

ANALISI DI FENOMENI DI DEFORMAZIONE SUPERFICIALE SUL TERRITORIO DELL'AUTORITÀ DEI BACINI ROMAGNOLI A PARTIRE DA SERIE DI DATI RADAR SATELLITARI ELABORATI CON LA TECNICA DEI DIFFUSORI PERMANENTI

Jacopo ALLIEVI (*), Flavio BONSIGNORE (**), Stefano CESPA (*), Carlo COLESANTI (*),
Alessandro FERRETTI (*), Maurizio MORELLI (**), Alberto PISTOCCHI (***)

(*) Tele-Rilevamento Europa – T.R.E. S.r.l., Via Vittoria Colonna, 7 - 20149 Milano, Tel: 02-43.43.121, Fax: 02-43.43.12.30, e-mail: stefano.cespa@treuropa.com, alessandro.ferretti@treuropa.com, <http://www.treuropa.com>

(**) Struttura Tematica di Ingegneria Ambientale, ARPA Emilia-Romagna, Vicolo Carega, 3 - 40121 Bologna, Tel: 051-29.66.300, Fax: 051-2966338, e-mail: fbonsignore@ia.arpa.emr.it, mmorelli@ia.arpa.emr.it

(***) Autorità dei bacini Regionali Romagnoli, Piazza Morgagni, 2, 47100 - Forlì, Tel: 054-33.78.517, Fax 054-33.78.523, e-mail alberto.pistocchi@libero.it

RIASSUNTO La tecnica dei diffusori permanenti (*Permanent Scatterers*, PS) è uno strumento avanzato per l'elaborazione di serie di dati acquisiti da sensori radar ad apertura sintetica (SAR) montati su piattaforme satellitari. L'approccio PS permette di ricostruire e monitorare su ampia scala e con precisione millimetrica fenomeni di deformazione della superficie terrestre. Nel corso dell'articolo si propongono cenni introduttivi alla tecnica PS e si illustra brevemente qualche risultato significativo ottenuto nel corso di un'analisi PS svolta da Tele-Rilevamento Europa (TRE) per l'Autorità dei Bacini Romagnoli su gran parte del territorio delle province di Ravenna e Forlì-Cesena (oltre 1700 km²). Il lavoro si inserisce nel quadro delle attività sviluppate dall'Autorità di bacino per individuare le zone da sottoporre a tutela e per pianificare azioni da avviare per contenere i rischi connessi al fenomeno della subsidenza.

Si accenna, quindi, alle reti regionali di controllo della subsidenza (livellazione ottica e GPS) progettate e messe in opera da ARPA sull'intero territorio in pianura dell'Emilia-Romagna.

Si offre, infine, un iniziale confronto delle misure PS con i primi dati di livellazione, sottolineando aspetti di complementarità tra le tre tecniche di monitoraggio (livellazione, GPS, PS).

ABSTRACT The Permanent Scatterers technique is an advanced tool for the joint exploitation of series of spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR) data. The PS approach allows one to measure with millimetric precision and on wide scales ground deformation phenomena. We spend a couple of introductory words on the PS technique and show briefly some relevant results obtained in the framework of a PS analysis carried out by Tele-Rilevamento Europa (TRE) for the Romagna River Basin Authority on the provinces of Forlì-Cesena and Ravenna (over 1700 km²).

A brief overview of the regional optical levelling and GPS networks set up by ARPA will be given as well, providing an initial comparison of the PS measurements with the first levelling results. Finally, a possible synergistic usage of the three surveying techniques (levelling, GPS and PS) is briefly addressed.

Introduzione: interferometria SAR e diffusori permanenti

I sistemi SAR sono coerenti, in grado cioè di fornire dati tali da permettere la generazione di immagini complesse, costituite da modulo e fase. La fase è una misura ambigua (modulo 2π) della distanza tra il sensore e il baricentro elettromagnetico del singolo *pixel* dell'immagine SAR.

L'interferometria SAR si fonda proprio sulla valutazione su base *pixel by pixel* della variazione di fase tra immagini radar successive ed è, in tal modo, in grado di rilevare eventuali fenomeni di

deformazione (che si manifestano come variazioni di distanza) con una precisione teoricamente pari a pochi centesimi della lunghezza d'onda a cui opera il sistema¹.

