

## Il contributo dell'interferometria PS-InSAR<sup>TM</sup> satellitare nella valutazione della mobilità tettonica in Piemonte

*Analysis of interferometry data (PS-InSAR<sup>TM</sup>)  
to analyze the tectonic mobility in Piemonte*

MORELLI M. (\*), MALLEEN L. (\*), NICOLÒ G. (\*),  
PIANA F. (\*\*), FIORASO G. (\*\*)

**ABSTRACT** – The SAR interferometer technique allows detecting small movements of the ground surface. One of the most effective is the Permanent Scatters (PS-InSAR) technique proposed by FERRETTI *et alii*, 2001. The PS are points on the ground (buildings, rocks, etc.) that show high long-term phase coherence, as well as strong and stable backscatter level through time. Since PS do not change their signature with time, they can be used to estimate the sub-vertical motion of the ground, within the range of millimetre motions/year (fraction of the 5.6 cm-wavelength). PS velocity values are relative to a chosen reference point that is assumed to be stable.

Thirty-eight ERS1/2 SAR descending scenes, taken from 1992 to 2000, allow detecting over 2 million PS with a variable distribution density. This large data set required geostatistical and spatial cluster analysis (Hot Spot Analysis) that allowed generating maps of iso-kinematic domains to be compared with the present knowledge of Western Alps tectonic mobility.

The boundaries of the detected iso-kinematic domains can be very narrow (less than one km) or large (tens of kms), while the area size ranges from tens to some square kms.

The geometry of the boundaries can be very straight or curvilinear. Different geological meanings can be inferred for these boundaries, depending on their geometry and

velocity gradient observed across them. The boundaries could coincide with known, buried, concealed or inferred active faults, or could represent hinge areas between different uplifting or subsiding areas. Furthermore, iso-kinematic domains can be bounded by significant velocity variations induced by landslides or deep-seated gravitational deformations alignment. In some cases, the boundaries could also be simply determined by the effects of local anomalies in the PS statistical distribution.

These different boundary-types were recognized in several sectors of Western Alps and adjoining alluvial basins (Argentera, Monferrato, Gran Paradiso tectonic units) where normal, thrust and strike-slip faulting are presently active with moderate/low seismicity, and as complex local responses to the ongoing Europe-Adria convergence. The PS data revealed differential uplift or subsidence of large areas, probably controlled by km-scale gentle flexures, precisely located individual faults, not precisely located fault systems, gravitational instability or local human effects.

**PAROLE CHIAVE:** interferometria, faglie, scatteratori permanenti, statistica Hot Spot, geostatistica, tettonica attiva.

**KEY WORDS:** Active tectonics, faults, interferometry, permanent scatterers, Hot Spot statistic, geostatistic.

(\*) Centro Regionale per le Ricerche Territoriali e Geologiche, ARPA Piemonte, Torino.  
(\*\*) CNR Istituto di Geoscienze e Georisorse, Unità Operativa di Torino.

## 1. – INTRODUZIONE

Le tecniche di interferometria radar satellitare hanno la capacità di identificare piccoli movimenti della superficie terrestre. Differenti metodi di elaborazione interferometrica sono attualmente utilizzati; uno dei più promettenti è il metodo dei *Permanent Scatters* (PS) proposto da FERRETTI *et alii*, 2001 (PS-InSAR™). Questo metodo consiste nel riconoscimento su immagini radar dei satelliti ERS-1 e ERS-2 SAR di singoli punti di riferimento (PS) da utilizzare per le misure di deformazione. I PS sono punti che mantengono la stessa “firma elettromagnetica” in tutte le immagini utilizzate al variare della geometria di acquisizione e delle condizioni climatiche, preservano quindi l’informazione di fase nel tempo. Questi corrispondono solitamente a strutture di origine antropica e riflettori naturali (palazzi, dighe, antenne, affioramenti rocciosi ecc.) che mostrano una fase interferometrica stabile nel tempo.

Questo metodo ha la capacità di identificare piccole deformazioni della superficie terrestre con accuratezza elevata (velocità media di un PS fino a 0,1 mm/anno). Tutti i dati di velocità sono tuttavia relativi ad un punto assunto come stabile preso dal set di PS estratti dall’insieme delle immagini impiegate, mentre i movimenti sono misurati lungo la congiungente satellite–bersaglio radar che nel caso dei sensori ERS è quasi verticale (~ 23°).

