

IL MONITORAGGIO DELLA SUBSIDENZA IN EMILIA-ROMAGNA: RISULTATI RECENTI

G BITELLI (*), F. BONSIGNORE (**), L. VITTUARI (*)

(*) DISTART, Facoltà di Ingegneria - Università di Bologna, Viale Risorgimento 2, 40136 Bologna.
gabriele.bitelli@unibo.it, luca.vittuari@unibo.it

(**) A.R.P.A Emilia-Romagna, Struttura Tematica di Ingegneria Ambientale, Vicolo Carega 3, 40121 Bologna.
fbonsignore@ia.arpa.emr.it

Riassunto

Nel 2005-07 la Struttura Tematica di Ingegneria Ambientale di ARPA, su incarico della Regione Emilia Romagna e in collaborazione con il DISTART - Università di Bologna, ha realizzato l'aggiornamento delle conoscenze geometriche relative al fenomeno della subsidenza relativamente all'intero territorio di pianura della regione, coperto dal 1999 da una rete di monitoraggio integrata (livellazione geometrica e GPS).

A tal fine è stato utilizzato il metodo PSInSARTM di analisi interferometrica di dati radar (tecnica sviluppata e brevettata dal Politecnico di Milano e commercializzata dalla società Tele-Rilevamento Europa). L'indagine interferometrica è stata estesa all'intero territorio di pianura della regione (circa 11.000 km²) ed è stata confrontata ed integrata con i risultati ottenuti dal confronto di due campagne di livellazione geometrica di alta precisione condotte rispettivamente nel 1999 e nel 2005 sulla rete regionale di controllo della subsidenza. L'utilizzo del metodo satellitare ha permesso di acquisire un'informazione molto più diffusa e capillare rispetto al rilievo terrestre: un numero di punti di ben due ordini di grandezza superiore al numero dei capisaldi di livellazione presenti nella rete regionale.

In particolare, sulla base della disponibilità dei dati satellitari, sono state realizzate due diverse cartografie a curve isocinetiche: la prima, relativa al periodo 1992-2000, fa riferimento all'elaborazione dei dati provenienti dai satelliti dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA) ERS1 e ERS2, mentre la seconda riguarda il periodo più recente 2002-2006 e fa riferimento all'elaborazione dei dati provenienti dai satelliti Envisat (ESA) e Radarsat (Agenzia Spaziale Canadese).

Abstract

In 2005-07 the Thematic Structure of Environmental Engineering of ARPA, on behalf of the Emilia Romagna Region realized the updating of the geometrical knowledge concerning the phenomenon of the soil subsidence in cooperation with the DISTART Dept. of the University of Bologna. In particular in this paper, the PSInSARTM technique (developed by the Polytechnic of Milan and launched on the market through the society Tele-Rilevamento Europa) was used to monitor and measure the land surface subsidence of the whole territory of the Po River plain. A geometric levelling network extended to a regional scale was used to constrain and validate the interferometric dataset. The use of SAR allowed the acquisition of a more diffuse distribution of measured points with respect to the terrestrial surveys: the number of *Permanent Scatterers* (PS) was about two orders of magnitude greater than the number of the levelling benchmarks.

On the basis of images availability, two separate isokinetic contours maps of land subsidence vertical velocities were realized: the first, concerning the period 1992-2000, refers to the elaboration of the data coming from two satellites of the European Space Agency (ESA) ERS1 and ERS2, while the second concerns the most recent period 2002-2006 and refers to the elaboration of the data coming from the satellites Envisat (ESA) and Radarsat (Canadian Space Agency).

Le reti geodetiche per il monitoraggio della subsidenza in Emilia Romagna

Il monitoraggio della subsidenza a scala regionale è stato avviato dalla Regione Emilia-Romagna nel 1997 incaricando ARPA dell'istituzione della prima rete regionale di monitoraggio della subsidenza. La rete, progettata in collaborazione con il DISTART dell'Università di Bologna, è composta da due infrastrutture: una rete di livellazione geometrica di alta precisione costituita da oltre 2300 capisaldi e una rete GPS formata da circa 60 vertici. La rete di livellazione, in particolare, è stata messa a punto previa analisi dei capisaldi già presenti sul territorio (istituiti nel tempo da Enti diversi) in modo da poter utilizzare il maggior numero di serie storiche disponibili. Il suo rilievo ha permesso di attribuire ad ogni caposaldo una quota riferita, grazie al caposaldo assunto come origine, alla rete di livellazione di alta precisione IGMI.

