

Un sistema integrato per il monitoraggio nella pianura costiera veneziana

Diversi fattori hanno contribuito all'abbassamento di Venezia nel secolo scorso (circa 23 cm); tra questi la subsidenza naturale, la subsidenza per estrazione d'acqua di falda, l'innalzamento del medio mare. Le nuove tecniche di monitoraggio altimetrico permettono un controllo dettagliato dei movimenti, non solo del centro storico, ma dell'intera fascia costiera. Tuttavia la mole di dati forniti dalle diverse tecniche richiede una laboriosa fase di omogeneizzazione/calibrazione e un opportuno filtraggio di movimenti connessi a instabilità strutturali locali non rappresentative della subsidenza propriamente detta.

22

Fino a metà degli anni 1990, le livellazioni geometriche sono state il solo sistema di rilievo altimetrico che consentisse di quantificare la magnitudo della subsidenza del comprensorio veneziano. Successivamente sono state affinate le tecniche basate su misure satellitari con il GPS, sia esso differenziale (DGPS) o in continuo (CGPS), e l'analisi di immagini radar di tipo SAR, allargando così il numero dei tecnologie utilizzabili per il monitoraggio della subsidenza di quest'area.

Ciascuna tecnica presenta qualità e limiti diversi. Le livellazioni geometriche forniscono misure di alta precisione su un numero limitato di capisaldi; per la copertura di vasti territori di terraferma richiedono tempi di esecuzione lunghi e hanno costi elevati. Sono ancora molto valide per ristrette aree di particolare interesse, dove le distanze tra i capisaldi sono ridotte.

Le misure DGPS sono più veloci ed economiche delle livellazioni, ma meno accurate e, in genere, riferite a una rete dove i punti di misura sono tra loro molto distanti. L'applicazione del DGPS è particolarmente utile per il collegamento di una rete locale in aree subsidenti a un caposaldo stabile di riferimento, o per effettuare monitoraggi altimetrici speditivi quale strumento di ausilio a pianificazioni territoriali o, ancora, per verificare rapidamente trend di subsidenza noti e dell'ordine dei centimetri/anno.

Il CGPS è molto costoso e quindi in genere può essere utilizzato su pochissimi punti di misura. È comunque di grande utilità in quanto fornisce valori "assoluti" delle componenti verticale e orizzontali dello spostamento.

Nell'interferometria SAR convenzionale (InSAR), effetti di decorrelazione spaziale e temporale limitano la sua applicabilità alle aree urbanizzate. Il principale vantaggio di questa tecnica è che con costi ridotti è possibile analizzare aree anche molto estese e quindi effettuare una caratterizzazione dei movimenti del suolo a livello regionale.

Uno sviluppo della tecnica interferometrica è rappresentata dall'analisi su diffusori puntuali (*Interferometric Point Target Analysis, IPTA*). In questo caso l'interferometria radar viene applicata solo su alcuni punti selezionati in base alla stabilità particolarmente elevata del segnale riflesso lungo le successive riprese da satellite, permettendo così di ovviare in parte al problema della decorrelazione. IPTA richiede per contro l'uso di un data-set di immagini radar più consistente (almeno 25-30) rispetto a InSAR; il maggiore costo che ne deriva è compensato dalla maggiore accuratezza, dalla possibilità di misurare i movimenti verticali anche su aree poco urbanizzate e addirittura in settori privi di riflettori già rilevabili con il radar (ad es. in zone umide e/o agricole) tramite l'installazione di riflettori "artificiali persistenti" ad hoc.

Livellazioni e CGPS risultano comunque ancora oggi di notevole importanza per calibrare i risultati delle tecniche interferometriche che, su analisi a grande scala, risentono di problemi di determinazione accurata delle configurazioni orbitali (*flattening*).

