Studio della Subsidenza nel Golfo di Manfredonia (FG) con Ausilio di Tecniche D-InSAR

M. Triggiani[1], A. Refice[2], D. Capolongo[1], F. Bovenga[2], M. Caldara[1]

[1] Dipartimento di Geologia e Geofisica, Università degli Studi di Bari, Via Orabona 4, 70125 Bari, Italy, tel. 080 5442758 E-mail: triggianim@geo.uniba.it
[2] CNR-ISSIA, Via Amendola 122/D, 70126 Bari, Italy, tel. 080 5929432, E-mail: refice@ba.issia.cnr.it

Riassunto

A partire dagli ultimi decenni, la linea di costa del Tavoliere di Puglia è interessata da un forte arretramento. In concomitanza con intensi eventi meteo-marini si è spesso registrata una profonda ingressione delle acque nell'entroterra. Questi fenomeni frequenti, uniti alla presenza di lesioni da cedimenti su strutture antropiche, indicano la presenza di subsidenza su un'area non limitata alla sola fascia costiera.

Per analizzare l'evoluzione recente del fenomeno e determinarne i tassi è stata applicata la tecnica PSI (Persistent Scatterers Interferometry), che permette di ottenere mappe di spostamenti millimetrici della superficie terrestre da lunghe serie di interferogrammi radar, disponibili con una frequenza di circa 1 acquisizione ogni 35 giorni. L'analisi è ristretta a oggetti con forti segnali di ritorno, che generalmente coincidono con manufatti antropici.

In totale sono state analizzate 103 immagini acquisite dai satelliti ERS-1/2 ed ENVISAT, riferite a periodi di acquisizione tra gli anni 1995 e 2000 (ERS) e 2003-2008 (ENVISAT). I risultati indicano la presenza di una deformazione che interessa l'intero intervallo temporale analizzato, spazialmente distribuita a formare una depressione lentiforme centrata sul villaggio turistico Ippocampo, con velocità medie superiori a 20 mm/a e trend in aumento negli ultimi anni.

L'analisi comprende una prima validazione di questi risultati attraverso attività in situ, nonché una pianificazione per un'integrazione delle osservazioni con dati sulle aree più interne del Tavoliere.

Abstract

In the last decades, the coast of the Apulia Tavoliere plain has been subject to a considerable retreat. During strong hydrodynamic and meteorological events, sea waters penetrate deeply inland. Such phenomena, together with the presence of failure damages over anthropogenic structures, indicate the presence of subsidence over an extended area, not limited to the coastal range.

To analyze the recent evolution and rates of occurrence of the phenomenon, Persistent Scatterers Interferometry (PSI) techniques have been applied, to obtain millimetric displacement maps from series of radar interferograms, available with a repeat interval of 35 days. The analysis is restricted to objects characterized by strong radar return signals, generally coinciding with man-made features.

103 ERS-1/2 and ENVISAT scenes have been analysed, with acquisition dates spanning the interval 1995-2000 (ERS) and 2003-2008 (ENVISAT), respectively. Results indicate the presence of deformations affecting the entire temporal interval analysed, spatially distributed to form a "bowl" centered on the Ippocampo village with average rates exceeding 20 mm/y and an increasing trend in the most recent years.

The analysis includes a validation of these results with in situ activities, as well as planning additional observation with data inland of the Tavoliere plain.

