



# Venezia2021

## Linea 3.1

*Subsidenza della laguna di Venezia  
e evoluzione morfologica connessa a processi  
erosivi e deposizionali combinati a  
Relative Sea Level Rise*

**Responsabile di Linea  
Luigi Tosi (CNR-IGG)**

*Il riunione plenaria  
Venezia, 2-3 aprile 2019*

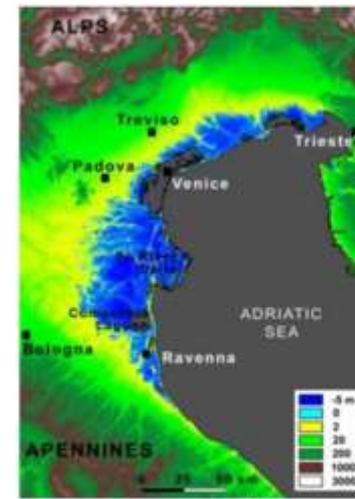


Il relative sea level rise (RSLR), ovvero la **perdita di quota altimetrica rispetto al medio mare** è tra i processi con maggiore impatto nelle aree di pianura costiera in tutto il mondo.

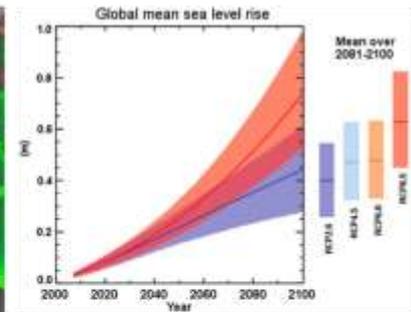
Il RSLR è la combinazione di 1) **Movimenti del suolo** e 2) **Variazioni del livello del mare**.

La **subsidenza** per compattazione è un processo praticamente **irreversibile**.

Nell'area costiera veneziana, la subsidenza pur non avendo magnitudo considerevoli come in altre aree nel mondo è comunque **molto preoccupante** data la peculiarità dell'**elevazione** del territorio (spesso ben al di sotto del medio mare), l'importanza dell'**ambiente lagunare** e gli scenari di **SLR**.



2- Elevazione del suolo



3- Analisi delle tendenze del livello marino

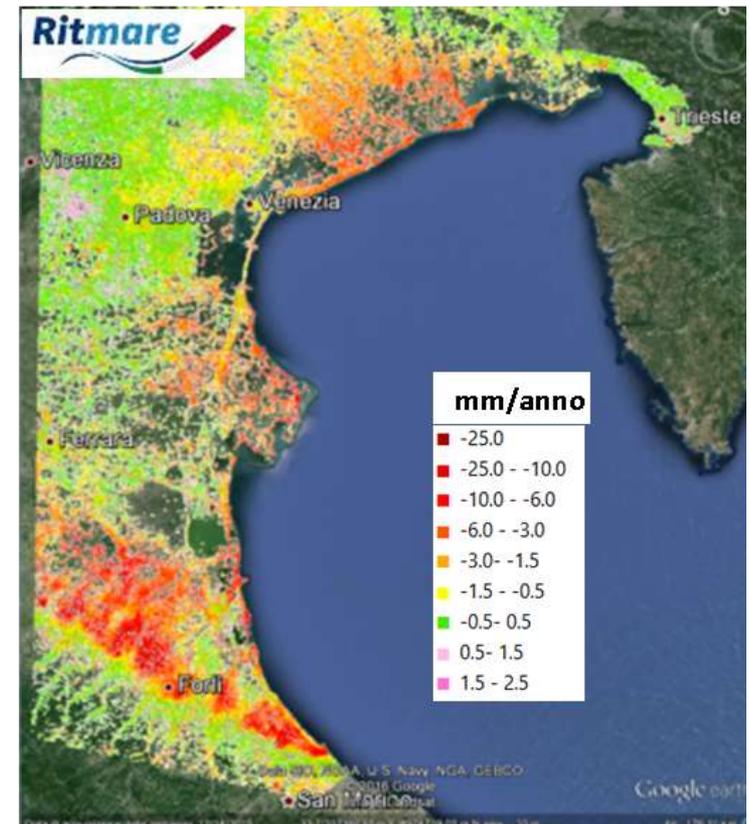
La **subsidenza** costiera nord adriatica è fortemente **eterogenea** sia a scala locale che regionale. Nell'area Veneziana ha velocità variabili tra meno di 1 mm/anno a oltre 10 mm/anno.

Il sea level rise è tra 1.5 a 3.5 mm/anno, a seconda del periodo considerato.

Nella area veneziana, **subsidenza** e l'**eustatismo** hanno portato a una perdita altimetrica rispetto al medio mare variabile da 30 cm a oltre 60 cm nell'ultimo secolo.

Oggi più che mai è necessario un **continuo monitoraggio e aggiornamento** delle conoscenze del processo di **subsidenza**, che nell'area veneziana è particolarmente complesso per la specificità dell'ambiente di transizione.

**Quantificare e monitorare la subsidenza** è inoltre fondamentale per conoscere l'**evoluzione delle morfologie lagunari** sotto la forzante del “**relative sea level rise**” e per indirizzare la progettazione delle opere e gli interventi per la salvaguardia di Venezia e della laguna.