Entrambe le reti sono state misurate per la prima volta nel 1999 (Bitelli et al., 2000). Alla parte di progetto, misura e elaborazione dei dati si è affiancata la realizzazione di un database relazionale in grado di gestire la grande mole di dati disponibili (capisaldi, campagne effettuate, risultati conseguiti, ecc.).

Nel 2002, su incarico della Regione, è stato ripetuto, ad opera del DISTART, il rilievo della sola rete GPS evidenziando i movimenti del suolo nel periodo 1999-2002 relativamente ai punti della rete stessa.

Nel 2005-07 ARPA, su incarico della Regione e con un contributo della provincia di Bologna, ha aggiornato le conoscenze geometriche del fenomeno tramite l'integrazione di due tecniche (fig. 2): la livellazione geometrica di alta precisione e l'analisi interferometrica di dati radar satellitari.

La campagna di livellazione geometrica, realizzata nel 2005, ha interessato un sottoinsieme della rete regionale (circa il 50% della rete), costituito da un migliaio di km di linee ed oltre 1000 capisaldi, ed è stata effettuata anche in funzione di supporto al rilievo radar (Bitelli et al., 2006).

L'analisi interferometrica, condotta dalla società Tele-Rilevamento Europa con la tecnica PSInSARTM sviluppata e brevettata dal Politecnico di Milano (Ferretti et al., 2001) si è estesa all'intero territorio di pianura della regione - circa 11.000 km². In particolare è stata condotta una elaborazione di tipo *standard SPSA low resolution* utilizzando i tre sensori sopracitati; l'elaborazione è stata compiuta per macro-aree o siti, successivamente connessi tra loro in una fase di *post-processing* che li ha legati ad un unico punto di riferimento. Si è trattato di un'elaborazione complessa, anche per la grande mole di dati e per la diversa consistenza di scene sia in termini di copertura spaziale che temporale (va rilevata per esempio la limitata disponibilità di dati Envisat nel periodo più recente). I dati principali forniti per ogni PS sono relativi alle coordinate, alla velocità media, alla coerenza ed alla deviazione standard.



Figura 1 – Rete regionale di livellazione geometrica e GPS per il controllo dei movimenti verticali del suolo nella Pianura Padana



Fig. 2 – Area interessata dall'analisi interferometrica PSInSARTM sovrapposta alla rete di livellazione geometrica misurata nel 2005.

Verifica dell'analisi interferometrica

L'analisi interferometrica condotta sull'intero territorio di pianura costituisce allo stato attuale un caso di studio molto interessante, sia per l'impiego del dato SAR interferometrico differenziale a una scala regionale, sia per la disponibilità di un importante archivio di misure geodetiche, praticamente contestuale ad una parte del *dataset* radar, derivato dalle misure di livellazione geometrica di alta precisione. Il DISTART, oltre all'elaborazione e analisi numerica di queste ultime, ha effettuato attività di verifica ed omogeneizzazione dei *dataset* radar interferometrici, anche tramite il confronto con i risultati della livellazione geometrica, con il fine ultimo di predisporre carte di uguale velocità di abbassamento della pianura emiliano-romagnola per i periodi coperti dalle osservazioni radar. A questo fine si sono messe a punto ed eseguite diverse procedure di analisi, a scala generale o anche di dettaglio.

In figura 3 si riporta la distribuzione dei bersagli radar *permanent scatterers* (PS) Envisat-Radarsat utilizzati per l'analisi dei movimenti verticali nel periodo 2002-2006; la figura 4 mostra, in un'area di dettaglio, l'elevata densità di tali punti in rapporto a quella dei capisaldi di livellazione, normalmente distribuiti con interdistanza di un chilometro lungo le linee. Si evidenzia chiaramente la concentrazione dei PS nelle aree edificate.

