

Nota tecnica sintetica per la comprensione del dato satellitare PSiNSAR™

Alessio Colombo, Carlo Troisi

La presente nota riassume brevemente i principi del metodo PSiNSAR™, i limiti dello stesso e la tecnica delle "aree anomale" adottate per la presentazione dei dati.

Tecnica PS

L'approccio PS si basa sull'osservazione di un piccolo sottoinsieme di bersagli radar, costituito appunto dai diffusori permanenti (*Permanent Scatterers* o PS), che mostra caratteristiche ideali per osservazioni interferometriche. Essi preservano infatti l'informazione di fase nel tempo e al variare della geometria di acquisizione. I PS sono tipicamente parti di edifici, strutture metalliche, rocce esposte, in generale elementi già presenti al suolo, le cui caratteristiche elettromagnetiche non variano sensibilmente di acquisizione in acquisizione; questo non accade invece alla vegetazione, il cui aspetto muta di continuo.

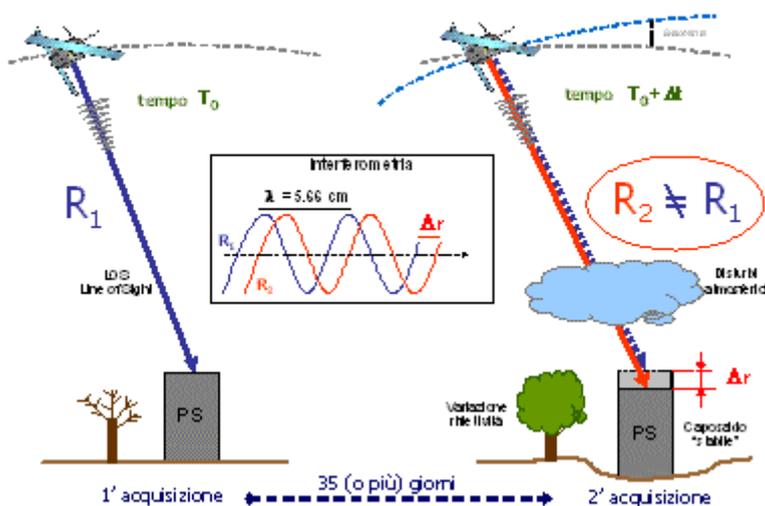


Fig. 1 Rappresentazione schematica delle basi teoriche delle tecniche interferometrica classica e PS e dei disturbi presenti nelle acquisizioni SAR (decorrelazione temporale, decorrelazione geometrica e disturbi atmosferici)-fonte Tele-Rilevamento Europa T.R.E. s.r.l..

L'elaborazione PS prende origine da uno studio statistico delle immagini radar e segna un passaggio da un'analisi per coppie di immagini, tipica dell'interferometria differenziale classica (DInSAR), ad un'analisi multi-immagine dell'intero dataset disponibile sull'area di interesse - per selezionare l'insieme dei PS.

Si può immaginare la griglia dei PS come una sorta di rete di stazioni GPS (Global Positioning System) "naturali" per il monitoraggio di vaste aree di interesse, con una frequenza di aggiornamento del dato mensile e una densità spaziale di punti di misura estremamente elevata (in aree urbane fino a 100-400 PS/km²).

Per eseguire stime accurate dei disturbi atmosferici è necessario che la densità spaziale dei PS sia sufficientemente elevata (maggiore di ~ 5 PS/km²), vincolo sempre verificato in aree urbane, e utilizzare per l'analisi dataset di almeno 25-30 immagini.

Per ogni singolo PS si ricavano la posizione (le sue coordinate geografiche: latitudine, longitudine) il trend medio di deformazione, con un'accuratezza compresa tra 0.1 e 2 mm/anno, e l'intera serie temporale di deformazione (in questo caso la precisione arriva a 1 mm su ogni singola misura per i PS migliori).

La precisione è funzione del numero di immagini e della "qualità" del PS stesso, cioè di quanto l'informazione di fase del PS sia immune dai fenomeni di disturbo.

Tutte le misure sono rilevate lungo la congiungente sensore-bersaglio (LOS, Line of Sight), e sono di tipo differenziale, ottenute dopo avere determinato uno o più punti di riferimento a terra, di coordinate note e supposti fermi (indicati come tali ad esempio da misure GPS o di livellazione ottica).

