acquisire informazioni su una rete di capisaldi radar estremamente densa, soprattutto nelle aree urbane, dove la densità dei PS può raggiungere valori notevolmente superiori rispetto a quanto ottenibile con le reti geodetiche convenzionali; inoltre, bisogna considerare che i bersagli sono già presenti sul terreno e, a differenza dei tradizionali strumenti di misura (quali, capisaldi geodetici e GPS, estensimetri, inclinometri), essi non richiedono alcuna produzione, installazione e successiva manutenzione da parte dell'operatore;
- ricostruire per ciascun bersaglio radar la serie storica degli spostamenti con una elevata precisione, superiore a quella del GPS in direzione verticale, e con un'alta frequenza temporale in confronto alla livellazione ottica;
- studiare ampie porzioni di territorio oppure zone difficilmente accessibili (dal momento che non richiede alcun intervento a terra), consentendo di ottimizzare i costi ed i tempi di indagine;
- elevata precisione delle misure sia di spostamento che di velocità media annua (fino a 0.5 mm/a);
- elaborare l'archivio storico dell'Agenzia Spaziale Europea (*European Space Agency, ESA*) con la possibilità di indagare l'evoluzione del fenomeno deformativo a partire dal 1992 (data di inizio dell'acquisizione delle immagini radar ERS), la quale può rivelarsi un elemento decisivo, soprattutto laddove le velocità in gioco (mm/a) sono estremamente ridotte e le tecniche convenzionali richiederebbero anni prima di poter dare misure significative.

È opportuno puntualizzare che la tecnica PS non è in competizione con le altre tecniche ma, al contrario, si pone in completa sinergia con esse. L'integrazione dei dati PS con le misure geodetiche tradizionali e GPS permette di sfruttare i vantaggi offerti dalle tecniche citate, aumentando il numero di informazioni disponibili, a favore di una visione più completa dell'evoluzione dei fenomeni studiati. Abbiamo già descritto i punti forza della tecnica PS; descriviamo adesso quelli di livellazione ottica e GPS.

Con la livellazione ottica si può raggiungere un'accuratezza sensibilmente elevata (0.1 mm su linee di livellazione con capisaldi distanti 100 m l'uno dall'altro) e fissare arbitrariamente la posizione dei capisaldi e l'intervallo temporale tra una campagna di rilevamento e la successiva (purtroppo le campagne vengono eseguite raramente con regolarità nel tempo). In virtù della accuratezza raggiungibile e della sua versatilità, questo metodo risulta assolutamente insostituibile per lo studio di fenomeni localizzati ad elevata criticità.

Il GPS, pur mostrando una densità di punti di misura estremamente inferiore a quella dei dati PS ed una accuratezza in verticale (dell'ordine del cm) inferiore sia alla PSInSAR™ che alla livellazione ottica, è l'unico strumento attualmente in grado di offrire dati tridimensionali e quindi l'orientazione del vettore spostamento nello spazio 3-D. Questa proprietà consente dunque di fornire indicazioni sul moto anche in direzione N-S, dove i sistemi SAR non possono apprezzare in maniera sensibile il movimento (sezione 3.2.2). Inoltre, possedere informazioni sul moto del terreno a monte dell'elaborazione dei dati SAR, ed in particolare del punto di riferimento (*reference point, REF*) utilizzato nell'analisi PSInSAR™, comporterebbe il grande vantaggio di ottenere velocità assolute e non più differenziali.

La Tabella 2 riassume, a titolo di esempio, alcune delle principali caratteristiche della tecnica PS e di quella GPS.

|                                    | <b>PS</b>    | <b>GPS</b>              |
|------------------------------------|--------------|-------------------------|
| Moto                               | 1-D          | 3-D                     |
| Frequenza di acquisizione del dato | 24/35 giorni | giornaliera             |
| Precisione di geocodifica          | metri        | centimetri              |
| Precisione verticale               | millimetri   | centimetri              |
| Strumentazione a terra             | nessuna      | stazione di rilevamento |
| Densità spaziale delle misure      | elevata      | bassa                   |
| Tabella 2: PS vs GPS.              |              |                         |

Considerato inoltre il fatto che i sistemi di monitoraggio ed allertamento in tempo reale si basano necessariamente su misure puntuali (estensimetri, inclinometri, piezometri, ecc.), la scelta delle tipologie strumentali più appropriate alle caratteristiche evolutive del fenomeno da controllare è fondamentale per il successo del preannuncio. L'analisi PSInSAR™ rappresenta uno strumento di eccezionale valore a supporto della progettazione di reti di monitoraggio in quanto fornisce informazioni relative sia all'estensione del fenomeno da monitorare che alla sua dinamica evolutiva.

Quanto esposto evidenzia la complementarità della tecnica PSInSAR™ con le tecniche di monitoraggio tradizionali; un impiego combinato ed una gestione integrata dei risultati nei Sistemi Informativi Territoriali promette quindi notevoli risultati e progressi in materia di studio e gestione del territorio.

Molti casi applicativi possono essere citati a dimostrazione della completa sinergia dei dati PS con quelli ottenuti sia con la livellazione ottica che con il GPS. Nella sezione successiva vengono riportati alcuni esempi di integrazione (Colesanti et al., 2001), che sono stati condotti per verificare l'attendibilità del dato PS.

### 6.1 Validazione del dato PS con misure di livellazione ottica e GPS

La validazione tra i dati PS e quelli ottenuti con livellazione ottica e GPS non è un obiettivo facilmente perseguibile, soprattutto a causa della mancanza di procedure standard di validazione, della scarsità di informazioni (geodetiche e geotecniche) *a priori* e di campagne di rilevamento regolari nel tempo.

Affinché i dati siano confrontabili tra loro, essi devono essere proiettati nella stessa direzione, dal momento che i valori ottenuti dall'analisi PSInSAR™ sono misurati lungo la linea di vista del sensore (LOS) e quelli relativi alla livellazione ottica ed al GPS in verticale.

#### PS vs livellazione ottica

Di seguito è riportato uno studio effettuato presso Ancona (Italia), area notoriamente affetta da un lento fenomeno gravitativo, monitorato con livellazione ottica dal 1983. Le immagini ERS utilizzate per l'analisi PSInSAR™ si riferiscono all'intervallo temporale compreso tra giugno 1992 e novembre 2000. Nell'area d'interesse (3.5 km<sup>2</sup>) sono stati individuati 650 PS, di cui 12 nella zona in frana.

Le misure di livellazione sono state proiettate lungo la LOS e confrontate con le misure dei PS più vicini. La Figura 36 mostra che i dati sono in buon accordo, anche se si riferiscono solo in parte allo stesso intervallo temporale. Inoltre, si può osservare che, nel periodo di acquisizione delle immagini ERS (1992-2000), la frequenza del dato PS è notevolmente superiore a quella dei dati derivanti dalla livellazione (Colesanti et al., 2001). L'accuratezza delle due tecniche di misura risulta del medesimo ordine di grandezza

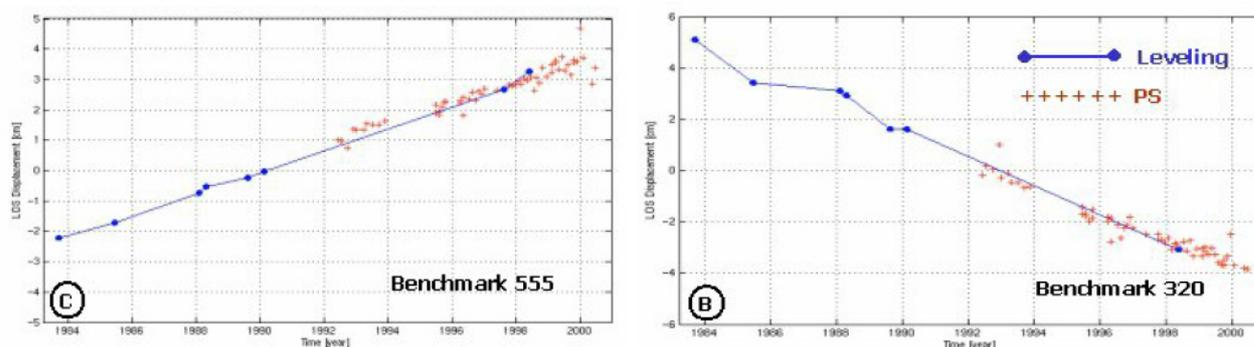


Figura 36: Confronto tra gli spostamenti lungo la LOS registrati in corrispondenza di due capisaldi e quelli dei PS ad essi più vicini.

#### PS vs GPS

I risultati dell'analisi PSInSAR™ sono stati confrontati con i dati GPS acquisiti dalla rete GPS integrata della California meridionale (SCIGN) ed elaborati presso il JPL (California Institute of Technology). Per il confronto sono state utilizzate le misure GPS raccolte a partire dal 1996 presso 11 stazioni presenti nel bacino di Los Angeles.

Come risulta dalla Figura 37, esiste un ottimo accordo tra i dati GPS, proiettati lungo la LOS, e le serie storiche relative ai PS più vicini (nell'intorno di 100 m). Pur confermando il trend evidenziato dai dati PS, i dati GPS mostrano una minor precisione (peraltro tipica della tecnica di misura).

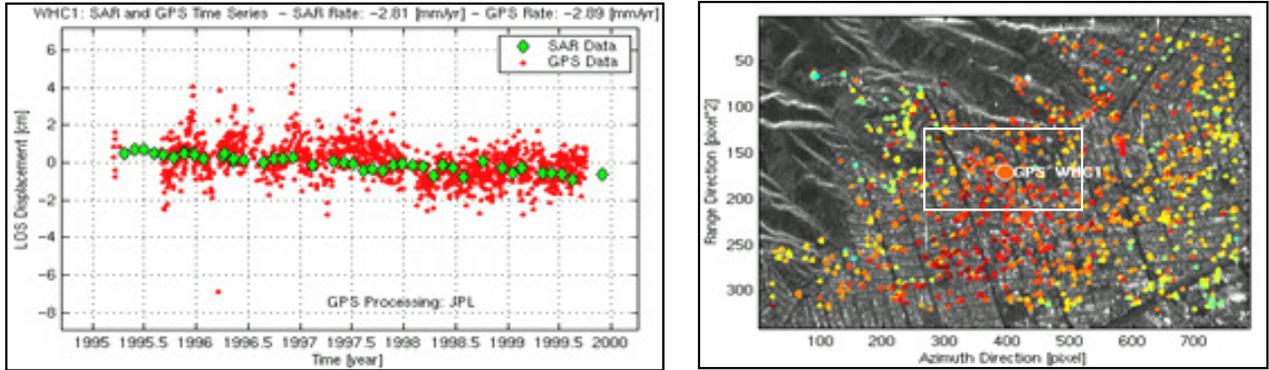


Figura 37: A destra posizione della stazione GPS CLAR e dei PS limitrofi. A sinistra confronto tra gli spostamenti lungo la LOS registrati in corrispondenza del caposaldo GPS e quelli dei PS ad esso più vicini.

## 7 Formato dei dati

In questa sezione verranno illustrate le principali caratteristiche dei file consegnati al cliente e sarà fornita una descrizione dei loro contenuti, facendo riferimento alle specifiche sezioni per eventuali approfondimenti.

### 7.1 Struttura del database

I risultati estratti con la tecnica PS sono consegnati al cliente in file digitali (con estensione *.dbf*) che possono essere aperti con il programma Microsoft Excel in modo da visualizzarne il contenuto, senza dover necessariamente importare il file in ambiente GIS (ESRI<sup>®</sup>).

Per ciascun sito analizzato, le informazioni estratte sono raccolte in tre differenti *database*:

- **REF**: indica le coordinate spaziali del punto di riferimento;
- **MET**: contiene le informazioni geografiche, di velocità e di qualità di ciascun PS;
- **TSR**: contiene le serie storiche di deformazione dei PS.

Il file **REF** riporta le coordinate spaziali (LAT/NORTH, LON/EAST) del punto di riferimento, indicato con il codice REF. Come già spiegato nella sezione 3.3, i valori di velocità calcolati con la tecnica PS sono differenziali; essi non esprimono quindi grandezze assolute, bensì indicano, come in una rete geodetica convenzionale, le velocità dei PS individuati in relazione ad un punto scelto come riferimento (*reference point, REF*).

| CODE | LAT        | LON        |
|------|------------|------------|
| REF  | 43,9134506 | 11,4457217 |

Figura 38: struttura dei file *REF*

Il file **MET** riporta per ciascun PS, oltre alle informazioni di tipo geografico (LAT, LON) e qualitative (V\_STDEV, COHERENCE), il valore della velocità media annua (VEL) stimata nell'intervallo temporale di acquisizione delle immagini processate. Si ricorda che, per convenzione, il segno, positivo o negativo, assegnato al valore di velocità si riferisce a moti rispettivamente in avvicinamento ed in allontanamento dal satellite (per ulteriori chiarimenti si veda la sezione 3.2).

I campi contenuti nel file **MET** possono variare in base alle richieste del cliente; tuttavia, quelli generalmente consegnati sono:

- *Code*: codice che permette di identificare in maniera univoca il punto di misura all'interno del file *.dbf*;
- *Lat/North*: posizione del PS in direzione N-S espressa in coordinate geografiche/cartografiche;
- *Lon/East*: posizione del PS in direzione E-W espressa in coordinate geografiche/cartografiche;
- *Coherence*: parametro di qualità del dato PS, con valori compresi tra 0 e 1 (sezione 7.2);

- *Height*: quota del PS calcolata rispetto all'ellissoide di riferimento WGS84<sup>3</sup>;
- *Vel*: velocità media annua di spostamento (mm/a) misurata lungo la linea di vista del sistema (LOS) e stimata sull'intero arco temporale in cui sono state acquisite le immagini; la velocità di ciascun PS è relativa ad un punto di riferimento. (sezione 3.3);
- *V\_stdev*: indice che misura il grado di dispersione attorno al valore di velocità media annua (sezione 7.2).

| CODE  | LAT        | LON        | COHERENCE | VEL   | V_STDEV | HEIGHT |
|-------|------------|------------|-----------|-------|---------|--------|
| A076N | 43,6437385 | 11,1721541 | 0,81      | -1,75 | 1,17    | 156,70 |
| A077T | 43,6438608 | 11,1723888 | 0,77      | -2,15 | 1,18    | 150,20 |
| A077U | 43,6485441 | 11,2060593 | 0,79      | -1,41 | 1,09    | 155,20 |
| A0789 | 43,6420717 | 11,1585834 | 0,68      | -1,09 | 1,25    | 151,90 |
| A079A | 43,6440493 | 11,1727766 | 0,89      | -2,49 | 1,14    | 147,30 |
| A079X | 43,6440896 | 11,1727440 | 0,73      | -0,92 | 1,19    | 153,70 |

Figura 39: struttura file MET

Il file **TSR**, contiene rispetto al file MET per ogni PS una serie di campi aggiuntivi pari al numero di immagini processate. Per ciascun PS, le celle sottostanti ai campi indicati con "Daaaammgg" contengono per quella data acquisizione il valore di spostamento, espresso in mm, stimato rispetto alla prima immagine disponibile (che nel file si diversifica per riportare in ogni cella valori di spostamento uguale a 0.00 mm). Il segno si riferisce, come nel caso della velocità, a movimenti in avvicinamento (positivo) o in allontanamento (negativo) dal satellite. I valori riportati in ciascuna riga, al di sotto dei campi "Daaaammgg", permettono di costruire la serie storica del PS in considerazione.

| CODE  | LAT        | LON        | V_STDEV | COHERENCE | VEL   | D20030407 | D20030501 | D20030525 |
|-------|------------|------------|---------|-----------|-------|-----------|-----------|-----------|
| A4XNS | 43,9615964 | 11,0486399 | 1,29    | 0,76      | 0,82  | 0,00      | -1,27     | -5,72     |
| A4XBX | 43,9598439 | 11,0502158 | 1,25    | 0,92      | 0,29  | 0,00      | 0,76      | -0,39     |
| A4RKQ | 43,9292916 | 11,0534296 | 1,26    | 0,94      | -1,05 | 0,00      | 6,41      | 2,72      |
| A4X18 | 43,9651565 | 11,0539591 | 1,28    | 0,92      | -0,10 | 0,00      | 1,51      | -0,62     |
| A4XVZ | 43,9639921 | 11,0536339 | 1,29    | 0,81      | 0,87  | 0,00      | -2,95     | -1,06     |
| A4R62 | 43,9361723 | 11,0539562 | 1,21    | 0,94      | 1,18  | 0,00      | 0,04      | -2,85     |

Figura 40: struttura file TSR

<sup>3</sup> L'ellissoide di riferimento WGS84 (acronimo di *World Geodetic System 1984*) è un sistema globale geocentrico, costituito da una terna cartesiana con origine coincidente con il centro di massa della Terra, l'asse Z diretto verso il polo N convenzionale al 1984, l'asse X passante per il meridiano di Greenwich al 1984 e l'asse Y diretto in modo da completare una terna destrorsa.