## Progressivo sviluppo della rete di monitoraggio



Leveling network: 250 km  
Benchmark spacing: 1 km

1993

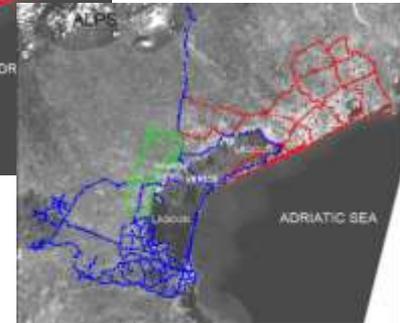


2000

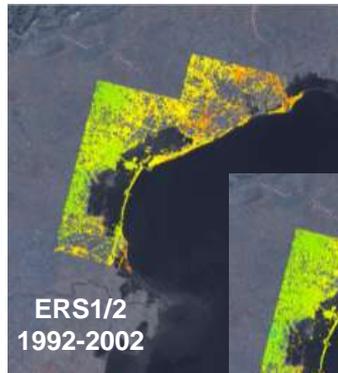


2005

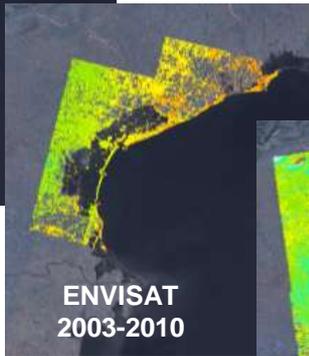
Leveling: 2100 km  
(2500 benchmarks)  
DGPS benchmark: 200



