

LE PRIME OPERAZIONI DEL MO.S.E. A DIFESA DI VENEZIA: QUALI EFFETTI SULLA MORFODINAMICA LAGUNARE?

**Davide Tognin^{1,2,*}, Alvise Finotello^{2,3,*}, Andrea D'Alpaos^{2,4}, Daniele Viero¹, Mattia Pivato², Riccardo Mel⁵,
Andrea Defina^{1,2}, Marco Marani^{1,2} & Luca Carniello^{1,2}**

- (1) Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Università degli Studi di Padova
(2) Centro di Idrodinamica e Morfodinamica Lagunare (CIMoLa), Università degli Studi di Padova
(3) Dipartimento di Scienze Ambientali, Informatica e Statistica, Università Ca' Foscari Venezia
(4) Dipartimento di Geoscienze, Università degli Studi di Padova
(5) Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, Università della Calabria

*email: davide.tognin@phd.unipd.it, alvise.finotello@unive.it

ASPETTI CHIAVE

- La separazione temporanea della laguna di Venezia dal mare influenza la sua evoluzione morfodinamica
- La riduzione dei livelli massimi limita l'inondazione delle barene, modificando i processi di sedimentazione
- In presenza di vento intenso, la chiusura può provocare un aumento della risospensione dei sedimenti

1 INTRODUZIONE

Per la prima volta nell'ottobre 2020 è stato utilizzato il sistema di paratoie progettato per proteggere la città di Venezia dall'inondazione dovuta alle alte maree molto sostenute. Ideato a seguito della catastrofica *acqua alta* del 1966 e ufficialmente proposto nel 1981, il Mo.S.E. (Modulo Sperimentale Elettromeccanico, <https://www.mosevenezia.eu/>) è costituito da un sistema di barriere poste in corrispondenza delle tre bocche di porto che collegano la laguna di Venezia con il mare Adriatico (Lido, Malamocco e Chioggia; Figura 1a). Ciascuna barriera è composta da una serie di paratoie (78 in totale) incernierate al fondale che in condizioni normali giacciono sul fondo delle bocche di porto. Quando è prevista un'alta marea molto sostenuta, dell'aria compressa viene iniettata nelle paratoie che si alzano dividendo la laguna dal mare e impedendo che l'alta marea si propaghi nel sistema lagunare e allaghi quindi i centri abitati.

Sin dalla sua concezione, il progetto Mo.S.E. ha suscitato un vivace dibattito sulla sua efficacia e sugli alti costi (Ammerman & McClennen, 2000), sugli effetti della modifica delle bocche di porto (Silvestri et al., 2018) e sui costi diretti di interruzione del traffico marittimo causati dai maggiori tempi di transito (Vergano et al., 2010), anche nella prospettiva di un innalzamento del livello medio del mare e del conseguente aumento del numero di chiusure (Umgiesser & Matticchio, 2006). Tuttavia, il tema dell'impatto dell'operatività del Mo.S.E. sulla matrice morfologica e ambientale dell'ecosistema lagunare, come conseguenza delle modifiche al regime idrodinamico, è stato affrontato solo marginalmente. La modifica della propagazione della marea non solo influisce sugli scambi di sostanze solute e inquinanti nel breve periodo, ma può anche incidere profondamente sull'evoluzione morfodinamica, introducendo delle variazioni nei processi di trasporto solido e di conseguenza compromettendo il delicato equilibrio sul quale si reggono le tipiche morfologie lagunari, ovvero canali, bassifondali e barene, al punto da metterne in discussione l'esistenza stessa (Defina et al., 2007; Marani et al., 2010).

Nell'ottica di un incremento, nel prossimo futuro, del numero di chiusure causato dall'aumento del livello medio del mare, assume quindi fondamentale importanza comprendere l'impatto dell'alterazione della naturale propagazione della marea all'interno della laguna sulle dinamiche morfo-sedimentarie della stessa, anche al fine di poterne prevedere l'evoluzione e programmare specifici interventi mirati alla salvaguardia dell'habitat lagunare e dei suoi preziosi servizi ecosistemici (Barbier et al., 2011).

In questo lavoro vengono analizzati, per mezzo di un modello numerico, gli effetti sulla dinamica dei sedimenti e sulla morfologia prodotti dalle prime due chiusure in assoluto del sistema Mo.S.E. durante due eventi di alta marea (3 ottobre e 15 ottobre 2020).

