

La subsidenza naturale ed indotta della laguna di Venezia: aspetti consolidati e ricerche di frontiera

Luigi Tosi

Consiglio Nazionale delle Ricerche
Istituto di Scienze Marine
Venezia

Seminario: Eustatismo e subsidenza: stato delle conoscenze e conseguenze attese sulla morfologia e sull'ecosistema della laguna di Venezia, 7 Maggio 2018, Collegio degli Ingegneri di Venezia

Outline

- La subsidenza naturale e antropica, RSLR, alcune evidenze
- Dalle livellazioni all'uso dei satelliti: avanzamento delle conoscenze
- Meccanismi di subsidenza nella costa veneziana
- Sfide in corso e future per migliorare la comprensione del processo

La subsidenza

La subsidenza è l'abbassamento della superficie del suolo causata da processi naturali e indotti dall'uomo che si verificano nel sottosuolo superficiale e profondo.

Le componenti naturali e antropogeniche della subsidenza agiscono a *diverse scale temporali* riflettendo la storia geologica e lo sviluppo umano nel territorio:

- da milioni a migliaia di anni i processi naturali e
- da centinaia a pochi anni le cause indotte.

La subsidenza interessa aree che hanno *estensione spaziale*

- a scala regionale e
- a scala locale.

La subsidenza è un processo generalmente (ma non necessariamente) lento.

Dr. Joseph F. Poland (San Joaquin Valley southwest of Mendota, California)

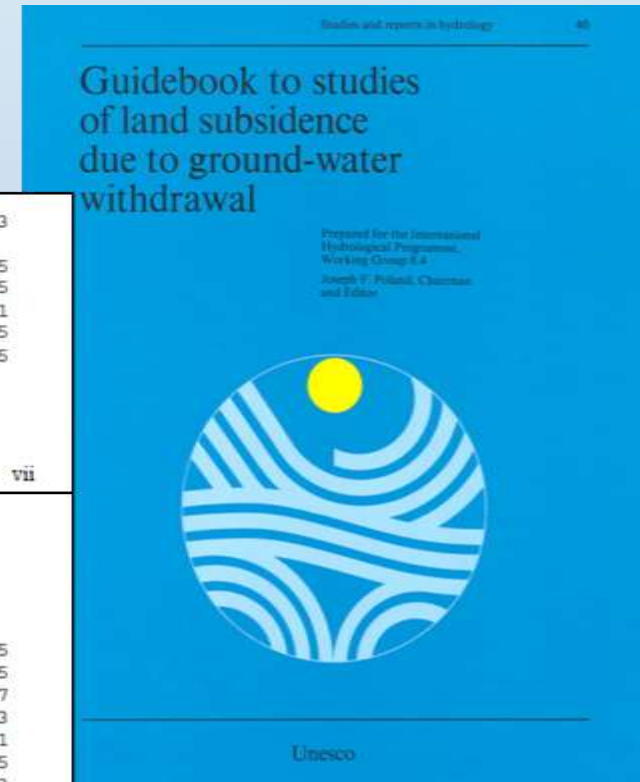


Casi di subsidenza Italiani noti in passato

Negli anni 1960 vennero alla luce tre casi di subsidenza in Italia :

- Venezia
- L'area Ravennate
- Il delta del fiume Po

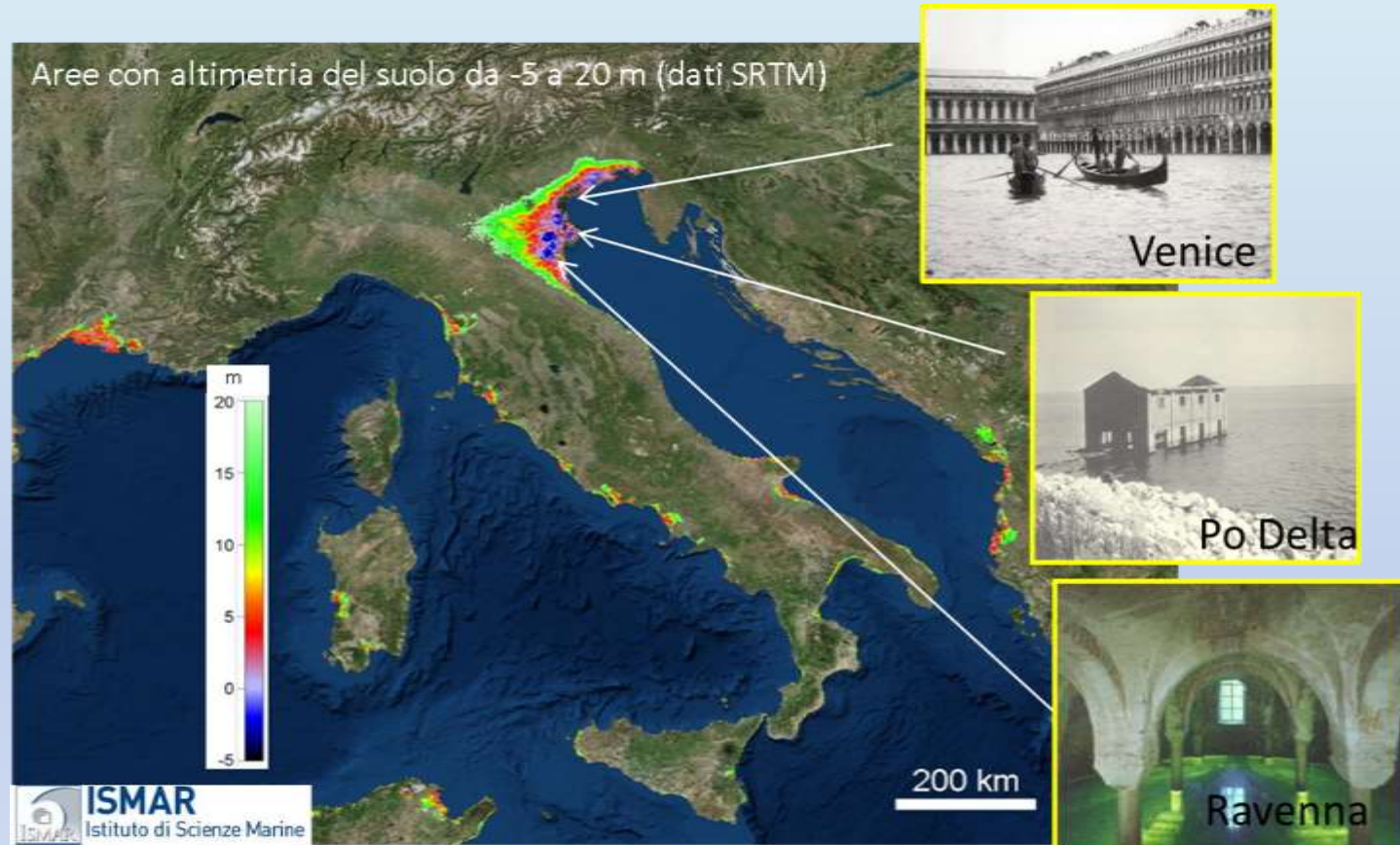
9	Case histories	143
9.1	Latrobe Valley, Victoria, Australia, by C.S. Gloe	145
9.2	Shanghai, China, by S. Luxiang and B. Manfang	155
9.3	Venice, Italy, by L. Carboquin, et al.	161
9.4	Tokyo, Japan, compiled by S. Yamamoto	175
9.5	Osaka, Japan, compiled by S. Yamamoto	185
		vii
<i>Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal</i>		
9	Case histories--Continued	
9.6	Nobi Plain, Japan, compiled by S. Yamamoto	195
9.7	Niigata, Japan, compiled by S. Yamamoto	205
9.8	Mexico, D.F., Mexico, by G. E. Figueroa Vega	217
9.9	Wairakei, New Zealand, by P. F. Bixley	233
9.10	Bangkok, Thailand, compiled by S. Yamamoto	241
9.11	Alabama, U.S.A., by J. G. Newton	245
9.12	Houston-Glaveston Region, Texas, U.S.A., by R. K. Gabrysch	253
9.13	San Joaquin Valley, California, U.S.A., by J. F. Poland and B. E. Lofgren	263
9.14	Santa Clara Valley, California, U.S.A., by J. F. Poland	279
9.15	Ravenna, Italy, by L. Carboquin, et al.	291



Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal
Edited by Joseph F. Poland, 1984

Venezia e Ravenna, per la peculiarità di queste città e l'importanza del loro patrimonio storico e culturale, unico al mondo, sono state studiate in modo approfondito già negli anni 1970 e incluse come esempi principali nella guida di J.F. Poland, edita dall'UNESCO.

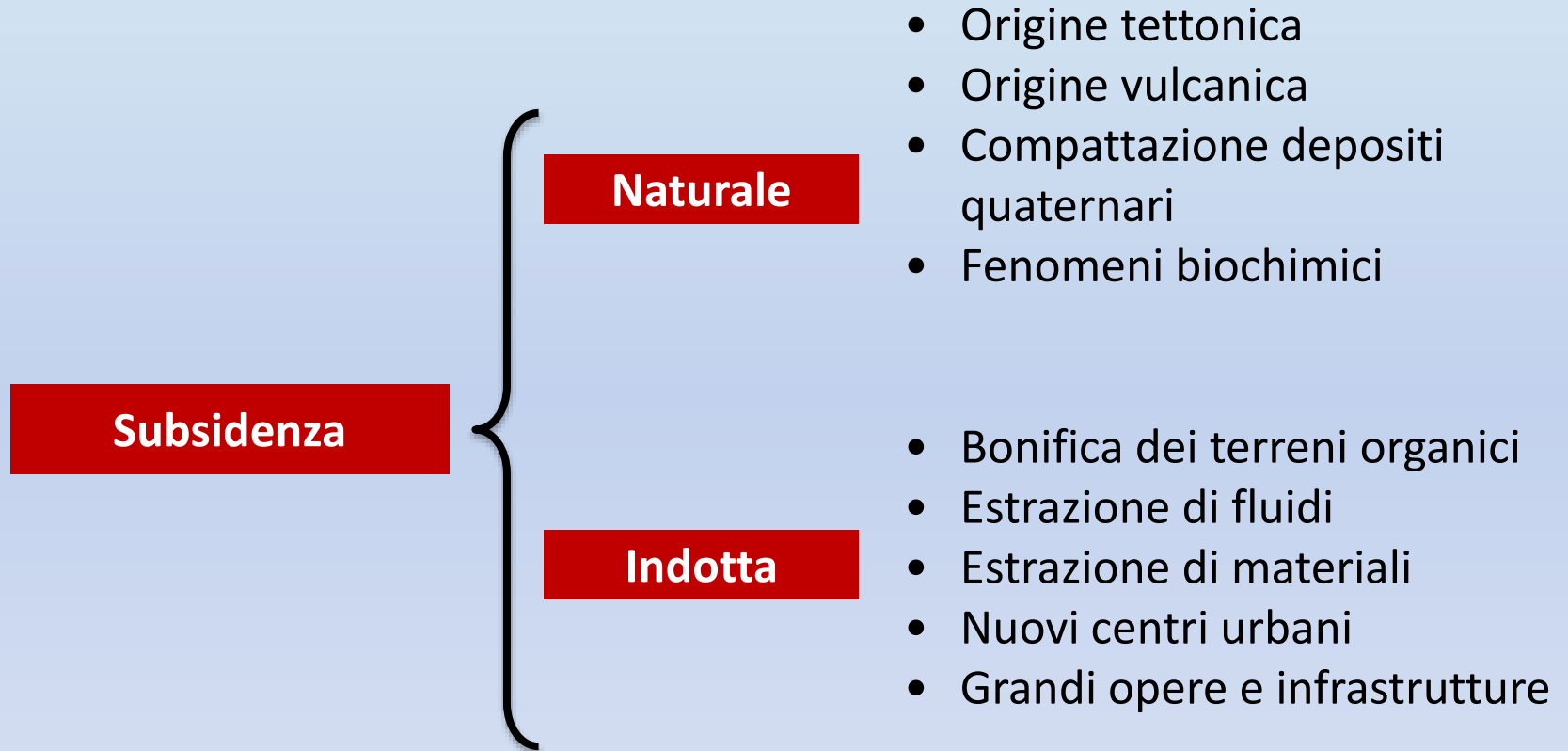
Casi di subsidenza noti in passato



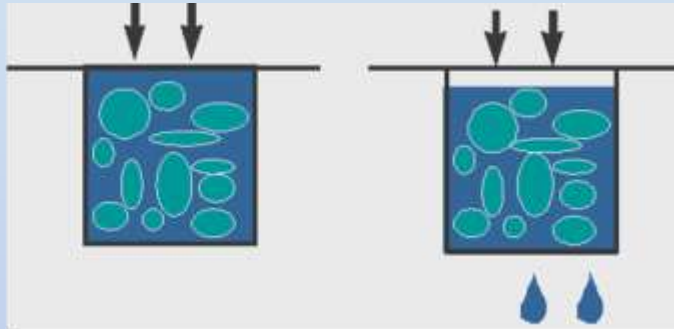
Venezia, Ravenna e il delta del fiume Po si trovano nella zona costiera italiana più incline alla sommersione per l'aumento del livello marino relativo.

L'altimetria della maggior parte di questa pianura costiera è inferiore al livello del mare anche di 4-5 m

Principali cause di subsidenza

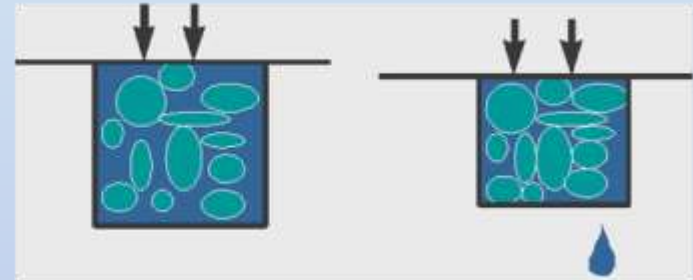


Principali meccanismi di subsidenza



Consolidazione primaria:

- aumento della pressione
- espulsione dell'acqua
- trasferimento del carico ai grani
- cambiamenti a breve termine

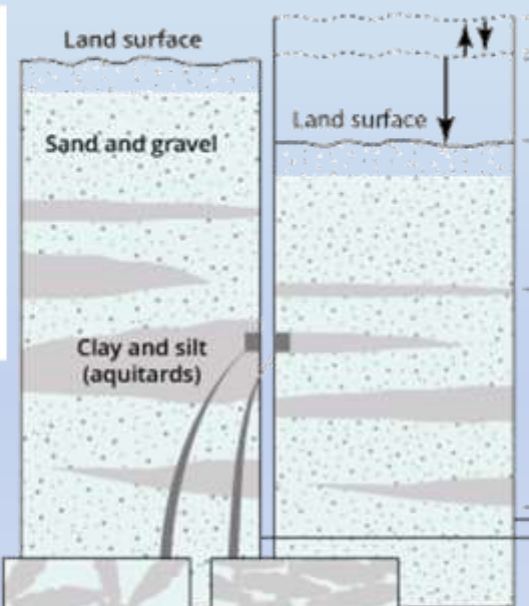


Consolidazione secondaria:

- arrangiamento della struttura interna
- Riduzione del volume
- Aumento della densità
- cambiamenti a lungo termine

Compattazione dell'acquifero dovuta al pompaggio di acque sotterranee

La diminuzione delle pressioni di strato (piezometria) porta ad un aumento dello stress intergranulare con conseguente ri-arrangiamento dei sedimenti e compattazione.



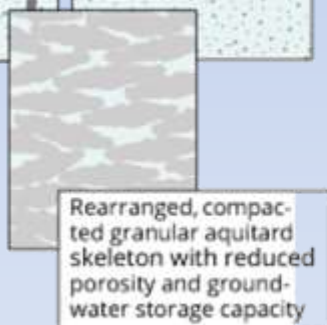
Solo una minima parte del cedimento si recupera (componente elastica)

La maggior parte della subsidenza è irreversibile

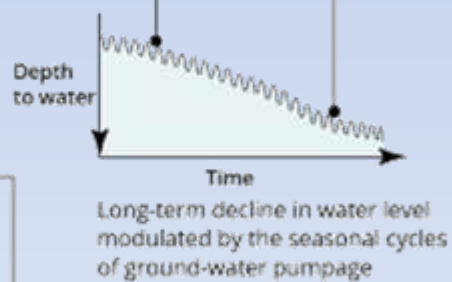
Compaction of the aquifer system is concentrated in the aquitards.