Il Centro Regionale per le Ricerche Territoriali e Geologiche dell’Arpa Piemonte ha sviluppato in questi ultimi anni particolare interesse alle risultanze di applicazioni interferometriche con tecniche PS nell’ambito dei monitoraggi dei movimenti franosi e studi di tettonica attiva per tutto il territorio piemontese. Un territorio che comprende diversi ambienti geologicamente molto complessi e tra loro giustapposti, caratterizzati da storia evolutiva esplicatesi a diversi livelli crostali:

- la catena alpina, costituita da una pila di unità tettono-metamorfiche dislocate da complessi sistemi di faglie;
- la terminazione nord occidentale della catena appenninica, costituita da unità tettono-stratigrafiche poste a tetto dei sovrascorrimenti basali padani.

I rapporti di giustapposizione tra le due catene sono parzialmente mascherati da depositi plio-pleistocenici del Bacino Terziario Piemontese e dell’avanfossa padana.

Per questo lavoro sono stati elaborati 614 immagini SAR nel periodo 1992 – 2001 che hanno permesso di individuare più di 2.000.000 PS. Questa mole di dati, contraddistinta da densità di distribuzione assai variabile sul territorio, è stata analizzata attraverso tecniche di analisi geo-

statistiche e di analisi cluster che hanno coniugato sia la statistica di tipo tradizionale, sia l’informazione spaziale. L’applicazione di tali tecniche è stata rivolta a:

- 1) caratterizzare il fenomeno in termini di autocorrelazione spaziale dei valori di velocità;
- 2) generare carte di domini isocinematici;
- 3) individuare zone di transizione tra domini isocinematici, da confrontare con l’assetto tettonico del territorio piemontese.

## 2. - ANALISI GEOSTATISTICHE ED ANALISI CLUSTER

Per la generazione delle carte delle isocinematiche si è preferito un approccio geostatistico. Nello specifico è stato utilizzato come interpolatore l’*Ordinary Kriging* che, rispetto ai tradizionali interpolatori deterministici, ha il vantaggio di stimare la variabile mediante un modello interpretativo del fenomeno basato sull’analisi dei valori di semivarianza per valori crescenti della distanza. Il risultato è stato la copertura del territorio piemontese di carte isocinematiche espresse in velocità (mm/anno) rispetto al punto di riferimento proprio di ogni scena.

Al fine inoltre di complementare i risultati ottenuti dalla geostatistica e per rispondere alla necessità di individuare i limiti tra aree a comportamento omogeneo a scala regionale è stata realizzata un’analisi cluster, calcolando per ogni PS il valore dell’indice  $G_i^*(d)$  (ORD J.K. & GETIS A., 1995). L’indice  $G_i^*(d)$  è una misura della concentrazione delle somme di valori associati a una data variabile  $X$  spazialmente distribuita [1]. Nella sua formulazione più recente è espresso in termini di  $Z$ -score, e rappresenta la differenza tra l’indice  $G_i^*(d)$  ed il suo valore atteso divisa per la deviazione *standard* [2]. Un valore alto positivo della statistica per un punto bersaglio  $i$  indica che i punti  $x_j$  contenuti nell’intorno di raggio  $d$  sono caratterizzati da alti valori di  $X$  in relazione al valore atteso.

Un valore negativo di  $Z(G_i^*)$  indica che i punti vicini mostrano valori bassi. Più alto in valore assoluto il valore di  $Z(G_i^*)$ , maggiormente significativa è l’anomalia. Concentrazioni nello spazio di valori alti, positivi o negativi, di  $Z(G_i^*)$  individuano cluster di valori anomali: si parla di punto caldo (*hot spot*) o punto freddo (*cold spot*) quando i cluster risultano rispettivamente dall’aggregazione di valori positivi o negativi e statisticamente significativi.

$$G_i^*(d) = \frac{\sum_j w_{ij}(d)x_j}{\sum_j x_j} \quad [1]$$

$$Z(G_j^*) = \frac{G_j^*(d) - E(G_j^*(d))}{\sqrt{\text{Var}(G_j^*(d))}} \quad [2]$$

Dove  $w_{ij}$  è un peso binario che vale 1 per distanze maggiori o uguali a  $d$  e 0 in caso contrario. Il risultato ottenuto è stato la copertura del territorio piemontese di carte delle tendenze delle velocità espresso in valori alti e bassi rispetto al valore atteso. Questo tipo di analisi ha permesso di identificare meglio le geometrie delle zone di transizione tra aree a comportamento omogeneo a scala regionale (MORELLI *et alii* 2008; MALLEN *et alii*, 2007).

