

SULL'EVOLUZIONE ALTIMETRICA DELLE BARENE DELLA LAGUNA DI VENEZIA IN RELAZIONE ALL'ATTESO "RSLR"

Pietro Teatini ^{1*}, Claudia Zoccarato ¹, Cristina Da Lio ² & Luigi Tosi ²

(1) Dipartimento di Ingegneria Civile Edile ed Ambientale, Università di Padova (Padova)

(2) Istituto di Scienze Marine, Consiglio Nazionale delle Ricerche (Venezia)

*email: pietro.teatini@unipd.it

ASPETTI CHIAVE

- E' proposto un modello numerico per lo studio dell'evoluzione altimetrica di barene lagunari.
- Sono accoppiati i processi di sedimentazione, consolidazione e "relative sea level rise" (RSLR).
- Si utilizza una griglia 2D adattativa per seguire il processo evolutivo.
- Il modello è applicato alla barena S. Felice in Laguna di Venezia.
- E' richiesta una sedimentazione di ~ 5 mm/anno per contrastare l'atteso RSLR al 2100.

1 PREMESSA

L'ambiente lagunare, in particolare le barene, si distingue per la presenza di numerosi e interconnessi processi di natura fisica, chimica e biologica (D'Alpaos *et al.*, 2012) che esercitano un'influenza significativa sull'evoluzione altimetrica delle piane tidali rispetto al livello medio mare (lmm). Quantificare l'evoluzione altimetrica delle barene è di grande rilevanza per valutarne la loro permanenza in relazioni a forzanti esterne mutevoli come, per esempio, quelle connesse ai cambiamenti climatici. Inoltre, l'analisi della successione stratigrafica del sottosuolo barenicolo permette di ricostruire l'evoluzione Olocenica del lmm, fornendo importanti indicazioni su possibili scenari di evoluzione futura (Brain *et al.*, 2015).

L'innalzamento o la perdita di quota di queste forme morfologiche è controllato principalmente dalla disponibilità del materiale organico/inorganico che contribuisce alla sedimentazione, la compattazione dei terreni depositati per peso proprio, i processi erosivi innescati da onde e correnti, nonché da fattori esterni quali l'innalzamento del lmm e la subsidenza profonda (nel seguito "relative sea level rise", RSLR) (Allen, 2000). Generalmente, i modelli per lo studio della formazione e dell'evoluzione delle barene non considerano in modo esplicito il processo di consolidazione naturale del suolo barenicolo, riassumendolo all'interno del RSLR (Marani *et al.*, 2010; Da Lio *et al.*, 2013) o rappresentandolo attraverso semplici relazioni empiriche mono-dimensionali (Massey *et al.*, 2006; Brain *et al.*, 2011). Tuttavia, nelle analisi di medio-lungo termine, una modellazione numerica fisicamente basata del processo di consolidazione naturale dei depositi superficiali lagunari può fornire delle risposte quantitative più accurate sulla possibile evoluzione altimetrica di tali ambienti permettendo, per esempio, di valutare il tasso di sedimentazione ω in grado di contrastare un certo scenario di RSLR. È evidente, infatti, come in uno stesso intervallo di tempo Δt il deposito $\omega \Delta t$ di un materiale organico molto compressibile, "produca" uno spessore di suolo (e quindi un accrescimento della superficie di una barena) assai inferiore di quello fornito dallo stesso valore $\omega \Delta t$ di sedimenti limo-sabbiosi assai meno deformabili.

In questo contributo è proposto un originale approccio modellistico bidimensionale (2D) e fisicamente basato per simulare l'evoluzione altimetrica di lungo periodo di una barena, in cui i processi geomeccanici che intervengono sono accuratamente rappresentati. Un'applicazione preliminare del modello è stata condotta sulla barena San Felice in Laguna di Venezia, dove la disponibilità di dati geotecnici e di misure di deposizione, compattazione e subsidenza ne hanno permesso la calibrazione. Il modello è stato quindi applicato in fase previsionale fornendo interessanti risultati sulla possibile evoluzione di questa barena in relazione all'atteso RSLR.