Granular aquitard skeleton defining fluid-filled pore spaces storing ground water

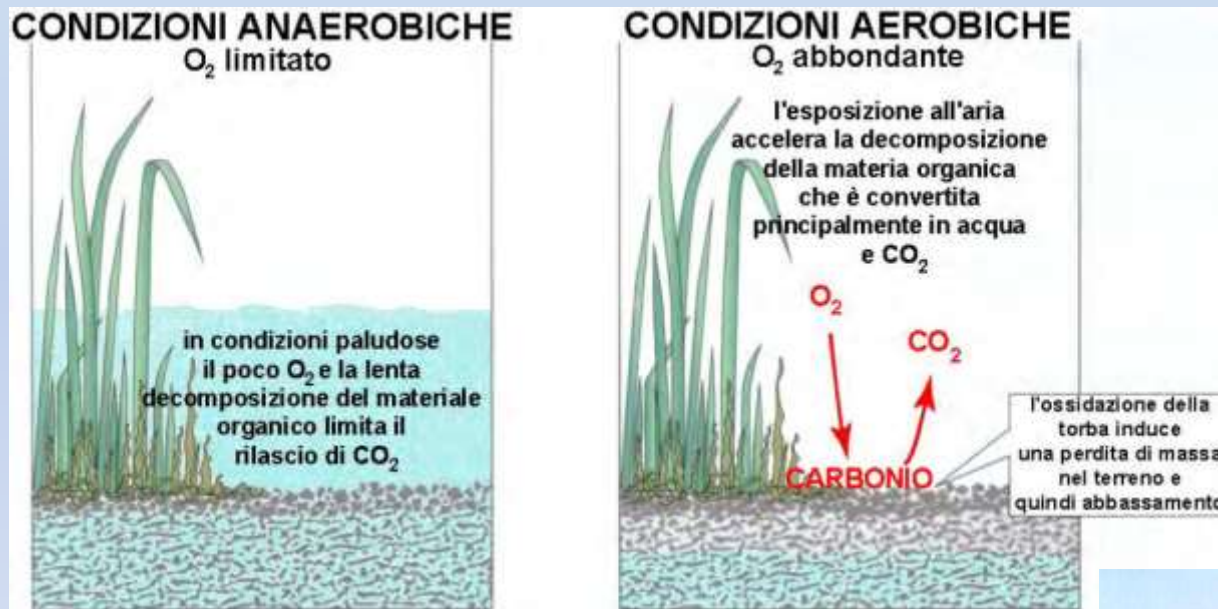


Rearranged, compacted granular aquitard skeleton with reduced porosity and ground-water storage capacity



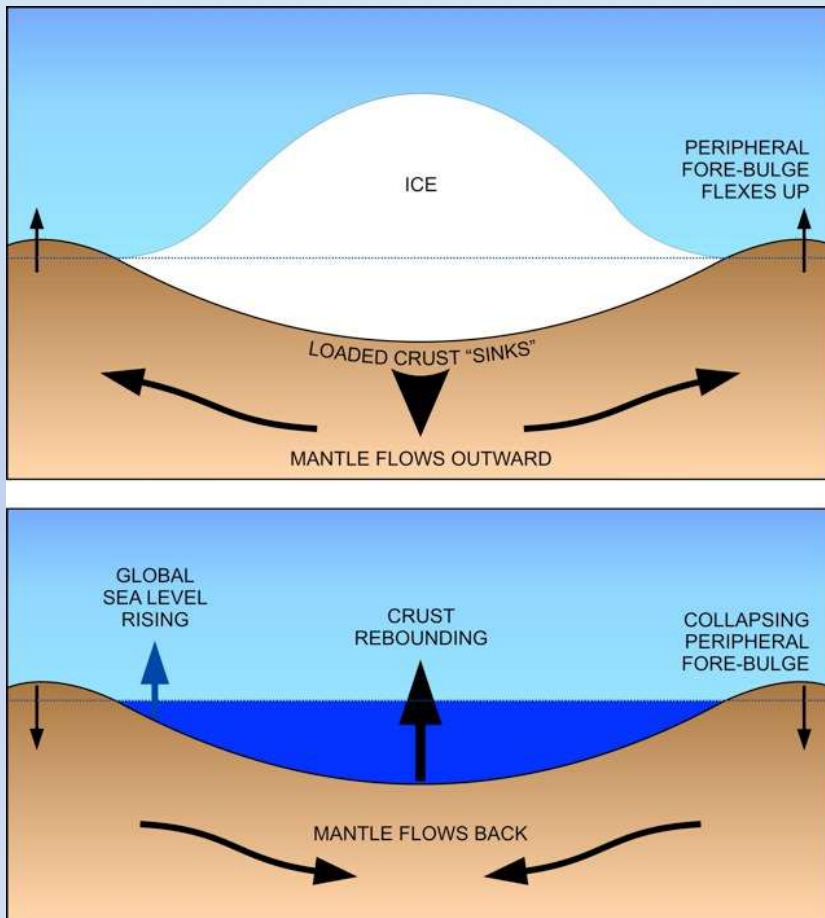
Ossidazione dei terreni organici

- Le torbe sono terreni ad elevato contenuto organico solitamente depositato in zone sommerse.
- La bonifica di queste aree innesca il fenomeno di bio-ossidazione del carbonio organico con significativa perdita di volume.



Tosi et al., 2000

Glacial Isostatic Adjustment (GIA)

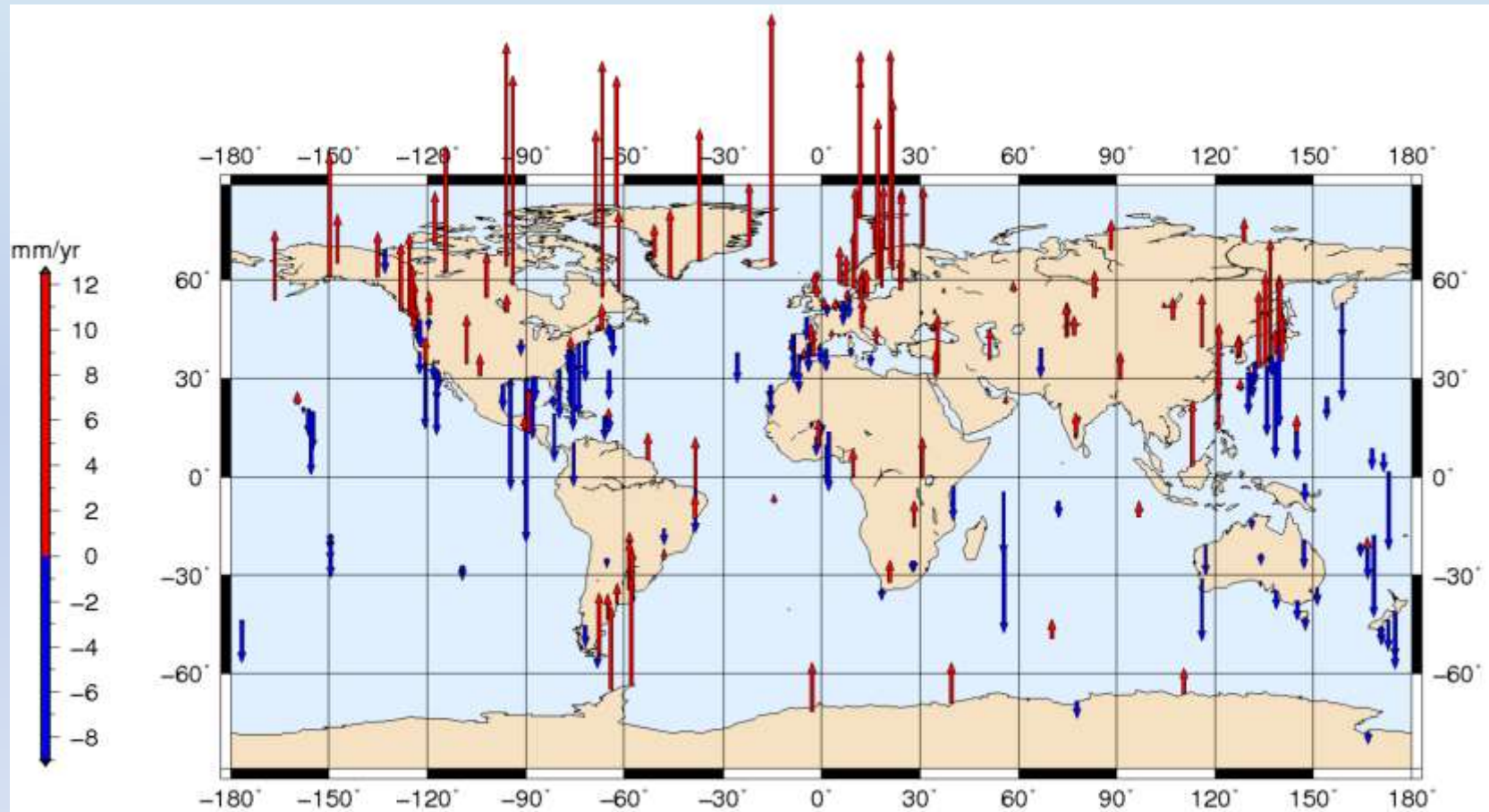


Glacial Isostatic Adjustment (GIA) (Post-Glacial rebound - PGR)

- Il sollevamento (rebound) è fino 7 mm/anno (e.g., Eurasia settentrionale e nord America).
- La subsidenza è circa 1 mm/anno (e.g., costa est U.S.)

<https://spotlight.unavco.org>

Movimenti verticali della superficie terrestre

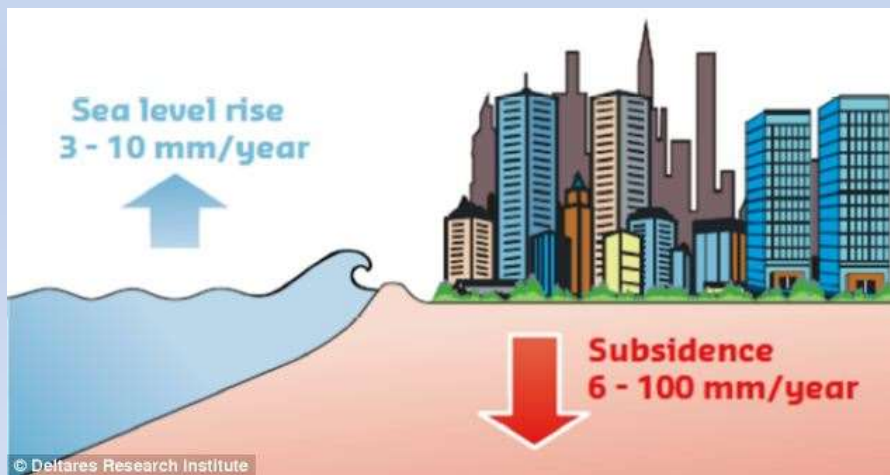


Wöppelmann et Marcos, 2012; Santamaria Gomez et al. (2012)

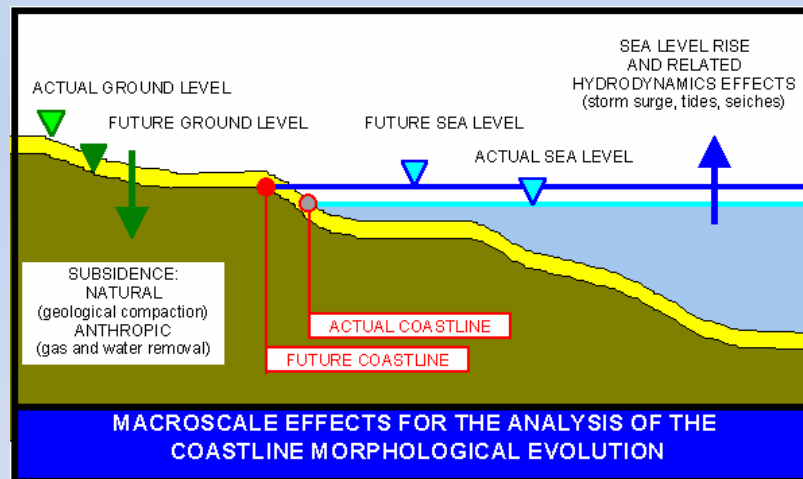
Subsidenza costiera

La subsidenza nelle pianure costiere è un processo particolarmente critico poiché contribuisce all'innalzamento del livello marino relativo (Relative Sea Level Rise - RSLR) con valori di abbassamento del suolo anche di un ordine maggiore di quelli del Sea Level Rise.

Effetti: Inondazioni, danni alle infrastrutture e siti storici, degrado morfologico delle zone umide e degli ecosistemi costieri, erosione costiera, intrusione salina, ecc.

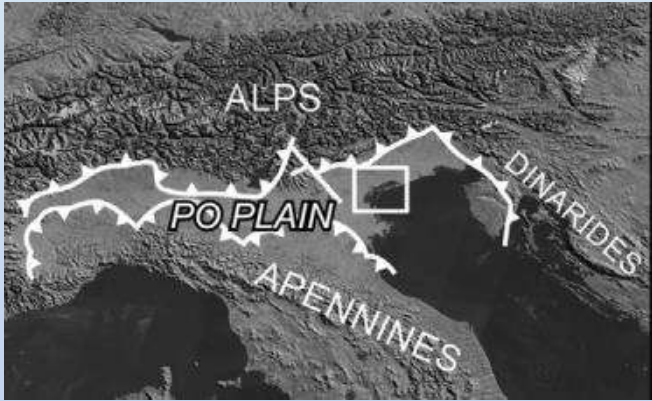


RSLR stimato da Deltares (The Netherlands) per le città costiere del mondo.



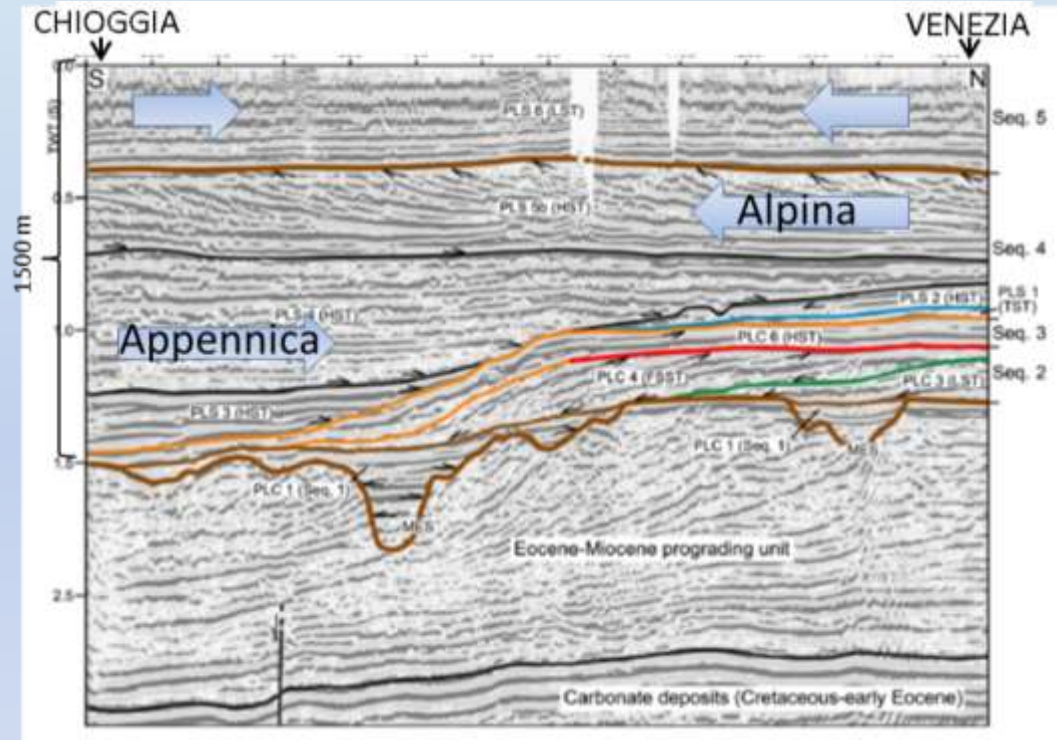
Effetto dell'aumento del livello del mare e della subsidenza rispetto alla costa

La subsidenza dell'area veneziana



L'area veneziana è un bacino dove si è accumulato sopra il basamento roccioso uno spessore di oltre 1500 m di apporti sedimentari (sabbie, limi, argille) di provenienza Appenninica e Alpina.

Il bacino è in graduale sprofondamento per la deformazione del substrato profondo e per la compattazione dei depositi fini sovrastanti.