Le misure sono, tuttavia, affette da una serie di fattori che si traducono in contributi aggiuntivi alla fase interferometrica (topografia, propagazione attraverso ionosfera e troposfera, imprecisioni nei dati orbitali, decorrelazione). Tali contributi possono ridurre fortemente la precisione delle misure e l'applicabilità della tecnica.

I principali fattori limitanti risultano essere la distorsione di fase provocata dalla propagazione attraverso l'atmosfera (ionosfera e troposfera) e la variabilità del termine di fase introdotto dalla

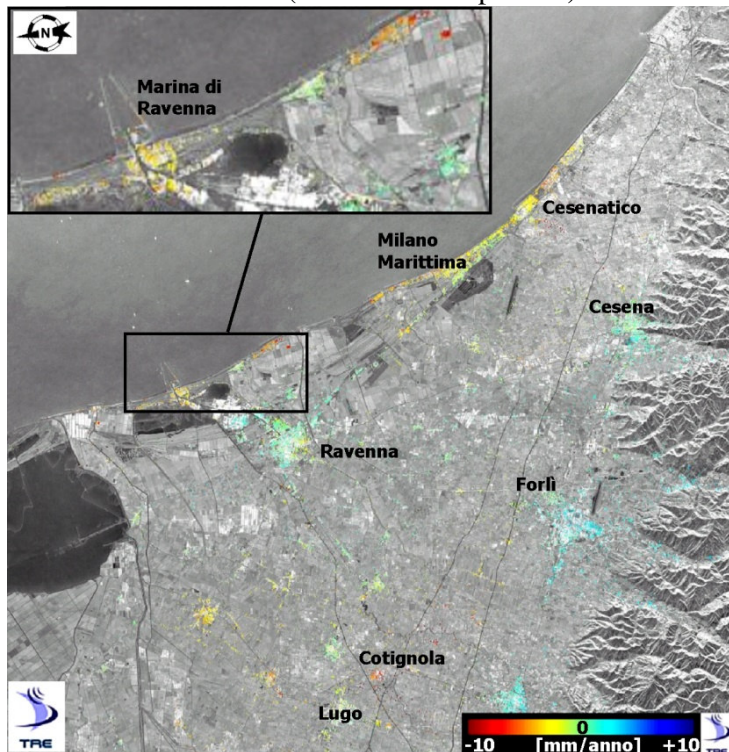


Figura 1 - Posizione e velocità media di deformazione dei PS nelle province di Ravenna e Forlì. (Layer di sfondo: immagine SAR, area: ~3900 km² di cui ~1700 analizzati). Nel close up si apprezzano i fenomeni in atto a Marina di Ravenna e nelle immediate vicinanze.

fase interferometrica, sfruttandone le diverse caratteristiche di correlazione in spazio e tempo (ad esempio il contributo atmosferico è incorrelato rispetto a tempo e geometria di acquisizione, ma correlato nello spazio. Il termine di deformazione è correlato nel tempo, può essere o no correlato nello spazio (a seconda del fenomeno in atto), mentre è certamente incorrelato rispetto alla geometria d'acquisizione, ecc.).

L'analisi PS non è, quindi, altro che una tecnica per separare i vari contributi alla fase interferometrica di singoli bersagli radar privilegiati isolando con notevole precisione il termine di deformazione. I PS possono essere visti come una rete geodetica naturale (i cui capisaldi non sono creati con un intervento *in situ*).

Condizioni di applicabilità dell'approccio PS:

- È necessario un numero sufficiente di immagini SAR. Non esiste un limite rigido, ma un ragionevole valore di riferimento può essere 15-20. I dati dei satelliti ERS-1/2 dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA) sono archiviati sistematicamente a partire dal 1992 e garantiscono una

diffusione sulla superficie dei singoli bersagli radar in funzione del tempo (decorrelazione temporale) e della geometria di acquisizione (decorrelazione geometrica).

L'approccio PS, messo a punto e brevettato presso il Politecnico di Milano e lanciato sul mercato da Tele-Rilevamento Europa (società di *spin-off* del Politecnico stesso), consente di superare le principali limitazioni dell'interferometria SAR tradizionale (Ferretti et al. 2000 e 2001).