Introduzione

In questo lavoro vengono presentati i primi risultati di uno studio volto a determinare la presenza e il tasso di subsidenza lungo la costa del Tavoliere attraverso l'analisi di dati telerilevati. I recenti sviluppi nelle tecnologie di telerilevamento da satellite e la copertura frequente e regolare di vaste aree per mezzo di sistemi di Osservazione della Terra (OT) hanno portato ad un incremento nell'utilizzo delle immagini da satellite per la stima e il monitoraggio di rischi naturali (si veda CE-OS Report, 2000 e riferimenti in esso). Grazie alle capacità dei sistemi radar di poter operare in qualsiasi condizione meteorologica, sia di giorno sia di notte, e di poter misurare con precisione piccole deformazioni al suolo (variazioni di quota di qualche millimetro), le tecniche di interferometria SAR (*synthetic aperture radar*, o radar ad apertura sintetica) risultano interessanti per il rilevamento e il monitoraggio di fenomeni di deformazione al suolo (subsidenza, faglie, frane, ecc.) su vaste aree. Esse risultano quindi un mezzo ideale per fare luce sull'eventuale presenza di subsidenza sull'area di studio, fenomeno suggerito dalla presenza di numerosi indizi. I risultati di questa indagine sono in fase di validazione e confronto con numerosi dati di verità al suolo, perlopiù di natura indiretta (confronto di mappe topografiche, presenza di pozzi, stratigrafia del sottosuolo) e mostrano sempre più chiaramente un fenomeno di subsidenza di natura antropogenica, sovrapposto a subsidenza naturale di entità minore.

Indizi di subsidenza

Il Tavoliere è la seconda pianura alluvionale d'Italia per estensione; la sua costa, per la gran parte sabbiosa, si estende per 50 km tra gli abitati di Manfredonia e Barletta congiungendo il massiccio del Gargano, a nord, con l'altopiano delle Murge a sud-est. Entrambe queste aree appartengono alla piattaforma carbonatica apula, di età mesozoica. La conformazione del golfo, caratterizzata da una falcata profonda, è stata raggiunta in tempi recenti in seguito alla rimonta del mare connessa alla deglaciazione post-würmiana. Nel Neolitico la piana costiera era occupata da una stretta e lunga laguna (Laguna di Salpi, Boenzi et al., 2002) che in seguito a fasi di alluvionamento del II a.C. si è divisa dando luogo a due bacini: il così detto Lago di Salpi a sud e il lago Salso a Nord. Successivamente, durante il XIX e XX secolo, la necessità di rendere l'area più salubre e la richiesta di nuove aree coltivabili hanno reso necessari numerosi interventi di bonifica realizzati deviando i corsi d'acqua, utilizzandone il carico solido per colmare le aree depresse, o, nelle aree più prossime alla costa, spianando le dune. Tali opere si sono concluse a metà del secolo scorso determinando un'area intensamente coltivata separata dalla costa da un basso cordone dunare artificiale. Alcune aree ancora depresse sono utilizzate come bacini evaporanti per la produzione di sale (saline di Margherita di Savoia).

Negli ultimi anni la fascia costiera è in fase di arretramento a causa della diminuzione degli apporti sedimentari necessari al mantenimento dell'equilibrio costiero. Lo smantellamento dell'apparato dunare, la deviazione e sbarramento dei corsi d'acqua ha, infatti, determinato un forte deficit negli apporti. Ne consegue che, in concomitanza di eventi meteo marini ad elevata intensità, le acque penetrano profondamente nell'entroterra inondando le aree coltivate. Tali eventi si stanno ripetendo con frequenze e tassi crescenti. In base a queste osservazioni, è possibile ipotizzare che l'area sia in subsidenza con velocità maggiori rispetto alle aree circostanti. Un esempio di queste aree è rappresentato dalla *salt marsh* che si sta formando alle spalle del villaggio turistico "Ippocampo". Per quest'area, studi condotti su carotaggi hanno già determinato tassi di subsidenza medi dell'ordine di 0,2 mm/a nel corso degli ultimi 125 ka (dati in corso di pubblicazione da parte di uno degli Autori).

Queste osservazioni, unite alla presenza di lesioni tipiche da cedimenti su strutture antropiche quali case poderali e ponti, confermano che il fenomeno è in atto su un'area non limitata alla sola fascia costiera, ma molto più vasta, interessando a fondo l'entroterra.