Zecchin and Tosi, 2014

Subsidenza e livello marino

Aumento del livello marino relativo (Relative Sea Level Rise - RSLR)

=

Componente dei movimenti verticali del terreno + Componente del livello del mare



Attuale: linea alghe verdi

circa 43 cm

circa 1,9 mm/anno RSLR

1792 AD: «C» Comune Marino

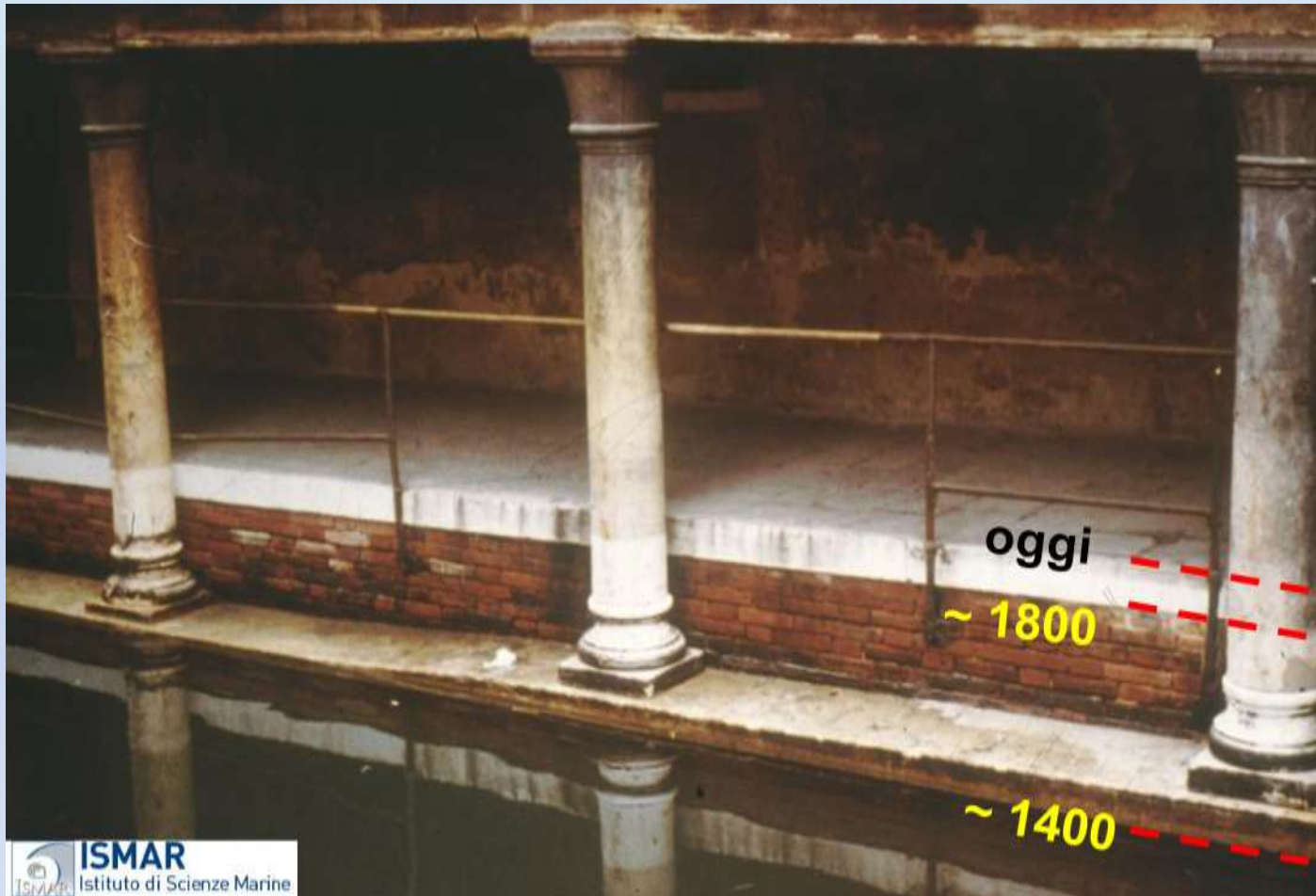
Carbognin et al., 2010

Evidenze del RSLR nei secoli



- Costruzione 1028
- ↓
- Ricostruzione 1590
- Differenza 50 cm
- ↓
- RSLR medio 0.9 mm/anno

Evidenze del RSLR nei secoli



RSLR medio:
1.1 mm/anno

Sollevamento di una pavimentazione pedonale

Evidenze della subsidenza causata dall'ossidazione dei terreni organici nelle bonifiche idrauliche



Tosi et al., 2000

In primo piano, un ponte costruito anni 1920, fotografato nel 2000 con le fondazioni protruse di circa 1.5 m.

Sullo sfondo il ponte degli anni 1970 che evidenzia circa 0.5 m di subsidenza in 30 anni.

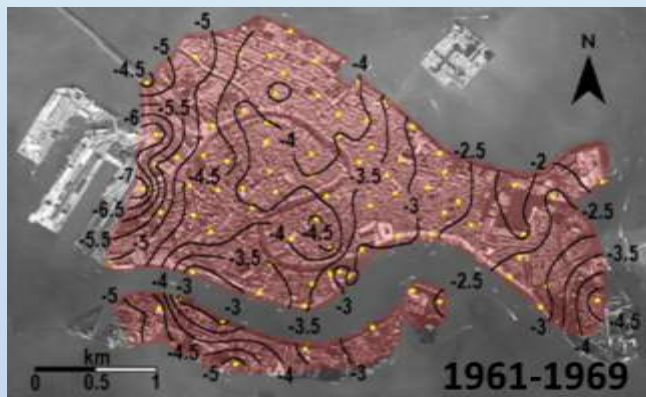


Ciò che rimane di un canale di bonifica



Subsidenza indotta da estrazioni artesiane

**Estrazioni artesiane
periodo 1950 - 1970**



1961-1969

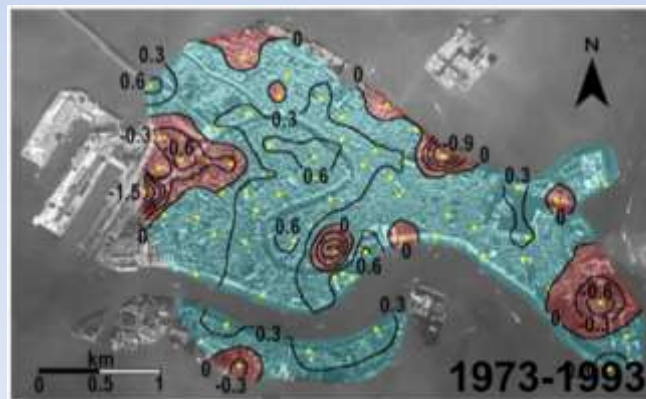
Subsidenza
naturale +
indotta
= 3-6 mm/anno

Tosi et al., 2002

**RISPOSTA GOVERNATIVA:
regolamentazione dello sfruttamento artesiano**



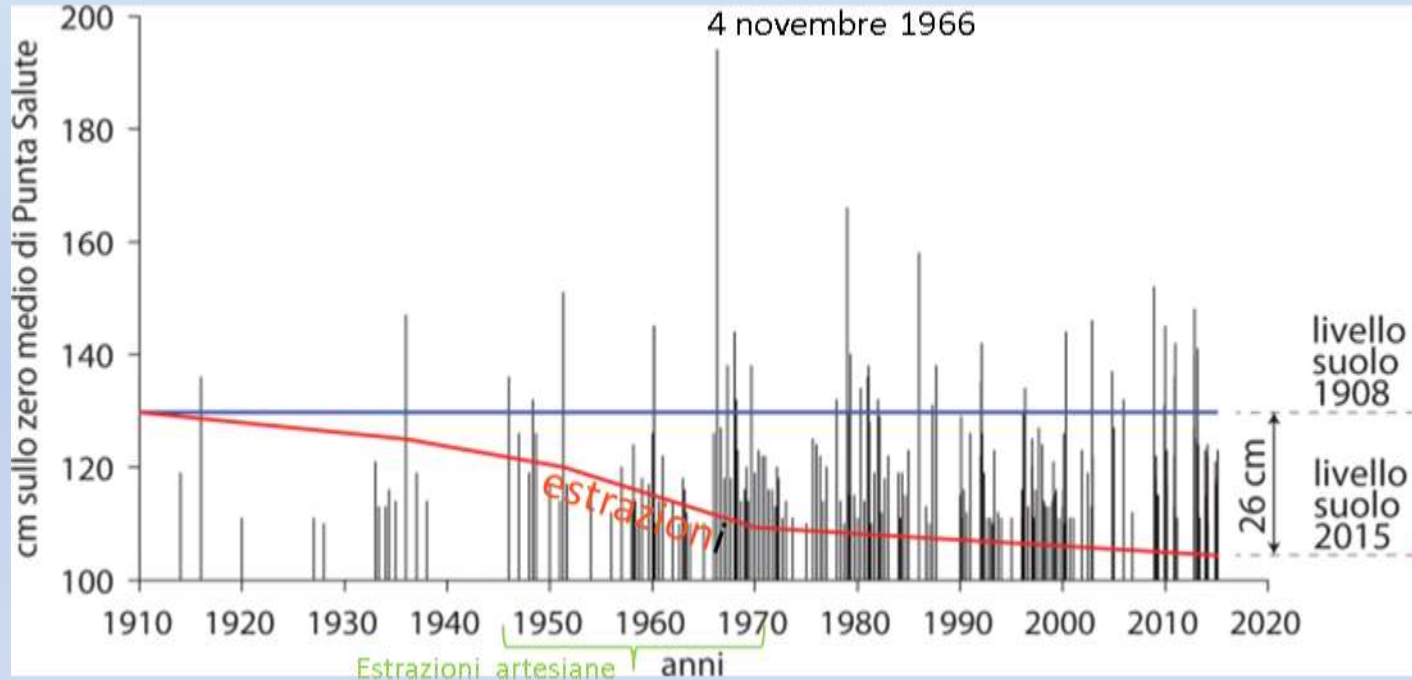
**Ricarica degli acquiferi e conseguente riduzione
della subsidenza a valori naturali**



Subsidenza
naturale
0.5-1 mm/anno

Tosi et al., 2002

Effetti permanenti ed irreversibili della subsidenza

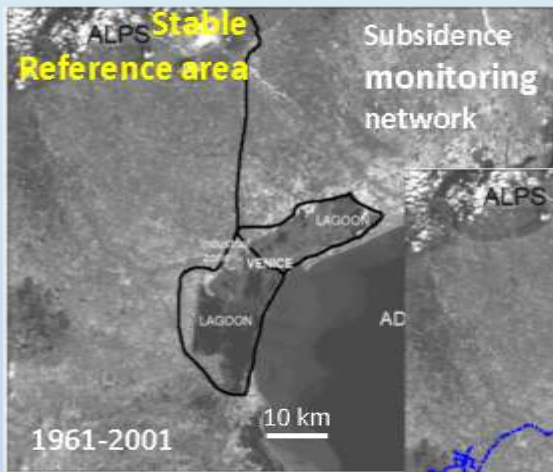


Trincardi et al., 2016

Perdita altimetrica (linea rossa) e eventi di marea superiori a 110 cm (linee nere)

**Dalle livellazioni all'uso dei satelliti:
avanzamento delle conoscenze**

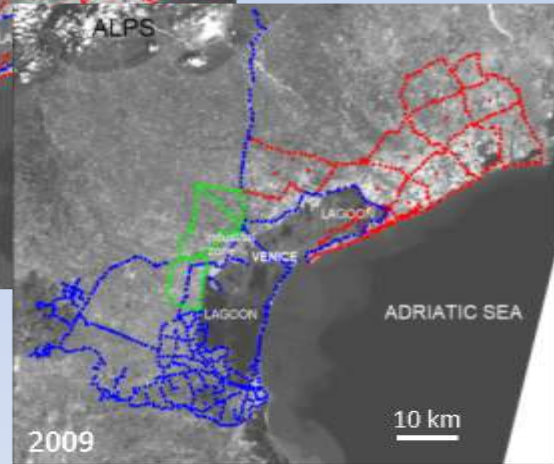
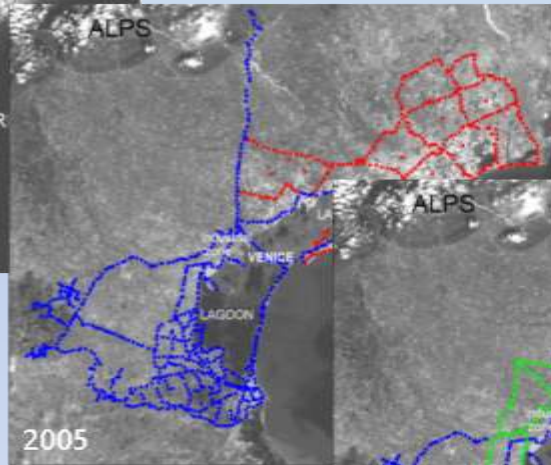
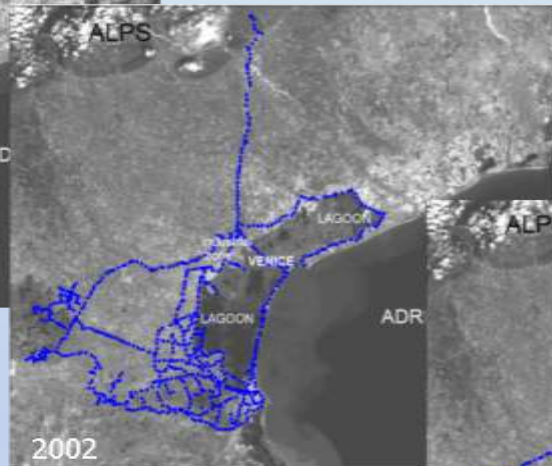
Misure e Monitoraggi: dalle livellazioni all'uso dei satelliti



Dal 1999 la rete di monitoraggio della subsidenza è stata sviluppata grazie a vari progetti.

Da circa 250 a oltre 2,500 capisaldi di livellazione di cui circa 200 anche per misure GPS statiche.

A questi si sono aggiunte le stazioni permanenti GPS



Tosi et al., 2010

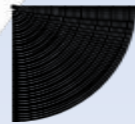
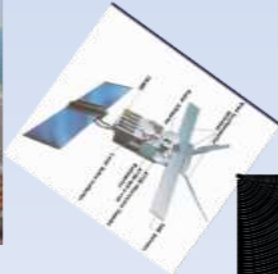
250 km

1,200 km

2,000 km

2,100 km

Evoluzione temporale della rete di monitoraggio

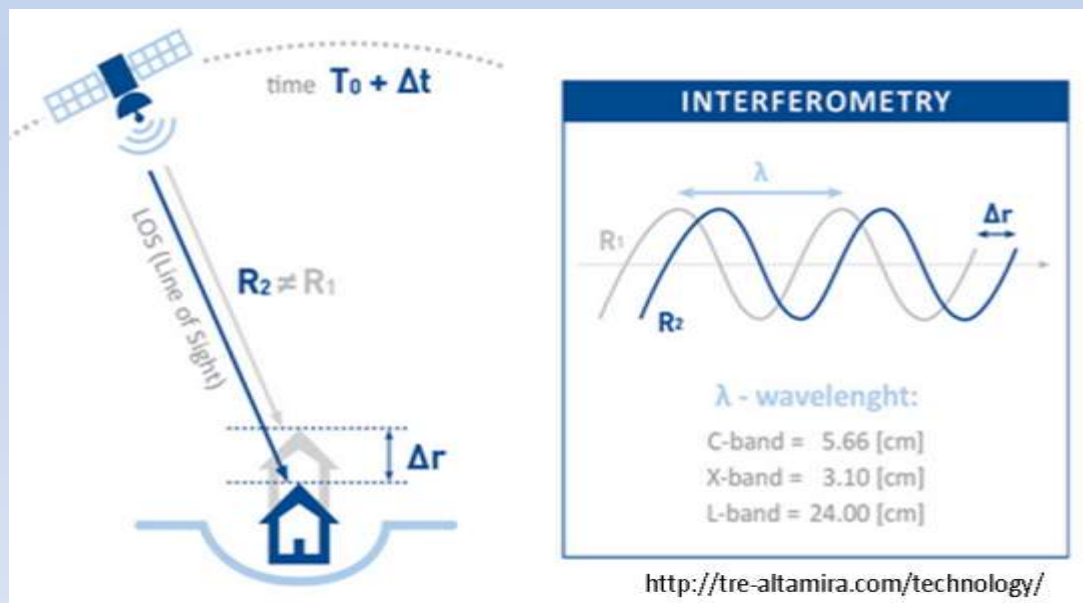


Monitoraggio dei movimenti del suolo con l'interferometria basata sulle immagini satellitari SAR (*Synthetic Aperture Radar*)

Il satellite è dotato di un sensore SAR (Synthetic Aperture Radar) e emette periodicamente un segnale lungo la stessa orbita che viene riflesso dagli obiettivi sul terreno (case, infrastrutture, ecc.).

