

Integrazione di dati SAR e GNSS per lo studio della subsidenza nel Delta del Po

Massimo Fabris (^a), Vladimiro Achilli (^a), Nicola Cenni (^b), Simone Fiaschi (^{a,c}), Mario Floris (^b), Andrea Menin (^a), Michele Monego (^a), Paolo Riccardi (^d)

(^a) Laboratorio di Rilevamento e Geomatica – Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Università degli Studi di Padova, via Marzolo, 9 – 35131 Padova, *e-mail: (massimo.fabris)(vladimiro.achilli)(andrea.menin)(michele.monego)@unipd.it*

(^b) Dipartimento di Geoscienze, Università degli Studi di Padova, via Gradenigo, 6 – 35131 Padova, *e-mail: nicola.cenni@unipd.it, mario.floris@unipd.it*

(^c) School of Earth Sciences, UCD University College Dublin, Belfield, Dublin, Ireland, *e-mail:* simone.fiaschi@ucd.ie

(^d) Sarmap SA, Cascine di Barico, Purasca, Switzerland, *e-mail: priccardi@sarmap.ch*

Riassunto

Il Delta del Po è da sempre interessato da importanti fenomeni di subsidenza di origine prevalentemente antropica. Le diverse politiche di gestione delle acque e delle estrazioni di idrocarburi attuate a partire dagli ultimi decenni del secolo scorso, hanno permesso di ridurre gradualmente il fenomeno. Attualmente nel Delta si registrano abbassamenti del suolo significativamente più contenuti rispetto al passato, ma ancora superiori rispetto a quelli provocati dai processi naturali.

Nell'ambito di questo lavoro, sono state utilizzate tecniche avanzate di interferometria radar satelliare (A-DInSAR) per analizzare immagini COSMO-SkyMed ad alta risoluzione (3 m x 3 m) acquisite dal 2012 al 2017. Vengono inoltre presentati i primi risultati ottenuti dall'analisi delle osservazioni GNSS acquisite sui vertici della Rete PODELNET (PO-DELta-NETwork). Questa infrastruttura è stata materializzata nel giugno del 2016 e i risultati proposti sono stati ottenuti confrontando le posizioni dei vertici stimate a partire dalle osservazioni acquisite nel giugno 2016 (campagna 0) e nel giugno 2018 (campagna 1). La rete è costituita da 46 vertici, la cui posizione verrà monitorata con cadenza biennale, e spazialmente si estende da Porto Caleri (Rovigo) al Lido di Volano (Ferrara) in direzione Nord-Sud e ad Ovest fino alla cittadina di Adria (Rovigo).

Nel lavoro vengono inoltre presentate le stime preliminari delle coordinate dei vertici ottenute mediante il software scientifico Gamit/Globk, ed una prima valutazione dei valori di subsidenza stimata confrontando i risultati della campagna del 2016 con quella del 2018.

Abstract

The Po River Delta is interested by significant subsidence phenomenon mainly due to anthropic activities. Different managements of the hydraulic network and the methane-water extraction activities that took place in the last decades of the last century, allowed the reduction of the subsidence rates. At present,



in the study area are recorded subsidence rates significantly lower than in the past, but still higher than the ones caused by natural processes.

In this work, were used Advanced Differential radar Interferometry (A-DInSAR) techniques to process high resolution (3 m x 3 m) COSMO-SkyMed images acquired from 2012 to 2017. Moreover, here are presented the first results of a new GNSS geodetic network PODELNET (PO-DELta-NETwork), planned, materialized and measured in 2016: the network, that extend from Porto Caleri (Rovigo) to the Lido di Volano (Ferrara) in North-South direction and to the small town of Adria (Rovigo) to the West, consists of 49 points that will be measured every 2 years.

In the work are presented also the preliminary estimations of the points coordinates obtained with Gamit/Globk software, and a first evaluation of the subsidence values by comparing the results of the 2016 and 2018 surveys.