I punti di forza della tecnica PS consistono principalmente nella possibilità di valutare e rimuovere dal segnale i contributi di disturbo atmosferico e di ottenere stime puntuali, e nella maggiore accuratezza delle misure (sino al millimetro su singola misura).

Riassumendo:

- archivio storico (satelliti ERS 1 e 2) dal 1992 al 2001, da cui la possibilità di indagini su fenomeni passati;
- misure differenziali, con accuratezza elevata:
 - sul trend di deformazione velocità media PS: fino a 0,1 [mm/a]
 - sulla singola misura spostamento verticale PS: fino a 1 mm
- elevata densità spaziale di capisaldi radar (in area urbana fino a ~ 400 PS/km²), già presenti sul territorio;
- facile integrabilità in ambiente GIS;
- applicazioni sinergiche con altre tecniche di rilevamento;
- accuratezza delle misure sull'asse verticale superiore rispetto alla tecnica GPS.

Limiti del metodo PS

Nell'effettuare interpretazioni dei dati PS occorre tenere ben presente una serie di elementi e di limitazioni di seguito brevemente riassunte. Chi utilizza i dati deve sviluppare una sensibilità al dato stesso analoga a quella che occorre sviluppare, ad esempio, per l'interpretazione dei dati inclinometrici. Le presenti considerazioni valgono per l'interpretazione dei dati PS in generale ma si riferiscono, in particolare, alle valutazioni relative ai fenomeni franosi, per la definizione e caratterizzazione dei quali, occorre tener ben presente, non è possibile utilizzare unicamente il dato PS. Il dato PS, in altri termini, è uno degli elementi che, unitamente agli elementi classici (rilievi di terreno, fotointerpretazione, monitoraggio, dati storici ecc.) concorrono alla caratterizzazione dei fenomeni franosi.

Copertura del territorio

Non tutto il territorio si presta all'applicazione della tecnica PSInSAR. Nell'esperienza piemontese, a cui fanno riferimento i dati utilizzati per l'individuazione delle aree anomale, circa un terzo del territorio è totalmente privo di PS. L'assenza di informazione (ovvero l'assenza di riflettori PS) è dovuta a:

- aspetti geometrici legati alle relazioni tra le orbite satellitari e l'orientazione dei versanti: i versanti paralleli alla direzione di vista del sensore non sono analizzabili; vi

sono sensibili distorsioni prospettiche dei pendii ad elevata energia di rilievo; alcuni versanti non sono illuminati in quanto coperti da altri;

- assenza di riflettori in aree vegetate ed in quelle innevate, che non riflettono i segnali radar;
- presenza di PS temporanei (strutture in costruzione o in ristrutturazione durante il periodo di monitoraggio satellitare);
- assenza di fabbricati od infrastrutture, che costituiscono la massa dei riflettori PS.

Le misure di velocità sono misure relative

Tutte le misure di velocità attribuite ai PS sono misure relative in quanto derivanti dal confronto tra il singolo PS ed un PS di riferimento considerato come stabile. Vi è in media un PS di riferimento ogni 2000 km². Benché si sia posta estrema cura nella localizzazione del PS di riferimento è possibile che lo stesso non si perfettamente stabile. Inoltre la deviazione standard dell'errore della misura di velocità aumenta con l'aumentare della distanza dal punto di riferimento.

Campi di velocità rilevabili

La tecnica PS è in grado di individuare deformazioni all'interno di un ben preciso campo di velocità (sempre e comunque velocità della componente lungo la LOS, vedi sopra).