2 METODI E MODELLI

Per calcolare il campo di moto ed il trasporto solido all'interno della laguna di Venezia è stato utilizzato un modello numerico in grado di riprodurre, sulla medesima griglia computazionale, l'idrodinamica, la generazione e propagazione delle onde da vento (Carniello et al., 2011) e i processi di trasporto solido ed evoluzione del fondo (Carniello et al., 2012). Utilizzando il modello è stato possibile confrontare due scenari ovvero quello che ha effettivamente visto l'entrata in funzione del Mo.S.E. e quello che, invece, si sarebbe realizzato qualora le paratoie non fossero state sollevate. Le simulazioni sono state condotte imponendo come condizioni al contorno i livelli di marea misurati in prossimità delle tre bocche di porto e la velocità e la direzione del vento in alcune stazioni all'interno della laguna durante i due eventi considerati. La chiusura del sistema Mo.S.E. è stata simulata inserendo, in corrispondenza della struttura stessa, degli elementi con quota del fondo variabile, rispettando le tempistiche della manovra effettivamente realizzata (Mel et al., 2019). Per ciascun evento sono stati valutati diversi parametri morfodinamici (livelli, intensità e durata della sommersione delle barene, sforzo tangenziale al fondo, altezza d'onda significativa e concentrazione di sedimenti in sospensione) ed è stata analizzata la loro variazione nei due scenari simulati per evidenziare gli effetti prodotti dalla chiusura delle barriere.