Introduzione

Il Delta del Po, è una delle zone più fragili del territorio italiano (Simeoni, Corbau, 2008) e ad elevato rischio di allagamenti a causa della combinazione tra subsidenza (naturale ed antropica) ed innalzamento del livello medio del mare, previsto in crescita per i prossimi decenni (Carbognin et al., 2011; Vibilić et al., 2017).

La subsidenza antropica, molto elevata durante il periodo di estrazione delle acque metanifere (anni '40 e '50), negli ultimi anni si è assestata a valori più ridotti, anche se, in alcune zone, presenta ancora velocità significativamente elevate.

Mentre nel passato la misura delle deformazioni verticali veniva effettuata quasi esclusivamente mediante la livellazione geometrica, oggi vengono utilizzate diverse metodologie che, integrando i metodi classici, forniscono dati di elevata precisione e risoluzione con tempi di acquisizione e costi molto più ridotti (Fabris et al., 2014). Un esempio è costituito dalle tecniche A-DInSAR (Advanced Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry) che permettono l'elaborazione di immagini radar acquisite in tempi diversi valutando spostamenti di pochi mm lungo la linea di vista del satellite (LOS – Line Of Sight) (Berardino et al., 2002; Costantini et al., 2017).

Anche le misure GPS e GNSS, ripetute in periodi diversi sugli stessi vertici, possono fornire risultati di elevata precisione adottando opportune procedure di acquisizione ed elaborazione dei dati.

Nell'area costiera veneto-romagnola le tecniche A-DInSAR sono state utilizzate recentemente da diversi autori (Bock et al., 2012; Tosi et al., 2016; Fiaschi et al., 2017). In particolare, Fiaschi et al. (2018) hanno elaborato immagini SAR dei satelliti ERS-1/2 (1992-2000), ENVISAT (2004-2010) e Sentinel-1A/B (2014-2017) focalizzandosi sull'area del Delta del Po: i risultati, validati mediante confronti con gli spostamenti ottenuti da livellazione geometrica e i dati delle stazioni GPS permanenti disponibili, hanno evidenziato velocità massime di abbassamento lungo la costa nell'ordine di 15 mm/anno, con possibili effetti negativi sulle infrastrutture poste a protezione del territorio dagli allagamenti.

La medesima area è stata oggetto di studi (e.g. Baldi et al., 2009; Cenni et al., 2013) condotti mediante l'analisi dei dati GNSS acquisiti dalle stazioni



permanenti ivi ubicate, ed in particolare dei siti: Taglio di Po (TGPO), Porto Tolle (PT01) e Codigoro (CODI).

In questo lavoro, le tecniche A-DInSAR e GNSS vengono utilizzate congiuntamente per tentare di migliorare la descrizione spaziale e temporale del fenomeno di subsidenza nel Delta del Po e per poter monitorare strutture sensibili quali gli argini di contenimento. Infatti, mentre i dati Sentinel-1A/B, utilizzati in precedenti alvori, sono caratterizzati da una risoluzione a terra (pixel) di circa 18 m x 18 m, quelli COSMO-SkyMed hanno risoluzione molto maggiore, pari a 3 m x 3 m, che permette di analizzare con maggiore dettaglio singole parti di strutture affette da instabilità e al tempo stesso di studiare più precisamente il fenomeno di subsidenza.

Inoltre, lo sviluppo della rete PODELNET, fornisce importanti vincoli per migliorare l'analisi interferometrica e incrementare il numero di punti su cui è possibile eseguire un confronto tra i risultati delle due tecniche.

Elaborazione dei dati COSMO-SkyMed

Il dataset COSMO-SkyMed utilizzato in questo lavoro è costituito da 86 immagini acquisite ogni 16 giorni con orbita discendente, dal 13 Marzo 2012 al 19 Settembre 2017. Le immagini sono disponibili in banda X (lunghezza d'onda di 3.1 cm) in modalità StripMap, con la quale è possibile ottenere una risoluzione a terra di circa 3 m x 3 m.