2 APPROCCIO MODELLISTICO

La dinamica verticale di una barena è simulata utilizzando un modello numerico agli elementi finiti che tiene conto della sedimentazione sulla superficie, della consolidazione del terreno conseguente all'aumento

della tensione totale per sedimentazione di nuovo materiale sulla superficie, e del RSLR.

Il modello è costituito dall'equazione di flusso sotterraneo che governa la dissipazione della sovrappressione in un dominio 2D che subisce grandi deformazioni ed evolve a seguito della sedimentazione di nuovo materiale sulla superficie (Zoccarato & Teatini, 2017):

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

dove p è la variazione di pressione nei pori del mezzo rispetto alla pressione idrostatica, $k_x(\sigma_z)$, $k_z(\sigma_z)$ sono la conducibilità idraulica lungo le coordinate spaziali x e z , σ_z la tensione verticale efficace, γ_w e γ_s sono il peso specifico dell'acqua e del solido, $c_b(\sigma_z)$ è la compressibilità edometrica del materiale, $\phi(\sigma_z)$ è la porosità del mezzo poroso, ϕ_0 la porosità iniziale (cioè del sedimento sulla superficie della barena), β è la compressibilità volumetrica dell'acqua, $D = \partial/\partial t + v_{g,z} \partial/\partial z$ è la derivata totale con $v_{g,z}$ la velocità verticale dei grani, e t è il tempo. Una volta calcolato il flusso nel dominio 2D, la compattazione della barena $\Delta u(x,z,t)$ può essere espressa come (Zoccarato & Teatini, 2017):

$$\Delta u = - \int_0^z \frac{\alpha \sigma_z}{1 - \alpha \sigma_z} dz \quad (2)$$

con $\alpha(\sigma_z)$ la compressibilità del suolo legata a c_b dalla relazione $c_b = \left(p \frac{\partial \alpha}{\partial p} + \alpha \right) / (1 + \alpha p)$ (Gambolati et al., 1998). L'equazione (2) tiene conto in modo matematicamente "corretto" del movimento delle particelle solide causate dalla riduzione di porosità del mezzo poroso. La tensione σ_z è funzione di x , z e t . Le caratteristiche idro-geomeccaniche dei depositi che formano la sequenza litologica barenale variano con la tensione efficace attraverso leggi empiriche (non linearità legata al materiale). Il modello permette di analizzare l'interazione di diverse tipologie di depositi, ciascuna caratterizzata da specifiche leggi costitutive.

Inoltre, il modello tiene in considerazione la non linearità geometrica che scaturisce dalla formulazione alle grandi deformazioni risolta con approccio Lagrangiano, in cui i nodi della griglia seguono gli spostamenti dei grani, deformandosi concordemente al fenomeno di accrescimento-compattazione. Ne consegue che la griglia di calcolo è di tipo adattivo e, quindi, la configurazione varia durante la simulazione. In questo modo, la derivata totale su un nodo che si sposta con velocità v_g può essere trattata come una semplice derivata parziale $\partial/\partial t$. L'equazione (1) è integrata nello spazio con il metodo degli elementi finiti e nel tempo con uno schema tipo Eulero. La non-linearità dei parametri è risolta con un appropriato schema iterativo all'interno del quale vengono contemporaneamente aggiornate le coordinate (verticali) nodali sulla base dei valori forniti dall'equazione (2). Un nuovo nodo, e gli elementi ad esso connessi, vengono aggiunti sulla superficie della barena quando lo spessore del materiale depositato supera una tolleranza prescritta. Le proprietà dei nuovi elementi sono fissate sulla base della tipologia del materiale depositato per $\sigma_z=0$. Un esempio schematico della risposta modellistica è riportato in figura 1.