### 3. - INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI E CONCLUSIONI

È stato eseguito un confronto tra le carte cinematiche prodotte dalle analisi statistiche dei PS e l'assetto tettonico di domini geologici il cui quadro strutturale è stato recentemente aggiornato sia dai rilevamenti CARG, sia da recenti lavori specialistici (Foglio 157 "Trino", PERELLO *et alii*, 2004; MORELLI & PIANA, 2006). In particolare sono stati analizzati i domini tettonici del Gran Paradiso, dell'Argentera, del Monferrato e dei bacini pliopleistocenici adiacenti (Savigliano e Alessandria), domini in cui l'espressione di una tettonica attiva è manifestata da una bassa o moderata sismicità. Per questi domini le zone di transizione che delimitano gli areali isocinematici mostrano geometrie ad andamento lineare o/e curvi lineare a differente persistenza (da qualche chilometro a decine di chilometri). Esse sono sia molto localizzate (ampiezza d'alcune centinaia di metri quadri) con elevati gradienti di velocità, sia più estese (decine di chilometri quadri) con bassi gradienti di velocità. Il confronto tra la distribuzione spaziale e geometrica di queste zone e l'assetto tettonico dei domini analizzati evidenzia inoltre differenti tipologie di corrispondenza. Per il dominio tettonico dell'Argentera, costituito da un basamento cristallino interessato attualmente da sollevamento in regime transpressivo (PERELLO *et alii*, 2001; BAIETTO *et alii*, 2008), si osservano zone di transizione lineari caratterizzate da elevati gradienti di velocità, corrispondenti geometricamente ad alcune faglie delle quali è nota l'attuale attività di controllo sulla circolazione di fluidi idrotermali (fig. 1). Si osservano inoltre zone di transizione, non corrispondenti a strutture tettoniche note, che potrebbero invece corrispondere a strutture sepolte. Per i domini del Monferrato e dei bacini plio-pleistocenici si osser-

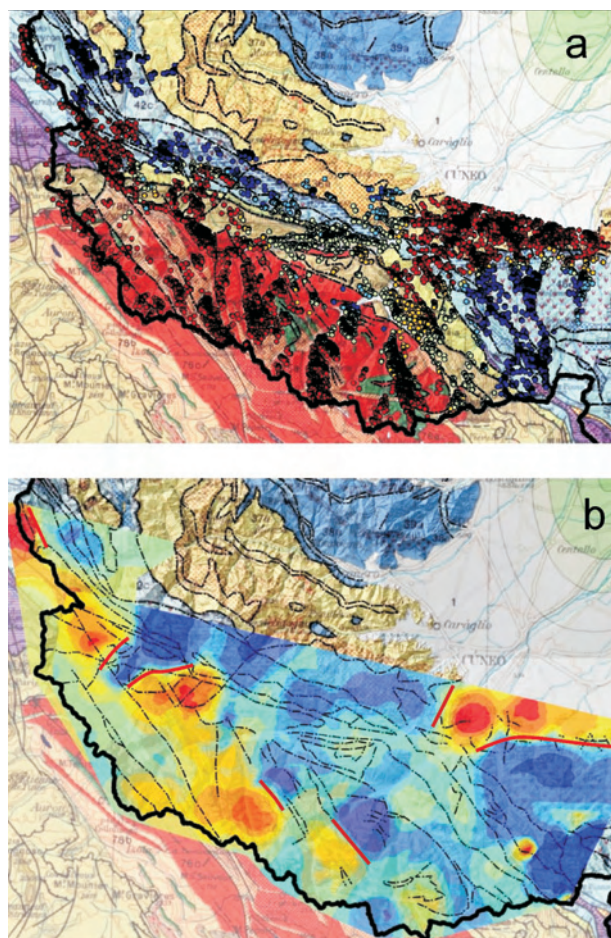


Fig. 1 – Dominio tettonico dell'Argentera; a) risultato *Hot Spot* : i punti rossi ed i punti blu sono i PS con valori rispettivamente alti e bassi rispetto al valore atteso; b) risultato della geostatistica; in rosso e in blu sono rappresentate le aree con valori di velocità rispettivamente alti e bassi. Linee rosse: zone di transizione tra aree isocinematiche; le linee a tratto nere: strutture tettoniche.