## 7.2 I parametri di qualità: Coerenza e Deviazione Standard

La tecnica PSInSAR™, nel caso di analisi standard, prevede l'utilizzo di un modello lineare per descrivere gli spostamenti dei bersagli individuati nell'analisi; questo significa che è possibile individuare solo quei punti che mostrano tassi di spostamento sufficientemente stabili nel tempo.

La coerenza (campo COHERENCE nel file dbf) è l'indice che misura l'accordo tra i dati ed il modello di spostamento utilizzato in fase di analisi. Può assumere valori compresi tra 0 e 1 dove 0 indica punti che non hanno nessuna attinenza con il modello lineare e quindi inaffidabili nel caso di analisi standard, mentre valori pari a 1 indicano elevato accordo con il modello utilizzato. In Figura 41 e Figura 42 sono illustrati due esempi rispettivamente di PS non affidabile a bassa coerenza e PS ad alta coerenza. In figura sono riportate anche le repliche delle serie storiche, concetto introdotto nel paragrafo 8.2.

Il valore di coerenza minima accettabile è stabilito, tramite una simulazione con metodo Montecarlo, in modo che la probabilità di errore sia inferiore a  $10^{-5}$ . Si impone cioè che, statisticamente, il valore di velocità di un solo PS su centomila venga considerato attendibile corrispondendo in realtà a un dato casuale e quindi inaffidabile. Tale valore, utilizzato come soglia di selezione dei Permanent Scatterers, risulta essere inversamente proporzionale al numero di immagini utilizzate nell'elaborazione.

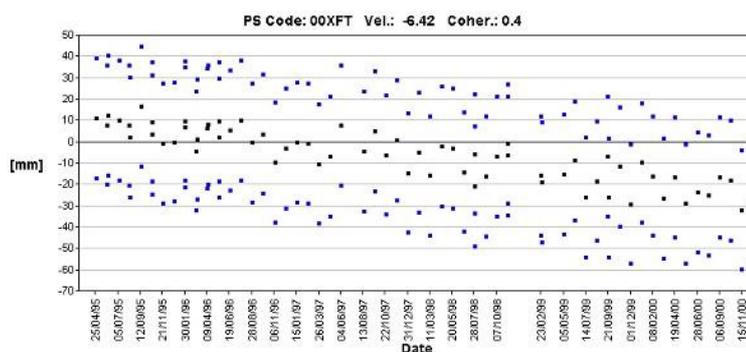


Figura 41: Esempio di serie storica di un PS con coerenza pari a 0,4. In blu sono rappresentate le repliche della serie storica a distanza pari a metà della lunghezza d'onda.

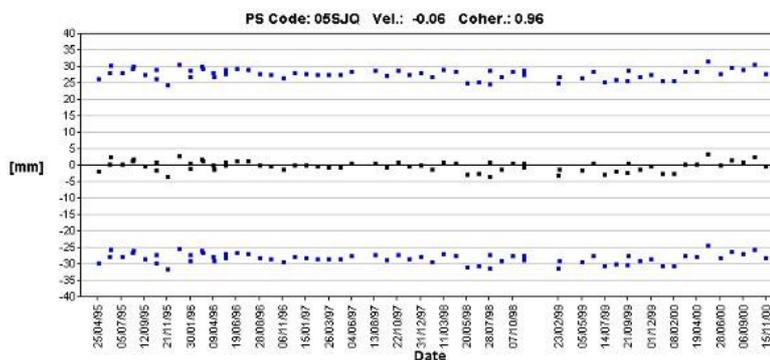


Figura 42: Serie storica di un PS con coerenza pari a 0,96. In blu sono rappresentate le repliche della serie storica a distanza pari a metà della lunghezza d'onda.

Esistono però anche casi in cui 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. Un caso in cui si verifica questo fenomeno si ha quando si è in presenza di moti con forti componenti stagionali. Infatti, anche in presenza di dati poco rumorosi, le componenti sinusoidali vengono interpretate dal modello come rumore facendo ridurre il valore della coerenza ( cfr.Figura 43 ).

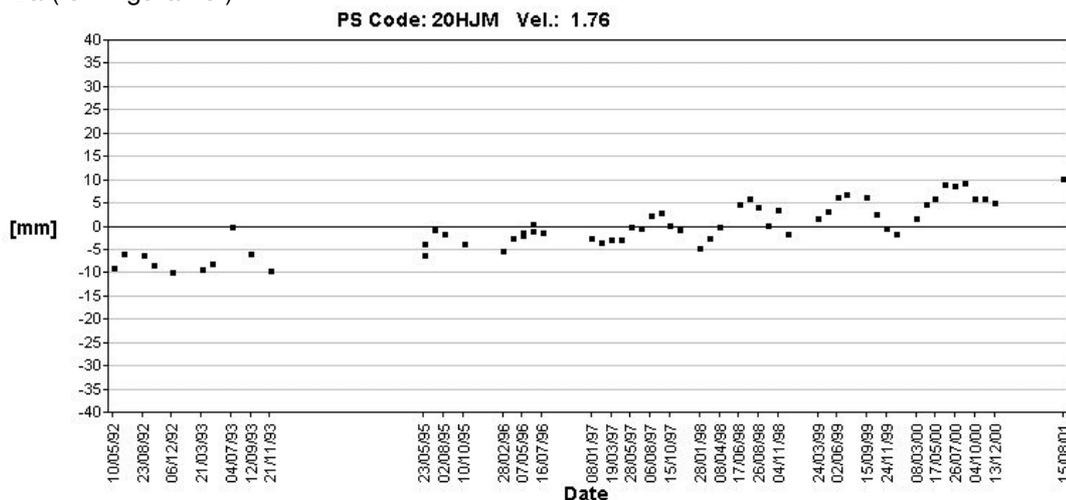


Figura 43: Esempio di serie storica stagionale.

Poiché la velocità di ogni PS è relativa ad un punto preso come riferimento (REF), è fondamentale considerare anche la propagazione dell' incertezza di misura man mano che ci si allontana da esso. La deviazione standard (campo V\_STDEV nel file dbf) indica di quanto vibra la stima della differenza di velocità del punto in analisi rispetto al riferimento (REF). Tale indice è dunque relativo a una coppia di punti (il PS considerato e il punto di riferimento). Questo significa che due punti vicini (distanti tra loro meno di un chilometro) saranno affetti dallo stesso errore e pertanto la differenza tra le loro velocità non risulterà da esso influenzata. Per capire il significato di questa grandezza riportiamo un semplice esempio. Supponiamo che la velocità media annua per un dato PS sia -3 mm/a, rispetto ad uno specifico punto di riferimento, e la rispettiva deviazione standard +0.5 mm/a; ciò significa che il valore "vero" della velocità, in assenza di errori sistematici, è compreso tra - 2.5 e - 3.5 mm/a con una probabilità del 68% (1 sigma).

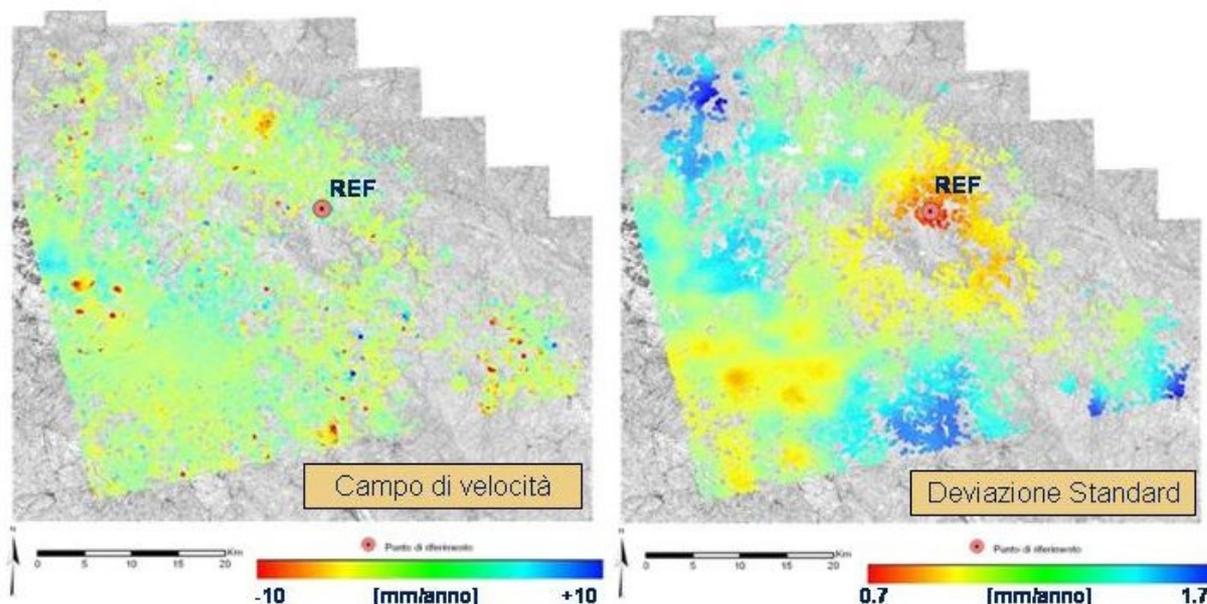


Figura 44: A destra campo di velocità dei PS. A sinistra corrispettiva mappa di deviazione standard delle velocità funzione della posizione del punto di riferimento.

In Figura 44 si può osservare come varia nello spazio la deviazione standard dell'errore che va a degradare la stima di velocità. Anche la topografia, oltre alla distanza dal punto di riferimento, influenza l'andamento di tale valore e come vengono raggiunti i valori massimi (nell'esempio pari a 1.7 mm/anno) proprio in corrispondenza delle cime. Questo significa che rispetto al riferimento localizzato a fondovalle ed indicato con un circolo rosa, la velocità di un PS situato in quota sarà influenzata da un rumore con deviazione standard pari a 1.7 mm/anno e che lo stesso punto confrontato con un altro PS localizzato nelle vicinanze non risentirà di questo effetto.

Nel caso in cui si proceda ad un cambio del punto di riferimento in fase di post-processing, il valore di deviazione standard riferito al punto di riferimento originale non è più valido. È possibile ricalcolare in questo caso un valore approssimativo delle deviazioni standard tenendo conto della dipendenza di questo dalla distanza dal nuovo punto di riferimento e dalla topografia dell'area in esame. Questo nuovo parametro così calcolato è però solo indicativo e da utilizzare con più cautela rispetto a quello originale. Si può concludere che l'operazione di cambio del punto di riferimento non inficia l'informazione sulla velocità del PS ma deteriora l'informazione contenuta nel valore di deviazione standard.

## 8 Guida pratica

Nella presente sezione al cliente verranno fornite le linee guida per visualizzare i risultati PS in ambiente GIS (ESRI<sup>®</sup>) utilizzando uno strumento (*Client Toolbar*) appositamente sviluppato da TRE per velocizzare le operazioni. Si tratta di un plug-in per ambiente GIS (ESRI<sup>®</sup>) grazie al quale è possibile disporre di una apposita toolbar (Figura 45) in ambiente ArcGIS (ArcMAP 9.x) che consente la rapida rappresentazione e consultazione dei file dbf contenenti i risultati dell'analisi PS.



Figura 45: *Client Toolbar*, da sinistra a destra i pulsanti che consentono di aprire il file dbf, visualizzare una sintesi del suo contenuto, visualizzare le serie storiche contenute nel file TSR e selezionare la scala cromatica più adatta al caso in esame.

La *Client Toolbar* consente di:

1. aprire ed importare un file *.dbf* in ambiente GIS (ESRI<sup>®</sup>);

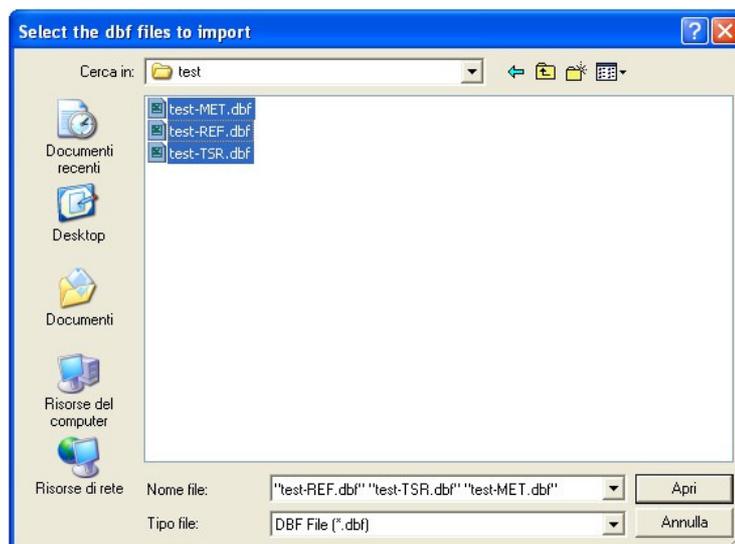


Figura 46: *Client Toolbar* – import di un file dbf

2. visualizzare le informazioni relative al file *.dbf* selezionato (numero di campi riportati nel file e numero di PS) ed alle immagini elaborate (numero di immagini processate, prima ed ultima acquisizione);

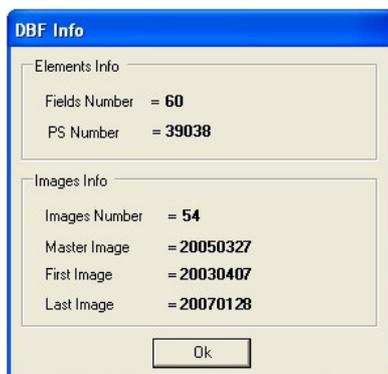


Figura 47: *Client Toolbar* – visualizzazione sintetica del contenuto di un file dbf

3. visualizzare le serie storiche dei PS contenuti nel file TSR;

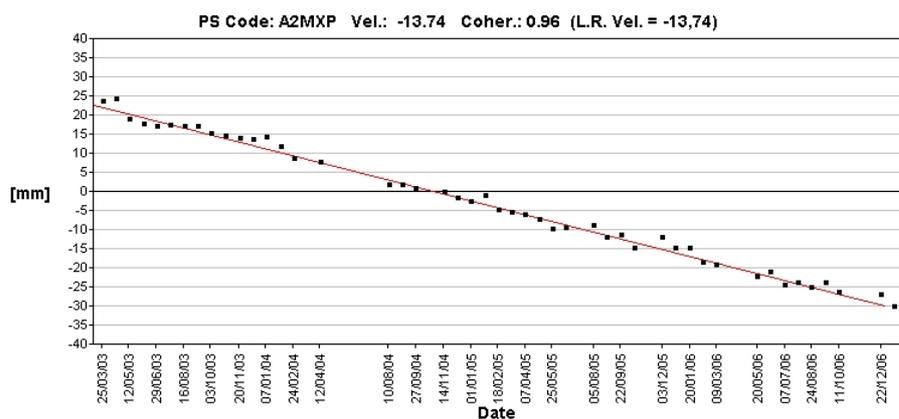


Figura 48: *Client Toolbar* – visualizzazione della serie storica di un PS

4. selezionare la scala cromatica per la variabile VEL del file selezionato.