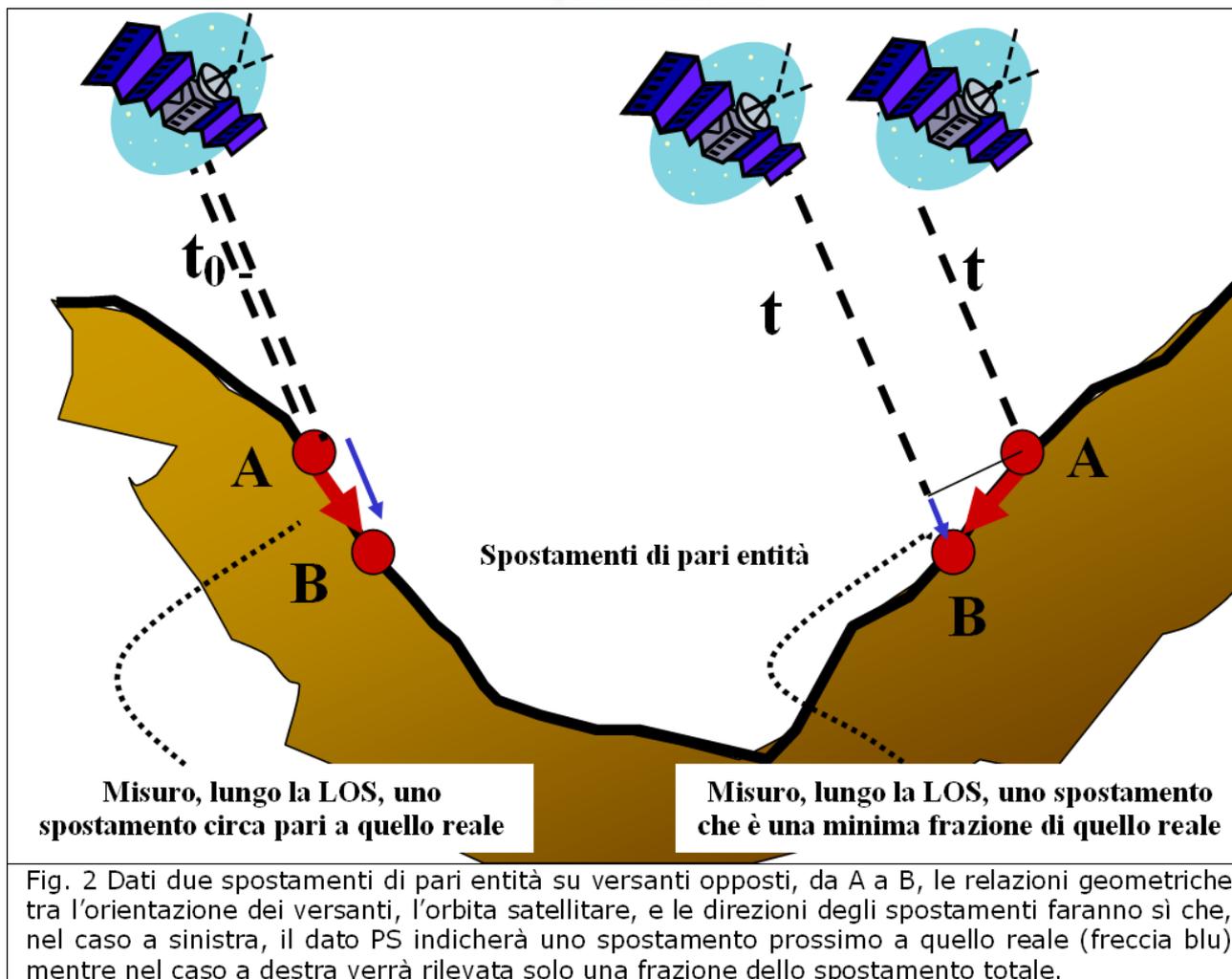
- o Limite superiore del campo di velocità: bersagli con velocità tali da subire spostamenti superiori ad un quarto di lunghezza d'onda (1,4 cm in banda C, satelliti ERS) tra due acquisizioni successive (35 giorni) non vengono individuati come PS; questo significa che non vengono rilevati spostamenti, lungo la LOS, superiori a 5-6 cm/anno.
- o Limite inferiore del campo di velocità: le caratteristiche del metodo portano a ritenere che, nel campo delle interpretazioni relative ai fenomeni franosi, possano essere ritenuti stabili punti con velocità lungo la LOS pari a ± 2 mm/anno. Tale valore scende a ± 1.5 mm/a nelle aree di pianura.