A tal fine si concentra l'attenzione su bersagli radar privilegiati (i diffusori permanenti) solo debolmente affetti da decorrelazione. Si tratta principalmente di parti di strutture e edifici o di affioramenti rocciosi (che esistono di per sé e non richiedono di essere messi in opera *ad hoc*).

In ipotesi di decorrelazione molto contenuta e sfruttando serie di immagini SAR, si può procedere alla discriminazione dei contributi alla

¹ Per i satelliti ERS-1 ed ERS-2 dell'Agenzia Spaziale Europea, cui ci si riferisce sistematicamente in questa sede, $\lambda=5.66$ cm.

sufficiente copertura praticamente su tutta l'Europa (oltre che su quasi tutte le principali città a livello mondiale).

- La densità spaziale di capisaldi deve essere almeno nell'ordine di 4-5 PS/km². Tale vincolo è ampiamente soddisfatto in caso di urbanizzazione quantomeno lieve o in aree ricche di affioramenti rocciosi. Si osservi, per contro, che, in presenza di un denso manto di vegetazione non interrotto almeno da singole strutture o rocce esposte, la condizione non è, generalmente, verificata e la tecnica PS spesso non è in grado di fornire misure. Una prima valutazione qualitativa delle aree per cui l'analisi è in grado di produrre dati e della messe di informazioni ricavabile può essere effettuata a partire da dati ottici (aerofoto, immagini satellitari ottiche) e/o cartografia sufficientemente dettagliata (ad esempio almeno 1:25.000).

Prodotti:

I principali prodotti di un'analisi PS sono (Colesanti et al., 2003):

- Posizione (coordinate geografiche e quota (ad esempio WGS84)) di ogni singolo PS rispetto ad un punto di riferimento a terra di coordinate note. La precisione di localizzazione è nell'ordine del metro e consente, pertanto, di mappare i PS sulle corrispondenti strutture (ad esempio sovrapponendo in ambiente GIS i risultati PS ad un'ortofoto (Figura 2) o a cartografia tecnica regionale (CTR), cfr. Figura 5).
- Velocità media di deformazione di ogni singolo PS nell'intervallo temporale preso in esame (la precisione è in genere tra 0.1 e 0.5 mm/anno).
- Serie temporale di deformazione di ogni singolo PS rispetto ad un'acquisizione assunta come riferimento (la precisione sulle singole misure è, in genere, tra 1 e 3 mm). È disponibile al più una misura ogni 35 giorni.

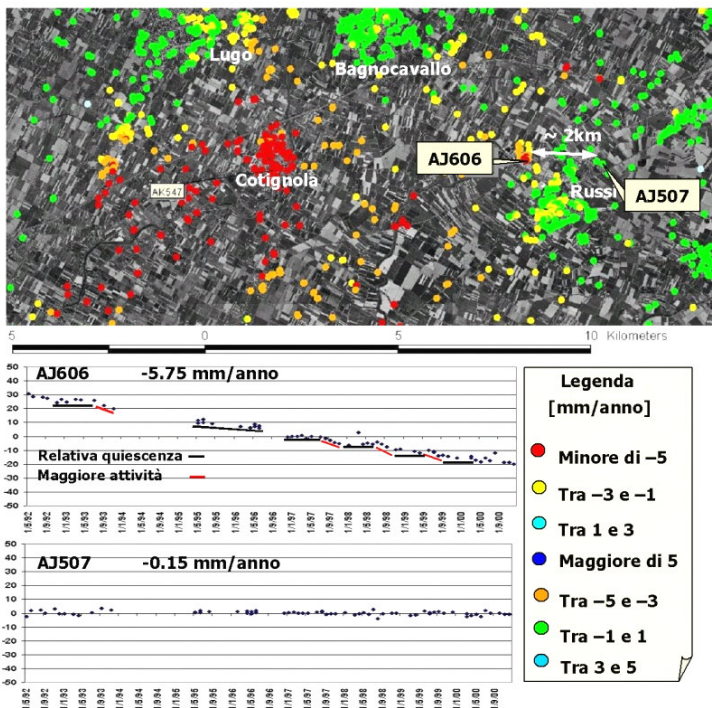


Figura 2 - Campo di velocità nell'entroterra di Ravenna, presso Lugo. Misure PS sovrapposte ad un'ortofoto. È messo chiaramente in evidenza un fenomeno di subsidenza esteso su diversi km² a Cotignola e dintorni. Un fenomeno fortemente localizzato è in atto nelle vicinanze di Russi. Nella serie temporale del PS AJ606 si riconoscono momenti di maggiore e minore attività. A meno di 2 km di distanza, il PS AJ507 non è affetto da alcuna deformazione.

