

Variabilità spaziale della subsidenza attuale nell'area veneziana

Spatial variability of the present land subsidence in the Venice area

TOSI L. (*), TEATINI P. (*)(**), CARBOGNIN L. (*),
BRANCOLINI G. (*), RIZZETTO F. (*)

ABSTRACT – A recent research has provided a high resolution map of the present land subsidence of the Venice coastland (Italy). The map, which refers to the 1992-2002 decade and covers an area of about 100x100 km², has been obtained by the innovative “Subsidence Integrated Monitoring System” (SIMS) that efficiently merges the different displacement measurements obtained by spirit leveling, differential and continuous Global Positioning System (GPS), Synthetic Aperture Radar (SAR)-based interferometry.

The investigation points out a significant spatial variability of the ground vertical movements, both at regional and local scales, and displacement rates ranging from a slight (1-2 mm/yr) uplift to a serious subsidence of more than 10 mm/yr.

Tectonics, differential consolidation of the Pleistocene and Holocene deposits, and human activities, such as groundwater withdrawals, land reclamation of marshes and swamp areas, and farmland conversion into urban areas, superimpose to produce the observed displacements. In this work we have distinguished the displacement components on the basis of the depth of their occurrence.

Deep causes, acting at a depth generally greater than 400-600 m below m.s.l., refer to downward movements of the pre-Quaternary basement and land uplift (up to 2 mm/yr) most likely related to neo-tectonic activity connected with the Alpine thrust belts and a NW-SE fault system.

The displacement factors located in the medium depth interval, i.e. between 400 and 50 m below m.s.l., are of both natural and anthropogenic origin. The former refers to the Medium-Late Pleistocene deposits that exhibit a larger cumulative thickness of clayey compressible layers at the lagoon extremities with respect to the central lagoon area where stiffer sandy formations prevail. Land subsidence due to aquifer exploitation mainly occurs in the north-eastern sector of the coastland where thousands of active wells are located.

In a 10-15 km wide coastal strip thickness, texture, and sedimentation environment of the Holocene deposits play a significant role in controlling shallow causes of land subsidence. Other factors that contribute in increasing land sinking at a smaller areal extent are the salinization of clay deposits due to saltwater intrusion and biochemical oxida-

tion of outcropping peat soils. Even the load of buildings and structures after the conversion of farmland into urbanized areas cause local shallow compaction.

PAROLE CHIAVE: subsidenza, sollevamento del suolo, variabilità spaziale, Venezia.

KEY WORDS: land subsidence, spatial variability, uplift, Venice.

1. - INTRODUZIONE

Fino alla fine del secolo scorso, le livellazioni geometriche sono state il solo metodo di rilievo altimetrico che consentisse di misurare correttamente l'entità della subsidenza “moderna” dell'area veneziana.

Verso la fine degli anni 1990 sono state sperimentate ed affinate le tecniche di misura che utilizzano le piattaforme satellitari: il GPS differenziale (DGPS) e in continuo (CGPS), il radar ad apertura sintetica (SAR) per l'interferometria differenziale tradizionale (InSAR) e l'analisi interferometrica su punti persistenti (IPTA).

Per potenziare le possibilità e la qualità del monitoraggio, sia in specifiche aree di interesse che a più ampia scala, nell'ambito del Progetto VENEZIA (2001-2003) e del Progetto INLET (2006-2009), finanziati rispettivamente dall'Agenzia Spaziale Europea e dal Magistrato alle Acque di Venezia e condotti da ISMAR-CNR, DMMMSA-UniPD e Gamma Remote Sensing-AG, è stato sviluppato il *Subsidence Integrated Monitoring System* (SIMS), un'originale procedura di integrazione dei risultati forniti dalle diverse metodologie (livellazione, CGPS, DGPS, InSAR e IPTA) in grado di superare i limiti di ogni singola

(*) Istituto di Scienze Marine-Consiglio Nazionale delle Ricerche, Castello 1664/a, 30122 Venezia (I)

(**) Dip. di Metodi e Modelli Matematici per le Scienze Applicate - Università di Padova, via Trieste 63, 35121

tecnica di rilevamento (TEATINI *et alii*, 2005).

Con questo metodo è stato possibile eseguire una analisi accurata della vasta area costiera veneta (circa 100x100 km²) compresa tra le foci dei fiumi Adige e Tagliamento e le colline euganee e trevigiane, dalla quale è emersa la forte variabilità dei movimenti verticali sia a scala “regionale” che “locale”.

Di seguito vengono sintetizzati alcuni risultati di una ricerca in corso mirata all’analisi della relazione tra la variabilità spaziale della subsidenza e delle componenti, naturali ed indotte, che la producono. Le forzanti sono esaminate in funzione della loro profondità.