Con l'intendimento di potenziare le possibilità e la qualità del monitoraggio, sia in specifiche aree di interesse che a più ampia scala, è stata quindi sviluppata un'originale procedura di integrazione dei risultati

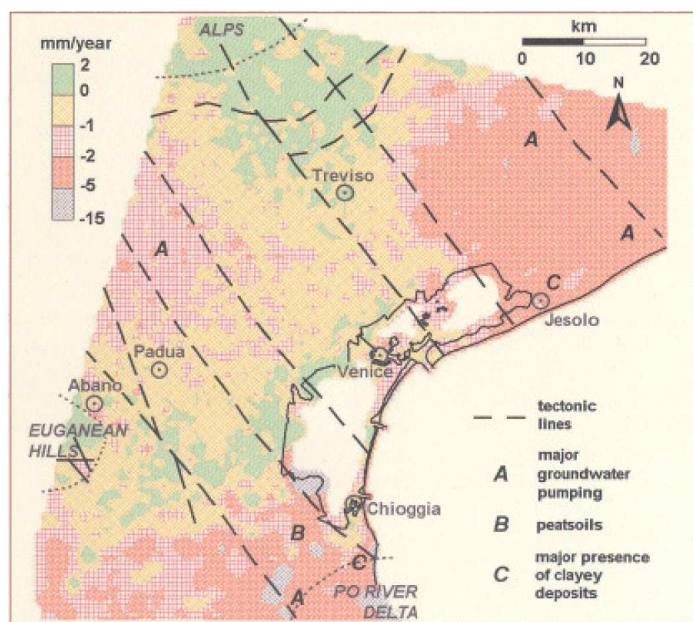


Fig. 1 Velocità media di spostamento (mm/anno) nel decennio 1992-2002 ottenuta nell'area veneta integrando livellazioni, misurazioni GPS e analisi interferometriche di dati satellitari radar. Sono delineate le principali cause degli abbassamenti misurati



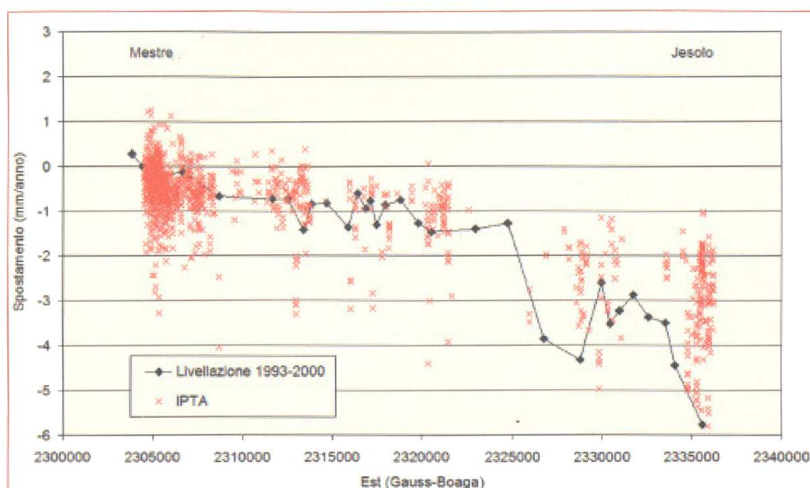


Fig. 2 Velocità medie di spostamento (mm/anno) nel periodo 1992-2000 lungo il margine lagunare da Mestre a Jesolo ottenute con la livellazione e il metodo IPTA

forniti dalle diverse metodologie in modo da superare i limiti di ogni singola tecnica di rilevamento.

Tale sistema di monitoraggio integrato (SIMS) ha permesso di ricostruire gli spostamenti verticali del territorio costiero veneto nel decennio 1992-2002 con elevata risoluzione spaziale e precisione verticale millimetrica (P. Teatini, L. Tosi, T. Strozzi, L. Carbognin, U. Wegmüller and F. Rizzetto, *Mapping regional land displacements in the Venice coastland by an integrated monitoring system*, Remote Sens. Environ., 98(4), 403-413, 2005). I dati utilizzati sono costituiti dalle livellazioni condotte nel periodo 1993-2000 (210 capisaldi), i rilievi DGPS del 1999 e 2004, i trend di spostamento sulle tre stazioni CGPS del Magistrato alle acque di Venezia (MAV) ubicate a Chioggia, Cavallino e Padova, le analisi InSAR e IPTA su rispettivamente 11 e 59 immagini dei satelliti ERS-1/2 che hanno permesso di individuare la velocità di spostamento di 380.000 pixel e 120.000 riflettori.