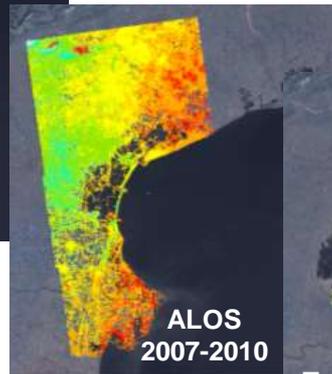
2009



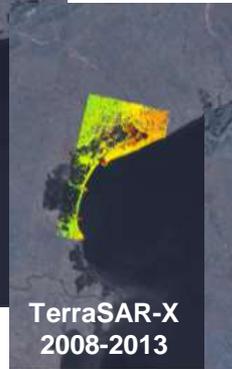
ERS1/2  
1992-2002



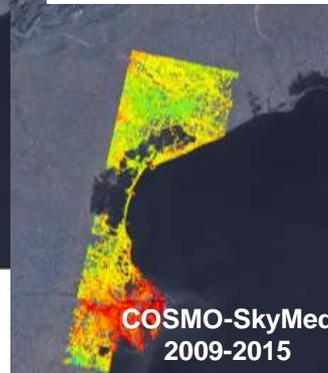
ENVISAT  
2003-2010



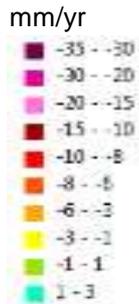
ALOS  
2007-2010



TerraSAR-X  
2008-2013



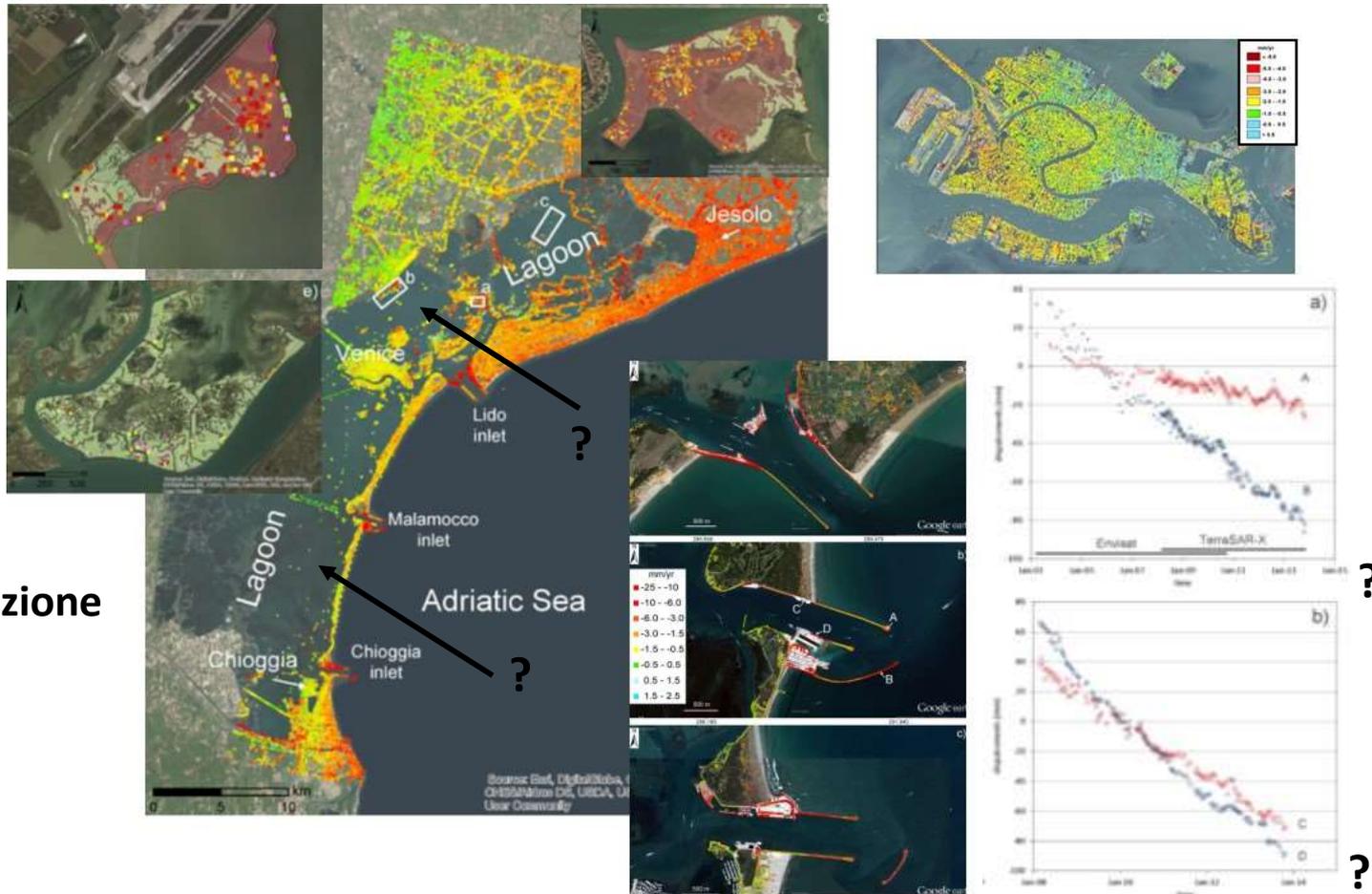
COSMO-SkyMed  
2009-2015



INLET Project, ERS & ENVISAT ASAR data ©ESA  
ALOS PALSAR, Project AOALO-3550, © JAXA  
TerraSAR-X AO, Project COA0612© DLR  
COSMO-SkyMed AO, Project ID 2100 © ASI



CGPS

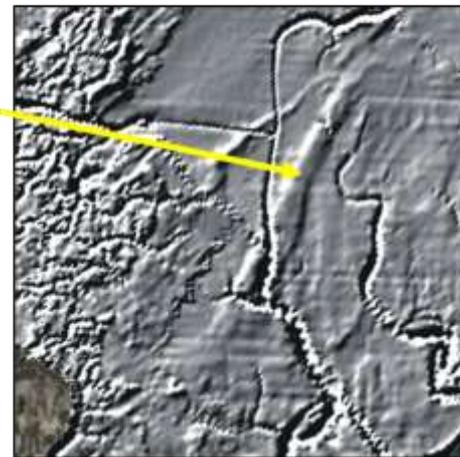
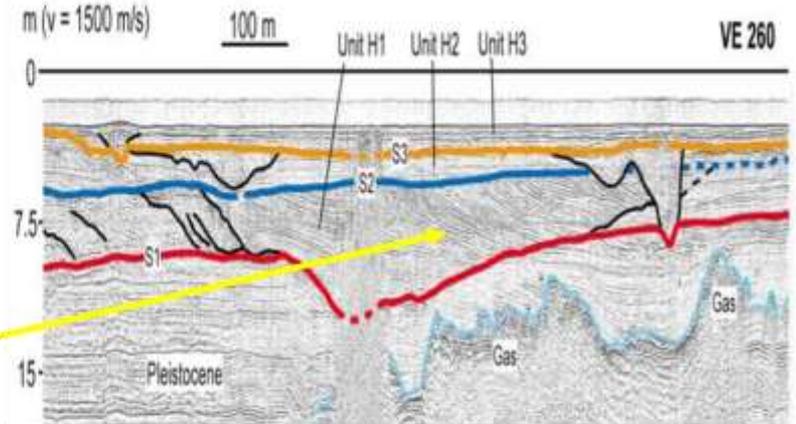


## Situazione 2013

Le informazioni sulla **subsidenza attuale** del bacino lagunare sono ancora scarse e non aggiornate.

Il principale contributo alla **subsidenza naturale** nell'area lagunare veneziana è dato dalla compattazione dei depositi olocenici.

I **depositi olocenici** presentano caratteristiche sedimentologiche molto variabili che combinate alla genesi e alla storia deposizionale conferiscono al sottosuolo **proprietà geo-meccaniche anche molto diverse** e quindi comportamento alla **compattazione spazialmente molto variabile**.



## PERTANTO E' NECESSARIO

- acquisire informazioni sui movimenti del suolo nell'area lagunare,
- acquisire informazioni sulle caratteristiche del sottosuolo olocenico,
- sviluppare un modello previsionale di evoluzione delle morfologie connesse al RSLR.