Ulteriori indicazioni sulle entità del fenomeno vengono dal confronto per differenza fra i rilievi topografici effettuati nell'area dall'I.G.M. (Istituto Geografico Militare) negli anni '50 e dalla Regione Puglia nel 2006. Nonostante la differenza in numero e qualità dei due set di dati di partenza generi artefatti sulle aree montuose della Murgia e del Gargano e un apparente sollevamento di alcuni

canali, la fascia costiera, caratterizzata da morfologia sub-pianeggiante, mostra un quadro più consistente. Si possono, infatti, osservare (Figura 1) differenze di quota superiori al metro per aree attualmente al livello del mare. Tali differenze, anche al netto delle precisioni relative dei due rilievi, possono essere considerate significative. È in effetti possibile riconoscere aree in abbassamento presumibilmente per subsidenza in corrispondenza di aree agricole e urbanizzate, dove lo sfruttamento della falda risulta più intenso.

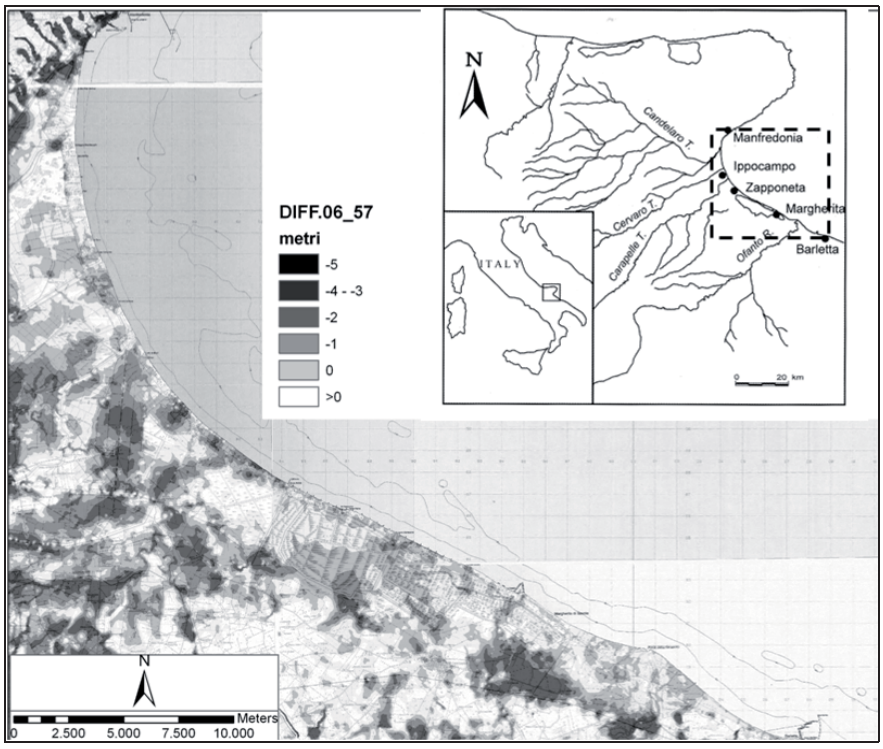

Figura 1. Mappa delle differenze di quota dedotte dai DEM ottenuti dai dati IGM e localizzazione dell'area di studio

Analisi dei dati

Per analizzare l'evoluzione recente del fenomeno e determinarne i tassi si sono analizzati i movimenti verticali dell'area costiera del Tavoliere per mezzo di dati SAR rilevati da satellite, elaborati per mezzo di tecniche di Interferometria Differenziale Multitemporale D-InSAR. In particolare abbiamo utilizzato la tecnica PSI (*Persistent Scatteres Interferometry*) (Bovenga et al., 2002) per stimare i tassi di subsidenza analizzando una serie di acquisizioni SAR. Le tecniche PSI, sviluppate presso il politecnico di Milano (Ferretti et al., 2001), permettono di ottenere informazioni di fase da serie di interferogrammi SAR coregistrati, interessanti diversi anni e realizzati da diverse direzioni con elevate *baseline*, restringendo l'analisi a pixel contenenti oggetti con forti segnali di ritorno. Sfruttando la stabilità temporale del segnale di ritorno prodotto dagli oggetti target, è possibile eliminare dalle immagini i contributi di fase spuri come gli artefatti di fase atmosferici e gli errori nel modello digitale del suolo (DEM) usato per determinare il contributo topografico alla fase. Tali oggetti stabili generalmente coincidono con manufatti antropici, perciò la tecnica dei PSI risulta particolarmente efficace sui centri urbani. La bassa densità dei manufatti antropici nell'area di studio ha