Osservazioni:

- La densità spaziale di PS può arrivare a valori estremamente elevati (fino a oltre 500 PS/ km² in area urbana).
- Viene registrata la sola proiezione della deformazione lungo la congiungente satellite-bersaglio (direzione quasi verticale).
- I dati di deformazione sono relativi ad un PS assunto come riferimento e supposto stabile.
- La tecnica PS è stata ampiamente validata (Colesanti et al., 2003)

Analisi PS sulle Province di Forlì-Cesena e Ravenna

Come già accennato, su commissione dell'Autorità dei bacini romagnoli, TRE ha effettuato un'analisi PS sull'area in pianura delle province di Forlì-Cesena e Ravenna. La zona, approssimativamente triangolare, è delimitata grossomodo dalle Valli di Comacchio (Nord), dalla Via Emilia

(Ovest), dall'Adriatico (Est) e dal Rubicone (Sud). L'analisi PS è stata individuata dall'Autorità di bacino come lo strumento più idoneo a fornire un quadro aggiornato del fenomeno della subsidenza,

a conferma ed integrazione delle attività di monitoraggio svolte da ARPA Emilia Romagna. In particolare, la tecnica consente di generalizzare a tutto il territorio, con copertura sufficientemente uniforme, la misura degli spostamenti già disponibile su alcune linee di livellazione.

L'obiettivo dell'analisi è fornire un supporto alle decisioni riguardo alla strategia di lotta alla subsidenza di cui il piano di bacino si fa carico, attraverso l'individuazione delle aree di intervento prioritario per il controllo dei prelievi di fluidi dal sottosuolo e di altre possibili cause di subsidenza. Sono state utilizzate 65 immagini SAR ERS-1/2 acquisite in modalità discendente (sensore in moto da Nord verso Sud) tra maggio 1992 e dicembre 2000. È stata effettuata un'analisi PS di tipo "standard". Si sono, cioè, cercati i soli fenomeni di deformazione con un'evoluzione prevalentemente lineare nel tempo (moto con velocità approssimativamente costante).²

Pur avendo fissato soglie molto restrittive per l'individuazione dei PS (per garantire una probabilità trascurabile di scambiare un caposaldo radar inaffidabile per un PS) sono stati identificati oltre 14.200 PS, in gran parte concentrati nelle aree urbane (cfr. Figura 1). Il PS di riferimento cui sono relativi i dati di deformazione è stato fissato nelle vicinanze dell'abitato di Fosse Ghiaia (Ravenna). Parecchi fenomeni di deformazione sono stati messi in luce, in particolare effetti di subsidenza su scala più o meno estesa (da singole strutture a diverse decine di km²).

In Figura 2 si focalizza l'attenzione su un'area circoscritta, tra gli abitati di Lugo e Russi, nell'entroterra della provincia di Ravenna. La velocità media di deformazione di ciascun PS (*layer* vettoriale di tipo puntuale) è sovrapposta ad un'ortofoto, in modo da mettere in chiara evidenza localizzazione, estensione e gradiente spaziale dei fenomeni di deformazione in atto. Sono, inoltre, rappresentate due serie temporali che danno una descrizione dettagliata di quanto accade presso i singoli capisaldi radar (si osservano periodi di quiescenza e di attività dei fenomeni in atto).

La rete regionale di controllo della subsidenza

Nel 1997 la Struttura Tematica di Ingegneria Ambientale di ARPA su incarico della Regione Emilia-Romagna e in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, dei Trasporti, delle Acque, del Rilevamento, del Territorio (DISTART) dell'Università di Bologna ha progettato una rete regionale di controllo della subsidenza prevedendo l'uso combinato di livellazione