– Argentera tectonic domain; a) *Hot Spot* results: red and blue points represent respectively high and low velocity values in relation to the expected value; b) geo-statistical results; red and blue area represent respectively high and low velocity PS values. Red lines are the boundaries between sectors showing homogeneous kinematic behaviour; dashed lines represent tectonic structures.

va invece un'evidente corrispondenza geometrica tra i settori in sollevamento e in subsidenza alla scala dei tempi geologici, con gli areali isocinematici PS-InSAR. In particolare, i valori cinematici alti rispetto al valore atteso corrispondono ai settori in sollevamento geologico, mentre i valori bassi corrispondono ai settori in subsidenza. In questi domini le zone di transizione tra settori isocinematici sono a gradiente basso, indicando probabili effetti di flessurazione regionale (fig. 2).

Infine, anche per il dominio tettonico del Gran Paradiso, che costituisce un duomo gneissico-eclogitico in costante esumazione alla scala dei tempi geologici (velocità di 0.6 mm/anno negli ultimi 20 Ma), si osserva congruenza con il dato PS che evidenzia un generale sollevamento, ripartito in settori a diversa velocità, separati da zone

di transizione parallele alle strutture tettoniche conosciute. Tale corrispondenza non è necessariamente legata ad attività recente delle strutture tettoniche, ma può essere dovuta ad un controllo passivo di quest'ultime sulla cinematica dei fenomeni gravitativi profondi lungo i versanti.

In conclusione, l'analisi statistica dei PS-InSAR ha permesso di identificare aree isocinematiche e di classificare diverse tipologie di zone di transizione (fig. 3). Da un primo confronto tra le carte cinematiche prodotte e i modelli geologici esistenti in letteratura, si evidenzia una distribuzione di settori in sollevamento e in abbassamento separati da zone di transizione corrispondenti a diverse tipologie strutturali:

i) faglie conosciute o sepolte o non note; ii) settori caratterizzati da effetti flessurali tra aree in subsidenza e in sollevamento, iii) allineamenti di fenomeni gravitativi profondi sui versanti.

In senso più generale, la mobilità crostale superficiale indicata dal dato PS-InSAR, solo parzialmente congruente con i modelli di evoluzione geologica recente, fornisce nuovi vincoli per il miglioramento o la revisione dei modelli disponibili.

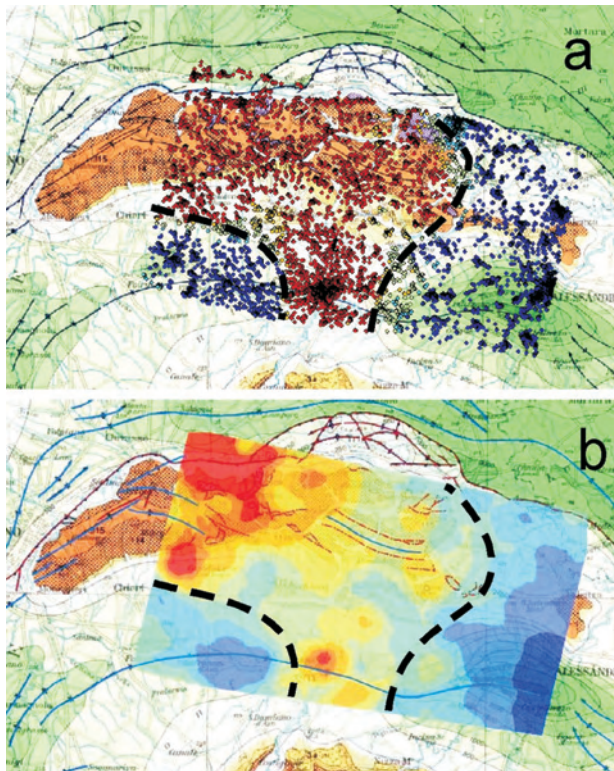


Fig. 2 – Domini del Monferrato e dei Bacini di Savigliano e di Alessandria. a) risultato *Hot Spot*: i punti rossi ed i punti blu sono i PS con valori rispettivamente alti e bassi rispetto al valore atteso; b) risultato della geostatistica; le aree in rosso e in blu rappresentano valori di velocità rispettivamente alti e bassi. Linee nere tratteggiate: zone di transizione tra aree isocinematiche. – *Monferrato, Savigliano and Alessandria tectonic domains; a) Hot Spot results: red and blue points represent respectively high and low PS velocity values in relation to the expected value; b) geo-statistical results; red and blue area represent respectively high and low velocity values. Dashed black lines are the boundaries between sectors showing homogeneous kinematic behaviour.*