Aspetti geometrici

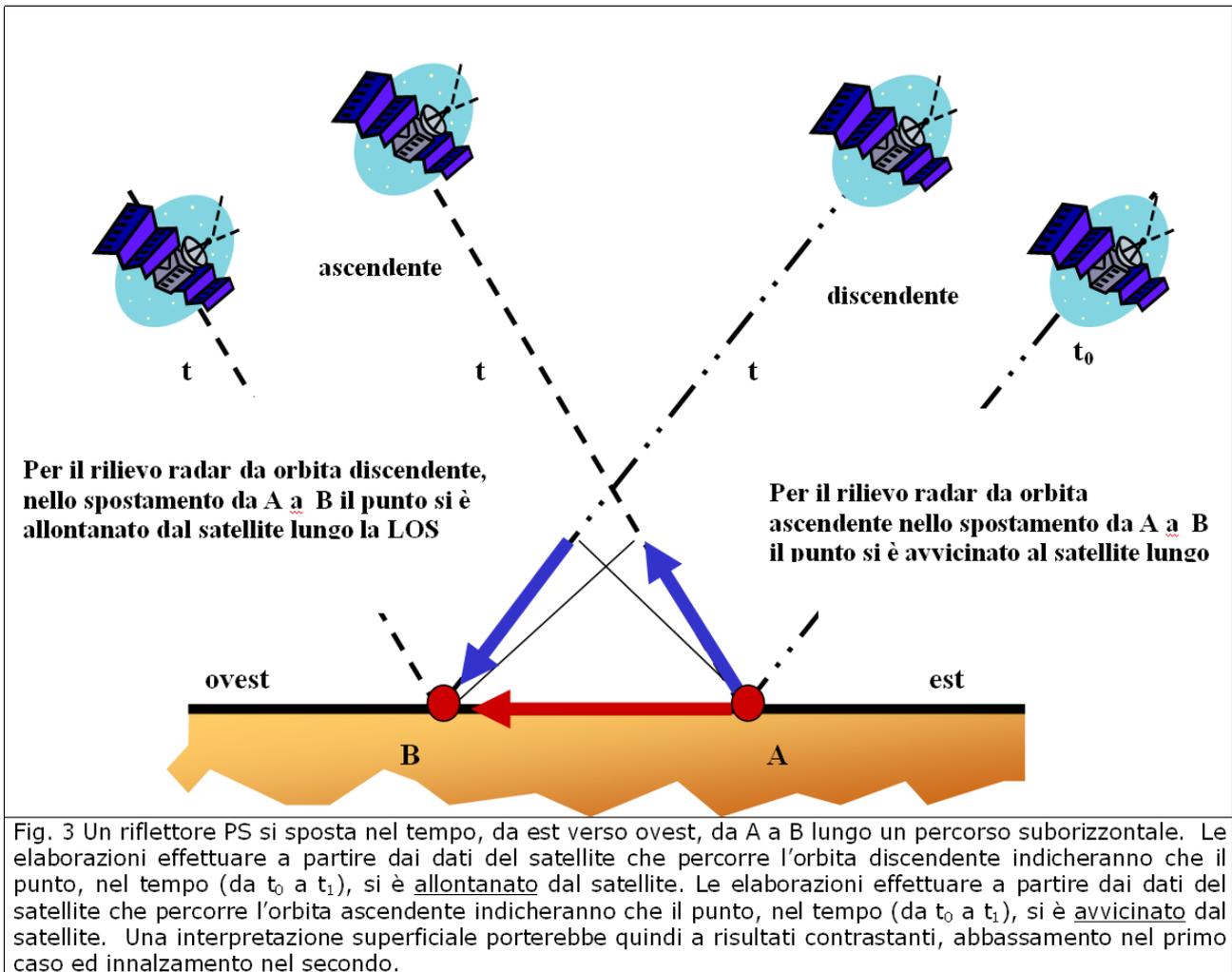
Il metodo è in grado di rilevare spostamento lungo un solo asse, quello che congiunge il bersaglio a terra con il satellite, asse detto LOS (line of sight). In altri termini il metodo rileva se il bersaglio a terra si è avvicinato od allontanato dal satellite. Tale asse presenta orientazione spaziale diversa per le orbite ascendenti e discendenti. Nei satelliti ERS, per le orbite discendenti l'asse immerge con azimut di circa 277° Nord ed inclinazione, rispetto alla normale, di circa 23°.