Figura 49: *Client Toolbar* – selezione della scala cromatica per la rappresentazione della VEL

Nel seguito vengono chiariti alcuni aspetti relativi all'impostazione della scala cromatica per la visualizzazione delle velocità PS ed alla visualizzazione ed interpretazione delle serie storiche degli spostamenti.

## 8.1 Visualizzazione delle velocità e impostazione della scala cromatica

Una volta caricati con il primo pulsante (da sinistra a destra) della *Client Toolbar*, i PS compaiono come punti dello stesso colore. Per visualizzare la velocità associata a ciascuno di essi, tenendo selezionato il relativo layer (MET o TSR), l'ultimo pulsante (da sinistra a destra) della *Client Toolbar* consente di scegliere il range di variazione desiderato. Si tratta di una scala con colori graduati, centrata sul valore zero di velocità e con un elevato numero di classi con ampiezza regolare in modo da cogliere anche le minime sfumature di variazione del parametro visualizzato. La scala di colori proposta è quella denominata *Spectrum-Full Bright*, con tonalità che passano gradualmente dal rosso, al verde ed al blu, con classi di dimensioni uniformi e velocità saturate in funzione della variabilità dei valori presenti (Figura 50). Naturalmente, la scelta dei valori estremi della scala dipende dall'entità dei valori minimo e massimo della velocità, come si dirà nel seguito.

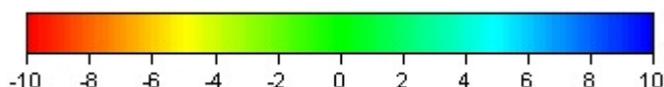


Figura 50: esempio di scala colori convenzionalmente adottata per rappresentare la velocità di spostamento annua, con intervallo di variazione compreso tra -10 e +10 mm/a. Secondo la convenzione adottata i valori negativi sono da interpretarsi come allontanamento dal satellite mentre i valori positivi significano avvicinamento al satellite

Per una corretta visualizzazione del fenomeno deformativo si deve scegliere il giusto intervallo di variazione, analizzando in primo luogo l'istogramma con la distribuzione dei valori di velocità (facilmente ottenibile in ArcMAP).

Ad esempio, nel caso di velocità di spostamento superiori a 5 mm/a, utilizzare una scala colori variabile tra -5 e +5 mm/a non consente di visualizzare né i valori di velocità  $\leq -5$  mm/a né quelli  $\geq +5$  mm/a, perché essi risultano concentrati in un'unica classe, rispettivamente, di colore rosso e di colore blu (nell'ipotesi che la scala cromatica utilizzata sia quella denominata *Spectrum-Full Bright*). Questo inconveniente è comunque di facile soluzione: è sufficiente ampliare l'intervallo della scala colori per includere anche i valori superiori (in valore assoluto) agli estremi di variazione della scala precedentemente scelta.

Tuttavia, la scelta degli estremi della scala cromatica deve sottostare a certi criteri; la scala non deve risultare né eccessivamente ampia né eccessivamente ristretta rispetto alla distribuzione dei valori di velocità. Nel primo caso, infatti, tutti i valori di velocità risulterebbero compresi nelle classi centrali e

quindi i PS apparirebbero essenzialmente di colore verde, condizione che l'utente potrebbe erroneamente associare ad assenza di moto. Nel secondo caso, se da un lato diminuire l'ampiezza della scala colori consente di rilevare i moti indotti dal fenomeno deformativo nelle sue minime sfumature, dall'altro bisogna considerare che non si può scendere al di sotto del limite di risoluzione del sistema (che in generale è dell'ordine dei decimi di mm; a tale proposito si veda la sezione 4).

In Figura 51 la stessa area è rappresentata con scale colori differenti. L'immagine di destra mostra come l'uso di una scala più ampia (con valori tra -20 e +20 mm/a) permetta di evidenziare le dinamiche più rilevanti (si può infatti notare che ci sono tre aree in movimento), smorzando le variazioni di ordine inferiore. Nell'immagine di sinistra, invece, la scelta di una scala con estremi pari a 10 mm/a (in valore assoluto) permette di rilevare le variazioni del moto con maggiore dettaglio.

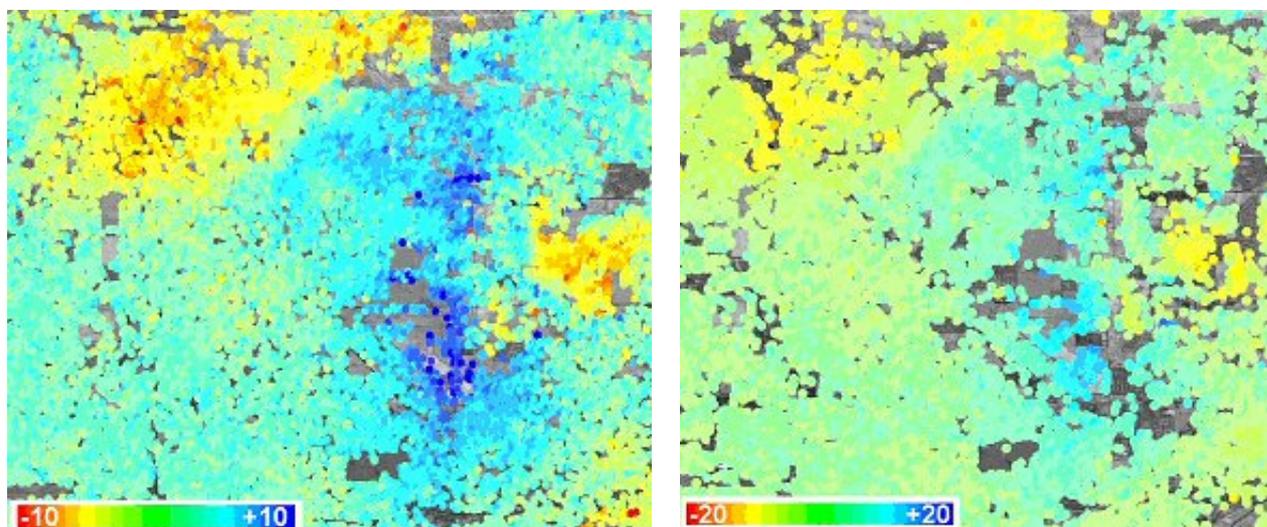


Figura 51: Visualizzazione del campo di velocità tramite l'utilizzo di scale cromatiche con estremi di variazione in valore assoluto pari a 20 mm/a (a destra) ed a 10 mm/a (a sinistra) all'interno della stessa area geografica.

## 8.2 Consultazione delle serie storiche

Le serie storiche riportano, per ogni PS, gli spostamenti in millimetri del bersaglio lungo la LOS in funzione del tempo trascorso dalla prima acquisizione della serie, che viene utilizzata come riferimento.

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. Infatti tramite l'analisi delle serie storiche si possono individuare andamenti stagionali dei moti, moti di tipo non lineare o accelerazioni.

In Figura 52 si riportano degli esempi di serie storica in cui è si evidenziano un andamento stagionale (A), non lineare (B), accelerato.

I diagrammi delle serie storiche si ottengono utilizzando l'apposito pulsante della *Client Toolbar*, come precedentemente indicato.

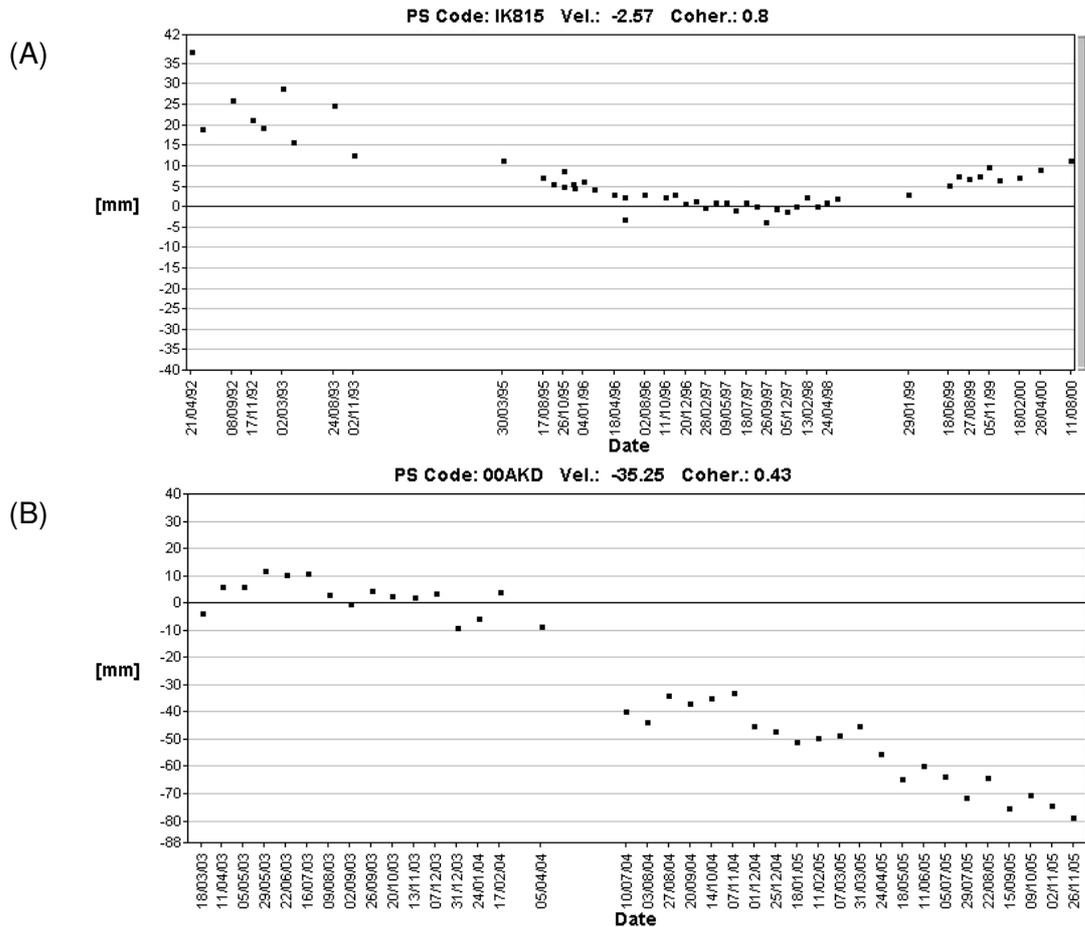


Figura 52: Esempi di serie storiche: (A) non lineare, (B) accelerato

Si consideri che il parametro di coerenza, essendo un indice dell'affidabilità del modello lineare per l'analisi standard, non tiene sempre conto dei fenomeni sopra elencati. In generale è quindi consigliabile visualizzare anche le serie storiche dei PS a bassa coerenza e valutarne la bontà caso per caso.

Si osservi inoltre che lo studio delle serie storiche consente di individuare casi in cui il punto in analisi si comporta da PS solo in un sottoinsieme dell'arco temporale di osservazione, e anche in questo caso il valore di coerenza risulta basso, in quanto una serie storica di questo tipo si discosta dal modello lineare.

Particolare attenzione va dedicata al fenomeno noto come ambiguità di fase o "phase unwrapping". Come spiegato nel paragrafo 4.4 la Tecnica PSInSAR™ è basata su misurazioni di variazioni di fase dell'onda incidente tra due acquisizioni successive. In un sistema coerente non è possibile distinguere tra uno spostamento  $\Delta R$  e uno spostamento  $nL + \Delta R$  (con L lunghezza d'onda del sistema), incorrendo nell'errore di equivocazione del moto. Questa situazione può creare problemi in presenza di movimenti molto veloci e con un succedersi delle acquisizioni molto irregolare. Un esempio di quello

che si può ottenere è riportato in Figura 53: a seguito della mancanza di dati nel 1994, non è possibile distinguere quale delle tre serie storiche rappresentate corrisponda a quella corretta, in quanto tutte e tre le soluzioni sono plausibili. Questo problema di ambiguità di fase è proprio di tutti i sistemi coerenti, dove l'informazione è contenuta nella fase di un'onda elettromagnetica.

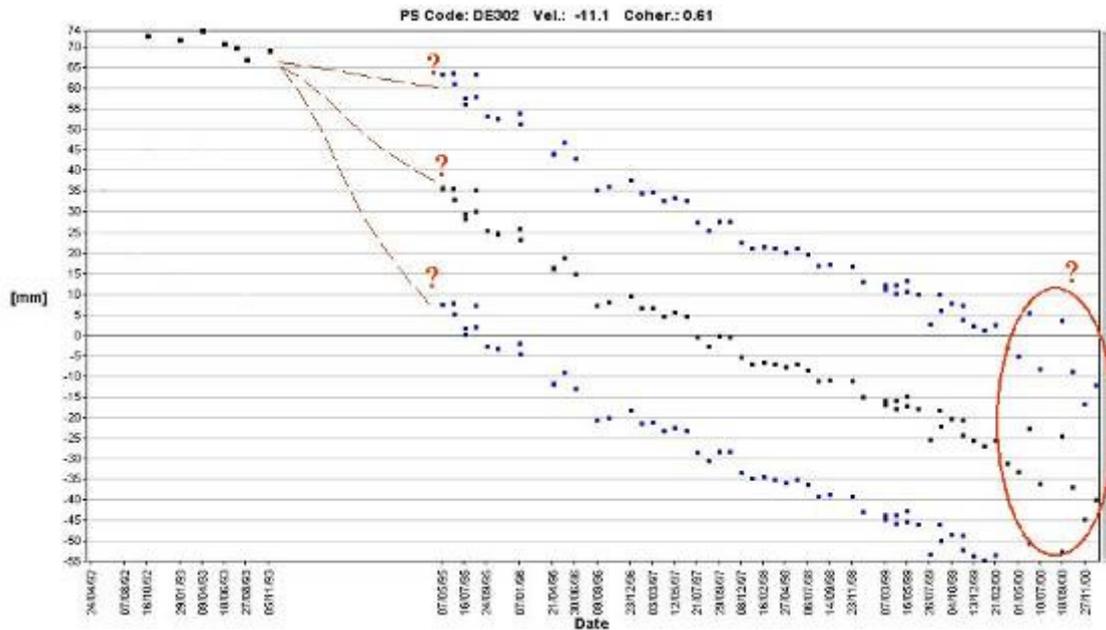


Figura 53: Esempio di *phase unwrapping*

Per riconoscere fenomeni di questo tipo è fondamentale, durante la visualizzazione delle serie storiche, rappresentare graficamente anche le repliche della serie stessa a distanza di  $\pm 0.5L$  in modo da poter valutare graficamente se ci siano andamenti più logici rispetto a quelli individuati dall'analisi. Tali considerazioni richiedono comunque grande attenzione ed esperienza e dovrebbero servire innanzitutto per individuare i PS per i quali il modello lineare dell'analisi standard non è sufficiente piuttosto che per fare ipotesi e per ricostruire serie storiche fortemente non lineari. In Figura 54 è riportato un esempio in cui si può notare come la serie storica originale, rappresentata in nero, presenti un errore di phase unwrapping nel passaggio indicato dalla freccia blu. Rappresentando anche le due repliche a  $+0.5L$  (in rosso) si nota come utilizzando la replica a  $-0.5L$  si ottenga un andamento più verosimile. In questo caso l'errore di phase unwrapping è dovuto alla forte non linearità del PS analizzato, si può infatti notare una accelerazione a partire dal 18 Gennaio 2005.