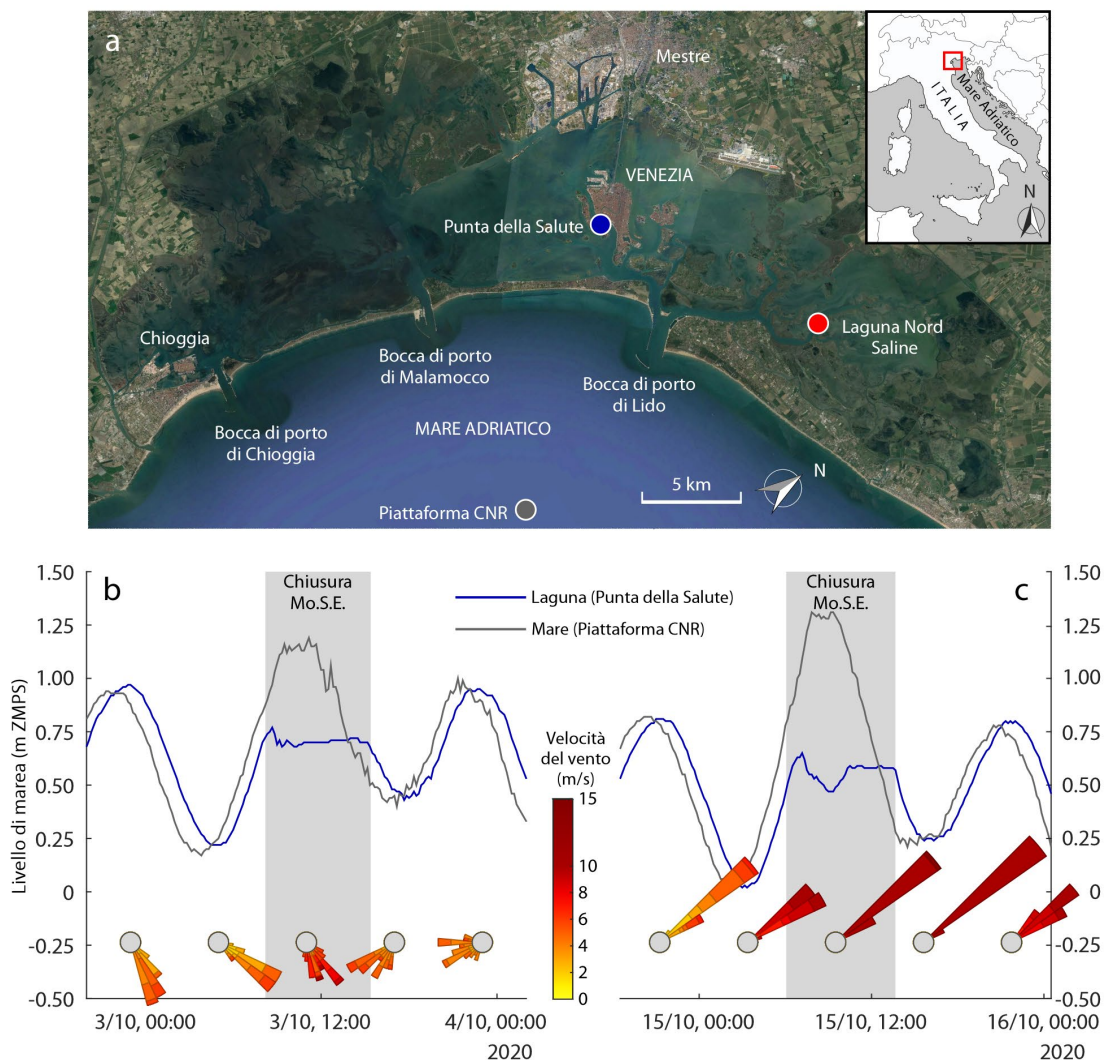


Figura 1. (a) La laguna di Venezia, con indicate le tre bocche di porto (Lido, Malamocco e Chioggia) e le città di Venezia e Chioggia. Livelli di marea e condizioni del vento per l'evento del 3 ottobre 2020 (b) e per l'evento del 15 ottobre 2020 (c). I livelli di marea misurati all'interno della laguna (Punta della Salute) e in mare (Piattaforma CNR) sono riferiti allo Zero Mareografico di Punta della Salute (ZMPS). Le rose dei venti rappresentano velocità e direzione del vento misurati nella stazione di Laguna Nord – Saline e raggruppati per intervalli di 6 ore. Il periodo di chiusura delle paratoie mobili del sistema Mo.S.E. è evidenziato con sfondo grigio.

3 RISULTATI E CONCLUSIONI

Nonostante i due eventi considerati risultino essere molto simili in relazione alle condizioni di livello di marea registrato in mare (massimo pari a circa 120-130 cm rispetto allo zero Mareografico di Punta della Salute - ZMPS) e durata della chiusura (circa 8 ore), essi differiscono sensibilmente in termini di velocità e direzione del vento. Infatti durante la chiusura del 3 ottobre, il vento presenta direzione variabile e intensità inferiore a 7 m/s (Figura 1b), mentre l'evento del 15 ottobre è caratterizzato da una condizione di vento di Bora (NE) persistente e con velocità maggiori di 15 m/s (Figura 1c), in grado di generare un importante set-up all'interno della laguna e altezze d'onda piuttosto elevate (fino ad 1 m).

La chiusura delle paratoie comporta una significativa riduzione dei livelli massimi in laguna, che però presenta una variabilità spaziale notevole nei due eventi considerati dovuta principalmente alla diversa condizione di vento (Figura 2a e 2b). Durante la chiusura del 3 ottobre la riduzione massima di livello rispetto allo scenario a bocche aperte è di 50 cm in laguna centrale e di poco più di 35 cm nel bacino settentrionale, dove l'ampiezza di marea risulta naturalmente più ridotta per la maggiore dissipazione dovuta alla morfologia più irregolare di questa zona. Il set-up generato dall'intenso vento di Bora durante la chiusura del 15 ottobre determina una minore differenza di livello nella laguna meridionale, mentre nella parte centrale il livello subisce una riduzione di oltre 70 cm rispetto allo scenario senza l'utilizzo del Mo.S.E. La riduzione dei livelli si riflette nella riduzione del tirante sulle barene (Figura 2c e 2d). Durante la chiusura del 3 ottobre il tirante sulle barene viene ridotto in modo pressoché uniforme in tutta la laguna (tra 30 e 50 cm), mentre alcune barene della laguna centro-settentrionale non vengono addirittura sommerse durante l'evento del 15 ottobre a causa dell'abbassamento localizzato dei livelli prodotto dal vento di Bora. Questa riduzione di intensità e durata della sommersione delle zone di barena, soprattutto se avviene durante eventi meteomarinari intensi e tipicamente caratterizzati da importante trasporto solido, si traduce in un minore apporto di sedimenti alle barene stesse e, di conseguenza, in una riduzione del tasso di accrescimento, rendendole quindi più vulnerabili all'innalzamento del livello del mare (Tognin et al., 2020).