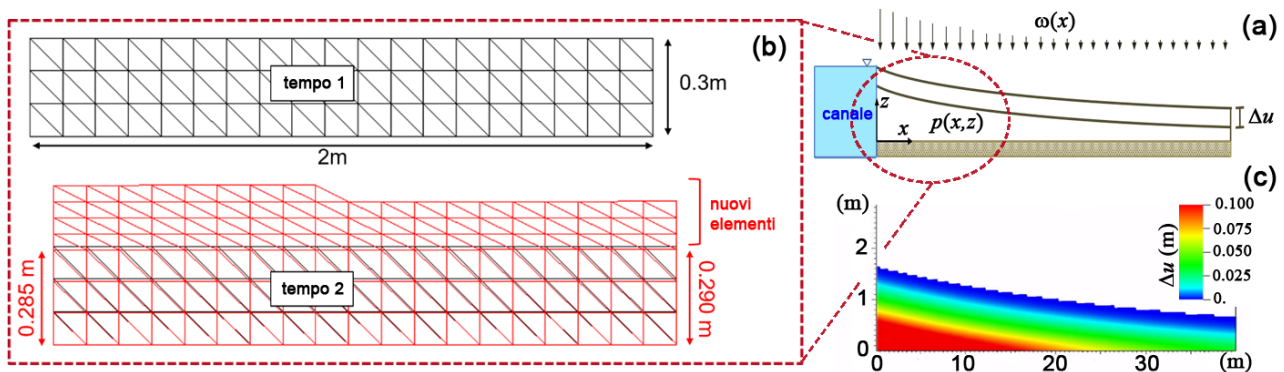


Figura 1. (a) Rappresentazione schematica del dominio di simulazione. (b) Griglia di calcolo di tipo adattivo: accrescimento e compattazione tra due tempi di calcolo. (c) Esempio di risultato modellistico in termini di compattazione Δu .

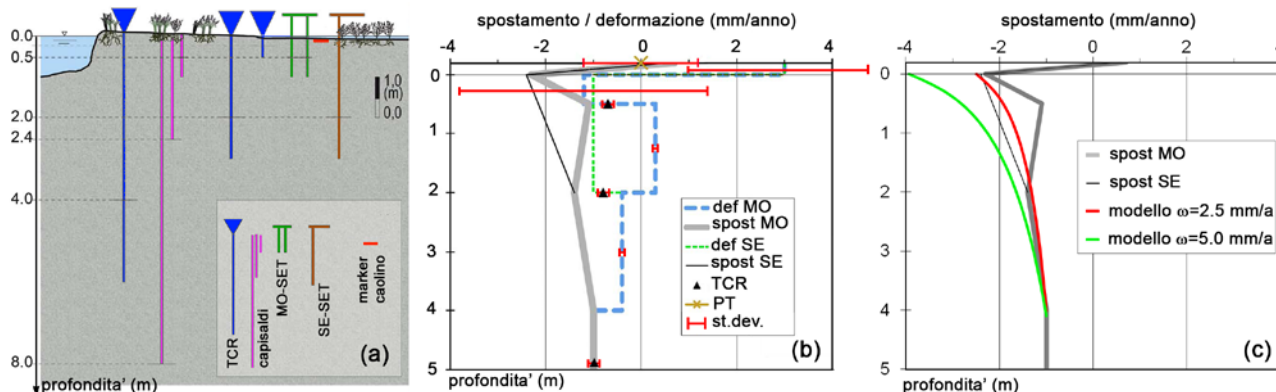


Figura 2. (a) Strumentazione installata in barena San Felice: riflettori SAR artificiali (TCR), capisaldi profondi, tavole di sedimentazione/erosione (MO-SET e SE-SET), marker a caolino (da *Da Lio et al. (2018)*). (b) Andamento della deformazione (e relativa deviazione standard) e dello spostamento al variare della profondità ricavata dalle misure su San Felice; i dati fanno riferimento a diversi periodi nell'intervallo compreso tra il 1993 e il 2013 (da *Da Lio et al. (2018)*). (c) Confronto tra spostamento misurato (con strumentazione MO e SE) e il risultato modellistico ottenuto con tassi di sedimentazione pari a 2.5 e 5.0 mm/anno.