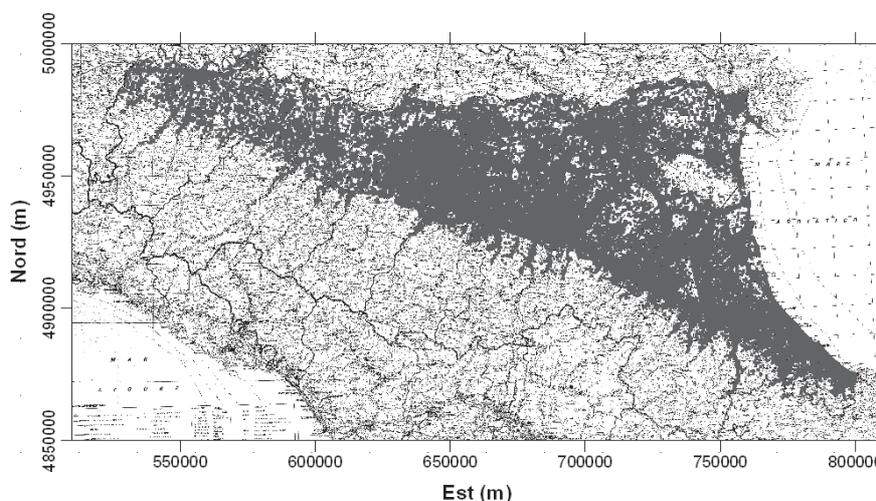


Figura 3 – Distribuzione di PS derivanti da immagini Envisat+Radarsat (2002-2006)



Figura 4 – L’immagine mostra la diversa densità dei PS rispetto ai capisaldi della rete di livellazione (simboli quadrati numerati), nonché la distribuzione spaziale dei primi, concentrata principalmente nelle aree edificate

Uno degli aspetti critici che accomuna le reti di livellazione geometrica ripetute nel tempo e l’interferometria SAR è la scelta del punto o dei punti origine delle quote da ritenersi fissi nelle successive elaborazioni. Questi punti di vincolo fissano il *datum* altimetrico di ciascuna campagna di misura e, se correttamente scelti, permettono di interpretare le indicazioni di movimento, per loro natura relative, in termini “assoluti”; qualora i riferimenti ritenuti stabili nel tempo di fatto non lo siano, i confronti tra successive misure possono contenere effetti sistematici indesiderati e fornire una indicazione non corretta del fenomeno di movimento verticale. Per quanto riguarda le campagne di livellazione geometrica 1999 e 2005, l’origine delle quote è stata fissata ad un valore determinato dall’Istituto Geografico Militare Italiano (IGMI) per un caposaldo posto a Sasso Marconi (Bologna), in area collinare e in posizione longitudinale pressoché baricentrica rispetto alla rete complessiva. Al termine della fase di elaborazione del dato PSInSARTM, che è stata in una prima fase condotta per ogni *dataset* separatamente per aree (siti), è stato selezionato per ciascun sito e sensore (ERS, Envisat, Radarsat) un solo punto di riferimento. La scelta del punto di riferimento per la tecnica interferometrica è stata effettuata sulla base di considerazioni legate prettamente all’elaborazione del segnale radar ma è stata confermata a posteriori sulla base di considerazioni esterne legate ai dati di livellazione.

E’ stata poi condotta un’operazione di *screening* generale (per gli scopi e la consistenza del lavoro non aveva evidentemente significato un’analisi puntuale) dei singoli *dataset* radar al fine di evidenziare la presenza di bersagli non rappresentativi di reali spostamenti del suolo, in genere oggetti che appaiono come PS isolati caratterizzati da velocità significativamente diverse dai PS circostanti (ad es. silos metallici affetti da condizioni di carico variabili nel tempo, punti posti in campi aperti e senza evidenza di manufatti, ecc.). A tal fine si sono effettuate in ambiente GIS verifiche sulle velocità di movimento di questi PS in relazione all’intorno, sul valore di coerenza (dato legato al singolo *dataset* e connesso al numero di immagini elaborate ed alla distribuzione *baseline* temporali e spaziali, fattore quindi della rumorosità e dello scostamento da un comportamento lineare), sulla loro localizzazione geografica analizzata su ortofoto ad alta risoluzione, sulle serie storiche, ecc.

Si sono inoltre analizzati i parametri statistici associati alle velocità e le loro distribuzioni spaziali, anche in relazione ai diversi tipi di sensori utilizzati; i valori di deviazione standard associati alle velocità di movimento risultano in generale di minore qualità per il periodo più recente, anche in relazione alla minore disponibilità di immagini già rilevata.