Tale configurazione geometrica presenta numerose implicazioni che debbono assolutamente ed attentamente considerate in fase di interpretazione dei dati:

- Viene rilevata solo una componente dello spostamento totale, quella lungo l'asse di cui sopra; a seconda dell'orientazione dei versanti e dell'asse degli spostamento potranno essere rilevati valori prossimi allo spostamento totale o solo una minima frazione degli stessi (vedi figura 2)



- Date le orientazioni sopra citate saranno meglio rilevati spostamenti lungo assi est-ovest, in quanto tali spostamenti comportano più decisi avvicinamenti od allontanamenti dal satellite. I movimenti lungo gli assi nord-sud non comportano sensibili allontanamenti od avvicinamenti al satellite e non vengono di norma rilevati o, meglio, vengono rilevate solo componenti minime. La presenza, quindi, di PS lungo versanti che potrebbero sviluppare movimenti lungo assi nord-sud deve essere valutata con particolare attenzione. Non potrò, ad esempio, discriminare se un valore di spostamento inferiore ai 2mm/a, (che, come già citato, viene assunto come soglia di velocità minima per discriminare i movimenti) rappresenti un PS immobile o se rappresenti invece una minima componente di uno spostamento più rilevante.
- Se gli spostamenti avvengono lungo assi est-ovest, gli stessi riflettori potranno indicare valori di spostamento opposti nelle elaborazioni relative rispettivamente alle orbite ascendenti e discendenti. Questo in quanto il riflettore nell'un caso si avvicina e nell'altro si allontana dal satellite. L'effetto è particolarmente evidente per movimenti lungo piani poco inclinati come avviene, ad esempio, nei settori sommitali delle grandi deformazioni di versante (figura 3).



- Un'analisi superficiale della distribuzione del seminato PS potrebbe talora portare a definire settori a comportamento cinematico diverso ove, in realtà, tali settori differiscono unicamente per l'orientazione del versante rispetto alle orbite satellitari, elemento che si riflette in componenti diverse degli spostamenti reali lungo la LOS (figure 4, 5.)