Questa analisi è stata possibile grazie all’elevata risoluzione spaziale e all’accuratezza verticale dei dati altimetrici disponibili (TOSI *et alii*, 2000; TEATINI *et alii*, 2005) nonché alle numerose nuove informazioni sull’assetto geologico ed idrogeologico, derivanti da recenti progetti come il CARG (Fogli “Venezia” e “Chioggia-Malamocco”), Co.Ri.La. VOSS e 3.16, VECTOR – Cliven e ISES.

2. – RISULTATI

La mappa dei movimenti verticali del suolo per il periodo 1992-2002 è riportata in figura 1. La variabilità spaziale a scala “regionale” del processo di subsidenza è ben evidente: le velocità di subsidenza comprese tra 1 e 2 mm/anno nel settore costiero centrale aumentano fino a 10 mm/anno procedendo verso il settore costiero nord-orientale e quello meridionale. Sollevamenti sono osservati a nord di Treviso e sud di Padova.

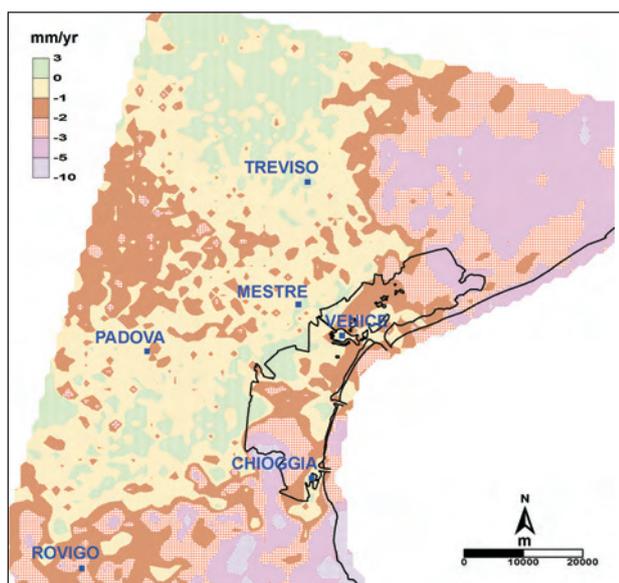


Fig. 1 - Velocità di spostamento verticale del suolo (mm/anno) relativo al periodo 1992-2002; valori negativi indicano subsidenza (da TEATINI *et alii*, 2005).
- Ground vertical movement velocities (1992-2002); negative values mean land subsidence (after TEATINI *et alii*, 2005).

2.1. – COMPONENTI PROFONDE

Il contributo dovuto alle componenti profonde (indicativamente sotto i 400-600 m), che agiscono a scala “regionale”, è dato da:

$$\eta_n = \eta_t + \eta_{sl} + \eta_c + \eta_{gia}$$

dove η_t è il contributo della tettonica, η_{sl} il carico dei depositi, η_c la compattazione dei sedimenti e η_{gia} l’assetto isostatico per la deglaciazione pleistocenica. CARMINATI & DI DONATO (1999) e CARMINATI *et alii* (2003) riportano per l’area veneziana valori di subsidenza naturale totale calcolati per l’intera serie quaternaria compresi tra -0.9 a -1.6 mm/anno.

Per quanto riguarda la componente dovuta alla tettonica, si è valutata la possibilità di correlazione tra le variazioni dei movimenti del suolo e la posizione di linee tettoniche regionali. Lungo la sezione di figura 2, ad esempio, le principali variazioni dello spostamento altimetrico, filtrato delle componenti locali, sembrerebbero essere in relazione con la presenza di faglie.

2.2. – COMPONENTI MEDIE

Le componenti della subsidenza che agiscono a media profondità (tra 400-600 e 50 m circa) sono sia naturali che indotte ed agiscono a scala “regionale”.

Un contributo naturale è la variabilità litologica dei depositi del Pleistocene medio-superiore nell’area lagunare. In figura 3 è riportato lo spessore cumulato dei depositi argillosi presenti fino a circa 400 m di profondità. La maggior presenza di sedimenti più comprimibili nei settori nord e sud rispetto a quello centrale, dove invece prevalgono i depositi sabbiosi, può giustificare parte delle variazioni del *trend* osservato in figura 1.