L'elaborazione dei dati è stata effettuata tramite la tecnica Permanent Scatterers (PS) (Ferretti et al. 2001) implementato nel software SARscape. I risultati ottenuti sono riportati come mappe delle velocità ricavate lungo la LOS, dalle quali è possibile determinare sia l'estensione delle aree maggiormente affette da subsidenza sia l'andamento degli spostamenti nel tempo.

In Figura 1 viene riportata la mappa delle velocità ottenuta nel settore nord del Delta del Po: le velocità sono classificate in cinque categorie, nelle quali i valori negativi (dal giallo al rosso) indicano subsidenza, mentre i valori positivi (in azzurro) indicano sollevamento. I valori compresi fra -1.5 mm/anno e +1.5 mm/anno (in verde) sono considerati come stabili. L'elevato numero e densità dei punti misurati permette il monitoraggio non solo di grandi centri urbani ma anche di strutture minori, come ad esempio gli argini o le strade (Figura 2). Questo permette di caratterizzare con maggior precisione la distribuzione spaziale della subsidenza e verificare quali strutture sono maggiormente a rischio.

I risultati preliminari ottenuti mostrano tassi di subsidenza piuttosto elevati, soprattutto nella zona centrale dell'area di studio e lungo gli argini di difesa marini (a nord) e fluviali (a sud). Sull'isola di Albarella (nord est in Figura 1) è possibile notare come la subsidenza sia localizzata in fasce, probabilmente a causa di diversi gradi di consolidazione dei sedimenti nel sottosuolo.





Figura 1 - Mappa delle velocità misurate lungo la LOS ricavata dal processamento PS dei dati COSMO-SkyMed nel settore nord del Delta del Po



Figura 2 - Dettaglio raffigurante l'elevata capacità dei dati COSMO-SkyMed nell'individuzione e monitoraggio di elementi strutturali di difesa



La rete GNSS

Nel luglio 2016, nell'ambito del Progetto di Ateneo dell'Università degli Studi di Padova dal titolo "High resolution geomatic methodologies for monitoring subsidence and coastal changes in the Po Delta area", in collaborazione con l'Unità di progetto Sistema informativo territoriale e cartografia della Regione Veneto, dell'U.O. Genio Civile di Rovigo e dell'IGMI, è stata istituita e misurata mediante tecnica GNSS una nuova rete di 46 vertici per raffittire la precedente rete IGM95 (rete PODELNET).

A guesta nuova rete si affiancano anche le 3 stazioni GNSS permanenti operative da alcuni anni nell'area del Delta del Po. La rete è stata progettata tenendo in considerazione alcuni importanti vincoli, tra cui il riutilizzo di vertici appartenenti ad altre infrastrutture già presenti sul territorio, un'interdistanza tra i punti limitrofi inferiore ai 10 Km e la possibilità di misurare la posizione del punto utilizzando la tecnica GNSS. Il primo rilievo della rete è stata eseguito nel giugno 2016, utilizzando 6 ricevitori GNSS (Leica System 1200 e Leica Viva GNSS - GS14 e CS15) con posizionamento statico minimo di 3 ore per la misura di ciascuna linea di base, ed un intervallo di campionamento di 15s. Nel luglio 2018 è stato effettuato un secondo rilievo, ripetendo le misure nella medesima configurazione di rete utilizzata durante la campagna eseguita nel 2016. I due rilievi sono stati effettuati nello stesso periodo dell'anno per evitare che eventuali fenomeni con andamento stagionale potessero influenzare i risultati.

L'elaborazione delle osservazioni GNSS è stata effettuata utilizzando il programma Gamit – Globk (Herring et al. 2015a,b). I dati acquisiti dalle stazioni GNSS permanenti sono stati analizzati insieme a quelli provenienti dai 46 vertici della rete PODELNET. La posizione dei siti permanenti è stata utilizzata come vincolo per inquadrare nello stesso sistema di riferimento i rilievi eseguiti nelle due diverse campagne e in giorni differenti. Tali posizioni sono state estrapolate considerando l'andamento lineare di lungo periodo, gli eventuali segnali periodici e discontinuità determinate analizzando le serie temporali delle posizioni delle 3 stazioni permanenti utilizzando la procedura descritta in Cenni et al. (2012, 2013). Si è scelto di non utilizzare le reali coordinate delle stazioni permanenti ottenute analizzando le osservazioni acquisite da queste ultime, in quanto potrebbero fornire un valore non realistico (outlier) a causa di possibili interferenze fisiche o/e elettromagnetiche sul segnale GNSS.