3 APPLICAZIONE MODELLISTICA ALLA BARENA SAN FELICE

Il modello è stato utilizzato per simulare l'evoluzione altimetrica delle barene presenti nella Laguna di Venezia. In particolare è stata condotta una simulazione preliminare calibrando la risposta modellistica con la caratterizzazione geomeccanica e i dati di subsidenza e deformazione raccolti sulla barena San Felice. I risultati dello studio possono considerarsi rappresentativi delle barene tipiche della laguna Nord prossime alla bocca lagunare.

3.1 Calibrazione

La calibrazione del modello evolutivo della barena è stata condotta utilizzando i dati di sedimentazione/erosione, deformazione superficiale e profonda forniti da varie strumentazioni installate in barena San Felice e monitorate in periodi purtroppo non simultanei compresi tra il 1993 e il 2013. Con riferimento alla figura 2a, la strumentazione utilizzata consiste in: i) riflettori artificiali SAR (TCR) (*Strozzi et al., 2013*); ii) un gruppo di capisaldi profondi monitorati con livellazione di alta precisione; iii) apparati di misura SET (Surface Elevation Table) di due tipologie (SE-SET e MO-SET); iv) markers a caolino; e v) riflettori naturali SAR (PT) distribuiti sulla superficie della barena. L'analisi integrata di tali misure in relazione alla loro profondità di riferimento (compresa tra 4 m e la superficie della barena) ha consentito di quantificare la deformazione e lo spostamento dei diversi intervalli di profondità: la compattazione profonda della barena, cioè al di sotto di una profondità di 4 m, è di circa 1 mm/anno mentre la superficie barenale risulta pressoché stabile in quanto lo spostamento superficiale (~ -2.3 mm/anno) e la deposizione (~ 2.5 mm/anno) sono sostanzialmente coincidenti (figura 2b).

La caratterizzazione delle proprietà geotecniche dei terreni della barena San Felice è stata condotta nei primi anni 2000 attraverso una serie di prove edometriche di laboratorio su campioni superficiali, distribuiti 0 e 1 m di profondità (*Cola et al., 2008*). Queste prove hanno permesso di ottenere la relazione tra indice dei vuoti ϕ e tensione verticale efficace σ_z . Da quest'ultima è stata ricavata la relazione tra compressibilità edometrica e tensione efficace. In figura 2c sono messi a confronto il dato fornito dalle misurazioni e il risultato del modello in termini di spostamento delle diverse quote della barena nel 2017. Ciò è ottenuto dall'integrazione lungo l'asse verticale della compattazione di ciascuno strato (misura) o elemento (modello) con cui si è suddiviso lo spessore della barena stessa. Il risultato modellistico è presentato per due scenari evolutivi corrispondenti a un tasso di sedimentazione pari a 2.5 e 5.0 mm/anno su un intervallo temporale di 7000 anni. È evidente che il match migliore delle misure si ottiene nel caso con $\omega = 2.5$ mm/anno: in questo scenario il modello rappresenta in modo accurato il dato misurato lungo l'intero spessore di barena compreso tra 0 e 4 m di profondità. Ovviamente, la semplificazione di imporre un tasso di sedimentazione uniforme nel tempo e nello spazio potrà essere rimossa allorquando saranno disponibili più dettagliate informazioni per la caratterizzazione di questo dato di input.

3.2 Scenari previsionali

Il modello calibrato è stato applicato in fase previsionale per analizzare la possibile evoluzione della quota della barena rispetto all'atteso innalzamento del lmm. La previsione è condotta su un arco temporale di 83 anni, ovvero dal 2017 al 2100. I tre scenari sviluppati (SC-1, SC-2 e SC-3) sono caratterizzati da un tasso di sedimentazione rispettivamente pari a 0 mm/anno (apporto del sedimento totalmente assente), 2.5 mm/anno (il tasso si mantiene pari alla condizione attuale) e 5 mm/anno (l'apporto di sedimento raddoppia rispetto alla condizione attuale).

La risposta fornita dal modello nei tre casi al tempo finale di simulazione è riportata in tabella 1. Si è ipotizzato un aumento costante del lmm pari a 1.2 mm/anno, ovvero un innalzamento complessivo del livello del mare di circa 100 mm al 2100.