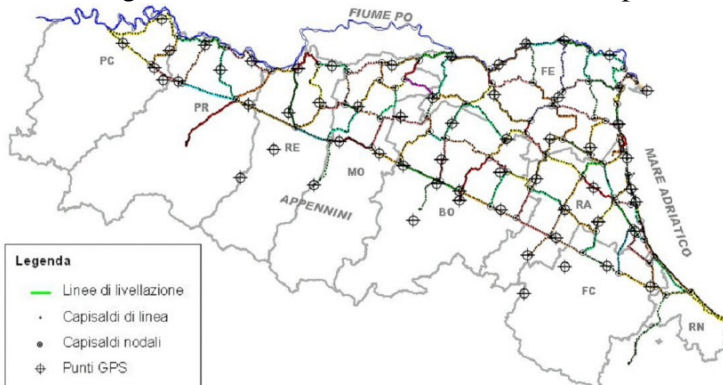


Figura 3 – Reti regionali (livellazione e GPS) per il monitoraggio della subsidenza in Emilia-Romagna.

geometrica classica e GPS (Bitelli et al., 1997).

Nel 1998 sono state realizzate due reti distinte costituite, rispettivamente, da oltre 2000 capisaldi distribuiti su 121 linee di livellazione (nel complesso oltre 2000 km) e 59 capisaldi GPS. Entrambe le reti sono ancorate a capisaldi in zone ritenute stabili (a Sud negli Appennini e/o a Nord a Brescia e Padova). Contestualmente è stato messo a

punto un sistema informativo per la gestione dei dati da acquisire e delle misure eseguite in precedenza presso reti geodetiche locali.

Tra fine agosto e inizio novembre 1999, grazie ai finanziamenti della Regione Emilia-Romagna e del Ministero dell'Università e della Ricerca scientifica è stata effettuata una prima misura delle reti (in particolare per la rete di livellazione sono state adottate le specifiche proprie delle misure di alta precisione), (Benedetti et al., 2000). Nel 2001-02 è stata effettuata una ricognizione generale con

² È possibile, in qualsiasi momento, arricchire la messe di dati svolgendo un'analisi PS "avanzata". L'analisi avanzata è in grado di rilevare anche fenomeni di deformazione ad evoluzione non lineare nel tempo. È consigliabile limitare l'analisi PS "avanzata" ad aree circoscritte dove l'analisi "standard" (a causa di un modello troppo semplificato per la deformazione in atto) non consente di trovare PS pur essendo ragionevole attendersene la presenza (edifici ecc.).

fini di manutenzione e nel 2002 una seconda campagna di misure GPS. Nel contempo le quote di livellazione ottenute nel 1999 sono state confrontate con quanto rilevato nel corso di precedenti campagne su scala locale, ottenendo iniziali mappe di deformazione (cfr. Figure 4 e 5). Si tratta di risultati parziali e preliminari, ottenuti su intervalli temporali anche radicalmente diversi da linea a linea e solo in corrispondenza di un sottoinsieme dei capisaldi (~50%) distribuiti non uniformemente (Bonsignore, 2003a). La prossima campagna di livellazione, decisiva per la generazione di dati più omogenei, è prevista per il 2005. Dal canto loro, le misure GPS sono risultate di buona qualità. Tuttavia l'intervallo temporale piuttosto breve (3 anni) e la lunghezza d'onda a cui operano i satelliti GPS (circa 20 cm) limitano, per il momento, la precisione delle stime di velocità. Un ragionevole valore di riferimento è circa $\pm 7\text{mm/anno}$ (Bonsignore, 2003b). È, quindi, possibile rilevare solo i fenomeni di deformazione più marcati.