Al termine della procedura di calcolo le coordinate della posizione dei 46 vertici sono state confrontate tra loro per ottenere una prima stima dei valori di velocità. L'analisi delle due campagne eseguite nel 2016 e nel 2018 è stata effettuata considerando fisse le 3 stazioni di riferimento alle coordinate determinate nel 2016. Questo consente di stimare le velocità di subsidenza relative dei diversi vertici rispetto a quelle delle stazioni permanenti, che risultano essere di -3 mm/anno (Cenni et al. 2013).

Nella Tabella 1 sono riportati i risultati preliminari relativi a 25 vertici per i quali sono disponibili sufficienti osservazioni acquisite durante le campagne del 2016 e del 2018.



Vertice	Latitudine	Longitudine	Velocità (mm/anno)
704N	45,01039773	12,10202819	-16
705N	45,02891915	12,26381893	-1
706N	45,05022066	12,36603129	13
707S	44,94469968	12,12061179	-15
708N	45,10968519	12,24305231	0
712S	44,963338	12,24522627	2
713S	44,95930834	12,41665788	6
714S	44,94483644	12,28258464	-26
715N	45,06588744	12,24824379	-3
720S	44,87426132	12,46300756	1
801S	44,89484888	12,09868201	-1
901N	45,00685596	12,32848199	6
902S	44,9716203	12,49380038	-20
904N	45,09594757	12,32510903	6
905N	45,02785094	12,18823869	-4
906S	44,9003502	12,48596755	-5
907S	44,8871977	12,21053105	7
908N	45,00234578	12,41709268	-6
909N	45,04496793	12,30598531	-6
910S	44,96362442	12,18547996	4
912S	44,85430782	12,17439713	5
913S	44,90366028	12,16433572	-1
914S	44,91993868	12,23033589	0
916S	44,83588784	12,34322504	-4
917S	45,00004341	12,14040826	8

Tabella 1 - Risultati preliminari delle velocità relative rispetto ad un sistema di riferimento locale composto dalle stazioni GNSS permanenti di Taglio di Po (TGPO), Porto Tolle (PTO1) e Codigoro (CODI). Per quanto riguarda la componete verticale le 3 stazioni presentano una velocità di abbassamento di 3 mm/anno che andrà sommata algebricamente ai valori ottenuti nei vertici per ottenere una stima assoluta della velocità.

Le velocità preliminari relative riportate in tabella 1, mostrano abbassamenti del suolo anche significativi in diversi vertici, in accordo con il dato interferometrico.

Da questa analisi preliminare sono stati esclusi i vertici che superano i -30 mm/anno, in quanto questo valori potrebbero essere dovuti a qualche problema sorto in fase di misura o post elaborazione.

Conclusioni

I risultati delle elaborazioni dei dati SAR, integrati con i dati GNSS delle stazioni permanenti di Porto Tolle e Taglio di Po (PTO1 e TGPO) e con quelli della rete geodetica rimisurata nel 2018, evidenziano deformazioni elevate prevalentemente in prossimità della fascia costiera, con valori di spostamento superiori a 10 mm/anno.



Bibliografia

Baldi P., Casula G., Cenni N., Loddo F., Pesci A. (2009), "GPS-based monitoring of land subsidence in the Po Plain (Northern Italy)", *Earth and Planetary Science Letters*, 288: 204-212

Berardino P, Fornaro G, Lanari R, Sansosti E. (2002), "A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40(11): 2375-2383

Bock Y., Wdowinski S., Ferretti A., Novali F., Fumagalli A. (2012), "Recent subsidence of the Venice Lagoon from continuous GPS and interferometric synthetic aperture radar", *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 13, Q03023