Confrontando il livello del mare e la quota della barena, calcolata tenendo conto dei processi di sedimentazione, compattazione e subsidenza profonda (in questo caso sotto i 4 m di profondità come quantificata dal TCR con fondazione più profonda), si ottiene che la superficie della barena sarà soggetta ad un processo di sommersione negli scenari SC-1 e SC-2. La barena sarà invece in grado di mantenere la propria quota altimetrica rispetto al livello del mare nello scenario SC-3 che consente un accrescimento (inteso come elevazione della superficie topografica della barena rispetto a quella attuale) di 95 mm. Negli altri casi ha luogo una perdita altimetrica di 83 mm e 17 mm, rispettivamente in SC-1 e SC-2.

Scenario	Sedimentazione (mm/anno)	Compattazione (mm)	Subsidenza profonda (mm/anno)	δ (mm)	Δ (mm)
SC-1	0.0	-	1.0	-83	-183 (2.2 mm/anno)
SC-2	2.5	142	1.0	-17	-117 (1.4 mm/anno)
SC-3	5.0	237	1.0	95	-4 (~0 mm/anno)

Tabella 1. Risultati degli scenari previsionali al 2100. I tre scenari fanno riferimento a diversi tassi di sedimentazione e a un innalzamento del medio mare di 1.2 mm/anno, costante nell'intervallo analizzato. Il parametro δ rappresenta la differenza tra la quota della barena al 2100 e al 2017; il parametro Δ costituisce la perdita di quota della barena rispetto al lmm del 2100.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Allen, J.R.L., Morphodynamics of Holocene salt marshes: a review sketch from the Atlantic and southern North Sea coasts of Europe, *Quaternary Science Review*, 2000, 19, 1155-1231.
- Brain, M.J., Long, A.J., Petley, D.N., Horton, B.P. & Allison, R.J., Compression behaviour of minerogenic low energy intertidal sediments, *Sedimentary Geology*, 2011, 233(1-4), 28-41.
- Brain, M.J., Kemp, A.C., Horton, B.P., Culver, S.J., Parnell, A.C. & Cahill, N., Quantifying the contribution of sediment compaction to late Holocene salt-marsh sea-level reconstructions, North Carolina, USA, *Quaternary Research*, 2015, 83(1), 41-51.
- Cola, S., Sanavia, L., Simonini, P. & Schrefler, B., Coupled thermo-hydro-mechanical analysis of Venice lagoon salt marshes, *Water Resources Research*, 2008, 44, W00C05.
- Da Lio, C., D'Alpaos, A. & Marani, M., The secret gardener: vegetation and the emergence of biogeomorphic patterns in tidal environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2013, 371, 20120367.
- Da Lio, C., Teatini, P., Strozzi, T. & Tosi, L., Understanding land subsidence in salt marshes of the Venice Lagoon from SAR Interferometry and ground-based investigations, *Remote Sensing of the Environment*, 2018, 205, 56-70.
- D'Alpaos, A., Da Lio, C. & Marani, M., Biogeomorphology of tidal landforms: physical and biological processes shaping the tidal landscape, *Ecology*, 2012, 93(5), 550-562.
- Gambolati, G. & Teatini, P., Numerical analysis of land subsidence due to natural compaction of the upper Adriatic Sea basin, *CENAS - Coastline Evolution of the Upper Adriatic Sea due to Sea Level Rise and Natural and Anthropogenic Land Subsidence*, ed. G. Gambolati, Kluwer Academic Publ., 1998, pp. 103-131.
- Marani, M., D'Alpaos, A., Lanzoni, S., Carniello, L. & Rinaldo, A., The importance of being coupled: stable states and catastrophic shifts in tidal geomorphodynamics, *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(4), 1-15.
- Massey, A.C., Paul, M.A., Gehrels, W.R. & Charman, D.J., Auto-compaction in Holocene coastal back-barrier sediments from south Devon, southwest England, UK, *Marine Geology*, 2006, 226(3-4), 225-241.
- Zoccarato, C. & Teatini, P., Numerical simulations of Holocene salt-marsh dynamics under the hypothesis of large soil deformations, *Advances in Water Resources*, 2017, 110, 107-119.