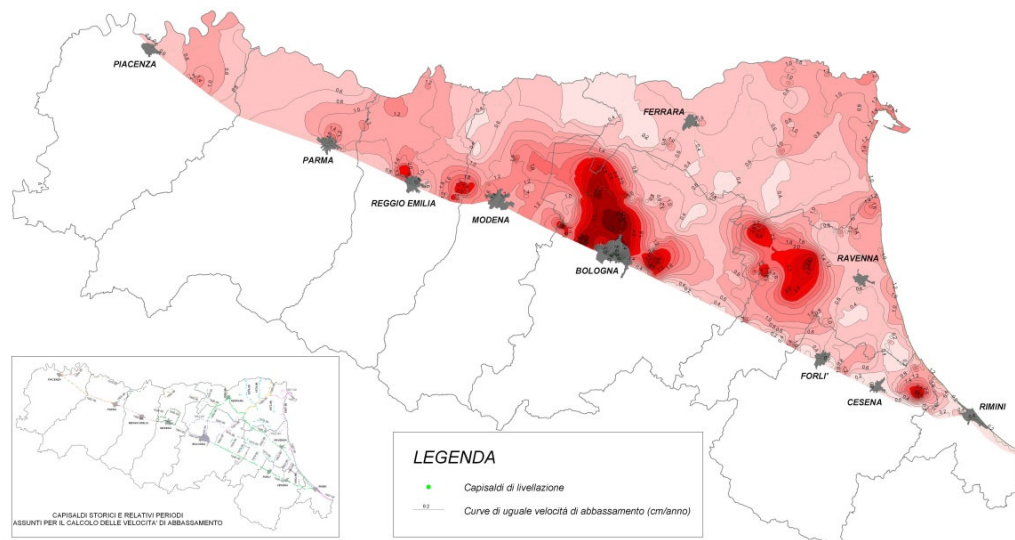


Figura 4 –Linee a eguale velocità di deformazione (isocinetiche) ottenute confrontando le quote della campagna di livellazione del 1999 con dati acquisiti precedentemente su scala locale in istanti temporali different (cfr. riquadro a destra). Figura tratta da (Bonsignore, 2003c).

Confronto e integrazione dei dati di deformazione – aspetti di sinergia

L'analisi PS è stata svolta in poche settimane all'inizio del 2003. I risultati sono stati confrontati con le elaborazioni derivanti dalle misure di livellazione effettuate nel 1999. In particolare, a titolo di esempio, in Figura 4, i dati di velocità PS (puntuali) relativi all'area di Cervia e Cesenatico sono sovrapposti alle linee isocinetiche ottenute interpolando le misure di livellazione. Nonostante le velocità si riferiscano ad intervalli temporali solo parzialmente confrontabili (PS: 1992-2000, livellazione: 1990/1993-1999 nell'entroterra, 1987-1999 lungo la costa), i dati sono evidentemente in ottimo accordo.

È particolarmente interessante osservare i notevoli aspetti di complementarità tra le tre tecniche:

L'approccio PS è estremamente competitivo sul piano economico in caso di impiego su vasta scala fornendo, in aree urbane (o, genericamente, in presenza di manufatti), una densità spaziale di capisaldi nemmeno pensabile con le altre tecniche. È possibile, inoltre, studiare fenomeni passati (a partire dal 1992) e non sono necessarie creazione e manutenzione dei capisaldi.

D'altra parte la livellazione ottica di precisione raggiunge un'accuratezza sensibilmente più elevata e permette di fissare liberamente la posizione esatta dei capisaldi e l'intervallo temporale tra visite successive. Specialmente nello studio locale di fenomeni particolarmente critici questi aspetti di versatilità combinati alla precisione elevatissima appaiono assolutamente insostituibili.

Dal canto suo il GPS è il solo strumento attualmente in grado di fornire dati tridimensionali.

Tutto ciò suggerisce chiaramente che l'impiego combinato delle tre tecniche e la gestione integrata dei risultati promettono notevoli passi avanti nel monitoraggio di fenomeni di deformazione superficiale e nella gestione del rischio ed essi connesso.