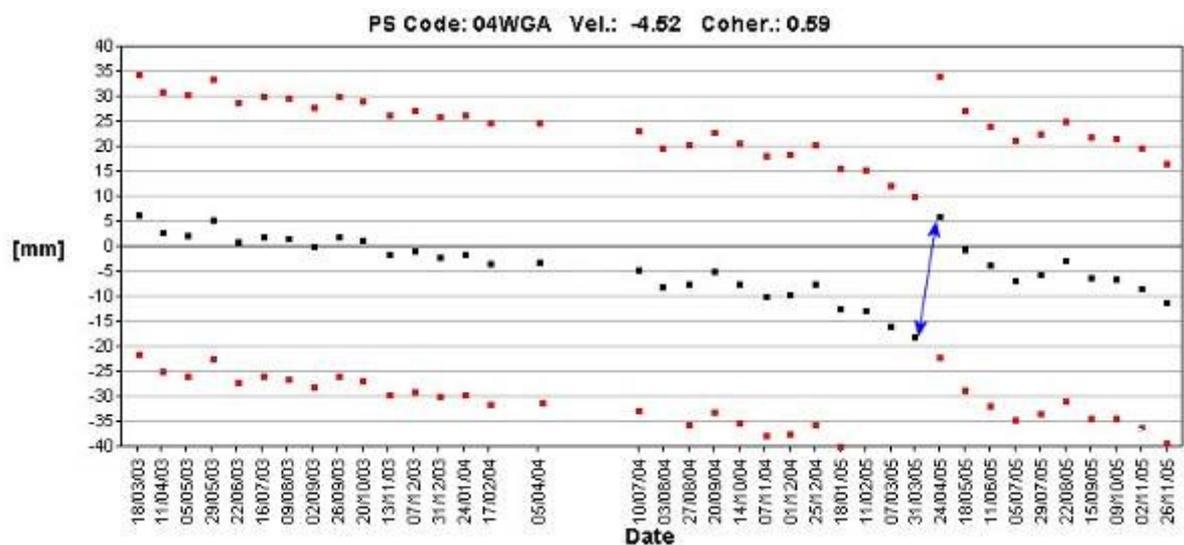


Figura 54: serie storica con errore di phase unwrapping.

## 9 Applicazioni

L'approccio PSInSAR™ offre al cliente un consistente numero di applicazioni in molti campi scientifici (tra cui geologia applicata, geologia strutturale, geofisica, vulcanologia, ingegneria civile, ingegneria mineraria). Questa tecnica presenta vantaggi superiori alle convenzionali tecniche di rilevamento grazie alla capacità di monitorare vaste aree in tempi ristretti e a costi relativamente contenuti, alla precisione delle misure, all'elevata densità spaziale delle misure ed alla possibilità di accedere ad un archivio storico di dati per lo studio di fenomeni passati (sezione 6).

Una breve carrellata di esempi ed immagini relative ai vari settori applicativi in cui la tecnica PS può essere utilizzata è già stata mostrata nella sezione 1. In questa sezione i vari casi applicativi verranno indagati separatamente e con maggiore dettaglio, facendo riferimento alle fonti bibliografiche da cui sono state estratte le informazioni riguardanti soprattutto l'interpretazione geologica degli eventi. Il lettore può comunque trovare sul sito [www.treuropa.com](http://www.treuropa.com) una vasta galleria di immagini ed attingere agli articoli scientifici specifici.

### 9.1 Subsidenza

La subsidenza consiste in un progressivo abbassamento della superficie terrestre che può essere innescato da cause sia naturali (compattazione dei sedimenti, movimenti tettonici) sia antropiche (estrazione di fluidi dal sottosuolo, attività mineraria oppure carico esercitato dai manufatti artificiali).

La tecnica PS rappresenta un ottimo strumento per studiare e monitorare con ripetitività ed omogeneità le zone soggette a subsidenza, sia a livello regionale che di singole opere antropiche; si tratta infatti dell'unica metodologia in grado di consentire analisi mensili su centinaia di km<sup>2</sup>. Considerando che le aree in subsidenza in genere sono intensamente urbanizzate, la quantità di dati PS è di gran lunga superiore a quella ottenibile con qualsiasi altra metodologia. L'accuratezza delle misure di velocità in direzione verticale è solitamente superiore rispetto a quella ottenibile con il GPS (vedi Tabella 2 nella sezione 6) e per tale ragione i dati PS ben si prestano allo studio dei fenomeni di subsidenza. In ogni caso, il dato satellitare non sostituisce le indagini in sito ma, se opportunamente integrato a dati provenienti da altre fonti, può garantire una più approfondita comprensione del fenomeno indagato (si veda a titolo di esempio la sezione 6). Inoltre, l'esistenza di un archivio storico ERS, ossia di una serie di immagini radar acquisite a partire dal 1992, permette di avviare indagini in grado di ricostruire la dinamica dell'area di interesse in tempi passati.

Lo studio del fenomeno di subsidenza che ha interessato la città di New Orleans rappresenta un caso emblematico. L'applicazione della tecnica PS ha permesso di identificare sul territorio oltre 180.000 punti di misura, dando luogo ad una mappa di subsidenza con una definizione che con i sistemi tradizionali non era possibile ottenere. Il risultato mostra chiaramente come il fenomeno di subsidenza, che pure interessa tutta l'area d'interesse, risulti particolarmente accentuato in corrispondenza di alcuni argini, affetti da velocità superiori ai 20 mm/a (Figura 55). In particolare, questo studio ha potuto mettere in evidenza come alcune sezioni degli argini che hanno ceduto al passaggio dell'uragano Katrina nell'agosto 2005 (identificati sulla destra della Figura 55 dall'allineamento di PS di colore rosso), già negli anni immediatamente precedenti al disastro fossero affette da spostamenti intensi, superiori ai tassi medi di deformazione misurati in tutta l'area (Dixon et al., 2006). Ciò prova come questa tecnica possa essere un ottimo strumento per pianificare interventi preventivi, soprattutto in aree ad alto rischio idrogeologico.

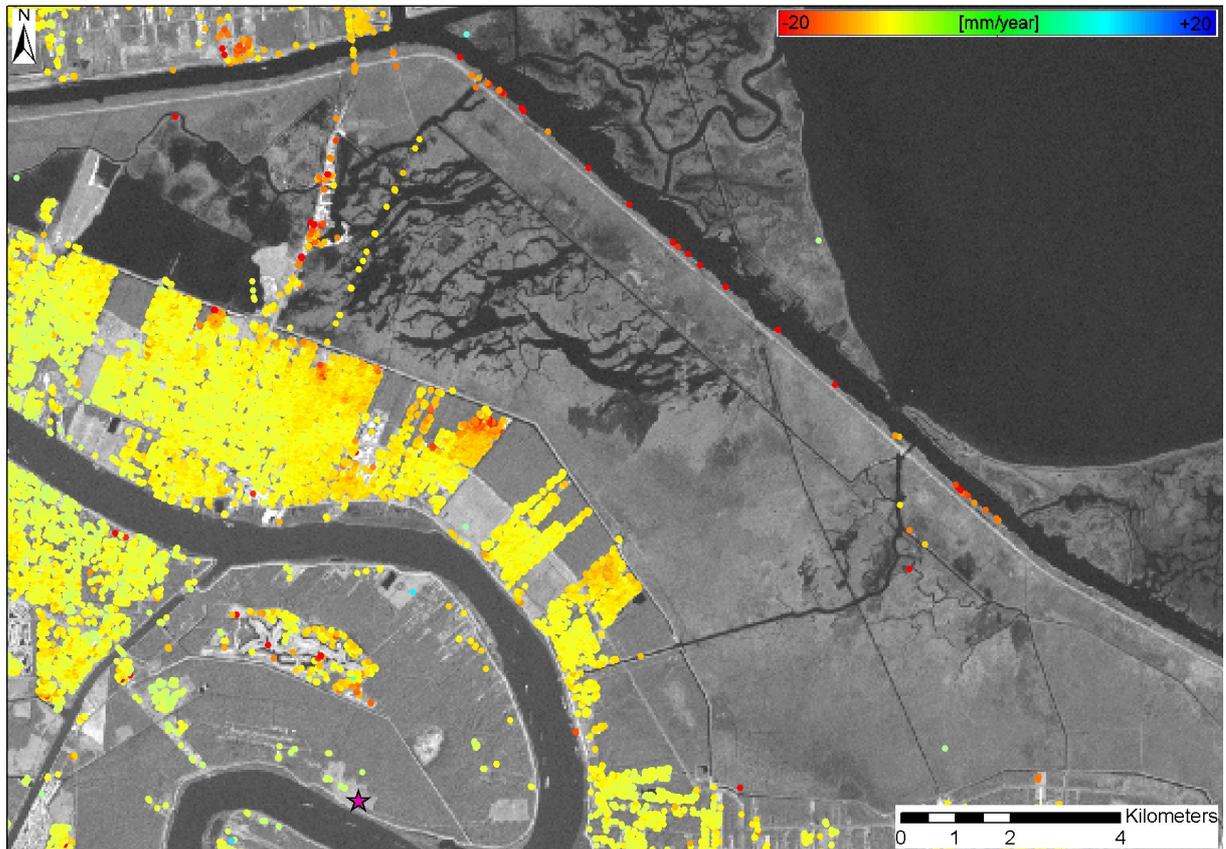


Figura 55: Campo di velocità dei bersagli radar (PS) individuati nell'area del Grande Delta del Fiume Mississippi comprendente la città di New Orleans. I valori di velocità sono saturati tra -20 e +20 mm/a e si riferiscono all'arco temporale 2002-2005.

### 9.1.1 Estrazione di fluidi dal sottosuolo

Le compagnie che operano nel settore di estrazione del petrolio e di gas naturale sono attualmente tra i maggior fruitori della tecnica PS, la quale viene utilizzata per il monitoraggio delle aree interessate dall'estrazione e per evidenziare eventuali relazioni tra processo di estrazione e tasso di subsidenza in modo da consentire una migliore pianificazione sia delle attività estrattive che di preservazione delle strutture in superficie.

Un tipico caso di subsidenza indotta dall'estrazione di petrolio dal sottosuolo e dallo sfruttamento intensivo della risorsa idrica sotterranea è quello verificatosi nella regione di Pomona (Los Angeles). In Figura 56 è possibile osservare come le intense attività estrattive abbiano prodotto un notevole abbassamento del terreno (rappresentato dalla superficie in colore rosso); l'area indicata sulla sinistra (in colore blu) è invece dovuta al sollevamento determinato dalla faglia di San José ([www.treuropa.com](http://www.treuropa.com)).

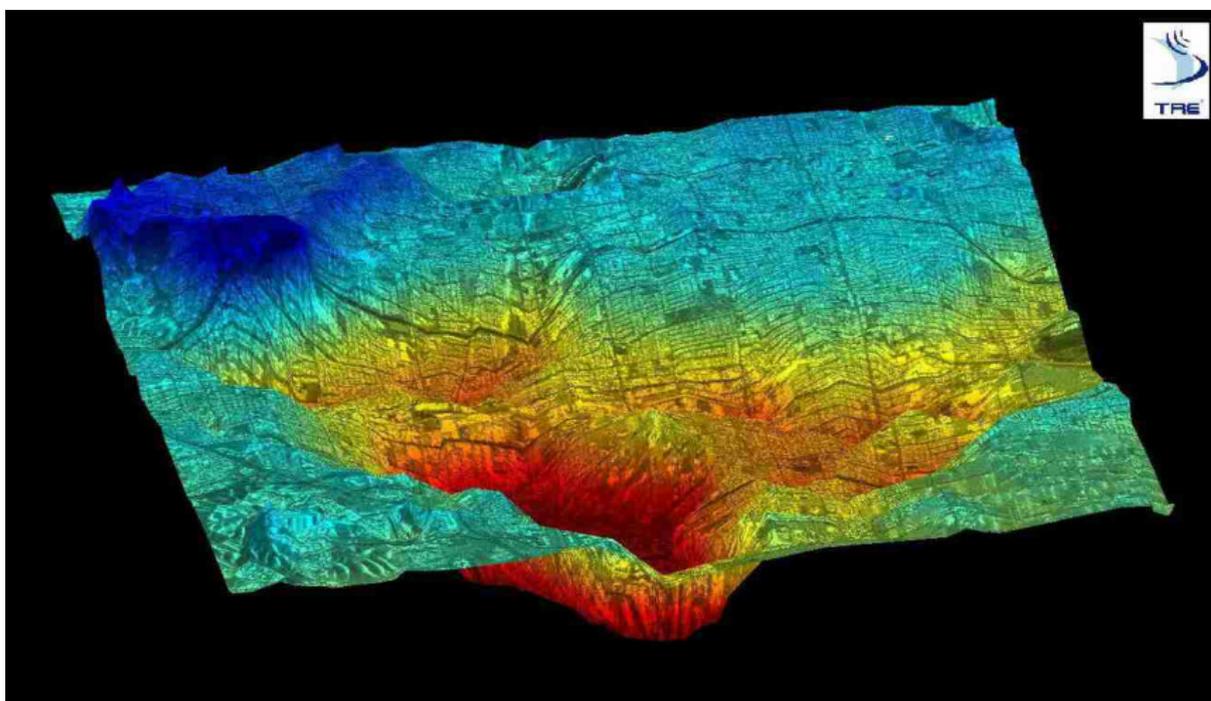


Figura 56: Rappresentazione 3-D della deformazione superficiale avvenuta nei pressi di Pomona (Los Angeles). I valori di spostamento sono compresi tra -20 cm (rosso) e +6 cm (blu) e si riferiscono all'intervallo temporale 1992-1999.