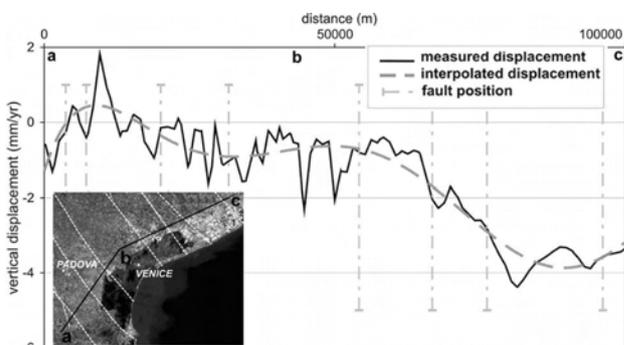


Fig. 2 - Relazione tra i movimenti del suolo 1992-2002 e la posizione di linee tettoniche. Nell’immagine satellitare sono indicate le posizioni delle faglie e la traccia del profilo (da TOSI *et alii*, 2009, modificata).
- Vertical displacements obtained by slicing the map of figure 1 along the black alignment shown on the right. The dashed line represents the measured values and the continuous line their large scale behaviour (modified after TOSI *et alii*, 2009).



Fig. 3 - Mappa dello spessore cumulativo (m) dei depositi argillosi nei primi 350 m di sottosuolo (da TOSI *et alii*, 2009, modificata).

- Cumulative thickness (m) of the clayey deposits in the upper 350 m depth of the Venice sedimentary sequence (modified after TOSI *et alii*, 2009).

Nella pianura veneta costiera sono presenti importanti risorse idriche sotterranee tra 50 e 600 m. Nell'ultimo ventennio, il crescente sfruttamento artesiano in varie parti della pianura veneta ha accelerato la subsidenza nell'area nord-orientale e nei settori a nord di Padova e a sud-ovest di Treviso dove si sono misurati tassi di subsidenza più elevati che altrove (fig. 1).

2.3. – COMPONENTI SUPERFICIALI

Le componenti superficiali (primi 50 m circa) sono sia naturali che indotte e si esplicano a varie scale spaziali.

I depositi olocenici generalmente hanno caratteristiche geotecniche differenti da quelle dei sedimenti tardo-pleistocenici (TOSI *et alii*, 2007a, 2007b). In particolare, l'indice di consolidazione dei depositi marino-lagunari è inferiore a quello dei depositi alluvionali. In figura 4 è riportata la mappa della profondità della base dei depositi olocenici, che in quest'area corrisponde grossomodo a quella del loro spessore, e un grafico con la variabilità dell'assetto della base dell'Olocene assieme a quella delle velocità di spostamento del suolo lungo la sezione a-c. Il trend dei movimenti si correla abbastanza bene a quello degli spessori olocenici; le divergenze sono dovute principalmente alla presenza di particolari strutture geomorfologiche (TOSI *et alii*, 2007a, 2007b; ZECCHIN *et alii*, 2008) e fattori antropici locali.

Anche la subsidenza dovuta alla diffusione di acque salate in formazioni argillose, originariamente sature di acqua dolce, comporta una con-

solidazione della matrice porosa. Il processo di intrusione salina, che in alcuni settori costieri del bacino scolante veneziano coinvolge i primi 30-50 m di sottosuolo, può contribuire alla subsidenza osservata. Studi specifici sono attualmente in corso. Altra componente superficiale è il processo di ossidazione biochimica del materiale organico affiorante nelle bonifiche. Questo comporta l'emissione di CO₂ nell'atmosfera con conseguente perdita di massa solida che si traduce in riduzione altimetrica (CARBOGNIN *et alii*, 2006).

Infine, nelle aree di recente sviluppo urbano, la compattazione del suolo indotta dal carico degli edifici assume un ruolo non trascurabile anche se limitato arealmente (figg. 5, 6).

3. - CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Recentemente, con l'utilizzo di tecniche di misura satellitare SAR è stata realizzata la mappa dei movimenti del suolo di una ampia area costiera veneta (100x100 km²). Grazie alla elevata risoluzione spaziale e all'accuratezza verticale del monitoraggio è emerso che il processo subsidenziale si esplica con una forte variabilità spaziale, sia a scala regionale che locale. L'analisi integrata dei dati altimetrici e delle numerose nuove informazioni sul sottosuolo, recentemente acquisite nell'ambito dei Progetti CARG, Co.Ri.La, VECTOR e ISES, ha permesso la caratterizzazione delle componenti della subsidenza dell'area veneziana in funzione della profondità alla quale agiscono.