Carbognin L., Teatini P., Tosi L., Strozzi T., Tomasin A. (2011), "Present relative sea level rise in the northern Adriatic coastal area". In Marine Research at CNR-Theme 3 "Coastal and Marine Spatial Planning", Brugnoli E., Cavarretta G., Mazzola S., Trincardi F., Ravaioli M., Santoleri R., Edizioni; CNR-DTA: Roma, 1123–1138

Costantini M., Ferretti A., Minati F., Falco S., Trillo F., Colombo D., Novali F., Malvarosa F., Mammone C., Vecchioli F., Rucci A., Fumagalli A., Allievi J., Ciminelli M. G., Costabile S. (2017), "Analysis of surface deformations over the whole Italian territory by interferometric processing of ERS, Envisat and COSMO-SkyMed radar data", *Remote Sensing of Environment*. doi:10.1016/j.rse.2017.07.017

Carbognin L, Tosi L. (2002), "Interaction between climate changes, eustacy and land subsidence in the North Adriatic Region, Italy", Marine Ecology, 23(1): 38-50

Carminati E, Martinelli G. (2002), "Subsidence rates in the Po Plain, northern Italy: the relative impact of natural and anthropogenic causation", Engineering Geology, 66: 241-255

Cenni N., Mantovani E., Baldi P., Viti M. (2012), "Present kinematics of Central and Northern Italy from continuous GPS measurements", *J. Geodyn.*, 58: 62-72

Cenni N., Viti M., Baldi P., Mantovani E., Bacchetti M., Vannucchi A. (2013), "Present vertical movements in central and northern Italy from GPS data: possible role of natural and anthropogenic causes", *Journal of Geodynamics*, 71: 74-85

Fabris M., Achilli V., Menin A. (2014), "Estimation of Subsidence in Po Delta Area (Northern Italy) by Integration of GPS Data, High-Precision Leveling and Archival Orthometric Elevations", *International Journal of Geosciences*, 5: 571-585. doi:10.4236/ijg.2014.56052

Ferretti A., Prati C., and Rocca F. (2001), "Permanent scatterers in SAR interferometry", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39 (1): 8-20

Fiaschi S., Tessitore S., Bonì R., Di Martire D., Achilli V., Borgstrom S., Ibrahim A., Floris M., Meisina C., Ramondini M., Calcaterra D. (2017), "From ERS-1/2 to Sentinel-1: two decades of subsidence monitored through A-DInSAR techniques in the Ravenna area (Italy)", *GISscience & Remote Sensing*, 54 (3): 305–328. doi:10.1080/15481603.2016.1269404



Fiaschi S., Fabris M., Floris M., Achilli V. (2018), "Estimation of land subsidence in deltaic areas through differential SAR interferometry: the Po River Delta case study (Northeast Italy)", *International Journal of Remote Sensing*, doi: 10.1080/01431161.2018.1490977

Herring T.A., King R.W., Floyd M.A., McClusky S.C. (2015a), "GAMIT Reference Manual, GPS Analysis at MIT, Release 10.6", *Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences,* Massachusset Institute of Technology, Cambridge MA.

Herring T.A., Floyd M.A., King R.W., McClusky S.C., (2015b), "Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program", *GLOBK Reference Manual, Release 10.6. Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences*, Massachusset Institute of Technology, Cambridge MA.

Simeoni U., Corbau C. (2008), "A review of the Delta Po evolution (Italy) related to climatic changes and human impacts", *Geomorphology*, doi: 10.1016/j.geomorph.2008.11.004

Tosi L., Da Lio C., Strozzi T., Teatini P. (2016), "Combining L- and X-Band SAR Interferometry to Assess Ground Displacements in Heterogeneous Coastal Environments: The Po River Delta and Venice Lagoon, Italy", *Remote Sensing*, 8: 308. doi:10.3390/rs8040308

Vibilić I., Šepić J., Pasarić M., Orlić M. (2017) "The Adriatic Sea: A Long-Standing Laboratory for Sea Level Studies", *Pure and Applied Geophysics*, 174: 3765–3811. doi:10.1007/s00024-017-1625-8