### Linea 3.1

La ricerca è **finalizzata** a **quantificare l'attuale subsidenza** della laguna di Venezia, **individuare le forzanti** geologiche e antropiche, e **prevederne la possibile evoluzione** nei prossimi decenni in considerazione dei processi erosivi, deposizionali e del RSLR (Relative Sea Level Rise).

In particolare gli **obiettivi** della Linea 3.1 sono i seguenti:

- Quantificare la subsidenza naturale e indotta, comprenderne i meccanismi e valutare la vulnerabilità della costa all'innalzamento del livello marino relativo.
- Caratterizzare l'assetto geologico e geomorfologico tardo-pleistocenico ed olocenico del sottosuolo lagunare per comprendere come questi possano influenzare la subsidenza naturale e indotta osservata.
- Caratterizzare il comportamento geomeccanico del suolo/sottosuolo lagunare e simulare la subsidenza naturale olocenica.

## Attività

**L'attuale subsidenza:** misurata attraverso le analisi interferometriche utilizzando le immagini acquisite dai sensori satellitari SAR.

**L'architettura del sottosuolo lagunare:** definita con i rilievi sismici ad altissima risoluzione.

La **compressibilità** del terreno lagunare: indagata con prove di carico in situ e analisi di laboratorio.

**L'evoluzione del bacino lagunare:** in funzione dell'apporto di sedimento, della consolidazione e dell'innalzamento del RSLR sarà simulato con modello 2D/3D a griglia adattativa in grado di simulare le grandi deformazioni che caratterizzano la consolidazione naturale dei terreni superficiali.

La Linea 3.1 intende anche proporre delle **azioni sinergiche** e di coordinamento con gli Enti preposti al controllo della subsidenza costiera, che dovranno essere attentamente valutate e predisposte in forza di aggiornate conoscenze tecniche-scientifiche.

## La Linea è strutturata in 3 WPs che si sviluppano con attività fortemente interconnesse



CNR  
Istituto di  
Geoscienze e Georisorse

Luigi  
Tosi

*WP 3.1.1 “Analisi della subsidenza e della vulnerabilità al Relative Sea Level Rise”*



OGS  
Istituto Nazionale di  
Oceanografia e di Geofisica  
Sperimentale

Massimo  
Zecchin

*WP 3.1.2 “Architettura dei depositi tardo-pleistocenici ed olocenici”*



UNIPD  
Dipartimento Ingegneria Civile  
Edile e Ambientale Università  
di Padova

Pietro  
Teatini

*WP 3.1.3 “Comportamento geomeccanico dei depositi lagunari, modellazione e sviluppo di scenari previsionali della subsidenza naturale olocenica”*

## WP 3.1.1

### “Analisi della subsidenza e della vulnerabilità al Relative Sea Level Rise”



CNR - Istituto di Geoscienze e Georisorse

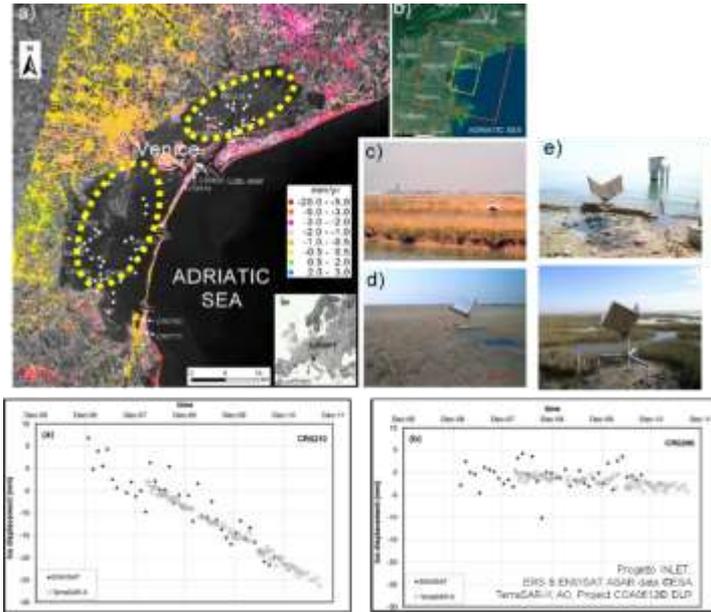
Obiettivi: i) la quantificazione della subsidenza naturale e antropica; ii) l'analisi di vulnerabilità al RSLR; iii) produrre input per la modellistica numerica geomeccanica.