determinato la necessità di svolgere l'analisi dividendo l'area in zone ristrette, centrate su centri urbani o gruppi di manufatti.
In totale sono state analizzate 103 immagini acquisite dai satelliti ERS-1/2 e ENVISAT, raggruppate in tre serie in base alla geometria di acquisizione: discendente (48 ERS-1/2) e ascendente (25 ERS 1/2 e 30 ENVISAT). Le immagini sono riferite a periodi di acquisizione tra gli anni 1995 e 2000 per le immagini ERS e 2003-2008 per le ENVISAT, con una frequenza di ripetizione di circa 1 acquisizione ogni 35 giorni.
Le tre serie, che interessano approssimativamente la stessa area centrata sul Tavoliere, sono state processate indipendentemente con la modalità già esposta concentrandosi in questa prima fase di studio sull'area costiera.
Il metodo dei *Persistent Scatterers* si è dimostrato estremamente valido in aree ad elevato numero di diffusori (aree urbane), mentre richiede una fase di sperimentazione e validazione per le aree dove i punti di riferimento permanenti sono limitati, come le aree extraurbane e le aree costiere.
In queste aree, infatti, il numero limitato di bersagli stabili obbliga a far ricorso a metodologie robuste di stima e rimozione dei contributi di fase spuri come quello atmosferico, adottando modelli semplici di tipo lineare. Tale approssimazione si può ritenere valida solo su piccole distanze, quindi l'analisi viene effettuata su aree più piccole (*patch*), che vengono analizzate indipendentemente. Tipicamente, ogni *patch* copre un gruppo quanto più omogeneo possibile di bersagli stabili e si estende su un'area al suolo di qualche km^2. La natura del territorio, nel caso specifico in esame, fa sì che aree di questo genere si trovino, sulla fascia costiera, inframmezzate ad aree a bassissima densità di manufatti antropici, e quindi quasi prive di oggetti stabili. In seguito, quindi, ogni elaborazione PSI indipendente necessita di almeno un punto di controllo, cioè un bersaglio permanente con posizione e velocità noti, per calibrare e raccordare tra loro le varie *patch*. Individuare, tra i dati di verità a terra, un oggetto con tali caratteristiche per ogni patch può rivelarsi un compito relativamente arduo.