L'emungimento di acqua dal sottosuolo può essere un'altra possibile causa del fenomeno della subsidenza. L'applicazione della tecnica PS rappresenta una metodologia innovativa per indagare con maggiore risoluzione ed accuratezza i movimenti del terreno legati alle dinamiche idrogeologiche. A tal proposito, uno studio effettuato su un'area di estensione pari a 20 km x 20 km nella zona di Las Vegas (Nevada) ha permesso di individuare ben 90.000 PS e di indagare con estremo dettaglio la risposta nel tempo degli acquiferi alle attività di emungimento e di ricarica in riferimento al periodo 1992-2005 (nel 1990 ha avuto inizio un programma di ricarica artificiale che viene effettuato nella stagione invernale ad opera del Las Vegas Valley Water District) (Bell et al., 2007). La porzione di territorio a NW della Faglia di Eglinton è notoriamente soggetta a forte subsidenza; le serie storiche dei PS che si trovano in questa zona hanno evidenziato una rallentamento nella velocità di subsidenza di circa 2 cm/a, passando da più di 3 cm/a (nel periodo 1992-1996) a meno di 1 cm/a (nel periodo 2003-2005) conseguentemente alla risalita della superficie piezometrica (Figura 57).

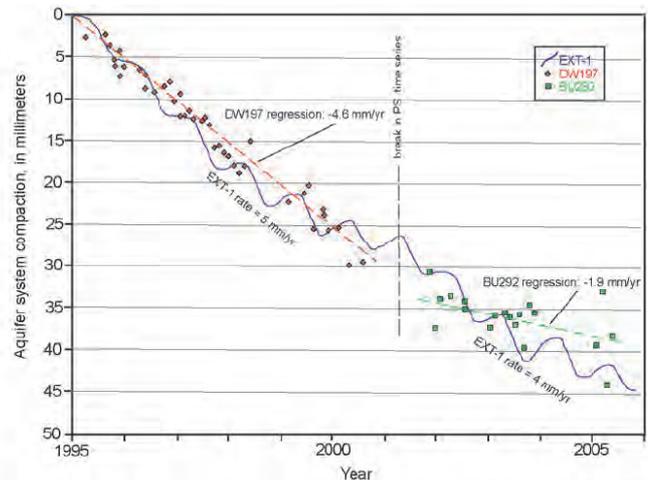
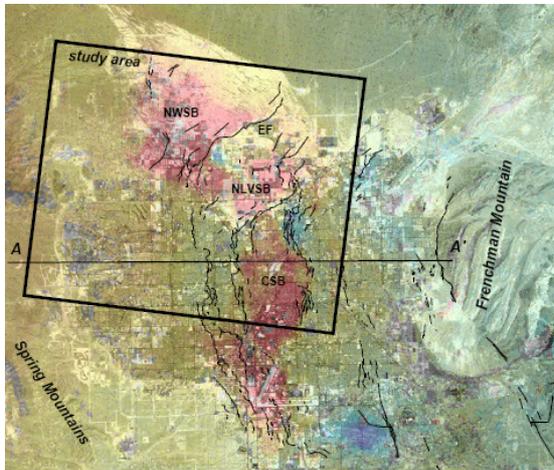


Figura 57: A sinistra l' area di interesse analizzata. A destra la serie storica di un PS sovrapposto all'andamento rilevato da una stazione GPS posta nelle vicinanze del PS considerato.

### 9.1.2 Attività mineraria

L'estrazione dal sottosuolo di materiali solidi, quali ad esempio carbone, ferro, sale, e la successiva interruzione dell'attività estrattiva può innescare processi dinamici che possono manifestarsi più o meno pesantemente in superficie con conseguenze spesso imprevedibili e soprattutto difficilmente controllabili. Subsidenza e collassi sono generalmente i fenomeni che si verificano più di frequente. Dunque, è di fondamentale importanza monitorare le aree minerarie in modo da prevenire eventuali danni.

Rispetto alle convenzionali tecniche (livellazione ottica e GPS) l'analisi PS è in grado di offrire un monitoraggio regolare nel tempo e su aree molto estese, come quelle minerarie, in tempi ridotti e con costi relativamente bassi.

La tecnica PS è stata applicata su un'area della Lorena (Francia) con estensione superiore a 800 km<sup>2</sup>, individuando ben 60 PS/km<sup>2</sup> (Colesanti et al., 2005). Lo studio è stato svolto da TRE in collaborazione con BRGM. La città di Roncourt è soggetta da tempo a fenomeni di instabilità dovuti alla presenza di un sito minerario per l'estrazione di materiali ferrosi. L'analisi PSInSAR™ ha permesso di evidenziare movimenti precedenti al febbraio 1999 (data in cui si è verificato l'evento franoso più preoccupante). La possibilità di evidenziare moti precursori rappresenta un enorme vantaggio applicativo soprattutto quando mancano dati provenienti da altre fonti. Questo studio mostra chiaramente l'importante ruolo che riveste la tecnica PS nella pianificazione territoriale e nella valutazione del rischio.

### 9.1.3 Sinkholes

Un processo per certi versi simile al fenomeno della subsidenza è quello noto in letteratura col nome di *sinkhole*. Questi sprofondamenti sono dovuti alla presenza nel sottosuolo di cavità di origine sia naturale che antropica (cave o ambienti nel sottosuolo ad uso vario, acquedotti, fognature, drenaggi, ecc). In alcuni centri urbani italiani (tra cui Roma e Napoli), i fenomeni di dissesto provocati dal crollo

di cavità sotterranee hanno determinato ingenti danni materiali e, in alcuni casi, anche la perdita di vite umane.

Anche la Regione Toscana è soggetta alla formazione di *sinkholes*. Il 14 ottobre 1995, una voragine di circa 40 m di diametro si aprì improvvisamente in una zona residenziale di Camaiore (Lucca), facendo sprofondare una palazzina di tre piani e danneggiando notevolmente altri edifici limitrofi che crollarono nei giorni successivi. Su questa area è stata svolta un'indagine PS, in due intervalli temporali differenti.

L'elaborazione delle immagini acquisite tra il 1992 ed il 2000 mostra chiaramente che l'area d'interesse non è affetta da movimenti apprezzabili ad eccezione di alcuni PS che si sono dimostrati ricadere nella zona interessata dal crollo. Le serie storiche relative agli edifici crollati (grafico in Figura 58) rivelano chiaramente che nessun spostamento si è verificato prima del 1995, anno in cui si iniziano a rilevare i primi movimenti repentini dell'area fino ad evolvere in crollo. Si osservi che l'interruzione della serie storica nel periodo successivo all'ottobre 1995 è dovuta alla perdita di riflettività dei bersagli radar conseguente al crollo degli stessi. Concentrando l'analisi nell'arco temporale stabile, compreso tra il 1992 ed il 1996, è stato possibile mettere in evidenza moti precursori al crollo dimostrando ancora la potenza della tecnica PSInSAR™ nel settore di previsione e prevenzione di eventi calamitosi.

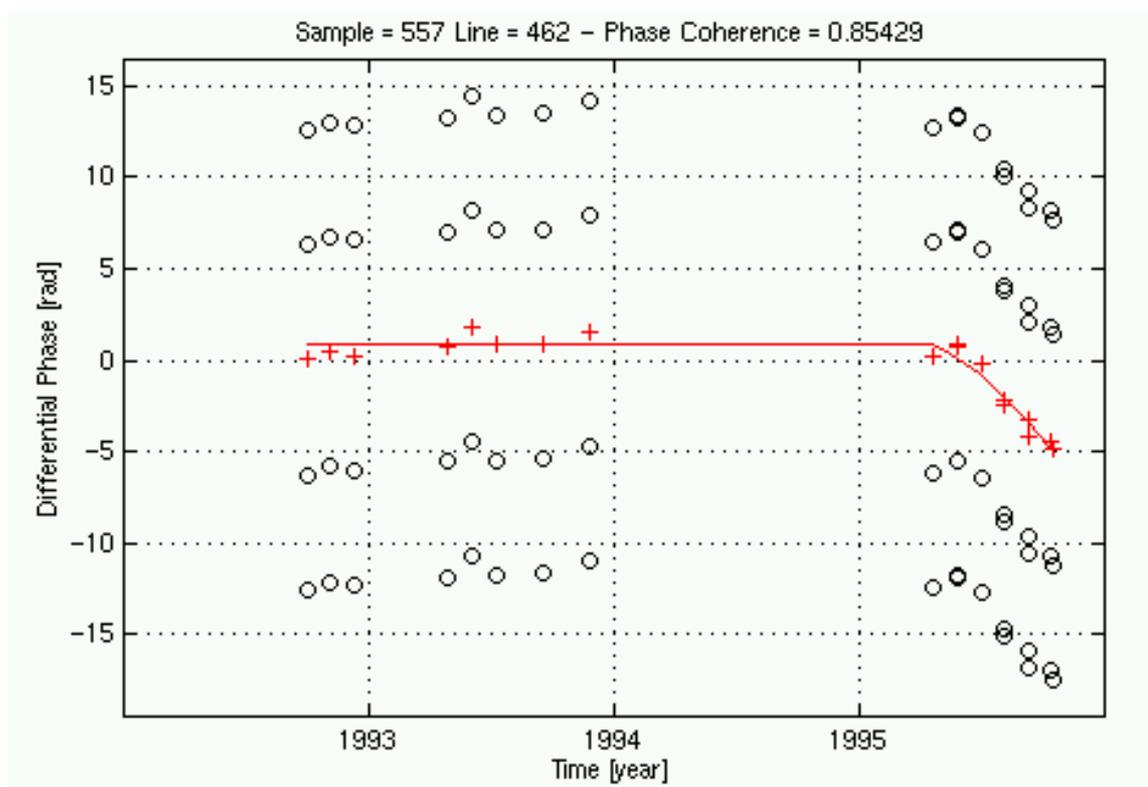


Figura 58: Serie storica corrispondenti ad uno degli edifici crollati riferite all'intervallo temporale 1992-1996

## 9.2 Instabilità di versante

L'analisi PSInSAR™ è in grado di monitorare con frequenza circa mensile i movimenti gravitativi sia che si tratti di analisi di dettaglio che di area vasta (e.g., Farina et al., 2006). Questa metodologia permette inoltre di studiare i fenomeni agenti anche in zone remote ed a rischio, che difficilmente sono analizzabili con le convenzionali tecniche di monitoraggio le quali richiedono l'installazione *in situ* dell'apposita strumentazione (capisaldi GPS, mire ottiche, estensimetri, inclinometri). Il dato satellitare non sostituisce comunque le indagini in sito ma opportunamente integrato ad esse, anche in ambiente GIS, offre una visione areale del fenomeno, verificabile ed ottimizzabile sulla base delle verità raccolte a terra.

Bisogna tuttavia considerare che la tecnica PS si presta al monitoraggio dei fenomeni franosi con alcune limitazioni legate essenzialmente alla variabilità dell'evento calamitoso, sia in termini di evoluzione temporale che di caratteristiche morfologiche, che alla modalità di acquisizione ad opera della piattaforma satellitare. Infatti, l'analisi PS è in grado di rilevare principalmente i movimenti ad evoluzione lenta (in genere inferiori a circa 10 cm/a).

Inoltre, dal momento che i fenomeni gravitativi si verificano generalmente in aree montuose, l'applicazione della tecnica PS deve far fronte ad alcuni ostacoli legati alla topografia dell'area, che introduce problemi di deformazione prospettica, al numero ridotto di bersagli radar con proprietà tali da essere definiti *Permanent Scatterers* a causa del basso grado di urbanizzazione di queste aree ed alla presenza della copertura nevosa che, determinando variazioni sensibili nella riflettività dell'oggetto a terra, può comportare la perdita del punto di misura (sezione 3.1.1).

La Figura 59 mostra alcune immagini scattate in seguito alla frana verificatasi il 7 marzo 2005 nel comune di Cerzeto (Cosenza). In questo caso, l'analisi PS ha permesso di ridefinire i limiti delle frane catalogate all'interno del PAI (Piano di Assetto Idrogeologico), modificare il loro stato di attività ed individuare ulteriori movimenti non rilevati precedentemente con altri sistemi.



Figura 59: Frana di Cerzeto (CS).

L'analisi di dati ERS, sia ascendenti che discendenti, acquisiti tra il 1992 ed il 2001 ha permesso di rilevare un nuovo movimento franoso in corrispondenza dell'abitato di Cavallerizzo, sito nel comune di Cerzeto; in particolare, i dati PS di entrambe le geometrie hanno permesso di stabilire con estrema precisione l'effettiva estensione dell'evento franoso, distinguendo le porzioni di territorio effettivamente in movimento da quelle stabili. I risultati PS sono stati interpretati dal Dipartimento di Scienze della

Terra dell'Università degli Studi di Firenze su incarico del Dipartimento di Protezione Civile. Nell'area in frana sono stati individuati 12 PS in modalità ascendente e 12 PS in modalità discendente. Combinando i dati satellitari ascendenti e discendenti e proiettando i rispettivi valori di velocità lungo la linea di massima pendenza (sezione 3.2.2), si ottengono spostamenti di entità superiore a 10 mm/a. Nella zona in frana sono individuabili inoltre due aree caratterizzate da differenti valori di velocità di deformazione. Nella porzione dell'area in frana topograficamente più elevata e con maggiore acclività (15-25°), i versi dei vettori velocità ascendenti e discendenti concordano (movimento in allontanamento dal satellite sia per i PS ascendenti che per i PS discendenti), mentre in quella topograficamente più bassa e meno acclive (10-15°), i PS ascendenti e discendenti mostrano valori di velocità opposti (PS ascendenti caratterizzati da movimento in allontanamento rispetto al satellite e PS discendenti da un movimento in avvicinamento rispetto al satellite). In base a quanto spiegato nella sezione 3.2.2, questa configurazione è spiegabile col fatto che nell'area a quota maggiore il moto presenta una componente prevalentemente verticale, mentre scendendo a quote inferiori esso tende ad acquisire una maggiore componente in direzione orizzontale a scapito di quella verticale. Dal momento che il versante è esposto verso E-NE, il quadro appena illustrato è coerente con la presenza di un movimento roto-traslativo diretto verso E, con superficie di scivolamento fortemente curvilinea nella zona di testata<sup>4</sup>.

La tecnica PS è stata applicata anche allo studio dei fenomeni di deformazione gravitativa profonda di versante, DGPV (Allievi et al., 2003; Ambrosi & Crosta, 2005; Ceriani et al., 2004). L'individuazione sul territorio di fenomeni gravitativi molto lenti, come quelli di DGPV, risulta essere difficile soprattutto perché lo stato di attività del fenomeno può risultare mascherato dalla presenza di coperture detritiche e vegetali. Un esempio classicamente noto come DGPV è rappresentato da quello che interessa un'area estesa oltre 30 km<sup>2</sup> sul versante N del Monte Padrio Varadega (Sondrio), nella media Valtellina (Figura 60). L'approccio PSInSAR™ ha permesso di individuare ben 7.100 punti di misura in corrispondenza di baite, radure ed affioramenti rocciosi, un numero notevole se si considera che in genere le aree montuose per il loro scarso grado di urbanizzazione presentano pochi *Permanent Scatterers*.

Come si può osservare dalla Figura 60, il campo di velocità diminuisce tendenzialmente procedendo verso le quote più elevate, dal piede alla zona di testata (ad eccezione della porzione meridionale del versante, posta a media altitudine, che mostra tassi di deformazione elevati ma ben in sintonia con alcuni elementi geomorfologici riconosciuti con la fotointerpretazione), mostrando valori positivi di velocità nel settore inferiore del pendio. Questo risultato è in accordo con un modello geologico che prevede una superficie di rottura composta (Ambrosi & Crosta, 2005), subverticale nella zona di testata, la cui inclinazione diminuisce verso le quote più basse; i valori di velocità positivi al piede del pendio si spiegano probabilmente con un rigonfiamento dovuto all'accumulo del materiale che si frattura progressivamente o addirittura con la presenza di porzioni della superficie di rottura immergenti verso il versante (Ceriani et al., 2004).