#### **Task:**

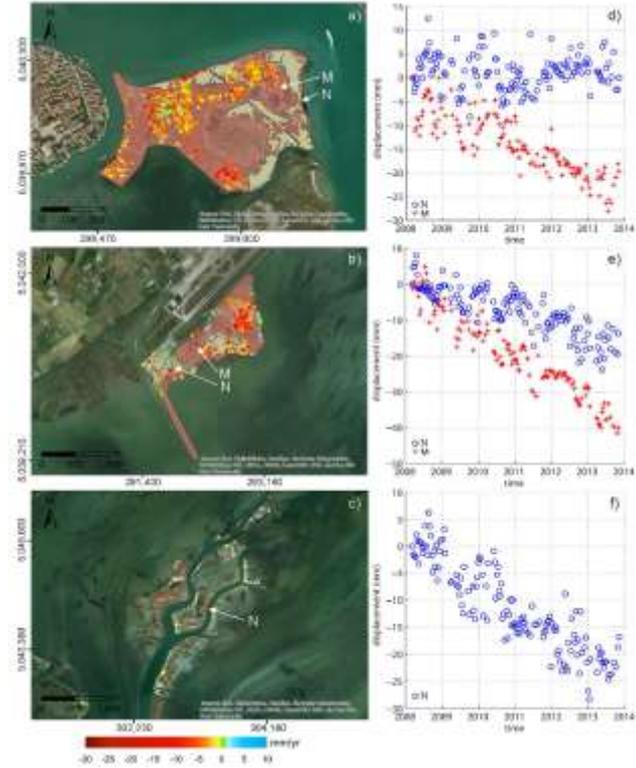
3.1.1.1 – Analisi dei dati interferometrici ottenuti dalle immagini satellitari SAR.

3.1.1.2 – Analisi di vulnerabilità al Relative Sea Level Rise.

3.1.1.3 – Analisi della subsidenza olocenica.



Satellite Radar Interferometry on Artificial Reflectors



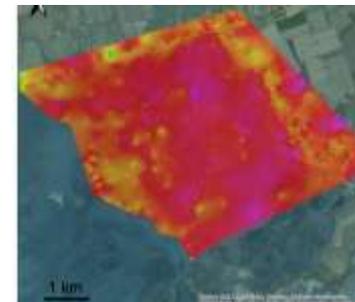
ALOS (L-band)



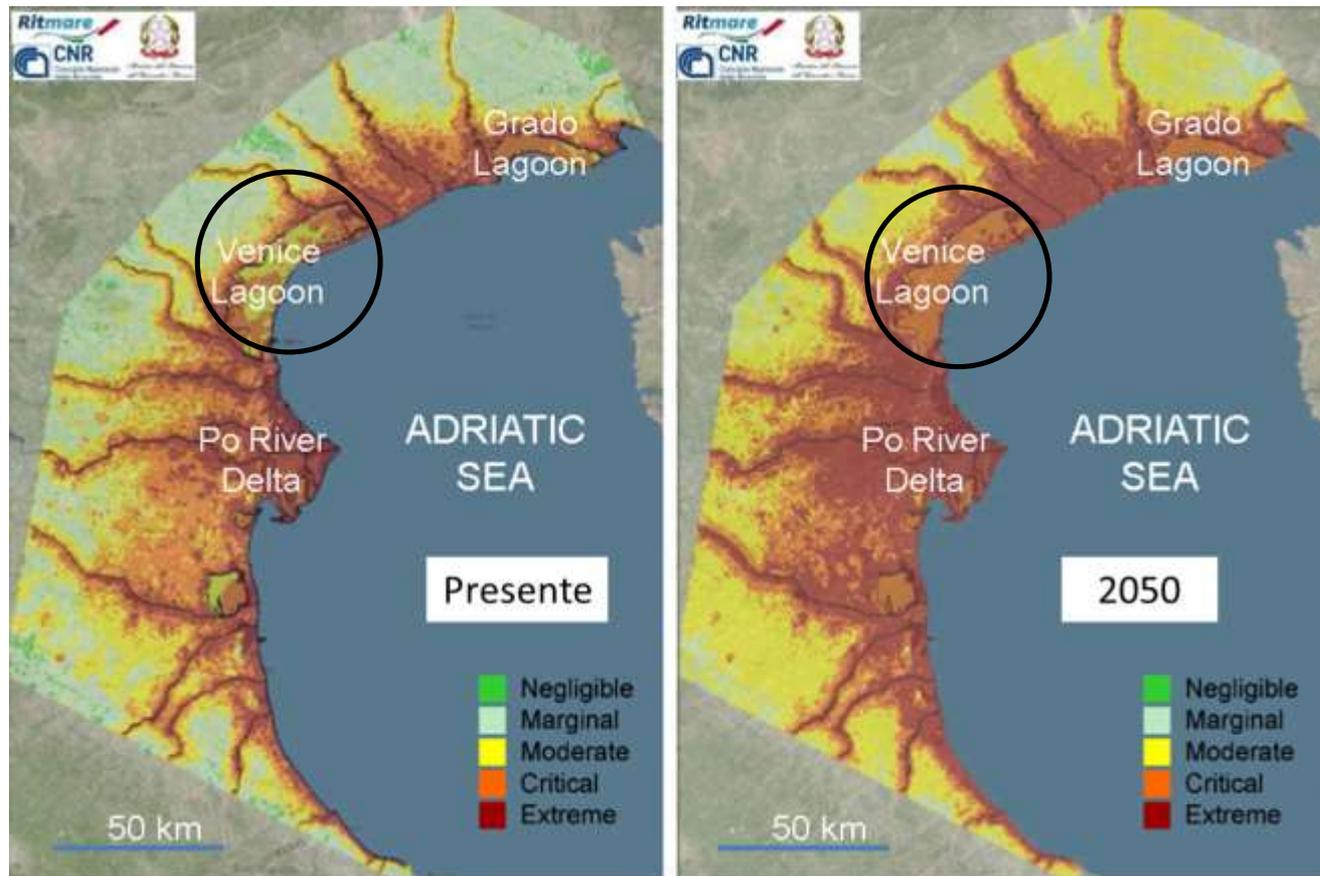
COSMO-SkyMed (X-band)



Combined L- and X-Band SAR Interferometric products



## Vulnerabilità all'aumento del livello marino relativo della costa nord Adriatica



## WP 3.1.2

### “Architettura dei depositi tardo-pleistocenici ed olocenici”



Obiettivi: a) acquisire informazioni sul sottosuolo dei bassi fondali lagunari, b) caratterizzare l'architettura dei depositi tardo-pleistocenici ed olocenici, c) fornire un supporto per l'interpretazione del processo di subsidenza e la modellistica numerica.