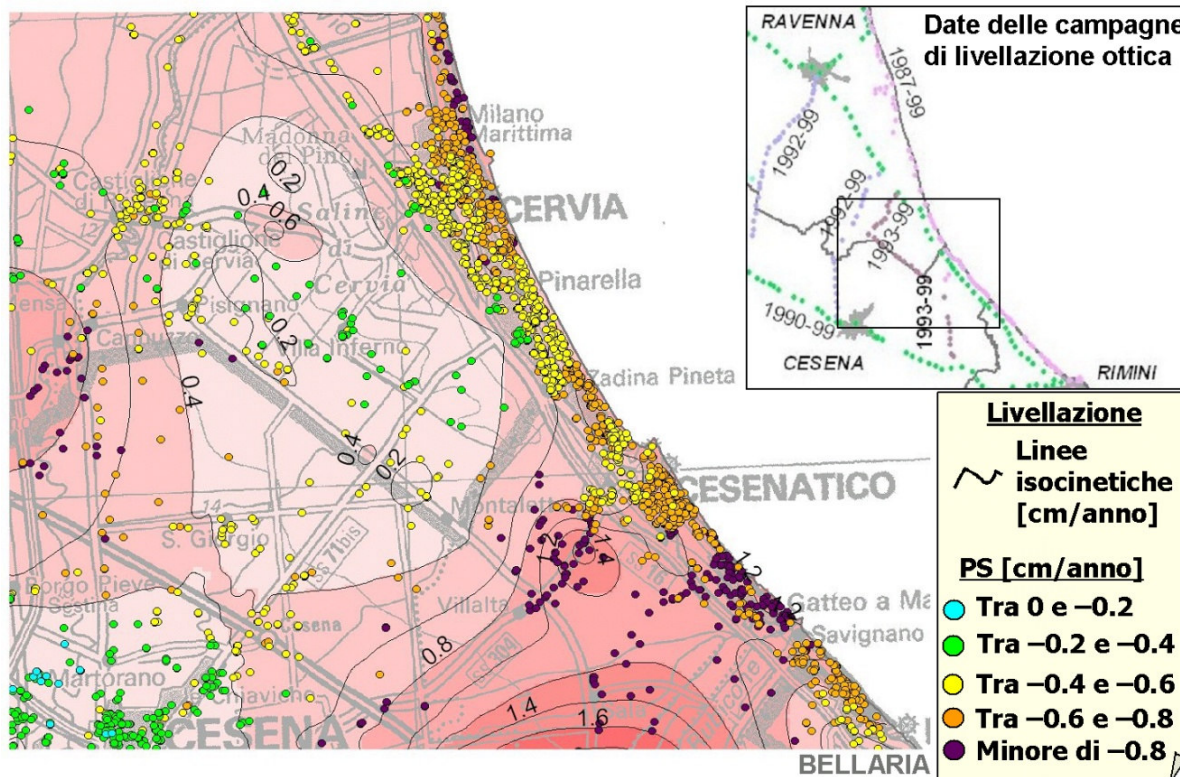


Figura 5 – Confronto tra i dati puntuali relativi ai PS e il campo di velocità interpolato dalle misure di livellazione. L'accordo è ottimo (nonostante i dati di livellazione siano solo parziali). Si osserva come i PS in area extraurbana tendano ad essere distribuiti lungo gli assi viari (in corrispondenza di manufatti e strutture).

Riferimenti bibliografici

- Benedetti G., Draghetti T., Bitelli G., Unguendoli M., Bonsignore F., Zavatti A., (2000), "Land Subsidence in Emilia-Romagna Region, Northern Italy", *Proceedings of the Sixth International Symposium on Land Subsidence*, Ravenna, 24-29 Sett., 61-76.
- Bitelli G., Bonsignore F., Unguendoli M. (1997), "Progetto di una rete per il controllo della subsidenza nella regione Emilia-Romagna", *Atti della 1ª Conferenza Nazionale ASITA*, Parma, 30 Sett.-3 Ott., 117-130.
- Bonsignore F., (2003a), Il monitoraggio della subsidenza in Emilia-Romagna, in *Acqua, suolo, clima: conoscere per governare*, Carla R. Ferrari (a cura di), I quaderni di ARPA, Bologna, Labanti & Nanni, 13-20.
- Bonsignore F., Draghetti T., Fontana D., Rapino A., Unguendoli M., (2003b), Emilia-Romagna subsidence monitoring network. GPS Network: Measurements 2002, *Atti del 4º Congresso Europeo sulla cartografia geoscientifica regionale ed i sistemi informativi*, Bologna, 17-20 Giu., 284-286.
- Bonsignore F., Chahoud A., Cristofori D., Farina M., Martinelli G., Villani B. (2003c), Subsidence and groundwater in Emilia-Romagna region: a comparison between subsidence rate and piezometric levels, *Atti del 4º Congresso Europeo sulla cartografia geoscientifica regionale ed i sistemi informativi*, Bologna, 17-20 Giu., 604-605.
- Colesanti C., Ferretti A., Prati C., Rocca F. (2003), "Monitoring Landslides and Tectonic Motion with the Permanent Scatterers Technique", *Engineering Geology*, 68 (1-2), 3-14.
- Ferretti A., Prati C., Rocca F. (2001), "Permanent Scatterers in SAR Interferometry", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing (TGRS)*, 39 (1): 8-20.
- Ferretti A., Prati C., Rocca F. (2000), "Nonlinear subsidence rate estimation using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry", *IEEE TGRS*, 38 (5): 2202-2212.