<sup>4</sup> La zona di testata è definita come la parte più alta della frana lungo il contatto tra materiale spostato e scarpata principale (Rivista Italiana di Geotecnica, 1995).

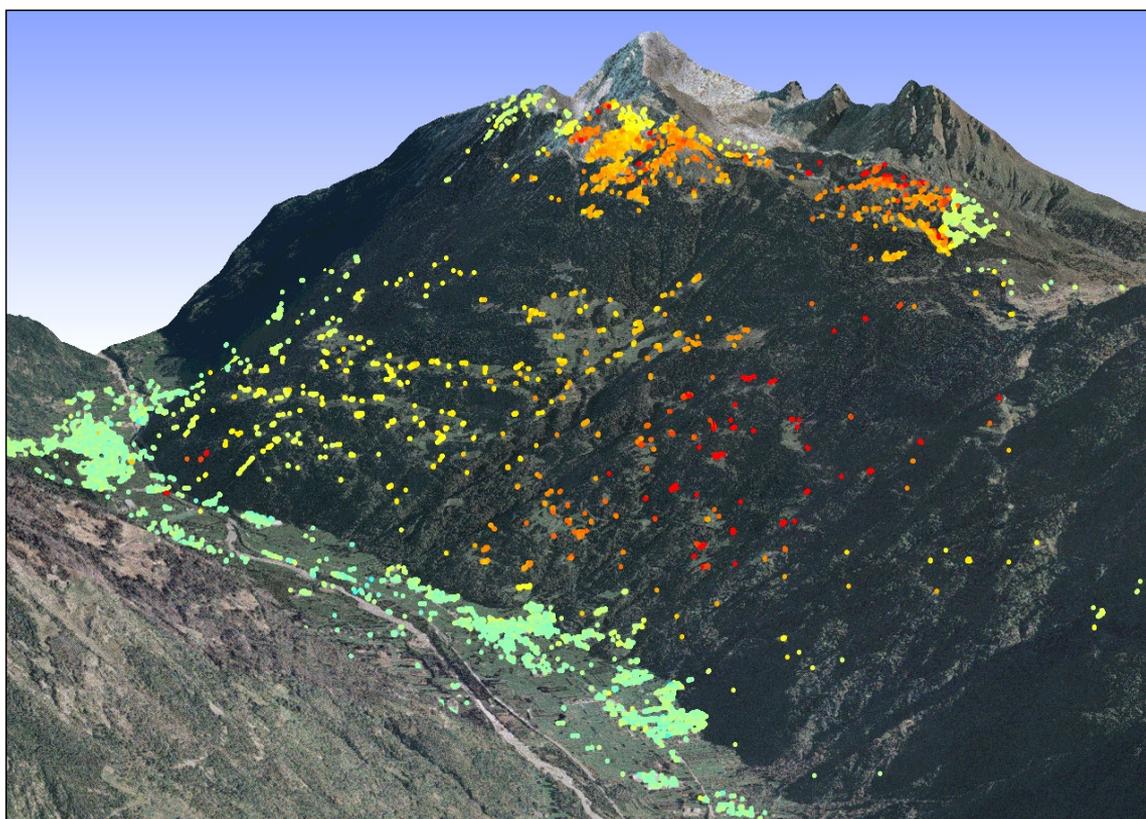


Figura 60: Rappresentazione 3-D dei PS individuati sul Monte Padrio Varadega.

L'analisi PSInSAR™ può fornire un valido ed insostituibile supporto nel censimento di fenomeni franosi a livello regionale, per la sua capacità di integrare con informazioni quantitative i risultati derivanti dall'approccio geomorfologico classico. In questi casi, l'elaborazione dei dati nelle due geometrie (ascendente e discendente) consente di ovviare a buona parte dei problemi geometrici legati all'orografia e fornisce informazioni utili a:

- verificare ed eventualmente affinare la perimetrazione dei fenomeni di dissesto
- individuare eventuali fenomeni eventualmente non emersi in fase di analisi delle caratteristiche geomorfologiche e delle informazioni bibliografiche disponibili sul territorio esaminato
- definire il grado di attività dei fenomeni sulla base della velocità di spostamento annua misurata
- in caso di coincidenza di dati nelle due geometrie, scomporre il moto nelle due componenti verticale ed orizzontale E-W

Nel seguito si riportano alcuni esempi tratti dallo studio effettuato sull'intera Valle d'Aosta, elaborando i dati ERS-1 ed ERS-2 per l'intero arco temporale coperto, in entrambe le geometrie. Grazie a ciò è stato possibile ottenere una buona copertura areale, grazie alla presenza di informazioni in almeno una geometria su entrambi i versanti delle valli laterali delle, orientate per lo più N-S. I risultati dello studio

PSInSAR™ sono stati sovrapposti a quelli dell'inventario dei fenomeni franosi della regione realizzato nell'ambito del Progetto IFFI.

Vengono proposti tre esempi.

Il primo riguarda la frana di Valtournanche, che rappresenta un esempio di ottima corrispondenza tra perimetrazione IFFI e dato PS. Inoltre, l'andamento degli spostamenti lungo la LOS, generalmente in allontanamento dal satellite in geometria discendente ed in avvicinamento in geometria ascendente (Figura 61 e Figura 62 rispettivamente, indica la presenza di una componente orizzontale di movimento verso ovest al piede del versante.

Il secondo esempio riguarda la DGPV di P.ta Chaligne (statale Gran San Bernardo), e rappresenta un esempio di perimetrazione che può essere rivista in base ai risultati dell'analisi PSInSAR. In Figura 63 e Figura 64 vengono riportati i risultati delle due analisi, in geometria discendente ed ascendente rispettivamente. In questo caso, i dati PS indicano che il perimetro del fenomeno risultante dal progetto IFFI va probabilmente esteso verso il basso sino al fondovalle. Come nel caso precedente, inoltre, l'analisi congiunta degli spostamenti nelle due geometrie indica l'esistenza di una componente di spostamento orizzontale diretta verso est.

Il terzo esempio riguarda il versante sinistro dell'invaso idroelettrico di Beauregard, caratterizzato dalla presenza di un fenomeno gravitativo ben noto in letteratura (G. Barla, S. Ballatore, G. Canella, R. Amici & A. Chiappane, 2005. *La deformazione gravitativa di Beauregard e la sua interazione con una grande diga ad arco gravità*. Memoria presentata in occasione dell'Incontro in Ricordo del prof. Arturo Pellegrino. Napoli, 26 settembre 2005). A causa dell'esposizione del versante, si sono ritrovati PS solo in geometria ascendente (Figura 65). Oltre ad una conferma dell'estensione del fenomeno riportata nell'inventario IFFI, la presenza di spostamenti di entità compresa tra 4.5 e 6 mm anno lungo la LOS conferma l'attività del fenomeno. Le velocità di spostamento mostrano ottima corrispondenza con i dati riportati in letteratura, ottenuti mediante ripetute campagne GPS, che nel periodo 1995-2005 hanno indicato la presenza di spostamenti con modulo 3D di circa 8 mm/anno. Nelle figure seguenti sono riportate le serie storiche degli spostamenti di tre PS, la cui ubicazione è indicata in Figura 65.

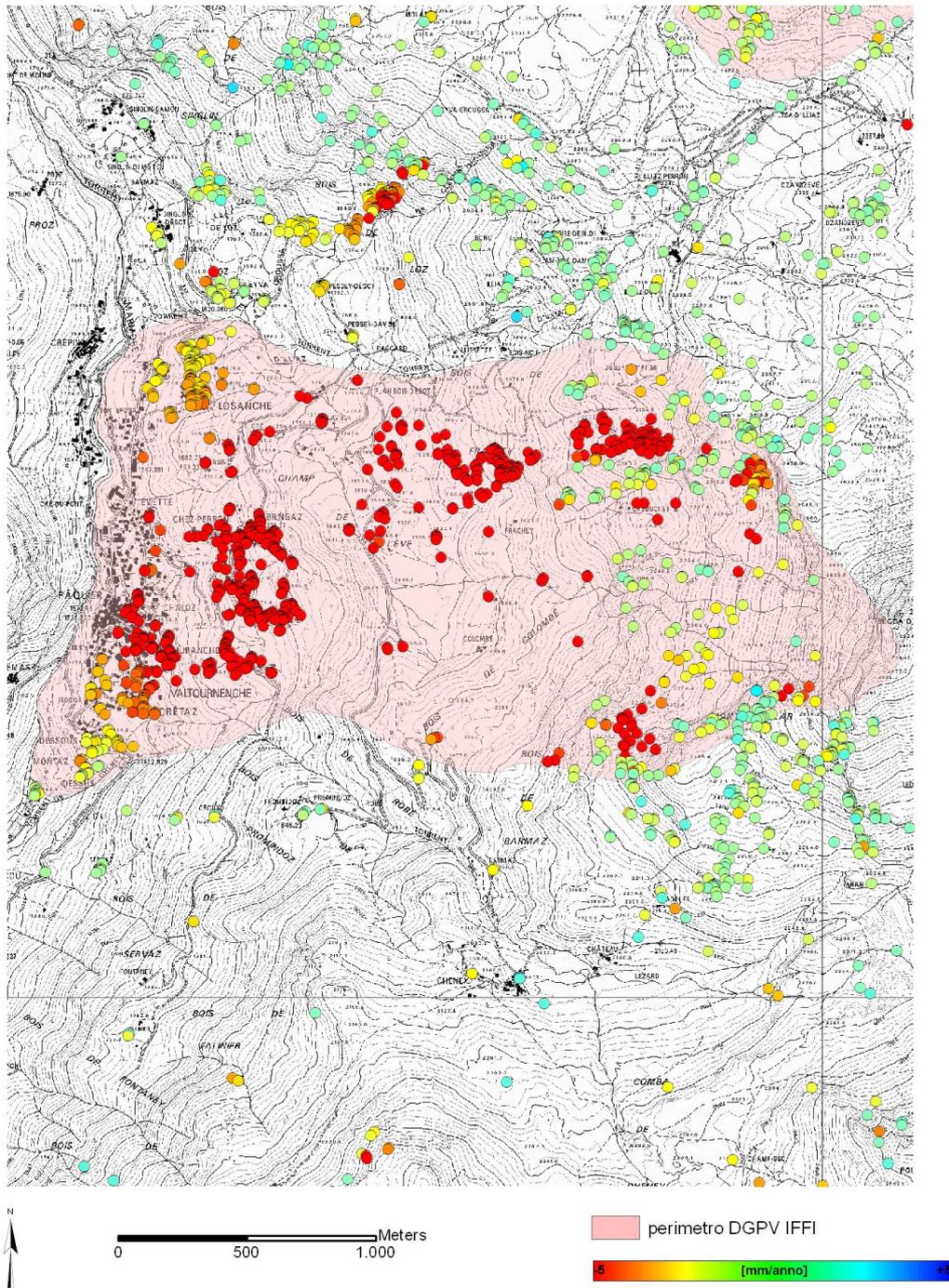


Figura 61: Particolare del campo di velocità sulla località Valtournanche (AO). Analisi Discendente .

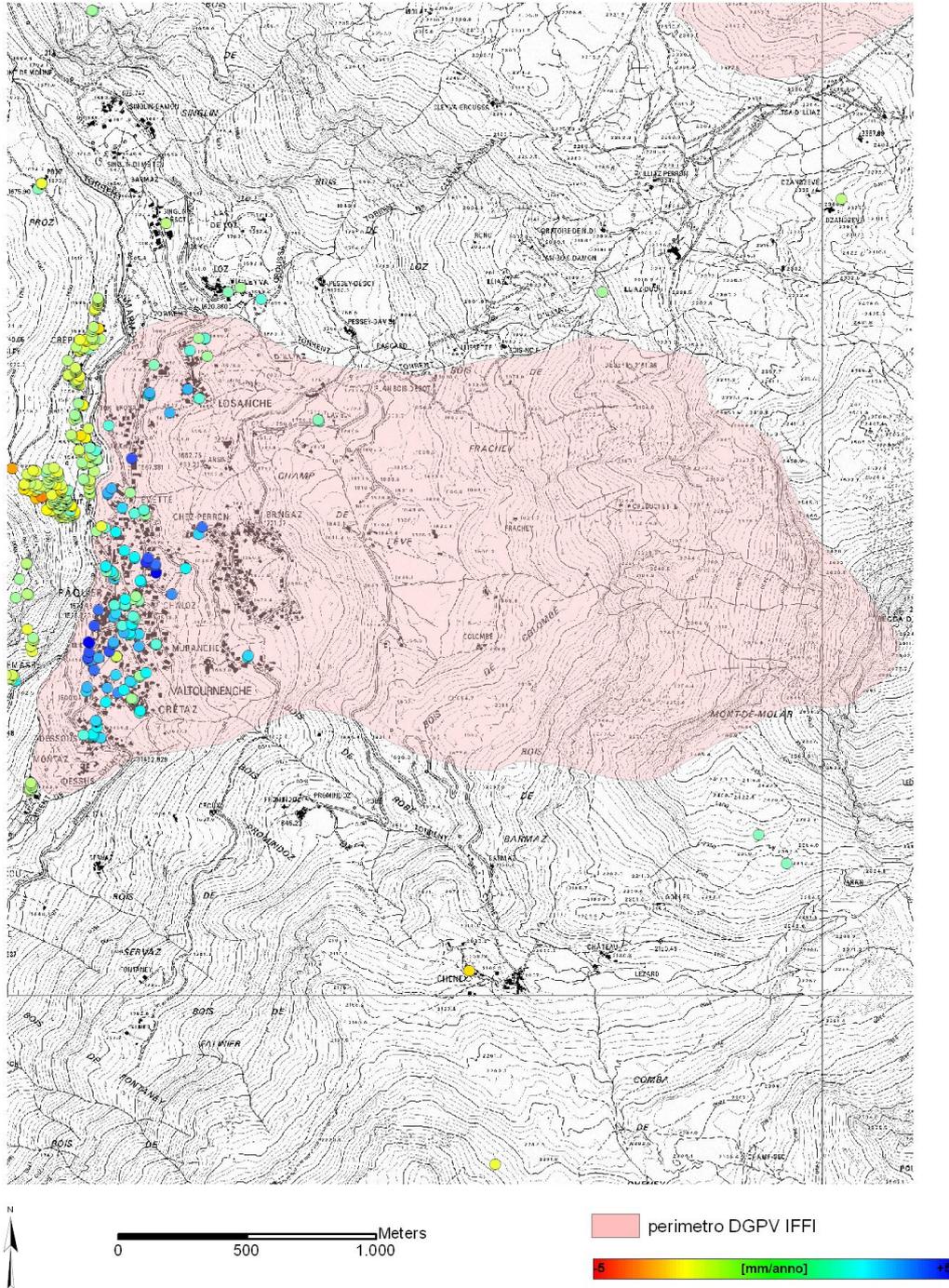


Figura 62: Particolare del campo di velocità sulla località Valtournanche (AO). Analisi Ascendente.