#### **Task:**

3.1.2.1 – Acquisizione e processing di profili sismici.

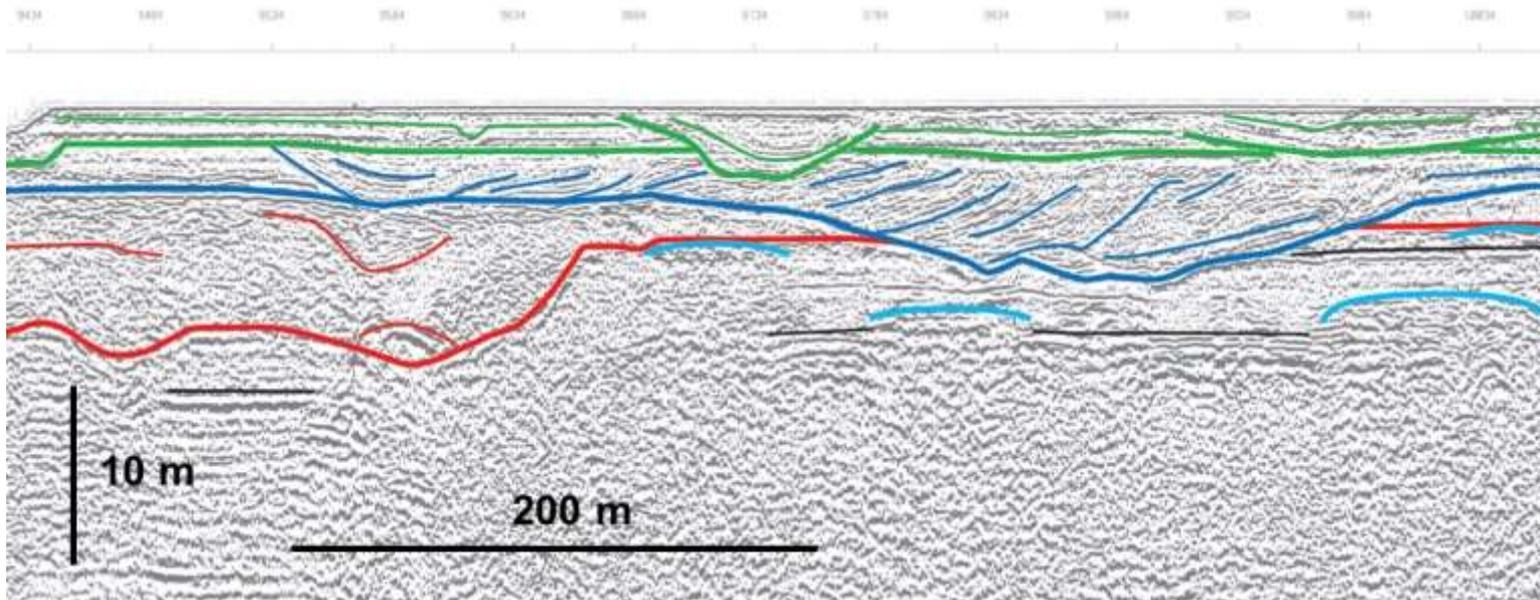
3.1.2.3 – Analisi sismo-stratigrafica.

3.1.2.2 – Interpretazione geologica e geomorfologica dei profili sismici.



Sistema di acquisizione sismica a riflessione monocanale ad altissima risoluzione (BOOMER) ottimizzato per bassissimi fondali (80-100 cm) composto da una sorgente elettrodinamica e uno streamer di 3 m con 8 idrofoni. La sorgente emette onde a larga banda (400-9000 Hz). Consente una risoluzione di 20 cm e una penetrazione di 20-30 m.