Tutti i dati altimetrici considerati sono stati omogeneizzati e riportati alla quota di riferimento del caposaldo di Treviso. È stata eseguita la verifica di congruità delle misure di livellazione e GPS eliminando quelle relative a capisaldi abbandonati e di nuova istituzione. I dati SAR sono stati inizialmente calibrati rispetto alle misure altimetriche tradizionali. Successivamente, i dati InSAR sono stati pre-processati su una griglia di 250-250 m mentre quelli forniti da IPTA sono stati filtrati per eliminare gli spostamenti connessi a possibili cedimenti locali delle strutture riflettenti e non ai processi di subsidenza. Tutti i dati



Fig. 4 Uno dei riflettori artificiali installati nella laguna di Venezia per la misura della subsidenza con tecniche di interferometria SAR



Fig. 3 Analisi dello spostamento delle isole dell'area lagunare attraverso il metodo IPTA

sono stati quindi integrati in un unico dataset per procedere alla loro interpolazione. La procedura utilizzata per la mappatura della subsidenza ha previsto l'applicazione di un metodo di *gridding* per generare tramite interpolazione un valore della variabile di interesse in ogni cella di un griglia regolare a partire dalle misure disponibili.

In ambito geologico gli errori presenti nei valori da analizzare, la loro limitatezza, irregolarità e non simultaneità di registrazione richiedono generalmente l'utilizzo di tecniche di interpolazione statistica tipo *kriging*, piuttosto che tradizionali metodi di interpolazione deterministica. Inoltre i metodi geostatistici, oltre a elaborare in modo obiettivo tutte le informazioni disponibili per mezzo di funzioni tipo variogramma o covarianza, forniscono anche una valutazione sull'attendibilità del valore ricostruito.

Dopo opportune elaborazioni preliminari, si è stabilito di utilizzare una griglia regolare con maglie di 500 m di lato ottenendo la mappa riportata in figura 1.

La figura 2 fornisce un esempio di confronto tra i risultati della livellazione e del metodo IPTA lungo la linea, da cui si può osservare la coerenza nei trend rilevati e la presenza di diffusori radar affetti da spostamenti localizzati non imputabile a processi a scala regionale.

Il metodo IPTA si è dimostrato particolarmente efficace per caratterizzare gli spostamenti delle isole ubicate all'interno dell'area lagunare difficilmente monitorabili con altre tecniche (figura 3).

I risultati ottenuti hanno evidenziato che, benché le velocità di abbassamento non raggiungano più i valori preoccupanti degli anni Settanta, sono presenti delle porzioni dell'area costiera veneta ancora oggi caratterizzate da una subsidenza non trascurabile.

Il continuo monitoraggio del territorio è pertanto di grande importanza. In quest'ottica, il MAV ha recentemente finanziato un nuovo studio (Progetto INLET) per estendere il monitoraggio della subsidenza fino a fine 2009 utilizzando le acquisizioni del nuovo satellite Envisat e per integrare le misurazioni IPTA all'interno della laguna di Venezia tramite l'installazione di una rete di riflettori artificiali (figura 4). A questo si aggiunge il progetto ERA che, supportato dalla Provincia di Venezia e dal MAV, focalizzerà l'attenzione sulla porzione centrale della provincia di Venezia dove sono ancora oggi presenti forti emungimenti d'acqua per uso potabile.

Laura Carbognin, Luigi Tosi

Istituto di scienze marine

Consiglio nazionale delle ricerche, sede di Venezia

Pietro Teatini

Dipartimento Metodi e modelli matematici per le scienze applicate
Università di Padova