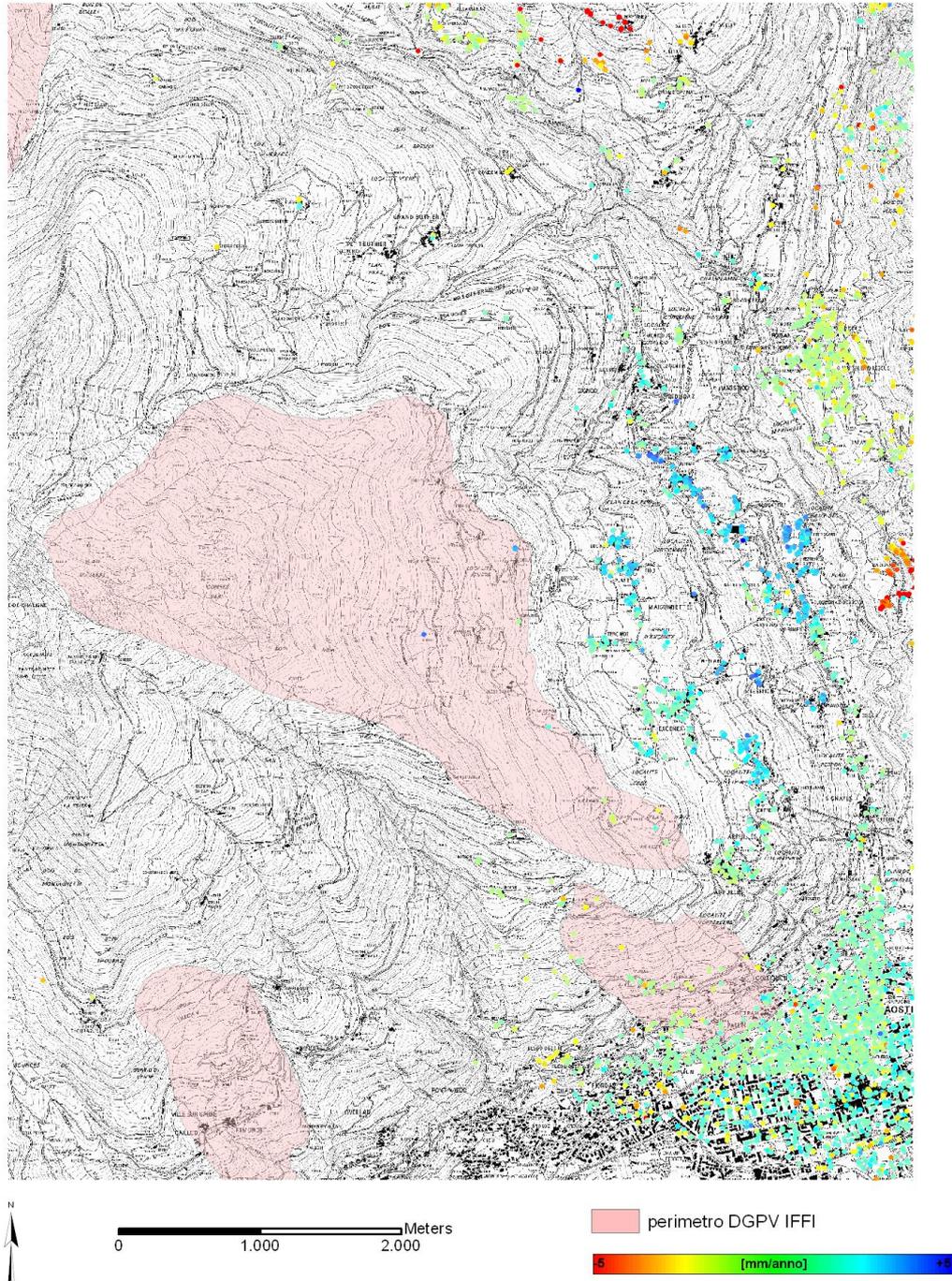


Figura 63: Particolare del campo di velocità sulla DGPV di P.ta Chaligne (AO). Analisi Discendente.

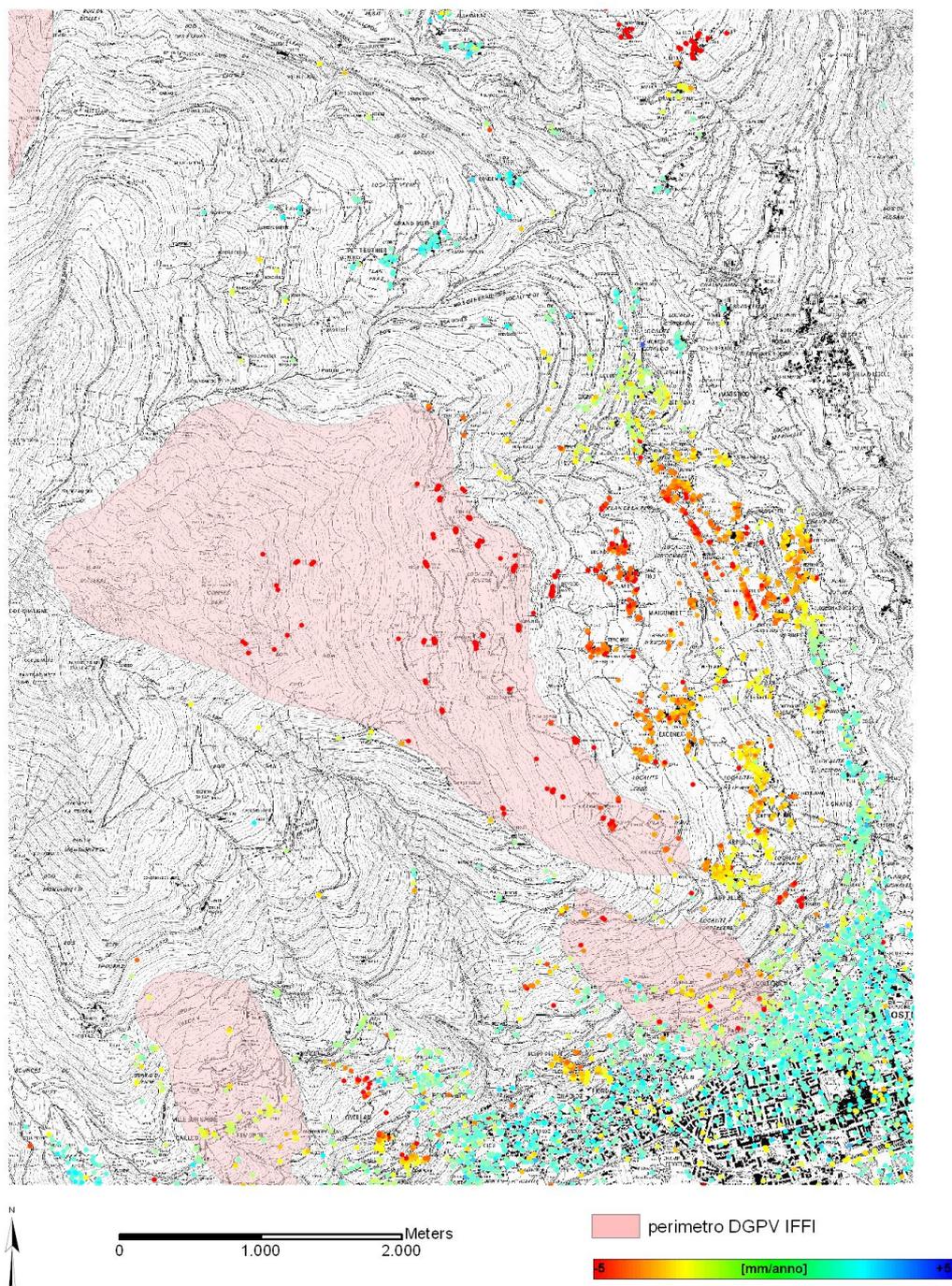


Figura 64: Particolare del campo di velocità sulla DGPV di P.ta Chaligne (AO). Analisi Ascendente.

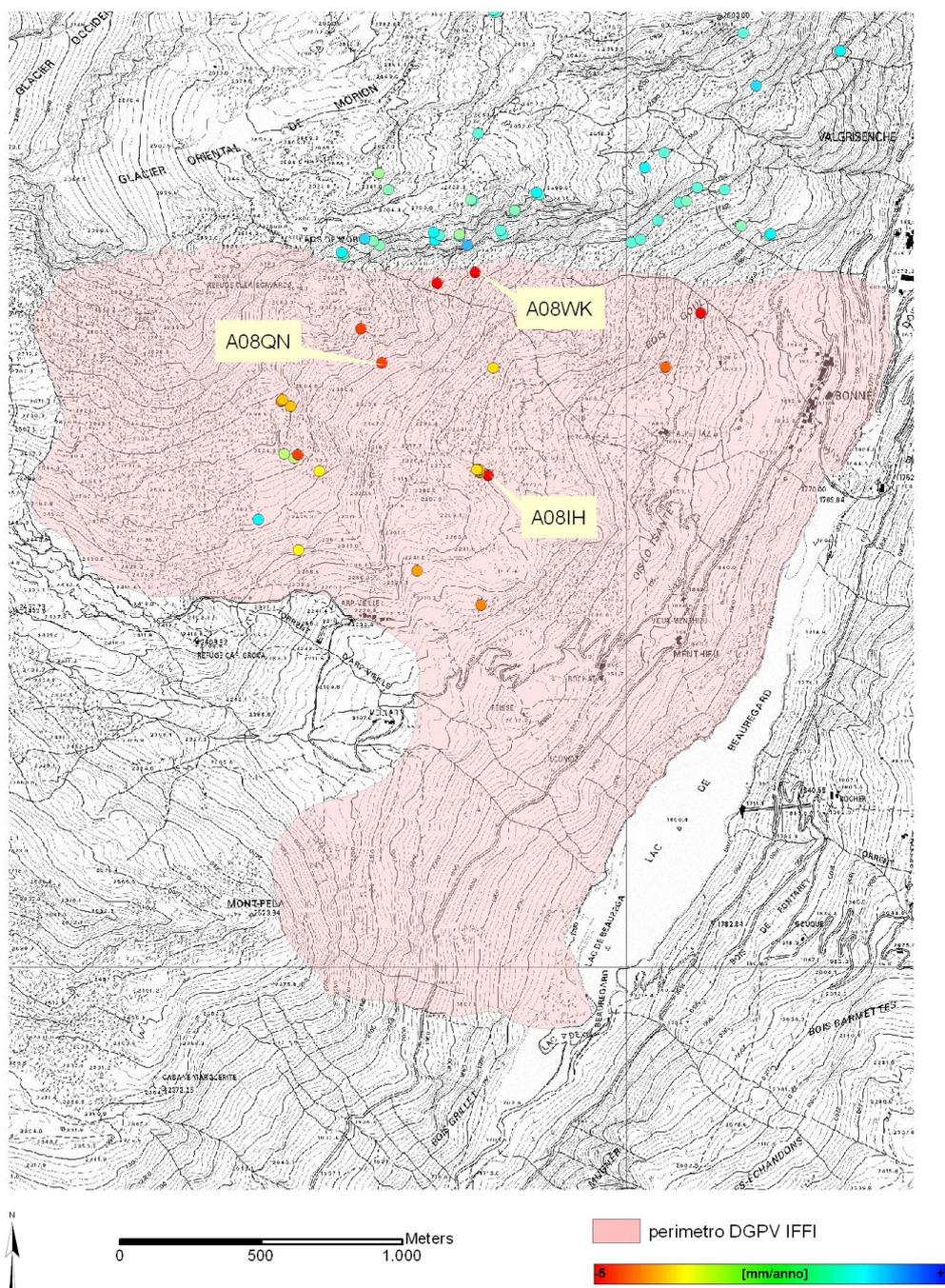


Figura 65: versante sinistro dell'invaso di Beauregard (Valgrisenche – AO), dataset Ascendente.

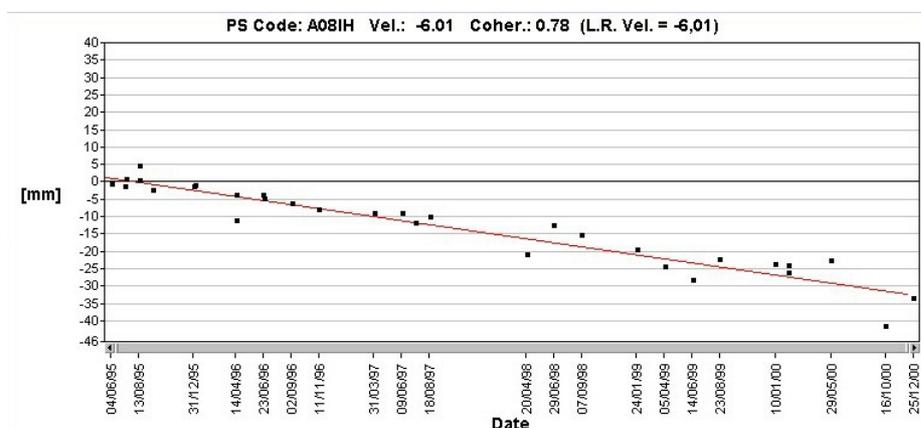


Figura 66: DGPV di Beauregard - Serie storica del punto A08IH

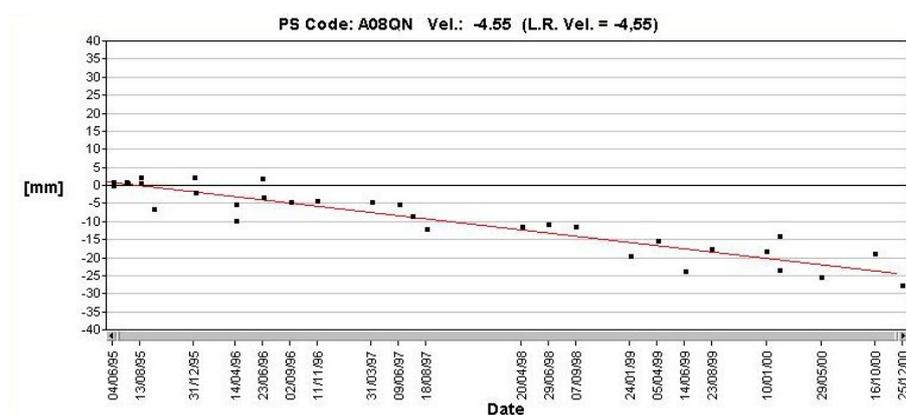


Figura 67: DGPV di Beauregard - Serie storica del punto A08QN.

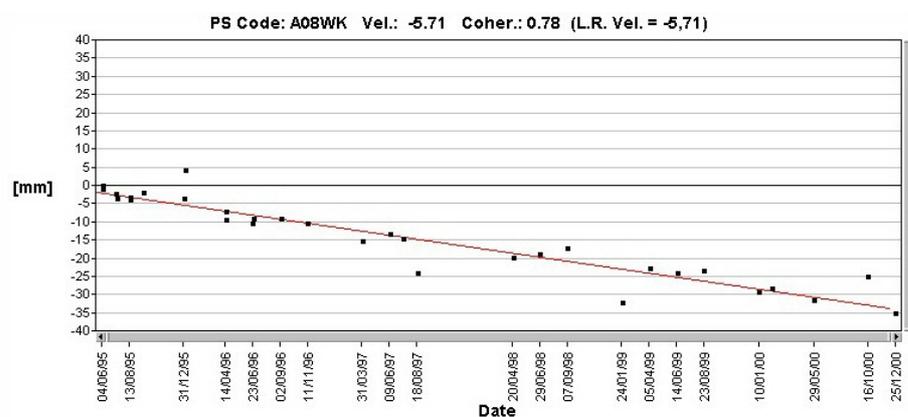


Figura 68: DGPV di Beauregard - Serie storica del punto A08WK

### 9.3 Faglie sismiche e vulcani

Le aree sismiche e quelle vulcaniche, essendo caratterizzate da movimenti estremamente lenti, richiedono per il loro studio un'elevata precisione del dato, che la tecnica PSInSAR™ è certamente in grado di offrire. Inoltre, per la sua competitività economica, l'analisi PS risulta un ottimo strumento di sorveglianza, utilizzabile dalla Protezione Civile, Pubbliche Amministrazione e centri di ricerca per attingere importanti informazioni da integrare in modelli di gestione e salvaguardia del territorio.