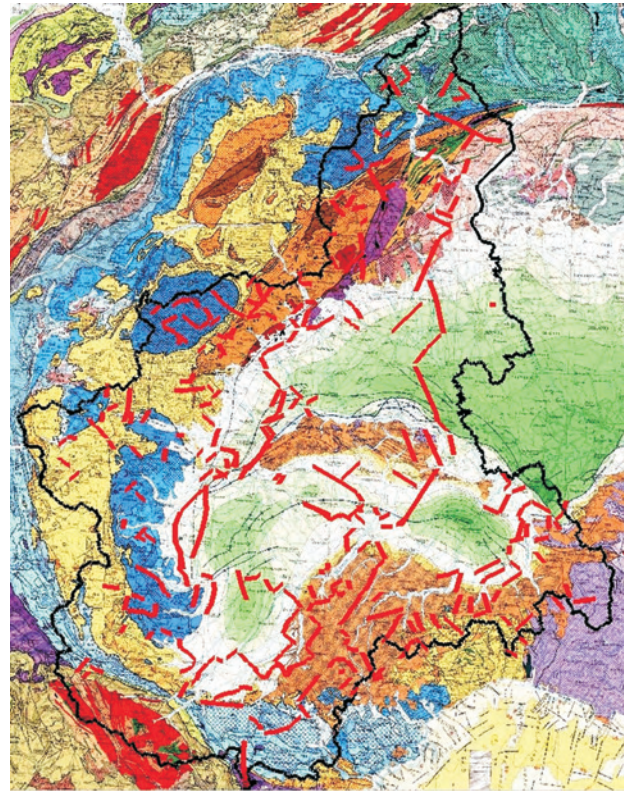


Fig. 3 – Le linee rosse indicano la localizzazione delle zone di transizione delle aree isocinematiche individuate. – *Red line shown the transition zone between iso-kinematic homogeneous areas. In black is the administrative boundary.*

#### BIBLIOGRAFIA

- FERRETTI A., PRATI C. & ROCCA F. (2001) – “Permanent scatterers in SAR interferometry”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39, 1: 8-20.
- MALLÉN L., MORELLI M. & NICOLÒ G. (2007) - *Primi risultati della sperimentazione di tecniche di analisi statistica in contesto spaziale dei PS-InSAR™ per studi neotettonici*. Atti 11<sup>a</sup> Conferenza Nazionale ASITA, 1451-1456.
- MORELLI M., MALLÉN L. & NICOLÒ G. (2008) - *Primi risultati dell'applicazione della tecnica interferometrica dei PS-InSAR™ per studi neotettonici nell'area di «giunzione Alpi-Appennini (Piemonte centro-meridionale)*. *Rend. SGI*, 1, 126-128.
- ORD J.K. & GETIS A. (1995) - *Local spatial autocorrelation statistics*. *Geographical Analysis*, 27, 4: 286-306.
- BAIETTO A., CADOPPI P., MARTINOTTI G., PERELLO P., PERROCHET P. & VUATAZ F.D. (2008) - *Terme di Valdieri case (Italian western Alps) Assessment of thermal circulations in strike-slip fault systems*. Geological Society of London, Special Publications 2008; 299: 317-339.
- PERELLO P., MARINI L., MARTINOTTI G. & HUNZIKER J.C. (2001) - *The thermal circuits of the Argentera Massif (western Alps, Italy): an example of low-enthalpy geothermal resources controlled by Neogene alpine tectonics*. *Eclogae Geologicae Helveticae*, 94, 75-94.
- AA.VV. (2003) - *Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000. Foglio 157 Trino*, APAT, Roma.
- PERELLO P., DELLE PIANE L., PIANA F., STELLA F. & DAMIANO A. (2004) - *Brittle post-metamorphic tectonics in the Gran Paradiso Massif (north-western Italian Alps)*. *Geodinamica Acta*, 17, 69-88.
- MORELLI M. & PIANA F. (2006) - *Comparison between remote sensed lineaments and geological structures in intensively cultivated hills (Monferrato and Langhe domains, NW Italy)*. *International Journal of Remote Sensing*, 27, 20, 4471-4493.