Con specifici test condotti ancora in ambiente GIS si sono inoltre confrontate su punti praticamente coincidenti (o meglio in ambiti molto ristretti) le velocità dedotte da orbite ascendenti e discendenti

(dato Envisat), in modo da verificare l'ipotesi di sostanziale trascurabilità di movimenti orizzontali, al fine di poter ri-proiettare nella sola direzione verticale le velocità misurate lungo la *line-of-sight*.

Un aspetto critico è stato quello inerente l'individuazione di procedure di confronto tra i dati di velocità desunti per i PS mediante la tecnica PSInSARTM e quelli desunti sui capisaldi mediante livellazione geometrica di alta precisione. Si tratta infatti di dataset non coincidenti dal punto di vista planimetrico e la comparazione è stata effettuata mediante differenti tecniche, su base locale con metodi deterministici (per prossimità o attraverso l'attribuzione al caposaldo della velocità media dei PS ricadenti in un predeterminato raggio di cattura funzione del gradiente di velocità verticale) o mediante interpolazione con metodi geostatistici. Per il dato ERS non sono disponibili dati topografici riferiti allo stesso periodo e che siano con certezza omogenei e confrontabili su tutta l'area di indagine; per quanto riguarda invece i dati Envisat e Radarsat, avendo a disposizione dei dati di livellazione omogenei tra loro (derivati dalle due campagne regionali) e quasi contemporanei ai dati radar, è stato possibile verificare l'accordo medio dei risultati radar con le misure topografiche.

Il contenuto informativo del dato interferometrico è puntuale, mentre il prodotto che veniva richiesto era una mappa a copertura continua del territorio di pianura regionale; considerando l'alta densità spaziale dei PS, si è proceduto ad una interpolazione dei *dataset* componendo due griglie della velocità di movimento, rispettivamente per il periodo 1992-2000 e 2002-2006, al fine di fornire una lettura di insieme immediata del fenomeno della subsidenza alla scala dell'intera pianura emilano-romagnola; la figura 5 mostra la carta a curve isocinetiche relativa al periodo 2002-2006 ottenuta dall'elaborazione dei dati provenienti dai satelliti Envisat e Radarsat.

Va sottolineato che il risultato di questo lavoro va considerato alla scala regionale per cui è stato concepito, ed in questa direzione sono state adottate le tipologie di elaborazione PSInSARTM condotte; il prodotto ottenuto non può essere cioè spinto verso investigazioni specifiche locali che richiederebbero altre modalità di elaborazione e di analisi puntuale.

Analisi dei movimenti verticali del suolo

Dall'osservazione dei risultati ottenuti (Bonsignore, 2008) si evidenzia, nel periodo più recente (2002-2006), una sostanziale assenza del fenomeno nelle province di Piacenza e Parma, mentre alcune aree di media pianura in provincia di Reggio Emilia e Modena, tra cui Correggio, Carpi, Ravarino continuano ad essere interessate da abbassamenti medi intorno a 10 mm/anno. Un miglioramento rispetto agli anni '80-'90 si registra nella provincia di Bologna, sebbene tale territorio sia, in ambito regionale, ancora il più soggetto al fenomeno con una vasta area di oltre 600 km² che presenta abbassamenti medi intorno a 20 mm/anno; in particolare si distinguono alcune zone di massimo sprofondamento in corrispondenza circa di Sala Bolognese, Bonconvento (oltre 3 cm/anno), Cadriano, Lavino di Mezzo e Castel S. Pietro (circa 3 cm/anno). Una diminuzione degli abbassamenti si evidenzia anche nell'area tra Faenza e Cotignola e a nord di Savignano sul Rubicone con valori ora compresi tra 10 e 20 mm/anno.

Il territorio ferrarese presenta, in generale, movimenti molto piccoli con una progressiva accentuazione approssimandosi all'area deltizia con valori tra 5 e 10 mm/anno. Per il litorale, infine, non si registrano variazioni significative rispetto al periodo precedente continuando questo delicato paraggio a perdere mediamente poco meno di 1 cm di quota all'anno; i movimenti più consistenti si evidenziano in corrispondenza dei paraggi di Foce Reno e Foce Fiumi Uniti con valori intorno a 1,5 cm/anno e nell'entroterra tra Bellaria e Cesenatico a nord di Savignano sul Rubicone, con valori massimi intorno a 2,5 cm/anno.