## Sezioni VHRS processate e interpretate



## WP 3.1.3

### “Comportamento geomeccanico dei depositi lagunari, modellazione e sviluppo di scenari previsionali della subsidenza naturale olocenica”

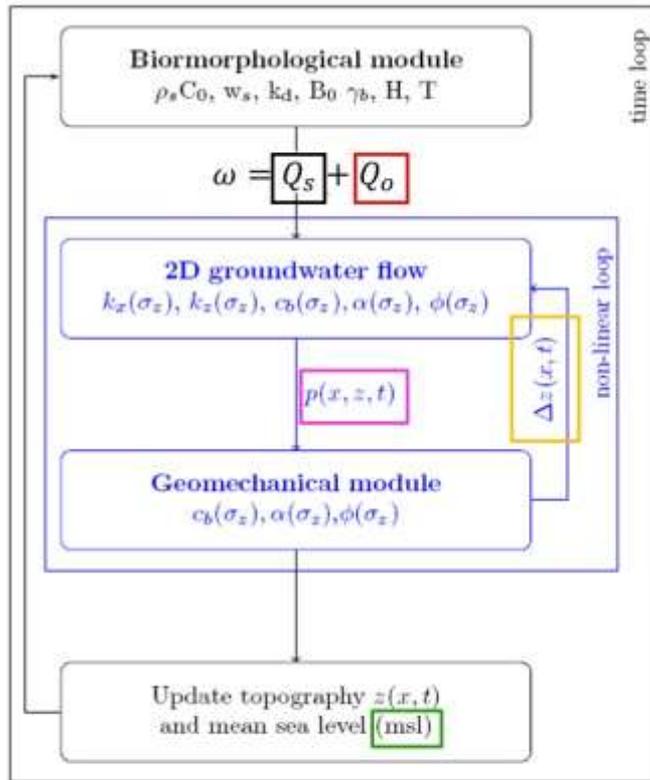


Obiettivi: a) la **caratterizzazione delle proprietà geomeccaniche** dei terreni più superficiali lagunari attraverso l'esecuzione di innovative prove di carico in-situ e l'interpretazione delle misure di spostamento - sovrappressione per mezzo di un modello geomeccanico accoppiato; b) lo sviluppo di un **modello di subsidenza in ipotesi di grandi deformazioni** per la simulazione dell'evoluzione olocenica di forme morfologiche lagunari

#### Task:

3.1.3.1 – Sviluppo di leggi costitutive appropriate per la caratterizzazione del comportamento geomeccanico dei terreni olocenici lagunari.

3.1.3.2 – Modellazione della subsidenza naturale olocenica nell'area lagunare e sviluppo di scenari previsionali.



$$Q_s(x, t) = \frac{w_s}{\rho_b} \frac{n_T}{T} \int C(x, t) dt$$

**D'Alpaos et al. (2007)**  
**Marani et al. (2019)**  
**Da Lio et al. (2013)**

$$Q_o(x, t) = \gamma_b B(z) = \gamma_b B_0 f(z)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{k_x(\sigma_z)}{\gamma} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{k_z(\sigma_z)}{\gamma} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = (c_b(\sigma_z) + \phi(\sigma_z)\beta) Dp - c_b(\sigma_z)(1 - \phi_0)(\gamma_s - \gamma)\omega(x, t)$$

$$\Delta z(z, t) = - \int_0^z \frac{\alpha \sigma_z}{1 - \alpha \sigma_z} dz$$

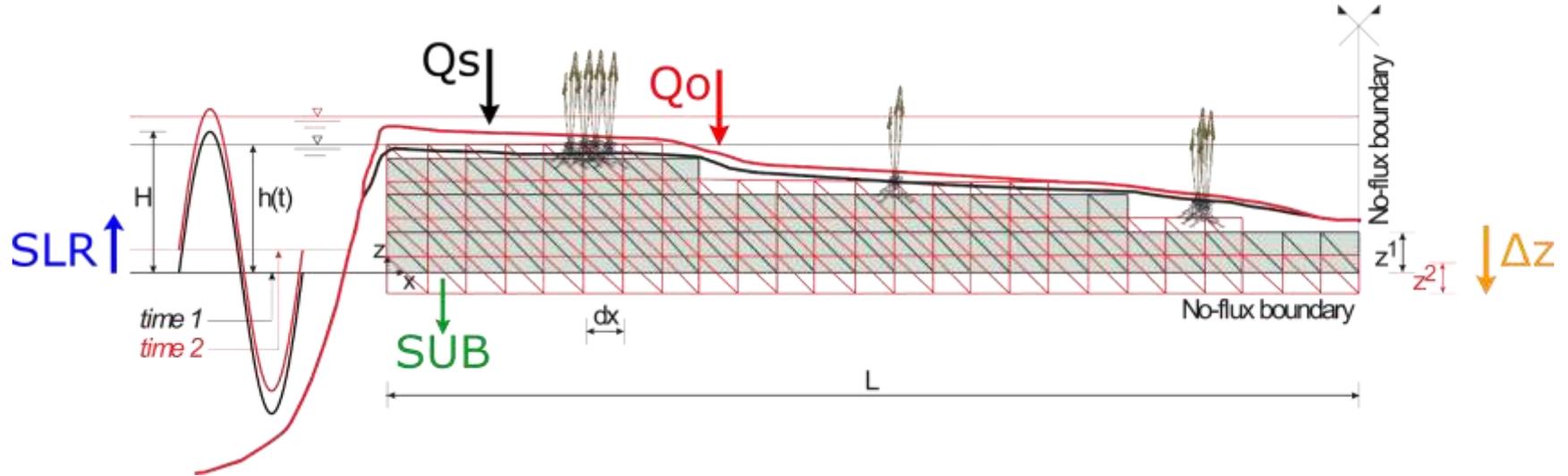
**Zoccarato and Teatini,**  
**AWR (2017)**

$$msl = msl - SUB + SLR$$

(-)      (+)