Il movimento del terreno (ad esempio la subsidenza) modifica la distanza del sensore-bersaglio e le variazioni del segnale riflesso (fase) vengono registrate durante i vari passaggi del satellite.

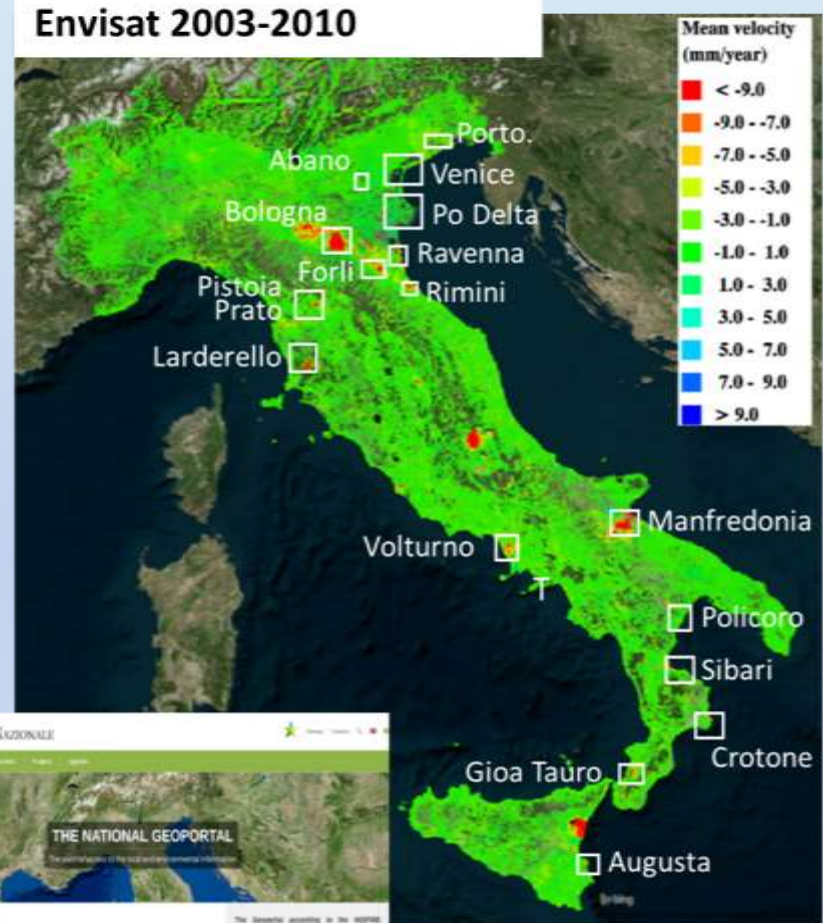
Interferometria SAR, è la misura del cambiamento di fase del segnale tra due immagini acquisite sulla stessa area, in tempi diversi. Quando un punto sul terreno si muove, la distanza tra il sensore e il punto cambia e quindi il valore di fase registrato dal sensore satellitare sarà differente.



Casi di subsidenza non noti o poco studiati in passato, emersi negli anni 2000 con l'utilizzo dell'interferometria SAR



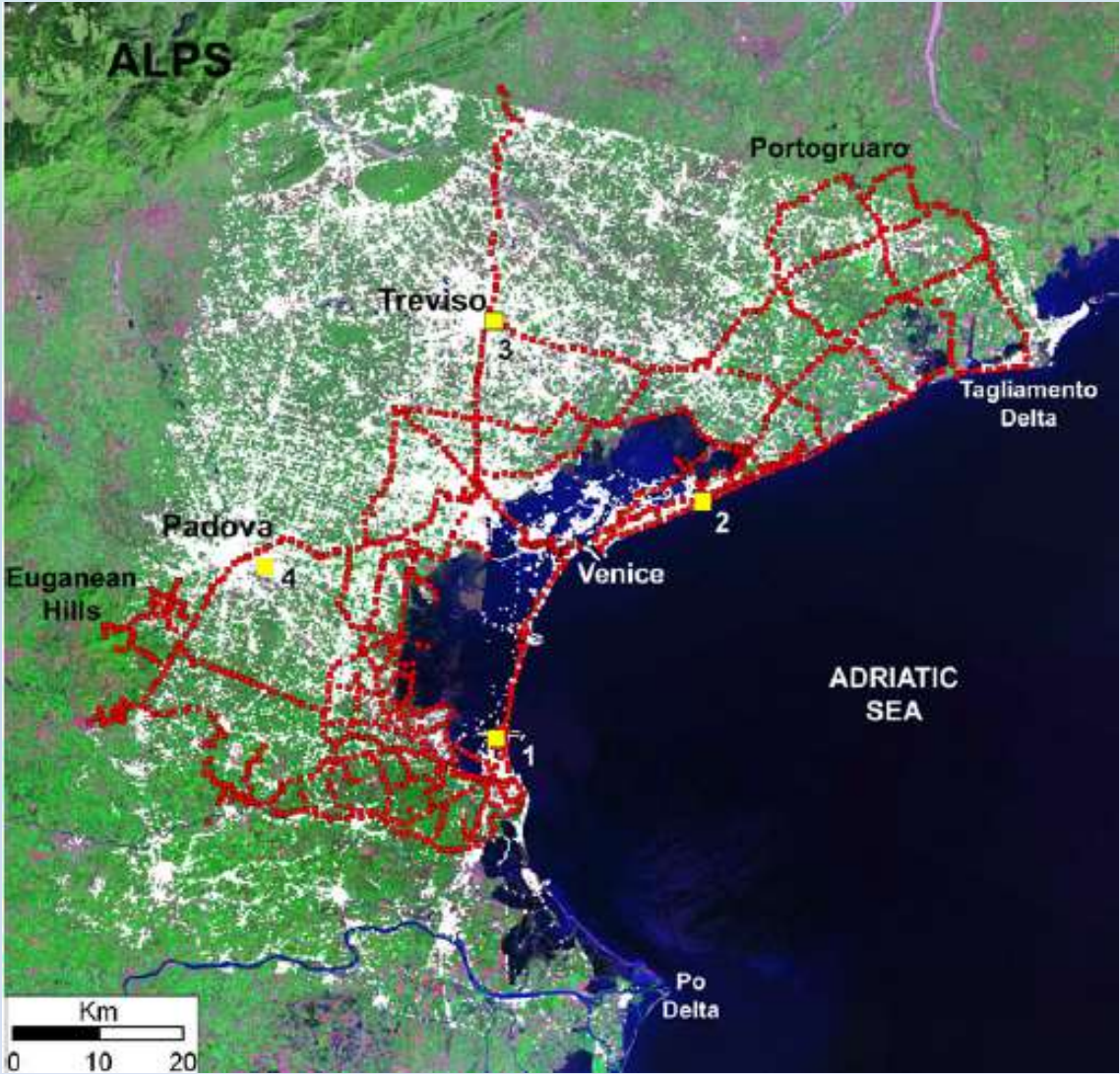
Rete di livellazione italiana (IGMI)



Modificata da Costantini et al., 2017, RSE

Lo sviluppo dell'interferometria basata sulle immagini satellitari SAR (*Synthetic Aperture Radar*) ha permesso di osservare numerosi casi di subsidenza, in precedenza non noti o poco studiati a causa della bassa risoluzione spaziale della rete di livellazione nazionale.

Rete di monitoraggio integrato della subsidenza di Venezia

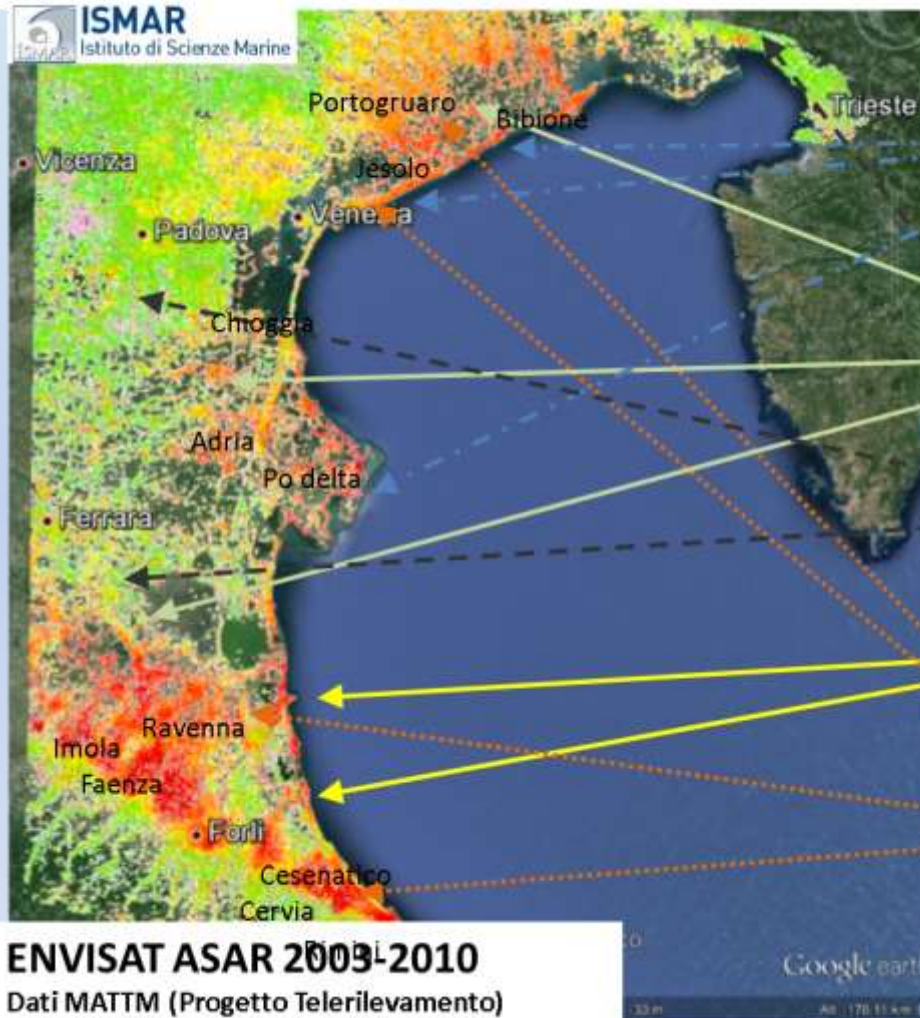


Modificata da Tosi et al., 2010, Acc. Lincei

La subsidenza della costa alto adriatica

Il dato interferometrico è di proprietà del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM) e distribuito con licenza Creative Commons - Attribuzione - Condividi allo stesso modo 3.0 Italia (CC-BY-SA 3.0 IT).

ISMAR
Istituto di Scienze Marine



consolidazione naturale residua

ossidazione dei terreni organici (torbosi)

tettonica

produzione di gas da giacimenti profondi

acque artesiane

ENVISAT ASAR 2003-2010

Dati MATTM (Progetto Telerilevamento)

Calibrazioni ISMAR-CNR (Progetto RITMARE)

Avanzamento delle conoscenze

Attraverso i dati satellitari e le tecniche di analisi interferometrica, la quantità di informazioni sui movimenti del suolo nella città di Venezia è aumentata di due ordini di grandezza e a scala regionale da circa 2000 capisaldi di livellazione a oltre 3 milioni di punti riflettenti

c.150 capisaldi , livellazioni ogni 10 anni



c.100.000 punti riflettenti rivisitazione mensile del satellite



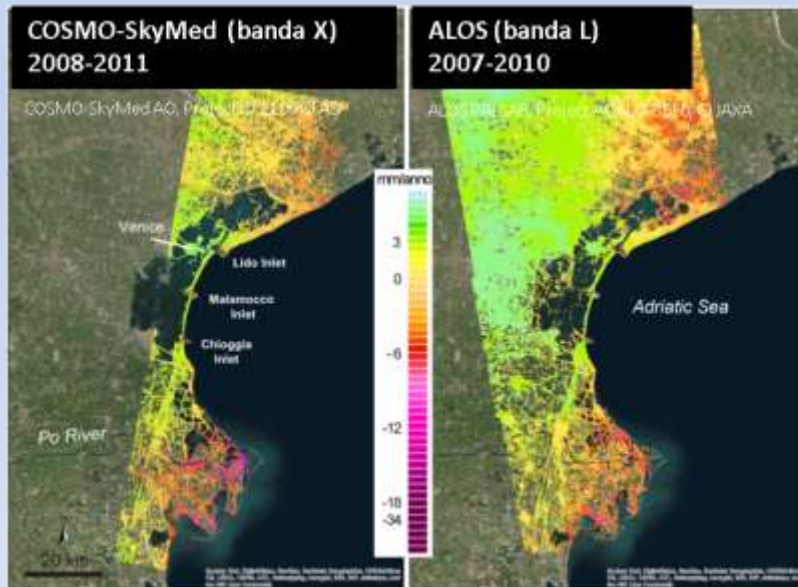
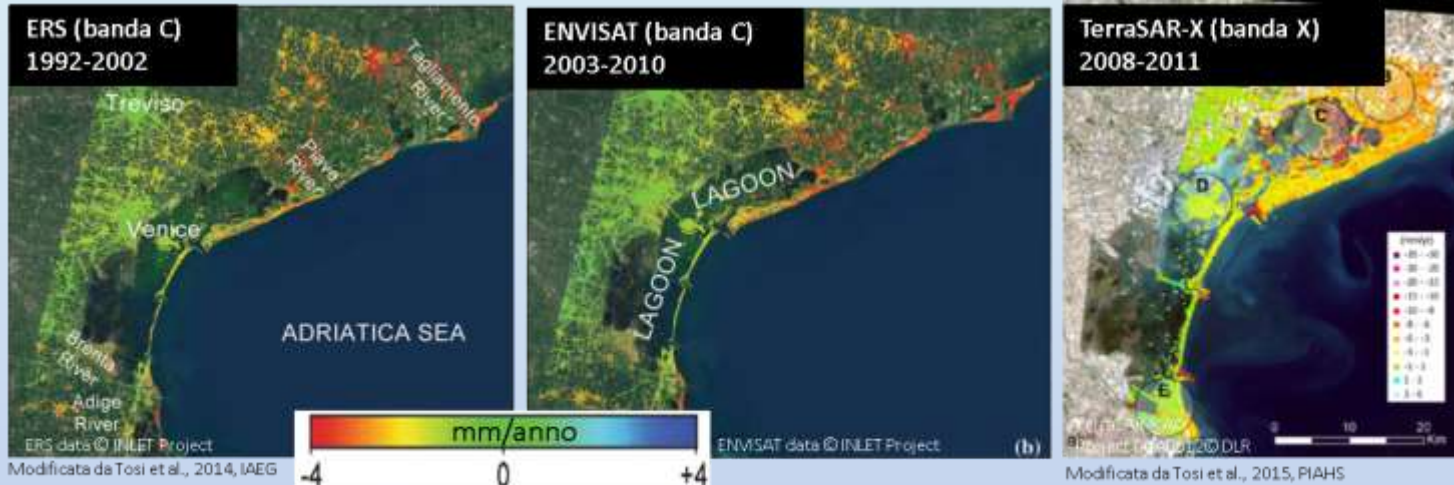
c.200.000 punti riflettenti rivisitazione 15 giorni



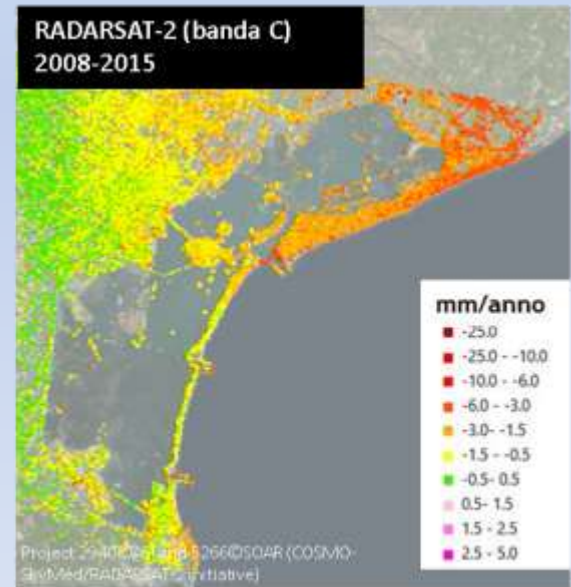
Oltre alla velocità media per il periodo analizzato è possibile ottenere anche il valore degli spostamenti del terreno ogni volta che il satellite ha acquisito l'immagine

Modificata da Tosi et al., 2013, Sci. Rep.