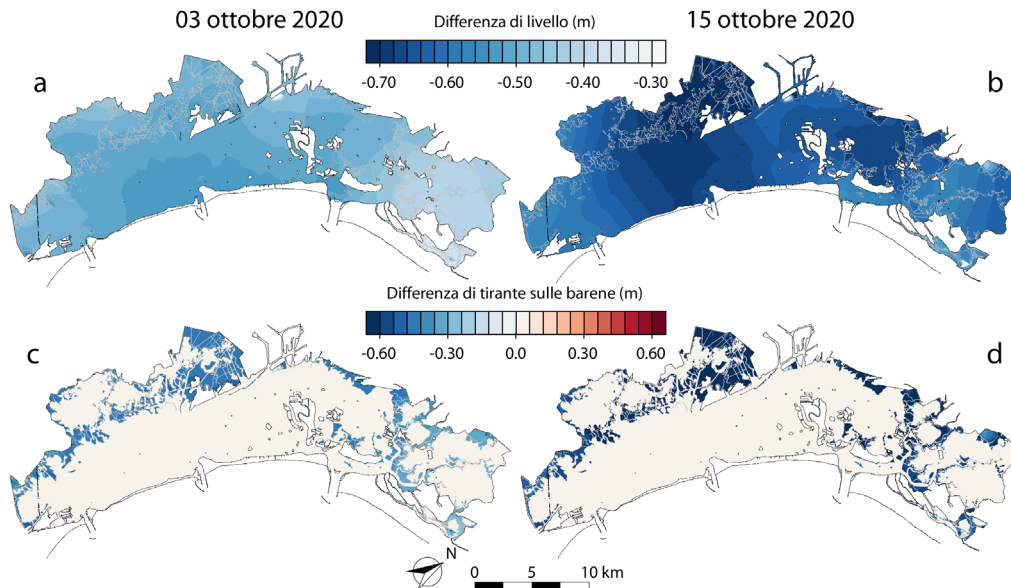


Figura 2. Differenza di livello massimo tra condizione con e senza chiusura del Mo.S.E per l'evento del 3 ottobre 2020 (a) e per l'evento del 15 ottobre 2020 (b). Differenza di tirante massimo sulle barene tra lo scenario con e senza chiusura del Mo.S.E. per l'evento del 3 ottobre 2020 (c) e per l'evento del 15 ottobre 2020 (d). Le zone di barena sono delimitate dal tratto grigio.

La chiusura del Mo.S.E. genera effetti anche sullo sforzo tangenziale al fondo prodotto dal moto ondoso in funzione delle differenti condizioni di vento e di livello. Infatti, se in assenza di vento (3 ottobre) le differenze di sforzo al fondo prodotte durante la chiusura possono essere trascurabili (Figura 3a), altrettanto non si può dire in presenza di un intenso vento di Bora (15 ottobre). Infatti, con tiranti inferiori dovuti alla chiusura del Mo.S.E., l'azione del vento genera un aumento dello sforzo al fondo di oltre 0.40 Pa (+50%) in vaste zone di bassofondale (Figura 3b). Come conseguenza diretta di tale incremento dello sforzo al fondo,

l'entrata in funzione del Mo.S.E. genera un aumento considerevole della concentrazione di sedimenti in sospensione (superiore a 50 mg/l, Figura 3d) durante l'evento del 15 ottobre, più ridotto invece durante l'evento del 3 ottobre (< 10 mg/l, Figura 3c).