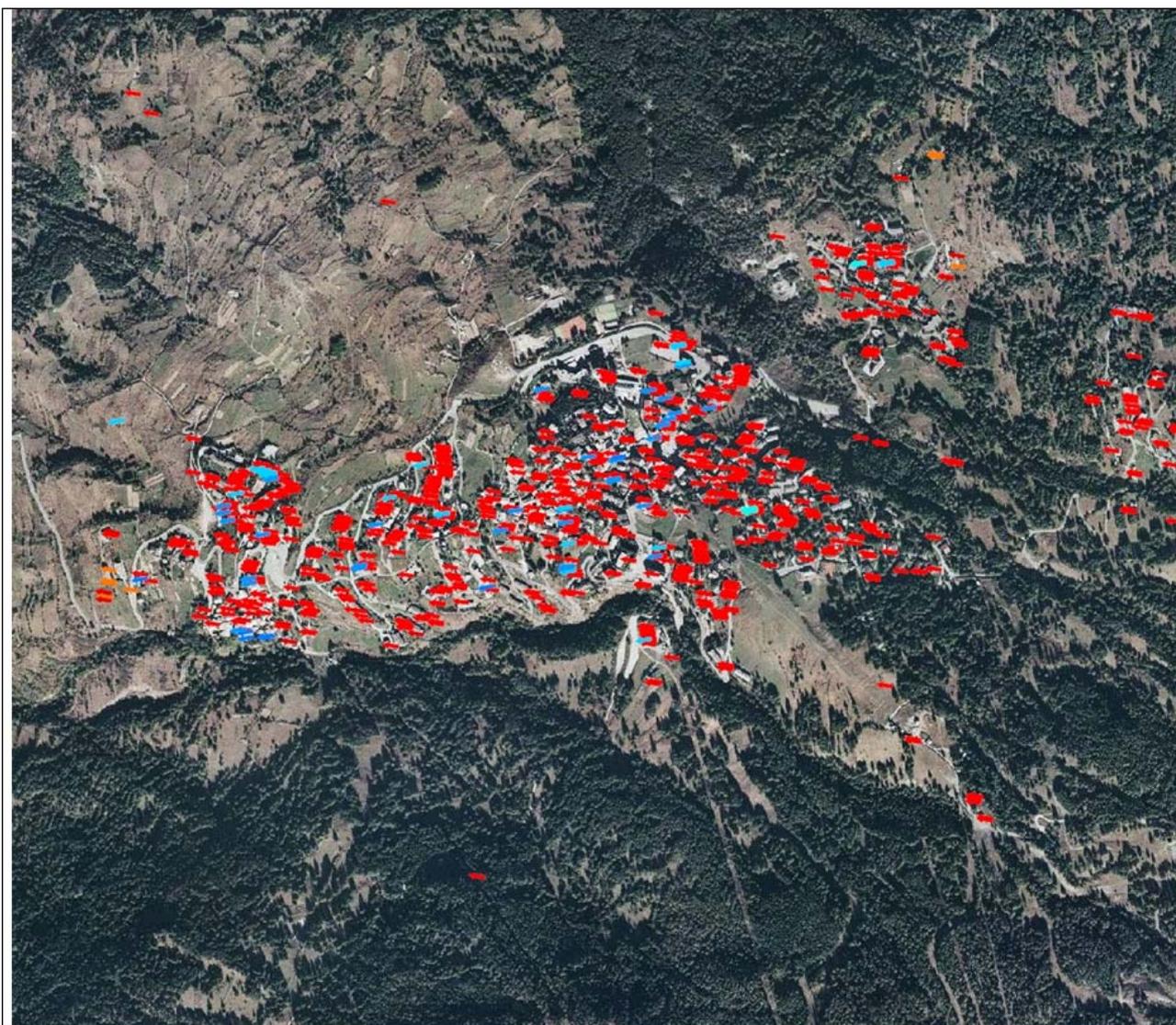


Fig. 4 Sauze d'Oulx (TO). Gli stessi edifici definiscono PS che segnalano un abbassamento apparente per i dati da satellite in orbita discendente (punti rossi) ed un innalzamento apparente per i dati da satellite in orbita ascendente (punti blu). In realtà (vedi figura precedente) gli spostamenti rilevati avvengono verso NO lungo un piano a basso angolo.