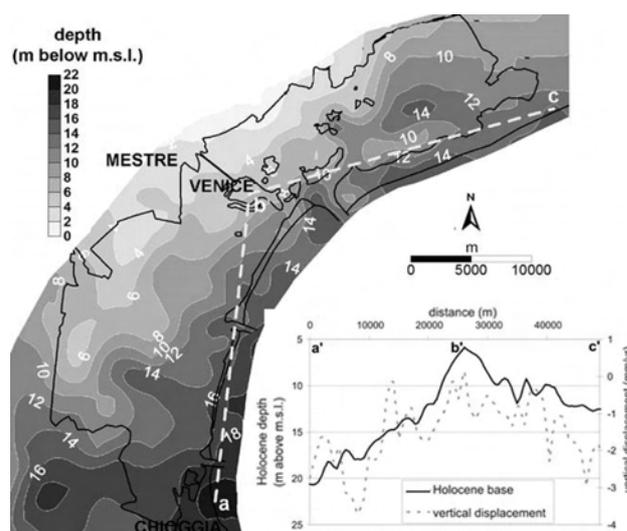


Fig. 4 - Mappa della profondità (m) della base dei depositi olocenici (pressappoco corrispondente a quella del loro spessore) e relazione tra il suo l'assetto e le velocità di subsidenza (mm/a) lungo la sezione a-c (da TOSI *et alii*, 2009, modificata).

- Map of the base of the Holocene deposits (c.a. their thickness, m below m.s.l.) and correspondence between the measured vertical displacements and the thickness of the Holocene deposits along the a-c cross section (modified after TOSI *et alii*, 2009).

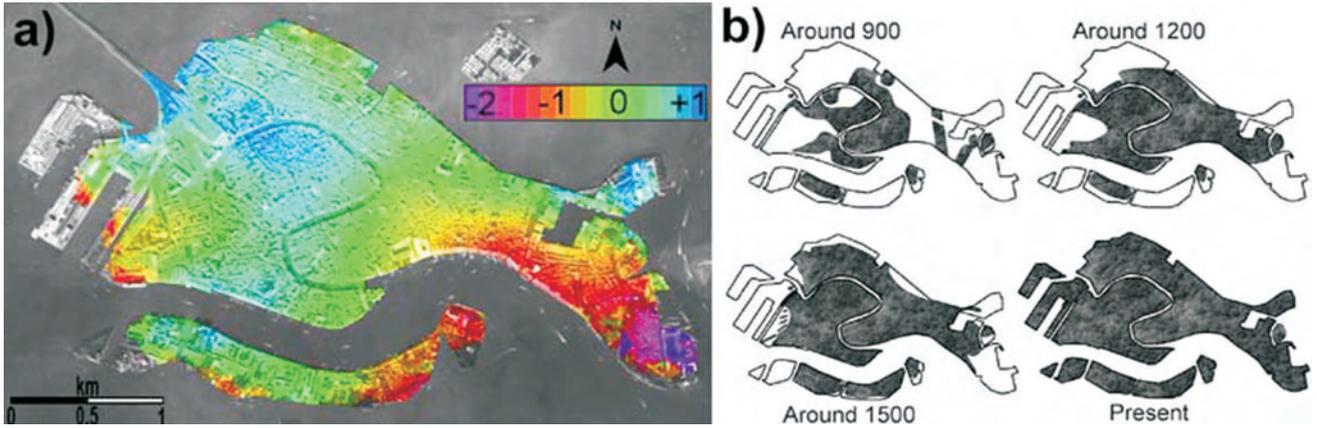


Fig. 5 - a) Movimenti verticali recenti di Venezia (mm/anno); b) Schema dell'espansione urbana di Venezia dal '900 (modificata da TOSI et alii, 2002).
 - a) Rates of ground vertical displacement (mm/yr); b) sketch of the Venice growth from 900 A.D. to the present (modify after TOSI et alii, 2002).