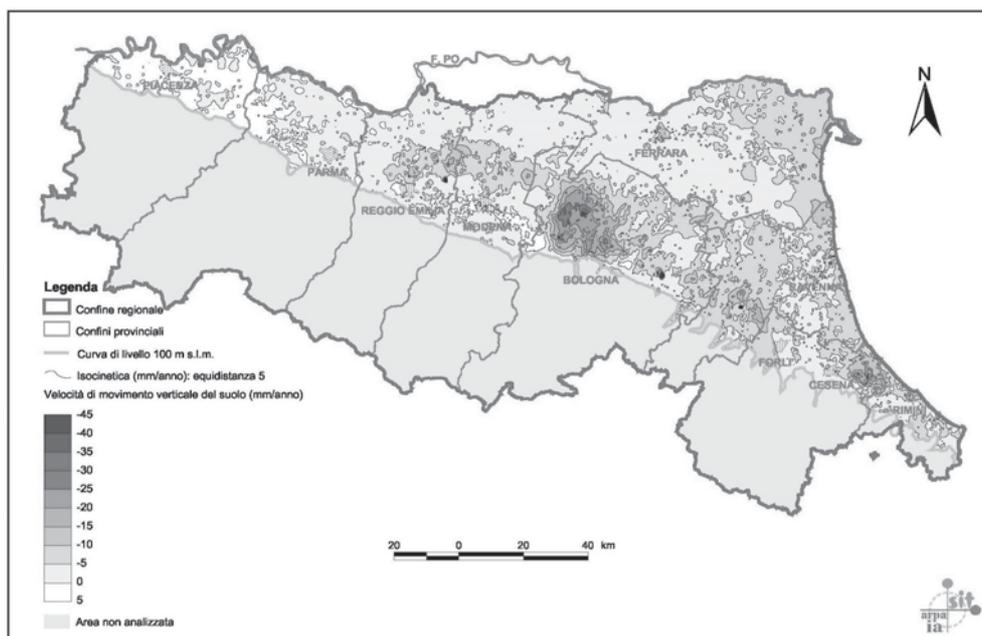


Fig. 5 – Carta a curve isocinetiche relativa al periodo 2002-2006 ottenuta dall’elaborazione dei dati provenienti dai satelliti Envisat e Radarsat.

Conclusioni

E’ stata aggiornata la base informativa relativa al monitoraggio geometrico del fenomeno della subsidenza a scala regionale.

L’analisi effettuata, con i risultati raggiunti, ha confermato le potenzialità del metodo interferometrico per la mappatura del fenomeno (purché ovviamente contenuto entro le velocità massime rilevabili con questa tecnica per i vari sensori), nonché l’importanza dell’integrazione e complementarietà di questa metodologia con le altre tecniche topografiche della livellazione geometrica e della geodesia spaziale. Proprio l’integrazione e la complementarietà saranno la base su cui continuare questo tipo di monitoraggio.

Ciascuna delle tecniche utilizzate presenta infatti vantaggi e problematiche diverse ed in particolare per l’interferometria radar, la più recente, è necessario e di grande interesse approfondire l’indagine e la sperimentazione scientifica sulle tecniche ed i risultati, potendo fare riferimento anche a dati di altra fonte. Ciò sarà di particolare interesse anche in vista degli sviluppi che si possono già oggi intravedere (tecniche con riflettori non permanenti, sviluppo di strategie diverse di elaborazione, disponibilità di nuovi sensori radar ad alta risoluzione e con maggiore frequenza di acquisizione, ecc.).

Bibliografia

- Bitelli G., Bonsignore F., Unguendoli M. (2000), “Levelling and GPS networks for ground subsidence monitoring in the Southern Po Valley”, *Journal of Geodynamics*, 30 (3): 355-369.
- Bitelli G., Bonsignore F., Bortone G., Vittuari L. (2006). Il monitoraggio della subsidenza a scala regionale in Emilia-Romagna. *Atti della giornata di studio Problemi di geingegneria: estrazione di fluidi e subsidenza*, P. Macini e E. Mesini (a cura di), Geofluid 2006, Piacenza: 57-66.
- Bonsignore F. (2008). Il monitoraggio in Emilia Romagna. *ARPA Rivista XI* (1), Supplemento: Il monitoraggio della subsidenza. Esperienze a confronto: 12-13
- Ferretti A., Prati C., Rocca F. (2001), “Permanent Scatterers in SAR Interferometry” - *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 39, 1.