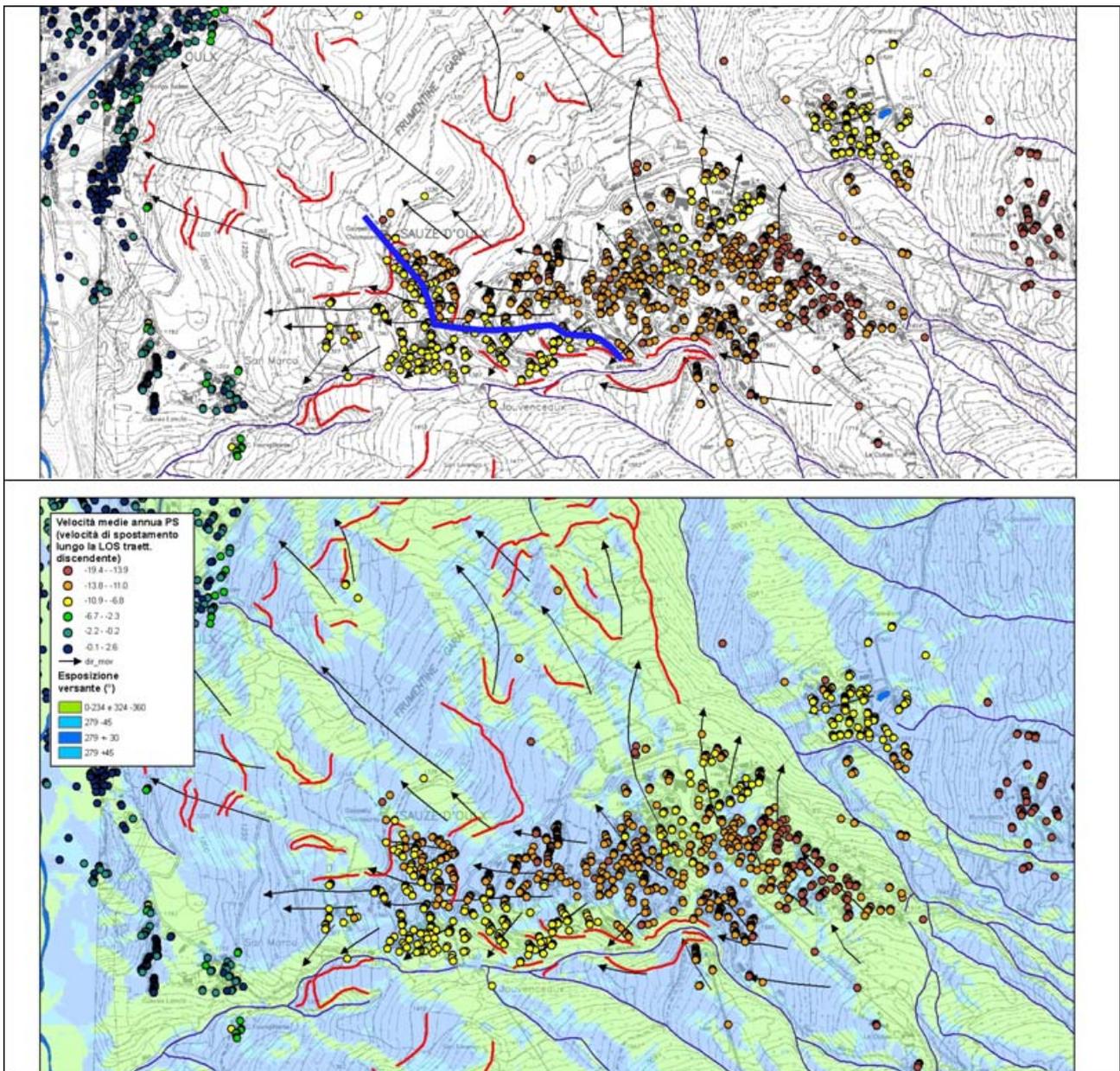


Fig. 5 Sauze d'Oulx (TO) Un esame rapido delle velocità del seminato PS (figura in alto) potrebbe indurre a definire settori con comportamento cinematico differente del corpo di frana, separati dalla linea blu. Un esame più attento (figura in basso), tramite confronto con le orientazioni del versante (campiture colorate) permette però di verificare come tale limite sia probabilmente apparente e corrispondente in larga parte con variazioni di orientazione del versante stesso. Le differenze quindi non riflettono variazioni della velocità reale ma solo variazioni delle sue componenti proiettate lungo la LOS.

Interpretazione delle deformazioni rilevate su edifici

La massa dei PS rilevati corrisponde a fabbricati od infrastrutture. Nell'effettuare interpretazioni per quanto attiene ai fenomeni franosi occorre tener presente che non è assolutamente possibile attribuire acriticamente al fenomeno franoso le velocità di spostamento rilevate sugli edifici. Questo in quanto tra le velocità rilevate sugli edifici e quelle "reali" del movimento franoso si interpongono numerosi elementi che possono amplificare o ridurre i valori:

richiamo di terreno da parte dei movimenti franosi attivi;
fenomeno di ritiro-rigonfiamento della copertura argillosa;
caratteristiche strutturali dell'edificio e soprattutto, caratteristiche delle sue fondazioni;
fattori geotecnici legati al comportamento dei terreni di fondazione.

Movimenti non lineari

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

Pratiche da evitare

In conclusione si elencano alcune pratiche da assolutamente evitare nell'analisi dei dati PS:

- indagini PS commissionate su aree inadatte a tale tipo di analisi (versanti ad orientazione sfavorevole, aree vegetate ecc.);
- acritica accettazione del dato PS come dato "risolutore" ;
- acritica trasposizione di un seminato PS in una zonizzazione del territorio a fini pianificatori;
- interpretazione generica degli spostamenti rilevati come dovuti a sole componenti sub-verticali;
- assenza di PS interpretata come assenza di movimenti;
- acritica interpretazione di spostamenti rilevati su manufatti come spostamenti dovuti ai corpi di frana.

Le Aree Anomale

Il percorso di analisi, il cui obiettivo consiste nell'interpretazione geologica dei campi di moto descritti dai PS prevede come passo iniziale la formazione di aggregati o cluster di PS che per caratteristiche fisiche e spaziali (velocità superiori od inferiori alla classe di velocità considerata stabile, e distanza interpunti e numerosità) possono rappresentare indizi di geo-processi. Tali raggruppamenti sono stati definiti come **Aree Anomale**. le aree anomale vengono relazionate a processi e forme geologiche al fine di individuare/ipotizzare le cause delle deformazioni misurate. Si tratta di un'interpretazione geologica preliminare a scala regionale che andrà successivamente verificata con l'analisi di dettaglio. Questo livello si presta a studi di carattere regionale.