Avanzamento delle conoscenze



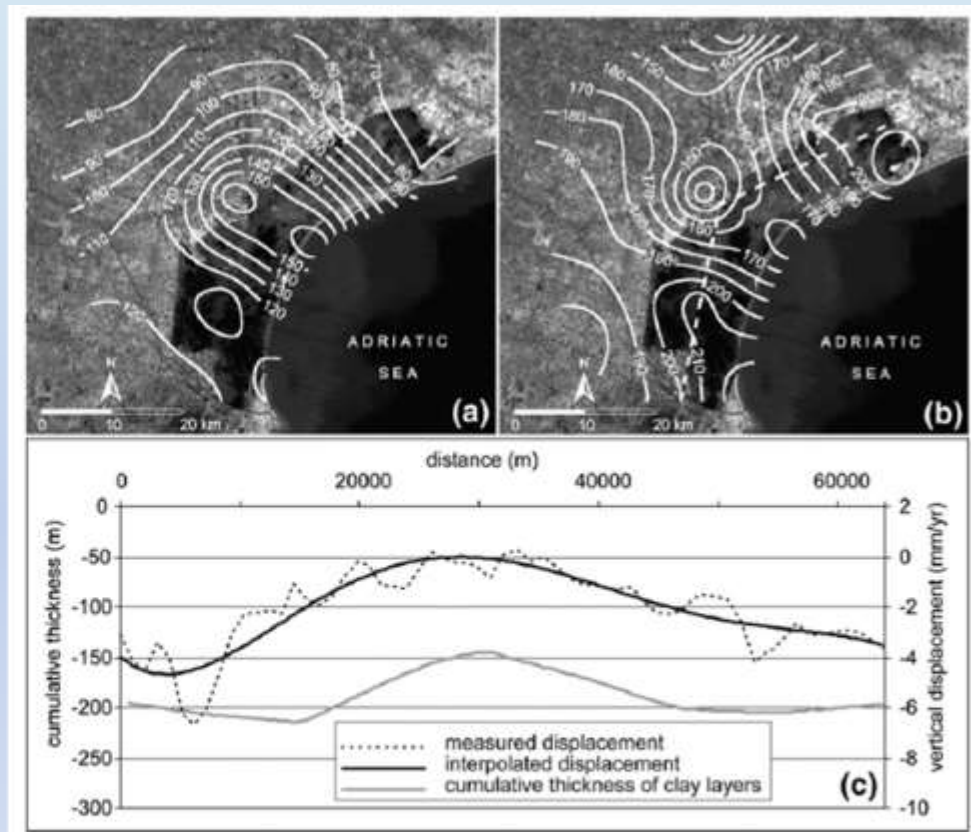
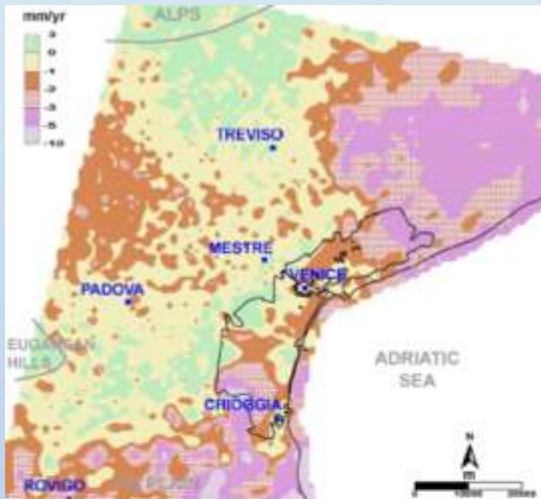
Modificata da Tosi et al., 2016, Remote Sensing



Modificata da Tosi et al., 2016, ESA SP

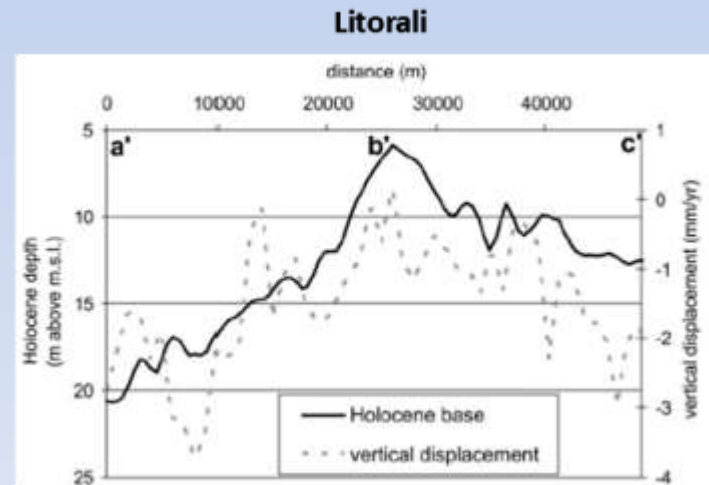
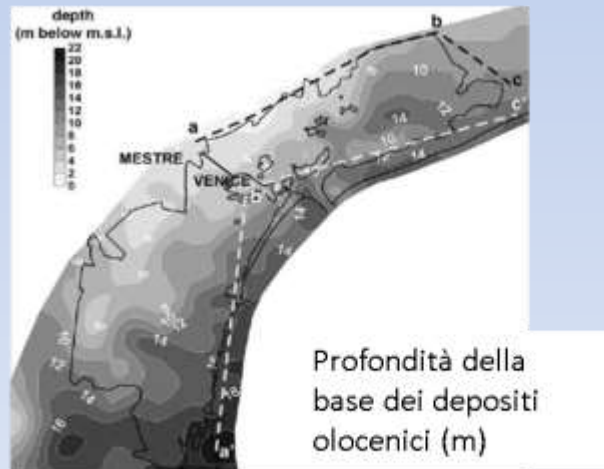
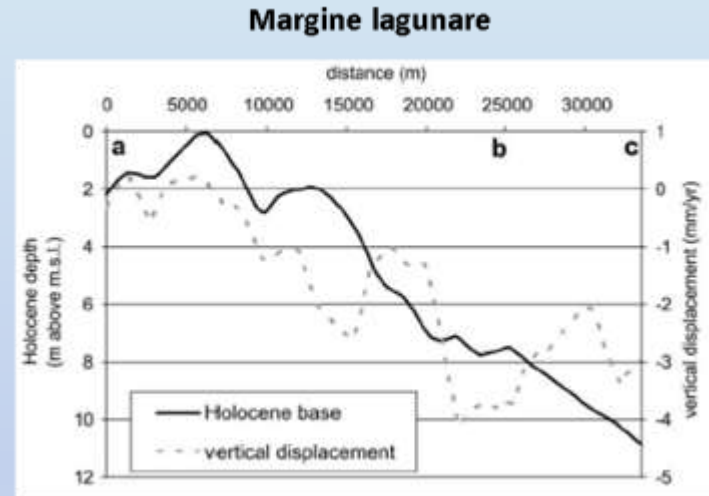
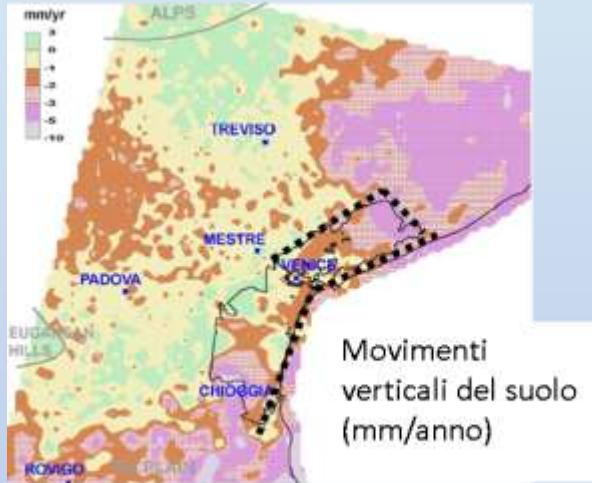
Meccanismi di subsidenza nella costa veneziana

Eterogeneità regionale e locale della subsidenza: Spessori ed età dei depositi



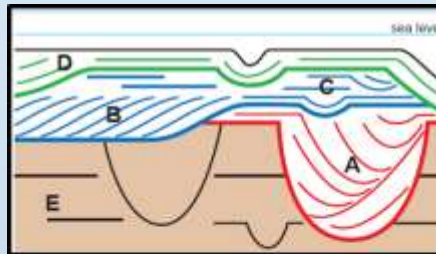
Modificata da Tosi et al., 2009, *Tectonophysics*

Eterogeneità regionale e locale della subsidenza: spessori ed età dei depositi



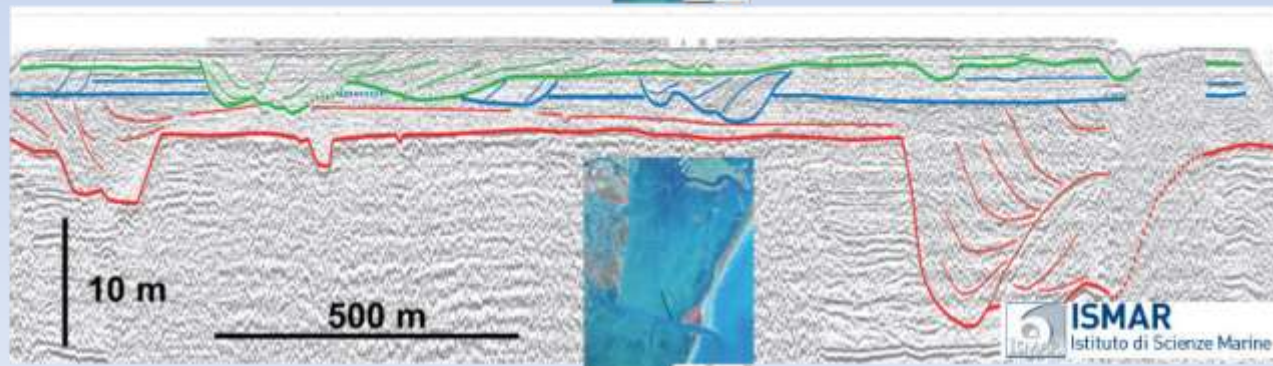
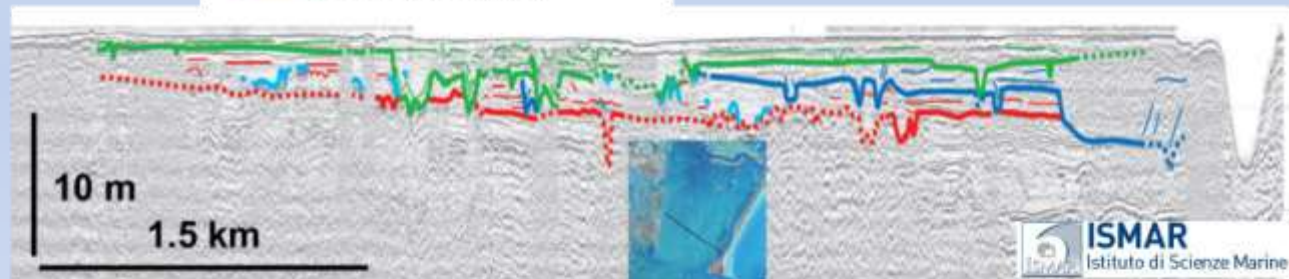
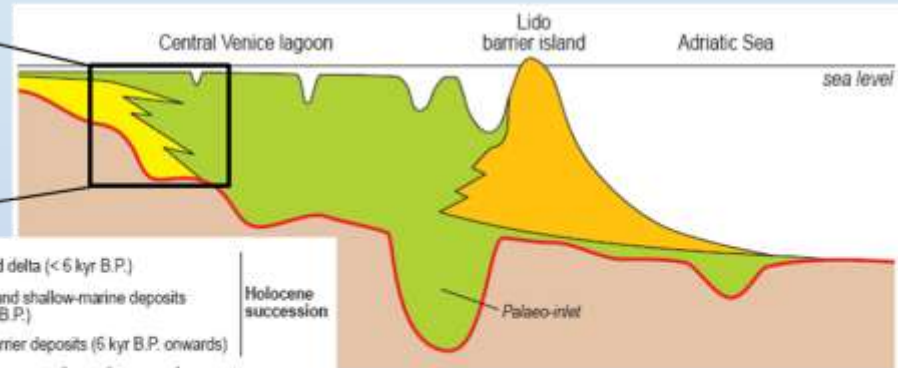
Modificata da Tosi et al., 2009, *Tectonophysics*

Eterogeneità regionale e locale della subsidenza: architettura del sottosuolo



- A: riempimento di paleo-inlet
- B: accrezione laterale
- C: aree di intercanale e canali minori
- D: canali e aree di intercanale recenti
- E: piana alluvionale pleistocenica

- Bayhead delta (< 6 kyr B.P.)
 - Littoral and shallow-marine deposits (< 6 kyr B.P.)
 - Back-barrier deposits (6 kyr B.P. onwards)
 - Pleistocene continental succession (> 18 kyr B.P.)
 - Pleistocene - Holocene boundary
- Holocene succession



Modificata da Zecchin et al. 2014

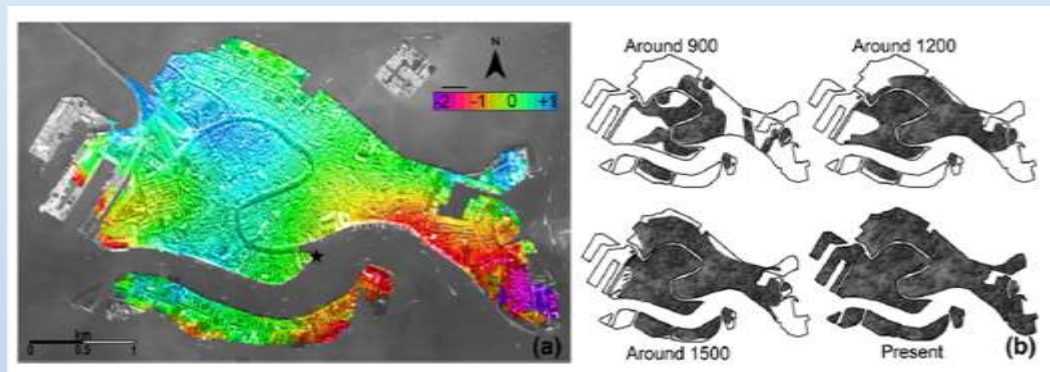
Variabilità della subsidenza nel centro storico di Venezia

1 Natura eterogenea del sottosuolo

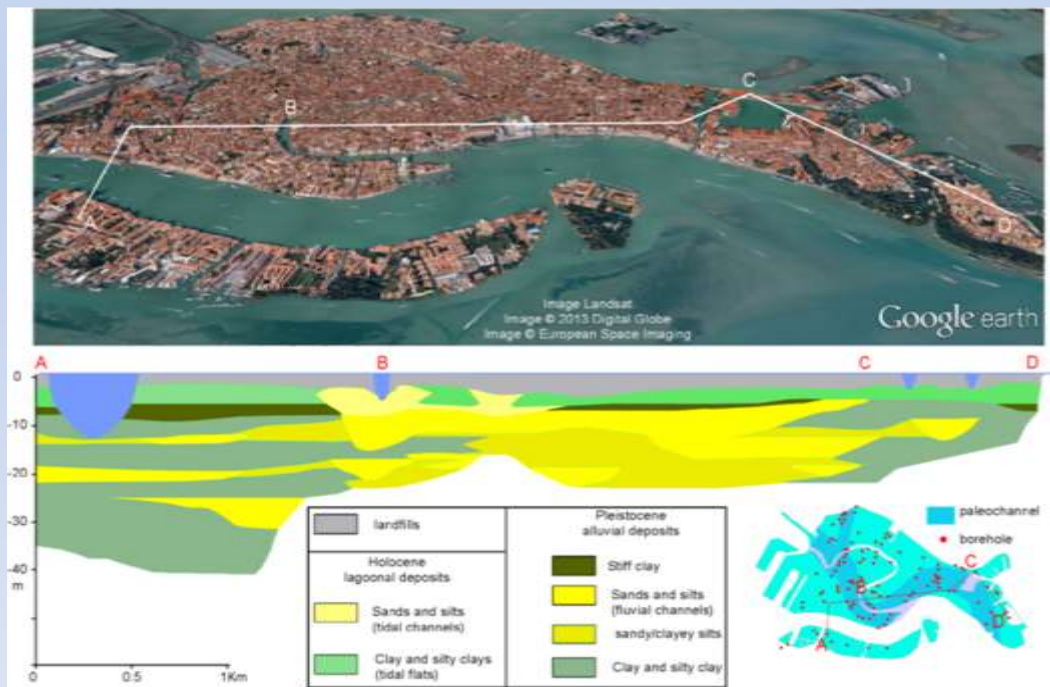
- Olocene: depositi di retro-barriera (barene, piana tidale, riempimenti di canali abbandonati)
- Pleistocene: depositi alluvionali, sistemi di paleo-canali, paleosuoli, torbe.