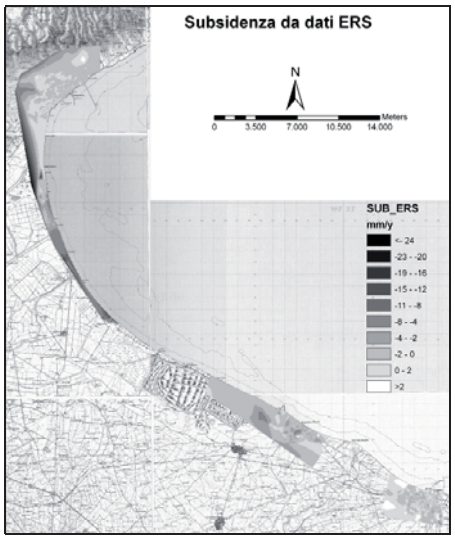

Figura 2. Mappa di subsidenza da dati ERS

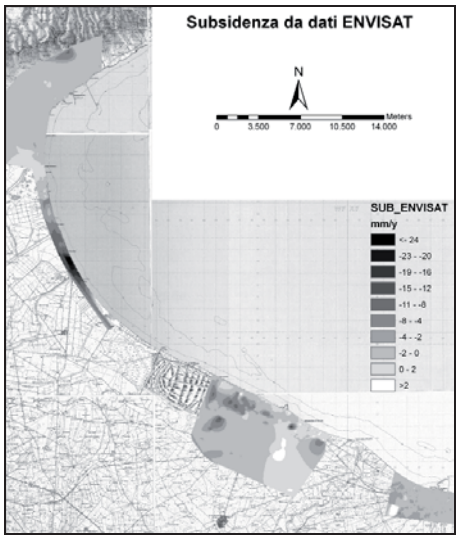

Figura 3. Mappa di subsidenza da dati ENVISAT

Si è cercato, per questo, di confrontare i risultati con dati derivanti da rilievi GPS ottenuti da una campagna di monitoraggio realizzata tra il 2006 il 2008 della rete di livellazione di alta precisione dell'Istituto Geografico Militare (IGM) e dei vertici di raffittimento realizzati nell'ambito 2 del POR Puglia "Coste" 2000-2006. Tale operazione ha dato finora dei risultati non esaurienti, poiché solo pochi dei punti rilevati sono collocati in corrispondenza delle *patch* analizzate e il breve inter-

vallo di osservazione non permette una stima attendibile del fenomeno. Eventuali campagne future potrebbero essere effettuate tenendo conto di queste necessità, ed essere quindi di aiuto nel risolvere il problema.
Ciononostante, basandosi su misure topografiche puntuali su alcuni oggetti noti, nonché su osservazioni ancillari di tipo indiretto, si è riusciti ad ottenere un quadro coerente del fenomeno nel suo complesso. Essendo quest'ultimo omogeneo a grande scala, e per facilitare la comprensione dei risultati da parte degli *end-users*, si è proceduto ad interpolare i dati puntuali della velocità media di subsidenza, tramite l'algoritmo *natural neighbor* in ambiente ArcMap, ottenendo due mappe, relative rispettivamente alle informazioni dei dati ERS (Figura**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** 2) ed ENVISAT (Figura 3). Entrambe le mappe indicano la presenza di una deformazione che interessa l'intero intervallo temporale analizzato, spazialmente distribuito a formare una depressione lentiforme centrata sul villaggio turistico Ippocampo dove si raggiungono i massimi tassi di subsidenza, superiori ai 20 mm/anno. L'area dell'Ippocampo è quella che lungo la fascia costiera sembra risentire maggiormente del fenomeno, con velocità in aumento negli ultimi anni, come mostra il confronto fra dati ERS ed ENVISAT (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**). Il confronto delle mappe di velocità recenti, ottenute dai dati telerilevati, con la differenza dei DEM, che indica le zone che hanno subito abbassamenti dell'ordine del metro o più in negli ultimi 50 anni, mostra anche un apparente spostamento del centro della depressione verso la parte più meridionale del villaggio; in quest'area, in effetti, le abitazioni sono state costruite in tempi più recenti.