Hydro-geomechanical feedback on tidal marsh resilience

## BIO-MORPHO-GEOMECHANICAL MODEL



*D'Alpaos et al. (2007)*  
*Marani et al. (2019)*  
*Da Lio et al. (2013)*

*Zoccarato and Teatini, (2017)*

$$\frac{dz}{dt} = \boxed{Qs(x,t)} + \boxed{Qo(x,t)} - \boxed{\Delta z(x,t)}$$

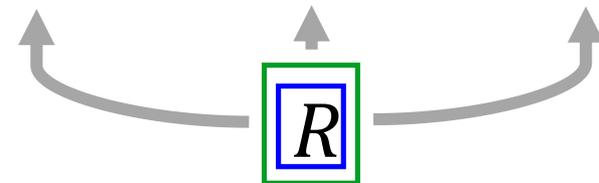
$z(x,t)$  = salt marsh elevation (topography)

$Qs(x,t)$  = local time – averaged **inorganic** settling rate

$Qo(x,t)$  = local time – averaged **organic** accretion rate

$\Delta z(x,t)$  = thickness variation due to consolidation

$R(x,t)$  = relative sea level rise (SUB + SLR)



## Area di studio



## Attività in corso



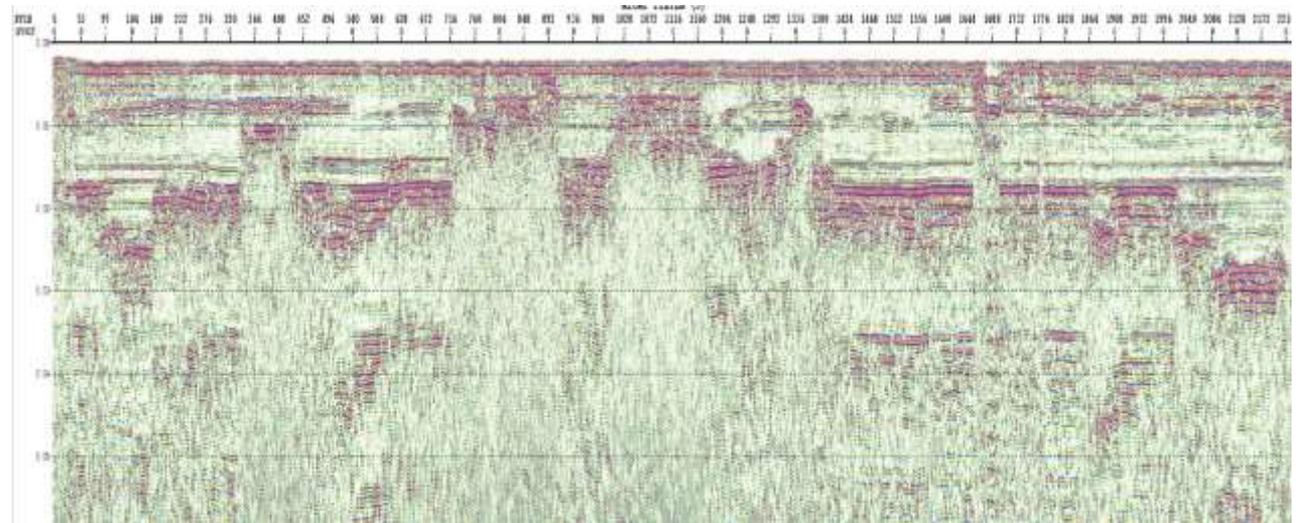
### Prove di carico in situ

Peso: 4.000 kg 1.5×1.5 m<sup>2</sup> di superficie  
Profondità di misura: 0, 10, 20, e 50 cm



### Campionamenti

Realizzate due campagne di acquisizione (18-22 febbraio e 4-8 marzo)



*Linea 3.1: Subsidenza della laguna di Venezia e evoluzione morfologica connessa a processi erosivi e deposizionali combinati a Relative Sea Level Rise*

## Partecipanti Linea 3.1

<b>Tosi Luigi</b>	<b>CNR</b>
<b>Da Lio Cristina</b>	<b>CNR</b>
<b>Alessandro Bergamasco</b>	<b>CNR</b>
<b>Andrea Bergamasco</b>	<b>CNR</b>
<b>Davide Tagliapietra</b>	<b>CNR</b>
<b>Zecchin Massimo</b>	<b>OGS</b>
<b>Baradello Luca</b>	<b>OGS</b>
<b>Caffau Mauro</b>	<b>OGS</b>
<b>Teatini Pietro</b>	<b>UNIPD</b>
<b>Ferronato Massimiliano</b>	<b>UNIPD</b>
<b>Mazzia Annamaria</b>	<b>UNIPD</b>
<b>Zoccarato Claudia</b>	<b>UNIPD</b>
<b>Assegnista</b>	<b>UNIPD</b>
<b>Eleonora Carol</b>	<b>CONICET</b>
<b>Giorgio Baldin</b>	<b>ISPRA</b>
<b>Tazio Strozzi</b>	<b>GAMMA</b>

# Grazie per l'attenzione