2 Sviluppo urbano nei secoli

- il settore centrale che corrisponde alla prima urbanizzazione ha tassi di subsidenza minimi.
- i settori di recente espansione urbana sono maggiormente subsidenti in quanto la consolidazione secondaria ancora attiva.

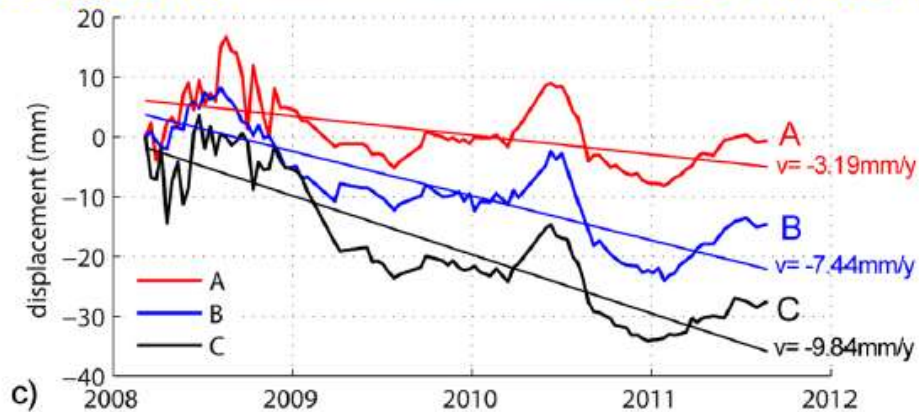
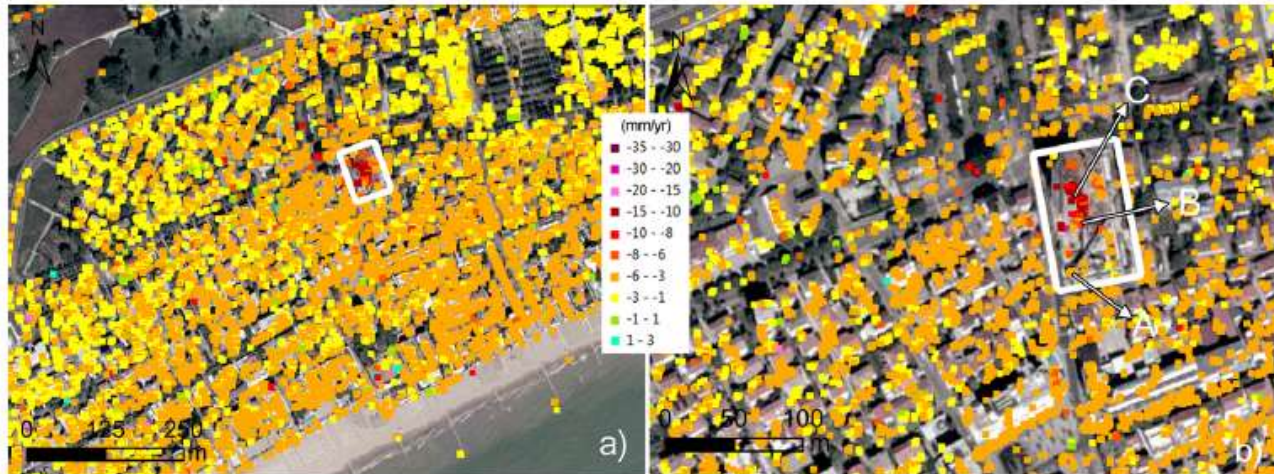


Modificata da Tosi et al., 2002, GRL

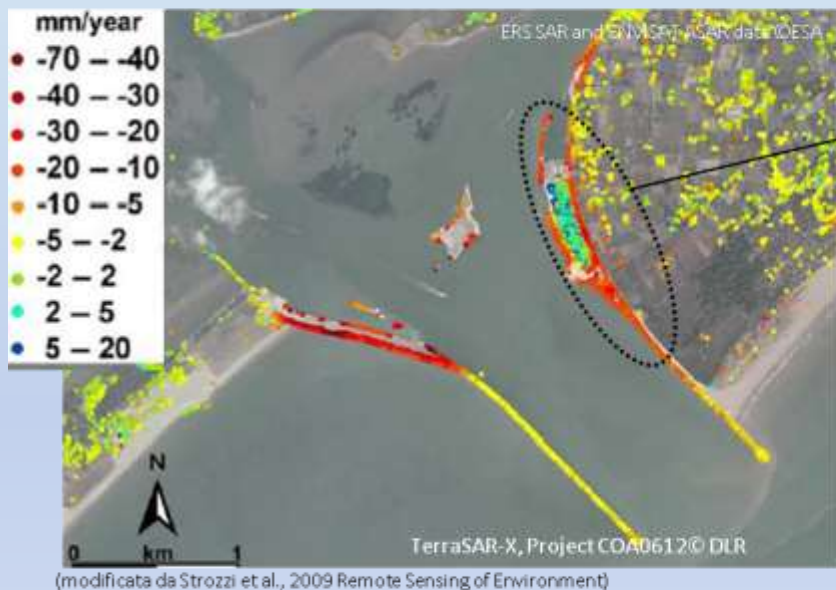


Modificata da Tosi et al., 2013, SCI REP

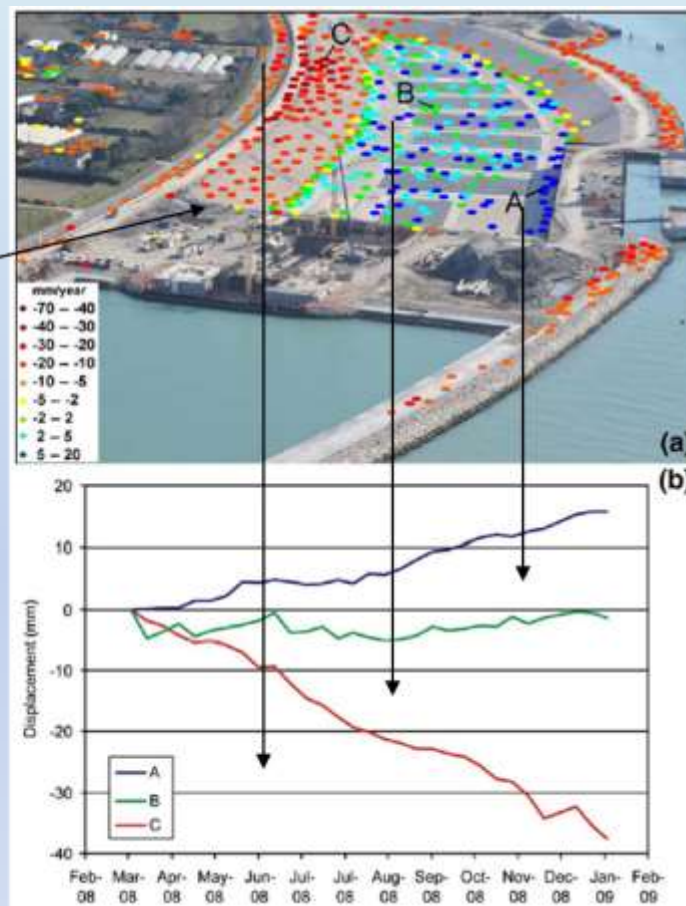
Subsidenza indotta dalla recente urbanizzazione



Analisi degli effetti delle compattazioni indotte in siti di particolare interesse ambientale/strategico



Bocca di Lido movimenti 2008-2009 (TerraSAR-X). Valori negativi sono gli abbassamenti quelli positivi i sollevamenti



- Dettaglio dei movimenti medi misurati in corrispondenza della “tura” (portocanale).
- Serie temporale di 3 PS (frequenza di acquisizione: 11 giorni).

Analisi degli effetti delle compattazioni indotte in siti di particolare interesse ambientale/strategico

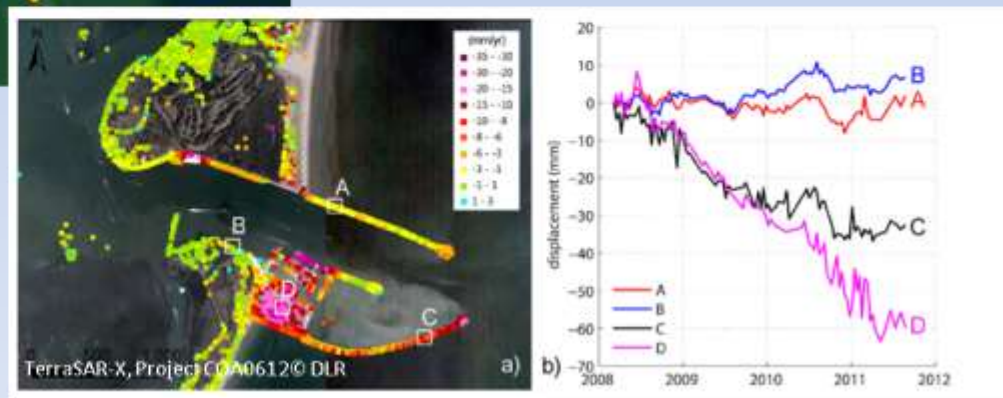
La conoscenza del processo di subsidenza è un punto fondamentale per la formulazione degli scenari a lungo termine di previsione di chiusura delle paratoie



Tosi et al., 2012



Tosi et al., 2012



Tosi et al., 2015

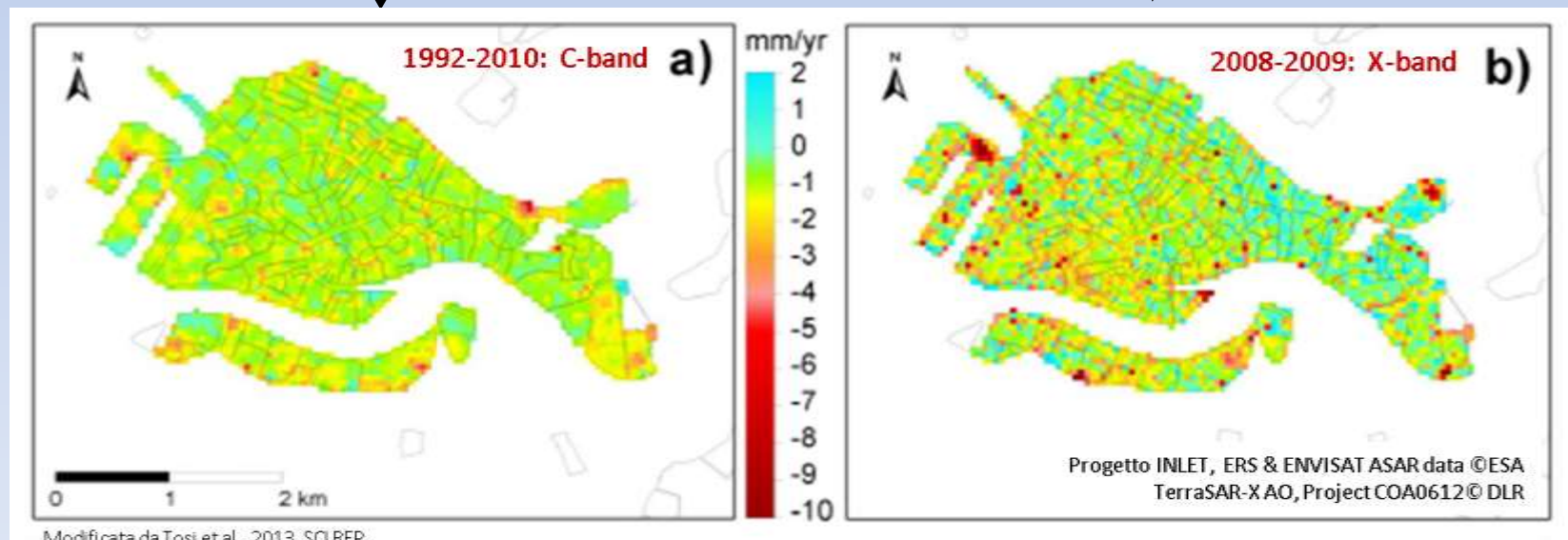
Sfide in corso e future

Quantificare la subsidenza naturale attuale e i movimenti del suolo indotti da attività antropiche

Uso combinato di prodotti interferometrici ottenuti da sensori con diversa ampiezza di banda estende la capacità dell'interferometria basata su SAR

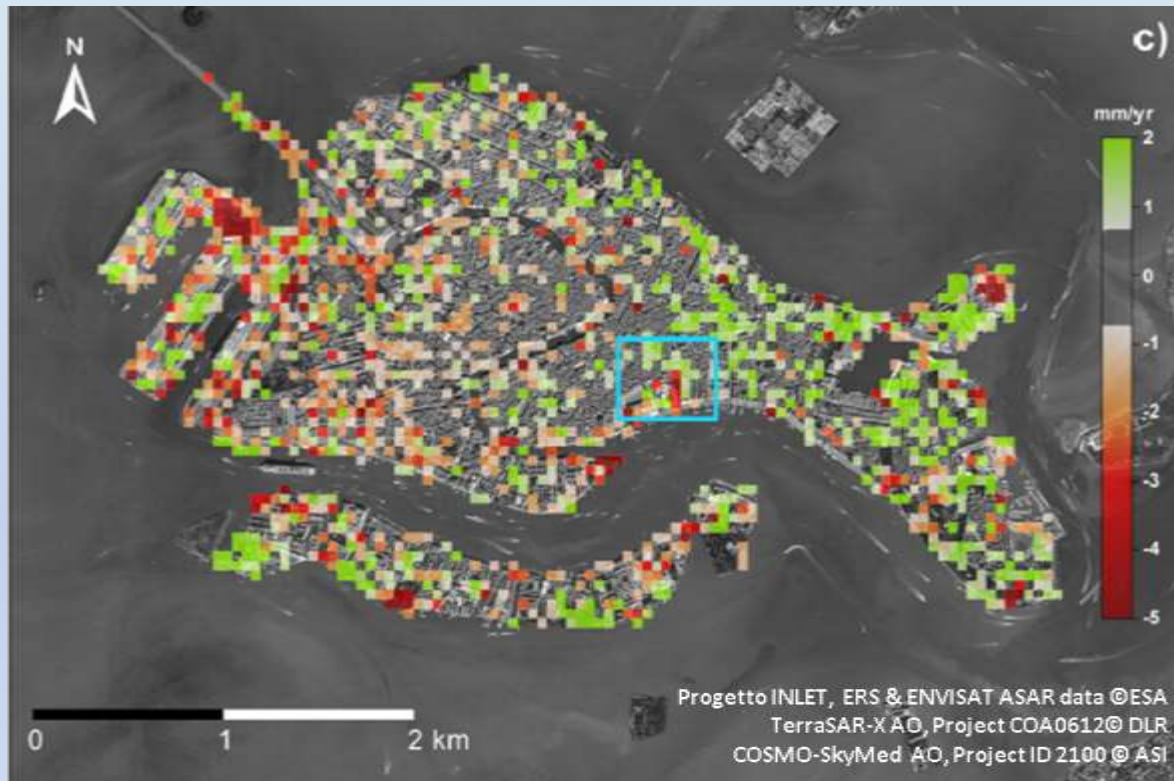
Long-term displacements (1992-2010) by C-band SAR sensors (ERS/ENVISAT)

La risoluzione di 20 m di pixel e il tempo di rivisitazione di 35 giorni scarsamente catturano e attenuano significativamente il cedimento antropogenico a breve termine (in VENEZIA). Possiamo supporre che le velocità medie del 1992-2010 siano ragionevolmente l'immagine dell'attuale subsidenza naturale.