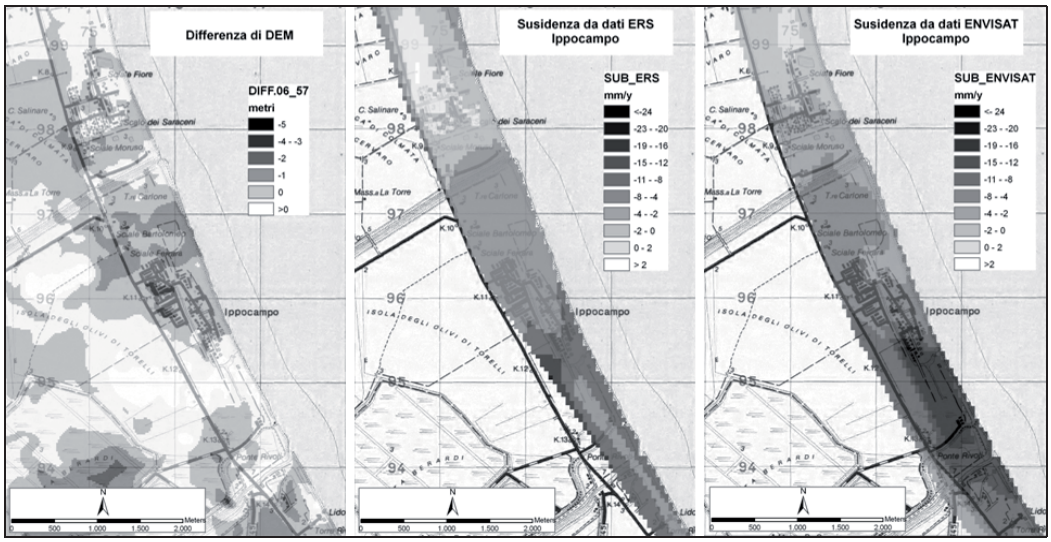

Figura 4. Confronto fra la differenza di DEM e mappe di subsidenza nell' area dell'Ippocampo

Conclusioni e sviluppi futuri
Sono stati indagati indizi pregressi e recenti circa un presunto fenomeno di subsidenza esteso alla fascia costiera della pianura del Tavoliere di Puglia. Dal confronto di dati topografici presi a decenni di distanza emerge la presenza di zone attualmente al livello del mare e prima poste a quote assolute di qualche metro. Ciò, assieme ad altri indizi locali, suggerisce la presenza di aree affette da subsidenza accentuata. L'analisi di dati radar telerilevati, pur non senza difficoltà connesse alla scarsità di manufatti antropici necessari ad ancorare le misure, rivela un quadro coerente con questi indizi. Mappe interpolate dalle misure puntuali di subsidenza per gli ultimi 15 anni rivelano la presenza di una depressione lentiforme di subsidenza centrata sul villaggio turistico Ippocampo, con

tassi massimi dell'ordine dei 20 mm/anno. I tassi di subsidenza sono in accordo con i tassi medi dedotti euristicamente dalle osservazioni sull'area precedentemente illustrate e con altre analisi condotte utilizzando tecniche e dati simili (Salvi et al., 2007).
Questi risultati preliminari fanno ipotizzare la presenza nell'area di tre tipologie di subsidenza coesistenti: una subsidenza naturale connessa a fenomeni tettonici o isostatici che si manifesta con fenomeni lenti e su scala geologica; una subsidenza naturale più pronunciata legata ai fenomeni di compattazione dei depositi sedimentari recenti sotto l'azione del peso litostatico ed infine una subsidenza più accelerata, di origine antropica, connessa con l'intenso sfruttamento della falda. A quest'ultima si somma, localmente, il carico degli interventi edilizi che ha determinato lo spostamento a meridione della area in subsidenza dell'Ippocampo e la formazione della *salt marsh*.
È in corso la validazione dei risultati ottenuti attraverso l'estensione delle aree di analisi, oltre ad attività di monitoraggio in situ. Lo studio proseguirà, inoltre, estendendo l'analisi interferometria anche a parti più interne del Tavoliere.

Bibliografia

F. Boenzi et al. (2002), "History of the Salpi lagoon-sabhka (Manfredonia Gulf, Italy)". *Il Quaternario*, 14(2001), 93-104.

CEOS Report (2000). Earth Observation for Landslide Hazard Support, in Report of the CEOS Disaster Management Support Group, http://disaster.ceos.org/landslide.htm

F. Bovenga et al. (2004), "SPINUA: a flexible processing chain for ERS / ENVISAT long term interferometry", *Proceedings of ESA-ENVISAT Symposium*, Salzburg, Austria, 6-10 September.

A. Ferretti, C. Prati, F. Rocca (2001), "Permanent Scatterers in SAR Interferometry". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39, 8–20.

S. Salvi et al. (2007), "The VELISAR initiative for the measurement of ground velocity in italian seismogenic areas", *EGU General Assembly*, Wien, Austria, 15-20 April, 2007.