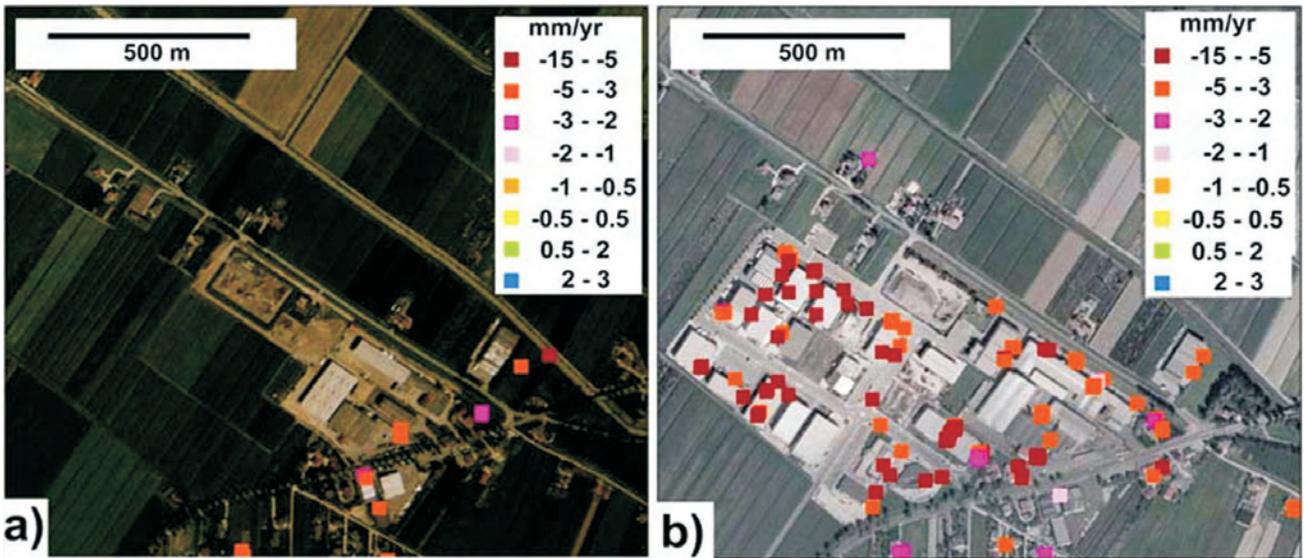


Fig. 6 - Esempio di variazione dei tassi di subsidenza connessi alla recente espansione urbana in un'area rurale vicino a Jesolo: a) 1992-2002, b) 2003-2007 (da TOSI et alii, 2009, modificata).
 - Example of average vertical displacements measured by IPTA in a newly urbanized zone close to Jesolo: a) 1992-2002, b) 2003-2007 (modify after TOSI et alii, 2002).

Ringraziamenti

Lavoro svolto con il contributo dei risultati dei progetti ISES, CARG, Co.Ri.La VOSS, Co.Ri.La 3.16., VECTOR-Cliven, ISES e CNR-RSTL n.156.

BIBLIOGRAFIA

CARBOGNIN L., GAMBOLATI G., PUTTI M., RIZZETTO F., TEATINI P. & TOSI L. (2006) - Soil contamination and land subsidence raise concern in the Venice watersbed, Italy. In: *Management of Natural Resources, Sustainable Development and Ecological Hazards*. C. A. BREBBIA et alii (Eds.), WIT Press, 691-700.

CARMINATI E. & DI DONATO G. (1999) - Separating natural and anthropogenic vertical movements in fast subsiding areas: the Po plain (N. Italy) case. *Geophys. Res. Lett.*, **26**(15): 2291-2294.

CARMINATI E., DOGLIONI C. & SCROCCA D. (2003) - Apennines subduction-related subsidence of Venice (Italy). *Geophys. Res. Lett.* **30** (13), 1717.

TEATINI P., TOSI L., STROZZI T., CARBOGNIN L., WEGMÜLLER U. & RIZZETTO F. (2005) - Mapping regional

land displacements in the Venice coastland by an integrated monitoring system. *Remote Sens. Environ.* **98**: 403-413.

TOSI L., CARBOGNIN L., TEATINI P., STROZZI T. & WEGMÜLLER U. (2002) - Evidences of the present relative land stability of Venice, Italy, from land, sea, and space observations. *Gophys. Res. Lett.* **29**, doi:10.1029/2001GL013211.

TOSI L., RIZZETTO F., BONARDI M., DONNICI S., SERANDREI BARBERO R. & TOFFOLETTO F. (2007a) - Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, Foglio 128 - Venezia. APAT, Dip. Difesa del Suolo, Servizio Geologico d'Italia, SystemCart, pp. 164, Roma.

TOSI L., RIZZETTO F., BONARDI M., DONNICI S., SERANDREI BARBERO R. & TOFFOLETTO F. (2007b) - Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, Foglio 148-149 - Chioggia-Malamocco. APAT, Dip. Difesa del Suolo, Servizio Geologico d'Italia, SystemCart, pp. 164, Roma.

TOSI L., TEATINI P., CARBOGNIN L. & BRANCOLINI G. (2009) - Using high resolution data to reveal depth-dependent mechanisms that drive land subsidence: The Venice coast, Italy. *Tectonophysics*, 10.1016/j.tecto.2009.02.026.

ZECCHIN M., BARADELLO L., BRANCOLINI G., DONDA F., RIZZETTO F. & TOSI, L. (2008) - Sequence stratigraphy based on high resolution seismic profiles in the late Pleistocene and Holocene deposits of the Venice area. *Marine Geology*, **253**: 185-198.