Modificata da Tosi et al., 2013, SCI REP

Movimenti indotti da attività antropiche



Modificata da Tosi et al., 2013, SCI REP

La quantificazione degli spostamenti antropogenici si ottiene rimuovendo la mappa interpolata a lungo termine (1992-2010) dalla soluzione interpolata a breve termine (2008)

Causes

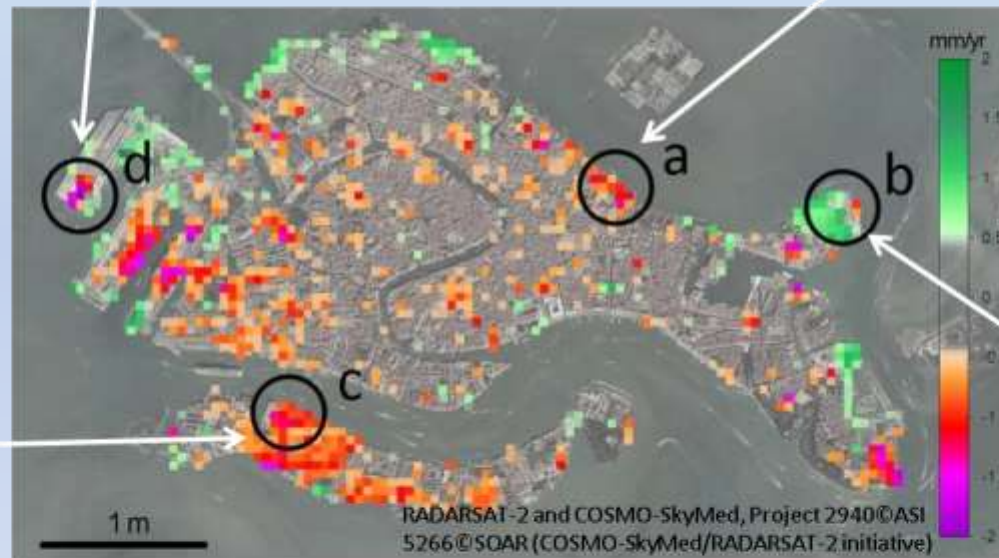


Lavori di restauro per la conservazione dei palazzi storici e delle murature (ad es. nuovi carichi, consolidamenti, jet grouting, pozzi).



Onde /vibrazioni indotte dai natanti

Movimenti indotti da attività antropiche

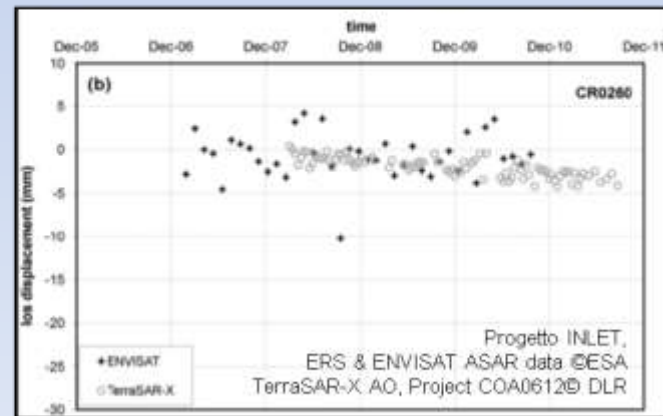
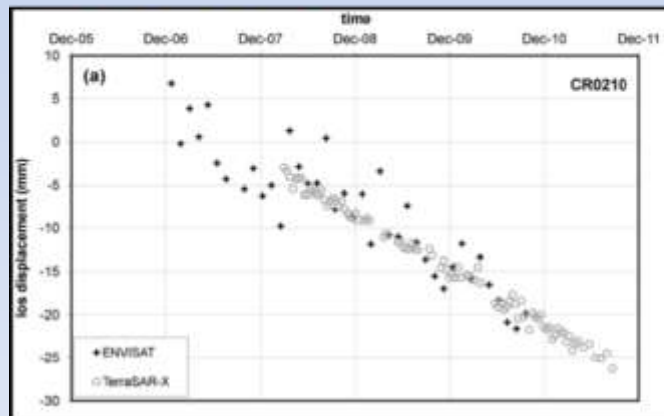
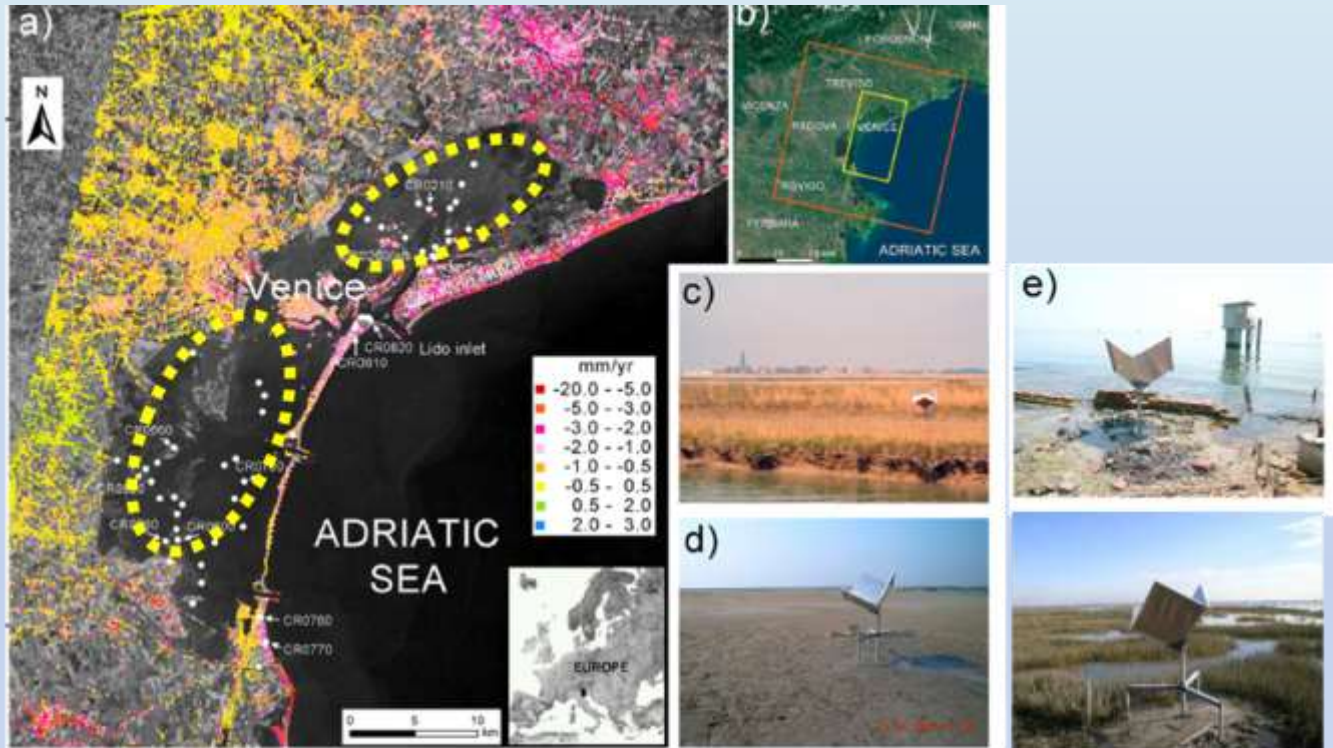


Modificata da Tosi et al., 2016, ESA SP



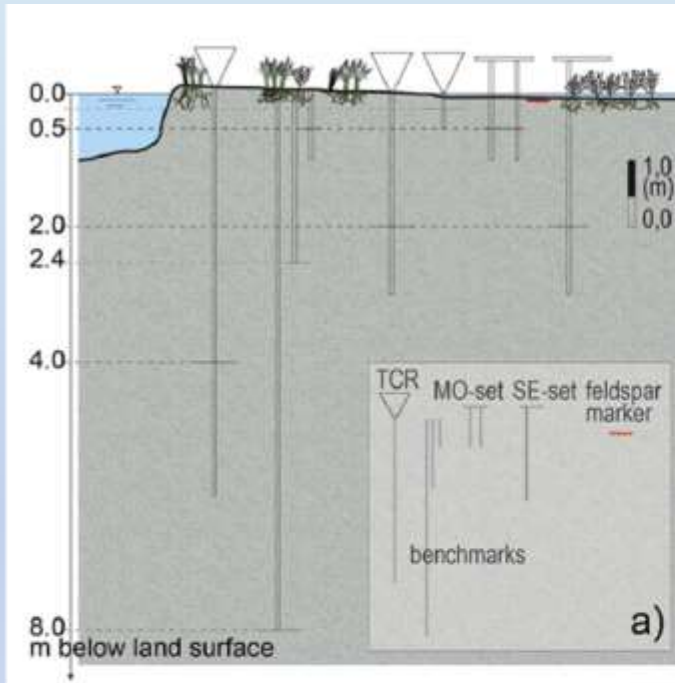
Nel periodo 2013-2015, il 15-20% di Venezia ha subito alcuni movimenti a causa di attività antropiche

Migliorare le conoscenze della subsidenza del bacino lagunare: riflettori artificiali

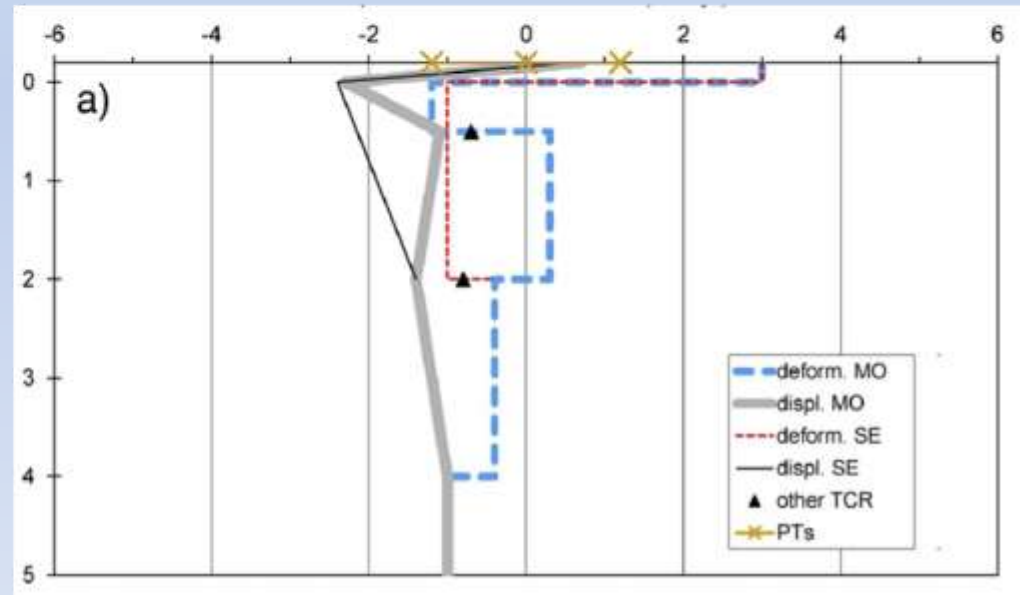


Modificata da Strozzi et al., 2013, JGR

Quantificazione della dinamica verticale delle barene: indagini integrate



Modificata da Da Lio et al., 2018, RSE



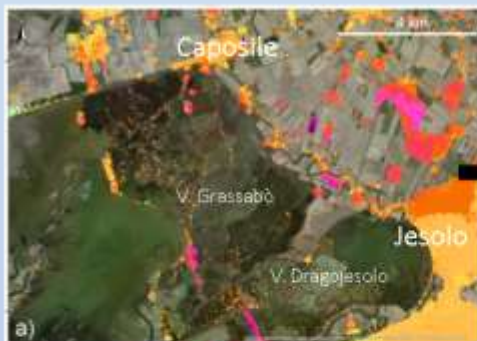
Integrazione dei dati SAR al suolo con misurazioni su capisaldi e prototipi di riflettori installati in barene in aree prive di strutture riflettenti

Migliorare le conoscenze della subsidenza in lagunare e nelle aree agricole limitrofe: integrazione dei prodotti interferometrici ottenuti da satelliti in banda X e in banda L

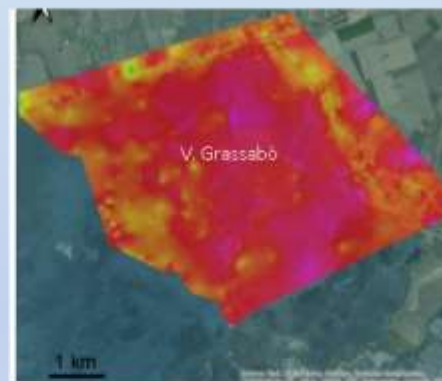
ALOS (banda L)

COSMO-SkyMed (banda X)

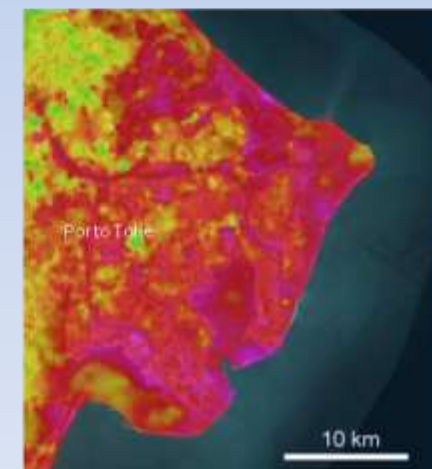
Analisi integrata dei prodotti
Banda L e Banda X



=



=



Modificata da Tosi et al., 2016, Remote Sensing



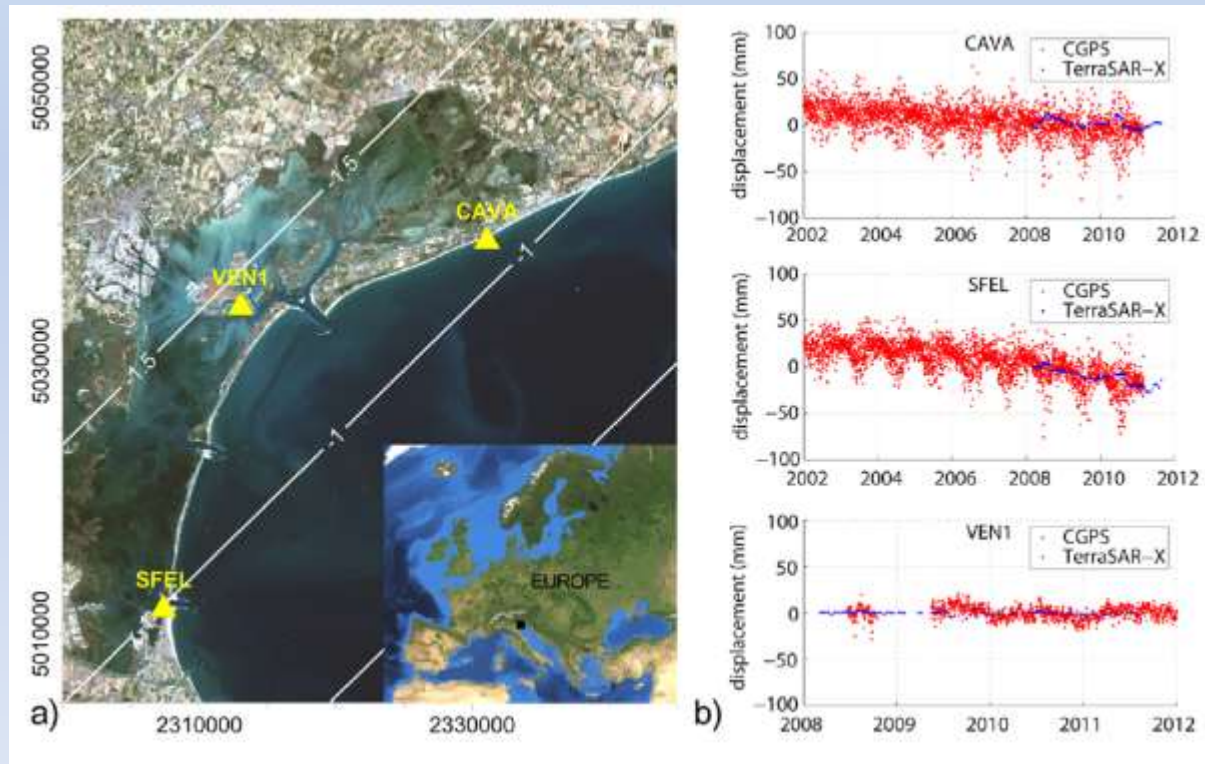
ALOS PALSAR, Project AOALO-3550, © JAXA
COSMO-SkyMed AO, Project ID 2100 © ASI