L'interpretazione delle **Aree Anomale** dipende dalla tipologia di fenomeno, che a sua volta è funzione della velocità e del tipo di movimento (lineare e non).

Le cause dei movimenti sono state suddivise in:

1. attività neotettonica e sismica
2. fenomeno franoso
3. subsidenza naturale per consolidazione di terreni recenti sottoconsolidati o per la presenza di terreni "problematici"

4. subsidenza naturale connessa a fenomeni di dissoluzione di rocce carbonatiche o evaporitiche
5. subsidenza indotta da estrazione di fluidi dal sottosuolo
6. subsidenza indotta da attività sotterranea (scavi per gallerie, attività mineraria)
7. subsidenza indotta da applicazioni di carichi (costruzioni, grandi opere) su superfici estese
8. comportamento geotecnico differenziale del terreno di fondazione e problemi strutturali
9. detrito di versante

Occorre tenere presente che i fenomeni, che causano i movimenti si possono anche sovrapporre a scale diverse, per cui l'interpretazione dei dati interferometrici può risultare difficile a causa dell'influenza di diverse componenti del movimento non sempre chiaramente distinguibili (figura 6): richiamo di terreno da parte dei movimenti franosi attivi, fenomeno di ritiro-rigonfiamento della copertura argillosa, fattori geotecnici e topografici; condizioni di fondazione e caratteristiche strutturali dei fabbricati.

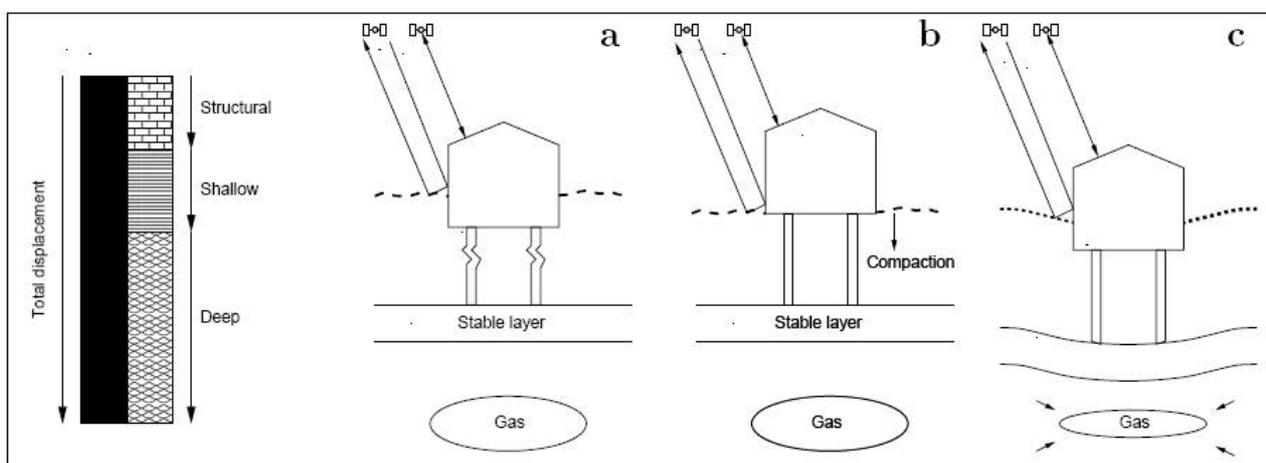


Fig. 6 Esempio della scomposizione dello spostamento misurato dovuto a differenti cause: a) strutturali (fondazioni), b) consolidamento del terreno, c) estrazioni di gas (Ketelaar et al., 2006).

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

- **Localizzazione e densità dei Permanent Scatterers**

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

- **Copertura del territorio**

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

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

- **Movimenti relativi**

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

- **Riflessioni multiple**

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

- **Distanza dal punto di riferimento**

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

- **Velocità lungo la LOS**

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

- **Spostamenti con velocità elevate**

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

- **Movimenti non lineari**

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

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

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

Torino, settembre 2008