#### 1. Aree tettonicamente attive

La baia di San Francisco (California) si trova in una zona tettonicamente attiva, controllata dal sistema di faglie di San Andreas. Su questa area sono state acquisite 49 immagini ERS tra il 1992 ed il 2000, la cui elaborazione ha condotto all'individuazione di 115487 PS (Hilley et al., 2006; Ferretti et al., 2004). L'analisi PS ha potuto rilevare la presenza di fenomeni superficiali legati all'attività tettonica, idrogeologica e geomorfologica. I moti di maggiore entità (in valore assoluto) si registrano sulle colline di Berkeley e nell'area della baia di San Francisco in prossimità di Treasure Island e di Alameda e non sono dovuti a processi tettonici (il sollevamento della zona compresa tra la Faglia di Hayward e quella di Calaveras è inferiore ad 1 mm/a) ma a processi di instabilità di versante e di subsidenza, rispettivamente (Hilley et al., 2006; Ferretti et al., 2004). In particolare, le serie storiche in corrispondenza dei PS individuati nelle aree in frana lungo i versanti delle colline di Berkeley (Figura 69) hanno messo in luce che i tassi di spostamento tendono ad aumentare durante la stagione umida, mentre si stabilizzano durante quella secca. Le serie storiche rappresentano dunque il miglior modo per osservare la relazione intercorrente tra precipitazioni, condizioni idrogeologiche e manifestarsi di eventi franosi.

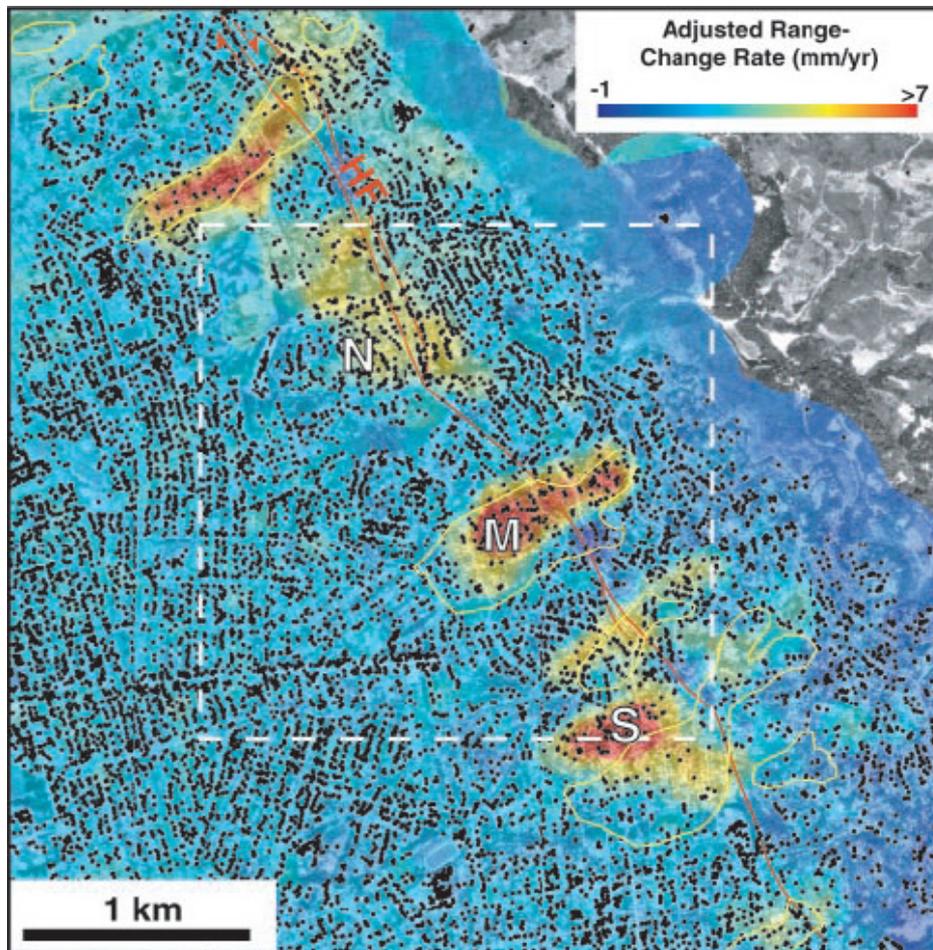


Figura 69: Area di Berkeley. Le aree di versante rappresentate in rosso corrispondono ad aree in frana (Ferretti et al., 2004).

In corrispondenza di Treasure Island, di Alameda e del settore SE di San Francisco, in cui si rileva la presenza di sedimenti non consolidati e di materiali di riporto, si registrano tassi di abbassamento fino a 0.15 m nell'intervallo temporale 1992-2000 (Ferretti et al., 2004). Le serie storiche relative a 17 PS localizzati in una zona del settore NW di Treasure Island mostrano che la subsidenza avviene rapidamente ma senza accelerazioni nel tempo (Figura 70).

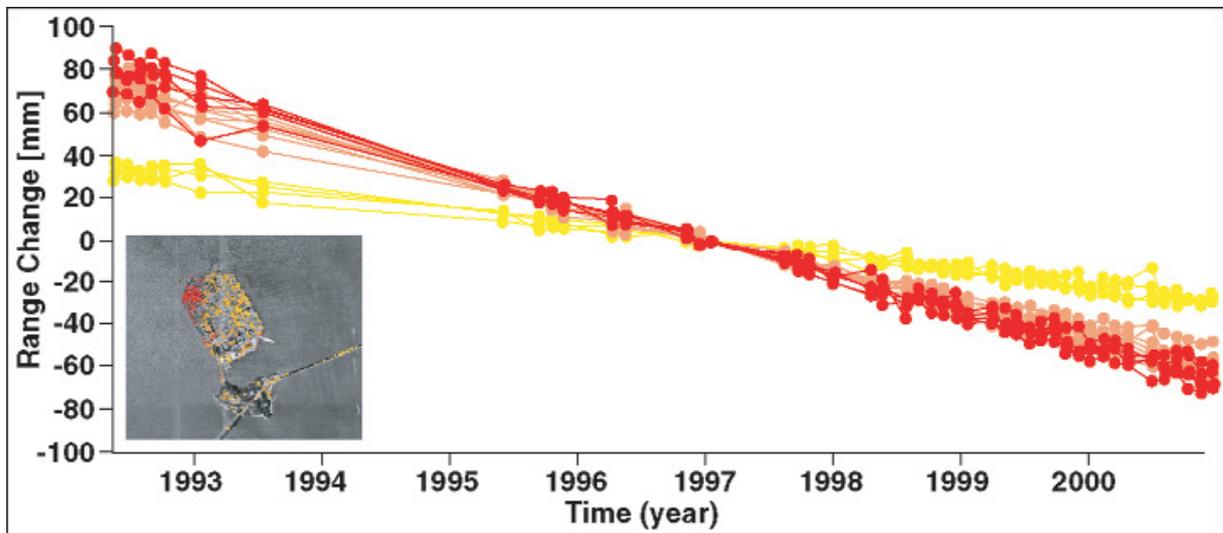


Figura 70: Serie storiche di 17 PS nell'area di Treasure Island (Ferretti et al., 2004).

## 2. Aree vulcaniche

Il complesso dei Colli Albani, che dista 15 km da Roma in direzione SE, è considerato un vulcano quiescente. Tuttavia, nell'area dei laghi Albano e Nemi, fin dall'epoca Romana l'attività non si è mai completamente arrestata, come dimostrano gli sciame sismici di moderata intensità e le emissioni di gas vulcanici (CO<sub>2</sub>) (Salvi et al., 2004, cum bib.). Tra il 1951 ed il 1994 tramite livellazione è stato possibile rilevare un sollevamento nella zona dei suddetti laghi; al fine di indagare il fenomeno con una migliore risoluzione spaziale è stata eseguita un'analisi PS utilizzando in totale 99 immagini ERS (66 in modalità ascendente e 33 in modalità discendente) acquisite nel periodo 1993-2000 ed ottenendo più di 100000 PS sull'area di interesse. Da questo studio è emerso la presenza di una zona in sollevamento diretta N-S e situata sul limite occidentale della caldera, con una copertura spaziale non raggiungibile con altre tecniche di rilevamento (Figura 71).

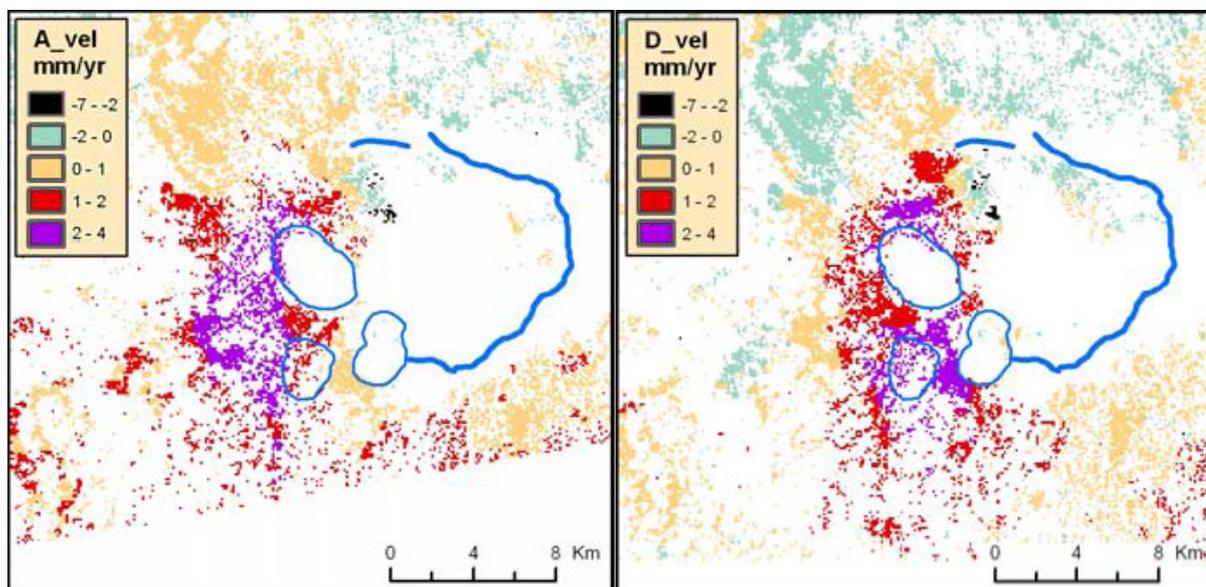


Figura 71: Distribuzione dei PS acquisiti nel periodo 1993-2000 in modalità ascendente (sx) e discendente (dx) nella zona dei laghi Albano e Nemi. I valori di velocità variano tra -7 e +4 mm/a.

#### 9.4 Infrastrutture, singoli edifici, beni architettonici

La valutazione della stabilità delle opere antropiche superficiali richiede una elevata precisione delle misure, che certamente la tecnica PSInSAR™ è in grado di fornire. Su tali bersagli (edifici sia ad uso civile che industriale, strutture architettoniche, ponti, dighe, argini, strade, linee ferroviarie, condotte superficiali, ecc.) è possibile individuare più di un PS. Tuttavia, nel caso in cui non ci fosse alcun PS in corrispondenza della struttura da monitorare, è sempre possibile disporre i riflettori artificiali (sezione 3.1.2) in modo da creare una rete di stazioni permanenti per il monitoraggio della singola opera.

Inoltre, la disponibilità di un archivio di immagini ERS acquisite a partire dal 1992 consente di evidenziare la potenziale relazione causa-effetto tra, ad esempio, l'esecuzione di scavi sotterranei ed i danni provocati agli edifici posti nelle vicinanze dell'area di scavo.

A tal proposito, l'approccio PS è stato utilizzato come elemento probante per verificare la connessione tra i cedimenti strutturali differenziali che hanno interessato tra il 1994 ed il 1995 alcuni edifici nel centro storico di Rovigo (Veneto), tra cui alcune pregevoli opere monumentali, e la realizzazione dello scavo di un parcheggio sotterraneo. Lo studio è stato condotto nel 2002 su una zona ampia 42 ettari, analizzando 105 immagini ERS acquisite nell'intervallo 1992-2000 sia in configurazione ascendente che discendente; il numero di PS individuati nell'area in esame ammonta a 145. I risultati ottenuti, integrati e convalidati anche da perizie di tipo meccanico e geotecnico, hanno messo in evidenza che tutto il centro storico e le aree limitrofe sono affette da un fenomeno di subsidenza con un tasso di abbassamento medio pari a 1.2 mm/a (Ferretti et al., 2003). Inoltre, è stata rilevata l'esistenza di una zona di fianco al cantiere, allungata in direzione E-W, che limitatamente al periodo 1994-1995 ha mostrato un netto cedimento, pari a circa 1.5 cm, attribuibile alla presenza di un paleoalveo in cui si

concentrano terreni altamente permeabili che inducono un maggiore abbassamento della falda in seguito al suo emungimento (Ferretti et al., 2003).

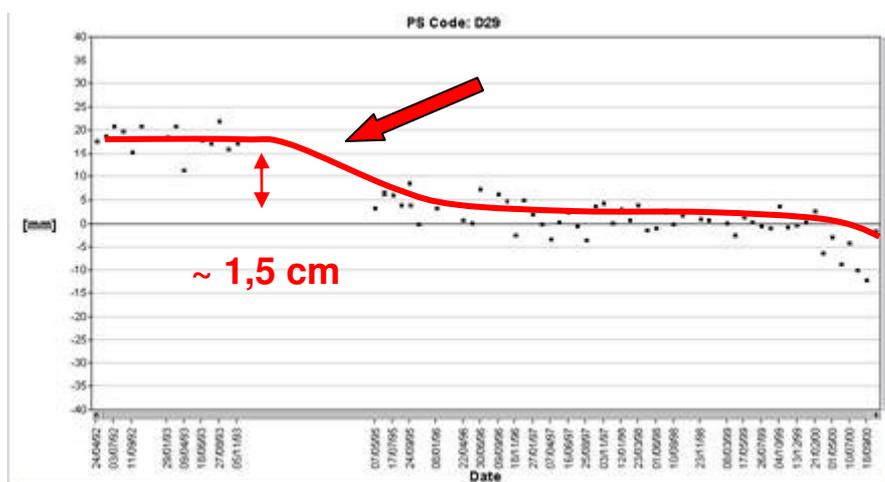


Figura 72: Serie storica di un PS posto nell'area allungata in direzione E-W adiacente al cantiere.