Considerazioni conclusive

Rete di calibrazione dei prodotti interferometrici unica

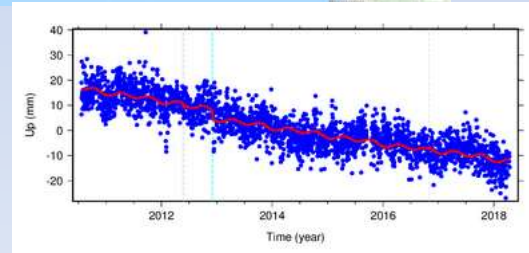
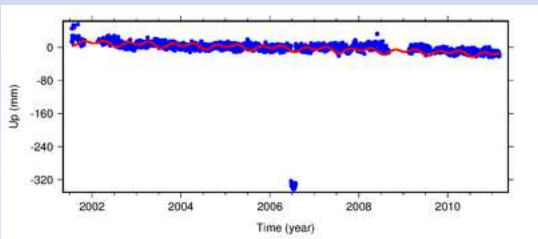
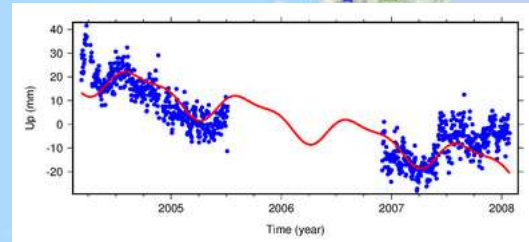
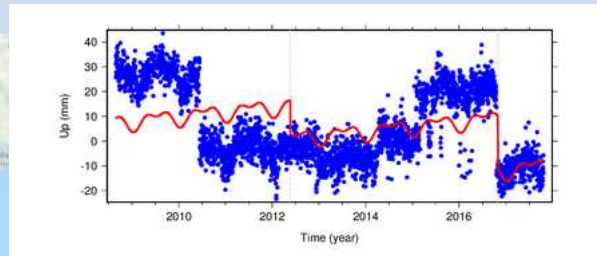
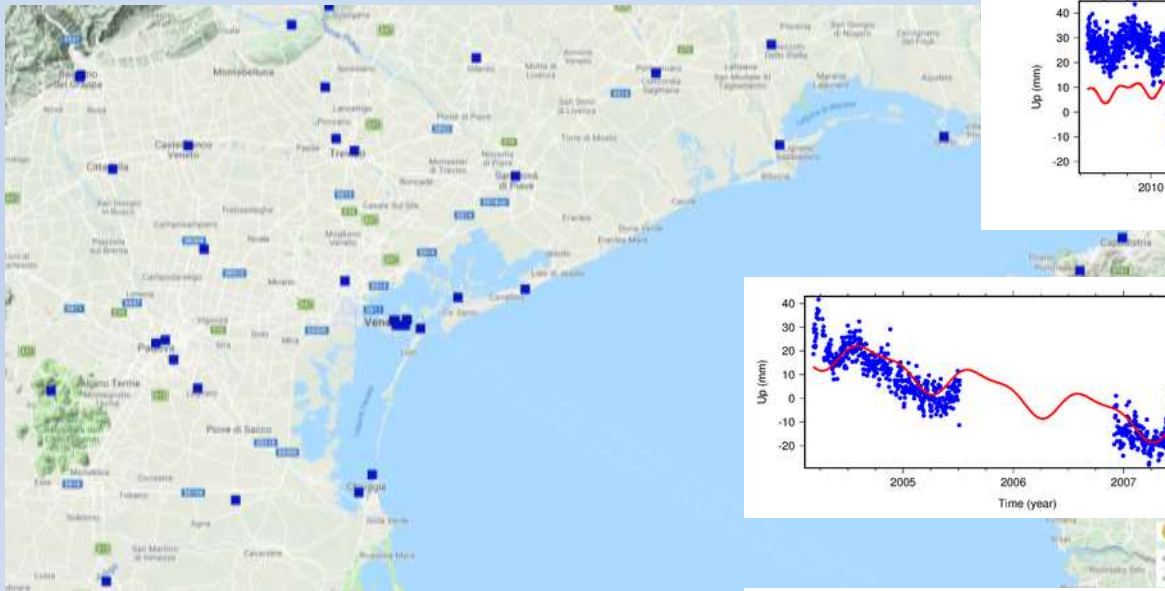
Le misure di spostamento del terreno ottenute con l'analisi interferometrica delle immagini satellitari SAR sono «misure relative» e necessitano di una accurata calibrazione.

Inoltre la non perfetta conoscenza dell'orbita introduce un errore non trascurabile per le analisi con precisione millimetrica di data set a scala regionale.



Tosi et al., 2015

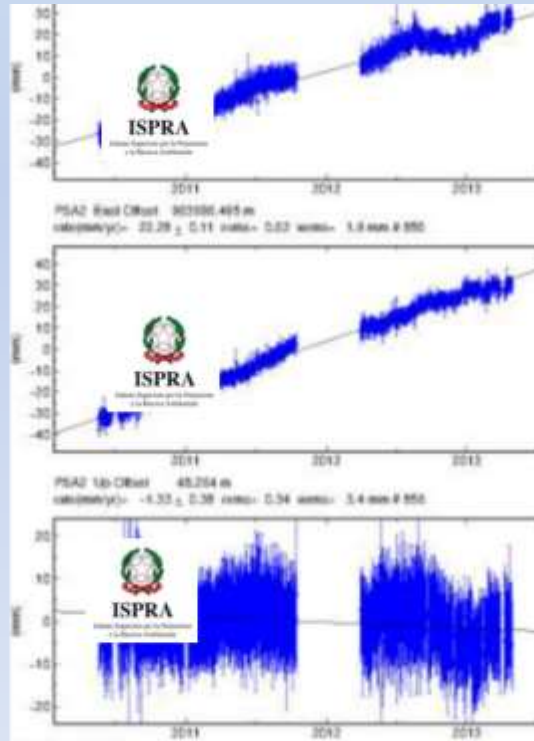
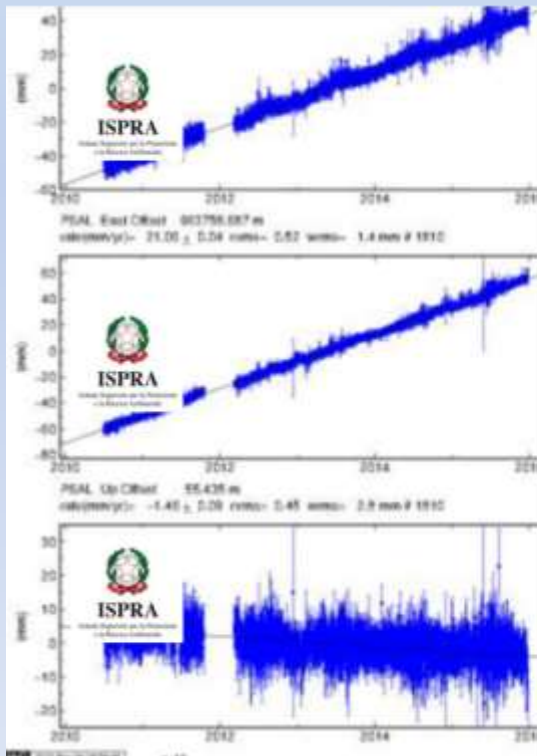
Recentemente le varie stazioni GPS presenti nel territorio sono state messe a sistema per il posizionamento GNSS (Regione del Veneto). Tuttavia le serie temporali sono spesso discontinue e non consentono di ottenere precisioni millimetriche utili per la calibrazione dei dati SAR.



<http://geodesy.unr.edu/>

Sarebbe auspicabile:

- Stabilire una rete di calibrazione «unica» con «*Ground Truth*» di fiducia.
- Individuare un'Autorità che processi e fornisca i dati «ufficiali» per le calibrazioni (almeno per le serie temporali CGPS).
- Accoppiare stazioni CGPS, mareografiche, riflettori SAR, ecc.



Elenco delle stazioni permanenti GPS delle reti locali ISPRa e CFSM considerate:

- PSAL (Punta Salute) - Rete ISPRa
- GRAD (Grado) - Rete ISPRa
- LIDO (Lido, Venezia) - Rete ISPRa
- PSA2 (Punta Salute) - Rete CFSM
- PCAV (Venezia centro) - Rete CFSM
- TREP (Treporti) - Rete CFSM
- PELL (Pellestrina) - Rete CFSM
- VAAV (Valle Averte) - Rete CFSM
- PORT (Portograndi) - Rete CFSM

Da Baldin 2017, ISPRa; Baldin G., Crosato F., 2017, ISPRa

Gli studi sulla subsidenza presentati sono stato condotti in collaborazione con:
Cristina Da Lio (CNR-ISMAR, Venezia); Pietro Teatini (Università di Padova e CNR-ISMAR) e Tazio Strozzi (Gamma Remote Sensing AG, Svizzera).

Bibliografia

- Da Lio C, Tosi L (2018). Land subsidence in the Friuli Venezia Giulia coastal plain, Italy: 1992-2010 results from SAR-based interferometry. *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT*, vol. 633, p. 752-764, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.03.244
- Da Lio C, Teatini P, Strozzi T, Tosi L (2018). Understanding land subsidence in salt marshes of the Venice Lagoon from SAR Interferometry and ground-based investigations. *REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT*, vol. 205, p. 56-70, doi: 10.1016/j.rse.2017.11.016.
- 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*, vol. 8, doi: 10.3390/rs8040308
- Trincardi F, Barbanti A, Bastianini M, Benetazzo A, Cavaleri L, Chiggiato J, Papa A, Pomaro A, Sclavo M, Tosi L, Umgiesser G (2016). The 1966 Flooding of Venice: What Time Taught Us for the Future. *OCEANOGRAPHY*, vol. 29, p. 178-186, doi: 10.5670/oceanog.2016.87
- Tosi, L., Da Lio, C., Strozzi, T., Teatini, P. (2016) Cosmo-SkyMed vs RADARSAT-2 for monitoring natural and anthropogenic components of the land movements in Venice. European Space Agency, (Special Publication) ESA SPSP-740
- Zecchin M, Tosi L (2014). Multi-sourced depositional sequences in the Neogene to Quaternary succession of the Venice area (northern Italy). *MARINE AND PETROLEUM GEOLOGY*, vol. 56, p. 1-15, doi: 10.1016/j.marpetgeo.2014.03.015
- Zecchin M, Tosi L, Caffau M, Baradello L, Donnici S (2014). Sequence stratigraphic significance of tidal channel systems in a shallow lagoon (Venice, Italy). *THE HOLOCENE*, vol. 24, p. 646-658, doi: 10.1177/0959683614526903
- Strozzi T, Teatini P, Tosi L, Wegmuller U, Werner C (2013). Land subsidence of natural transitional environments by satellite radar interferometry on artificial reflectors. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH. EARTH SURFACE*, vol. 118, p. 1177-1191, doi: 10.1002/jgrf.20082
- TOSI L, TEATINI P, STROZZI T (2013). Natural versus anthropogenic subsidence of Venice. *SCIENTIFIC REPORTS (NATURE)*, vol. 3, 2710, doi: 10.1038/srep02710
- Da Lio C, Tosi L, Zambon G, Vianello A, Baldin G, Lorenzetti G, Manfe G, Teatini P (2013). Long-term groundwater dynamics in the coastal confined aquifers of Venice (Italy). *ESTUARINE COASTAL AND SHELF SCIENCE*, vol. 135, p. 248-259, doi: 10.1016/j.ecss.2013.10.021
- Teatini P, Tosi L, Strozzi T (2012). Comment on "Recent subsidence of the Venice Lagoon from continuous GPS and interferometric synthetic aperture radar" by Y. Bock, S. Wdowinski, A. Ferretti, F. Novali, and A. Fumagalli. *GEOCHEMISTRY, GEOPHYSICS, GEOSYSTEMS*, vol. 13, Q07008, ISSN: 1525-2027, doi: 10.1029/2012GC004191
- Tosi L, Teatini P, Bincoletto L, Simonini P, Strozzi T (2012). Integrating Geotechnical and Interferometric SAR Measurements for Secondary Compressibility Characterization of Coastal Soils. *SURVEYS IN GEOPHYSICS*, vol. 33, p. 907-926, doi: 10.1007/s10712-012-9186-y
- Teatini P, Tosi L, Strozzi T, Carbognin L, Cecconi G, Rosselli R, Libardo S (2012). Resolving land subsidence within the Venice Lagoon by persistent scatterer SAR interferometry. *PHYSICS AND CHEMISTRY OF THE EARTH*, vol. 40-41, p. 72-79, doi: 10.1016/j.pce.2010.01.002

- Tosi L, Teatini P, Brancolini G, Zecchin M, Carbognin L, Affatato A, Baradello L (2012). Three-dimensional analysis of the Plio-Pleistocene seismic sequences in the Venice Lagoon (Italy). *JOURNAL OF THE GEOLOGICAL SOCIETY*, vol. 169, p. 507-510, doi: 10.1144/0016-76492011-093
- Teatini P, Castelletto N, Ferronato M, Gambolati G, Tosi L (2011). A new hydrogeologic model to predict anthropogenic uplift of Venice. *WATER RESOURCES RESEARCH*, vol. 47, W12507, doi: 10.1029/2011WR010900
- Rizzetto F, Tosi L (2011). Aptitude of modern salt marshes to counteract relative sea-level rise, Venice Lagoon (Italy). *GEOLOGY*, vol. 39, p. 755-758, doi: 10.1130/G31736.1
- Teatini P, Tosi L, Strozzi T (2011). Quantitative evidence that compaction of Holocene sediments drives the present land subsidence of the Po Delta, Italy. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH. SOLID EARTH*, vol. 116, B08407, doi: 10.1029/2010JB008122
- Carbognin L, Teatini P, Tomasin A, Tosi L (2010). Global change and relative sea level rise at Venice: what impact in term of flooding. *CLIMATE DYNAMICS*, vol. 35, p. 1055-1063, doi: 10.1007/s00382-009-0617-5
- Tosi L, Teatini P, Strozzi T, Carbognin L, Brancolini G, Rizzetto F (2010). Ground surface dynamics in the northern Adriatic coastland over the last two decades. *RENDICONTI LINCEI - SCIENZE FISICHE E NATURALI*, vol. 21, p. 115-129, doi: 10.1007/s12210-010-0084-2
- Strozzi T, Teatini P, Tosi L (2009). TerraSAR-X reveals the impact of the mobile barrier works on Venice coastland stability. *REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT*, vol. 113, p. 2682-2688, doi: 10.1016/j.rse.2009.08.001
- 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*, vol. 474, p. 271-284, doi: 10.1016/j.tecto.2009.02.026
- Gambolati G, Teatini P, Ferronato M, Strozzi T, Tosi L, Putti M (2009). On the uniformity of anthropogenic Venice uplift. *TERRA NOVA*, vol. 21, p. 467-473, ISSN: 0954-4879, doi: 10.1111/j.1365-3121.2009.00903.x
- Tosi L, Teatini P, Carbognin L, Frankenfield J (2007). A new project to monitor land subsidence in the northern Venice coastland (Italy). *ENVIRONMENTAL GEOLOGY*, vol. 52, p. 889-898, doi: 10.1007/s00254-006-0530-8
- Teatini P, Strozzi T, Tosi L, Wegmuller U, Werner C, Carbognin L (2007). Assessing short- and long-time displacements in the Venice coastland by synthetic aperture radar interferometric point target analysis. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH - EARTH SURFACE*, vol. 112, F01012, doi: 10.1029/2006JF000656
- Teatini P, Tosi L, Strozzi T, Carbognin L, Wegmuller U, Rizzetto F (2005). Mapping regional land displacements in the Venice coastland by an integrated monitoring system. *REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT*, vol. 98, p. 403-413, doi: 10.1016/j.rse.2005.08.002
- Carbognin L, Teatini P, Tosi L (2004). Eustacy and land subsidence in the Venice Lagoon at the beginning of the new millennium. *JOURNAL OF MARINE SYSTEMS*, vol. 51, p. 345-353, doi: 10.1016/j.jmarsys.2004.05.021
- Tosi L, Carbognin L, Teatini P, Strozzi T, Wegmuller U (2002). Evidence of the present relative land stability of Venice, Italy, from land, sea, and space observations. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, vol. 29, 1562, doi: 10.1029/2001GL013211
- Teatini P, Gambolati G, Tosi L (1995). A new three-dimensional nonlinear model of the subsidence at Venice. *IAHS PUBLICATION*, vol. 234, p. 353-361
- Carbognin L, Marabini F, Tosi L (1995). Land subsidence and degradation of the Venice littoral zone, Italy. *IAHS PUBLICATION*, vol. 234, p. 391-402
- Carbognin L, Tosi L, Teatini P (1995). Analysis of actual land subsidence in Venice and its hinterland (Italy). In: (a cura di): Barends FBJ; Brouwer FJJ; Schroder FH, *LAND SUBSIDENCE: NATURAL CAUSES, MEASURING TECHNIQUES, THE GRONINGEN GASFIELDS*. p. 129-137, ROTTERDAM:A.A. BALKEMA- BROOKFIELD, ISBN: 90-5410-589-5