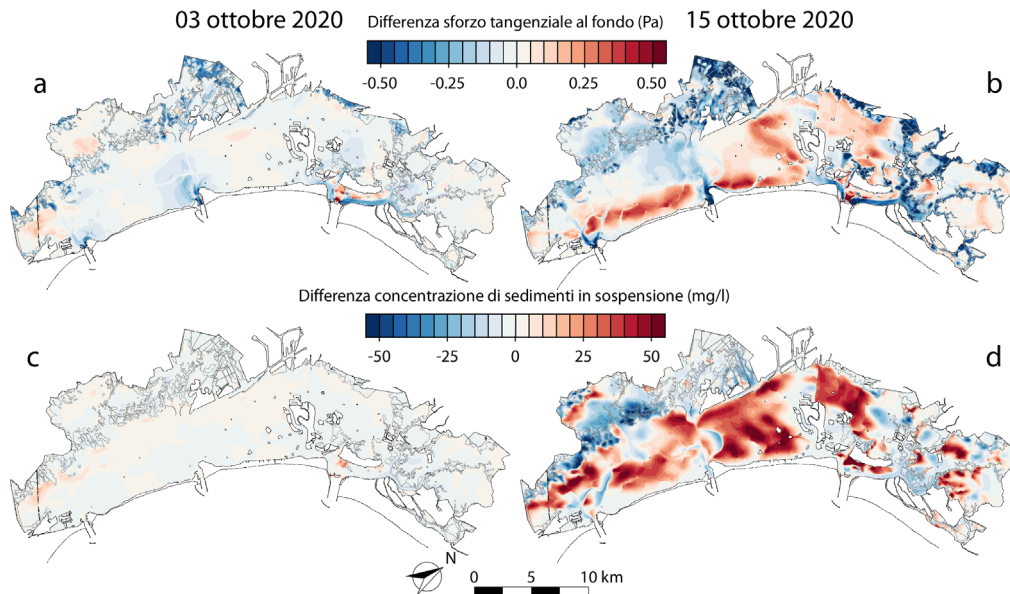


Figura 3. Differenza di sforzo tangenziale massimo al fondo tra condizione con e senza chiusura del Mo.S.E. per l'evento del 3 ottobre 2020 (a) e per l'evento del 15 ottobre 2020 (b). Differenza di concentrazione massima di sedimenti in sospensione tra lo scenario con e senza chiusura del Mo.S.E. per l'evento del 3 ottobre 2020 (c) e per l'evento del 15 ottobre 2020 (d).

In conclusione, il presente studio ha permesso di valutare le implicazioni della chiusura temporanea della laguna di Venezia sulla dinamica dei sedimenti per gli eventi di alta marea del 3 e del 15 ottobre 2020. Le variazioni in termini di apporto di sedimenti sulle barene, a causa della minore sommersione, e di risospensione dai bassifondali, causata dalla maggiore azione delle onde da vento nel caso di livelli ridotti, evidenziano la complessità degli effetti legati alla chiusura delle barriere mobili sull'evoluzione morfodinamica dell'ambiente lagunare e, pertanto, sottolineano l'urgente necessità di valutarne con attenzione le conseguenze sull'evoluzione morfologica dell'ecosistema lagunare e sulla sua conservazione.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Ammerman, A. J., & McClennen, C. E. (2000). Saving Venice. *Science*, 289(5483), 1301-1302.
- Barbier, E. B., Hacker, S. D., Kennedy, C., Koch, E. W., Stier, A. C., & Silliman, B. R. (2011). The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological monographs*, 81(2), 169-193.
- Carniello, L., D'Alpaos, A., & Defina, A. (2011). Modeling wind waves and tidal flows in shallow micro-tidal basins. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 92(2), 263-276.
- Carniello, L., Defina, A., & D'Alpaos, L. (2012). Modeling sand-mud transport induced by tidal currents and wind waves in shallow microtidal basins: Application to the Venice Lagoon (Italy). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 102, 105-115.
- Defina, A., Carniello, L., Fagherazzi, S., & D'Alpaos, L. (2007). Self-organization of shallow basins in tidal flats and salt marshes. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 112(F3).
- Marani, M., D'Alpaos, A., Lanzoni, S., Carniello, L., & Rinaldo, A. (2010). The importance of being coupled: Stable states and catastrophic shifts in tidal biomorphodynamics. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 115(F4).
- Mel, R., Carniello, L., & D'Alpaos, L. (2019). Addressing the effect of the Mo.S.E. barriers closure on wind setup within the Venice lagoon. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 225, 106249.
- Silvestri, S., D'Alpaos, A., Nordio, G., & Carniello, L. (2018). Anthropogenic modifications can significantly influence the local mean sea level and affect the survival of salt marshes in shallow tidal systems. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123(5), 996-1012.
- Tognin, D., Pivato, M., D'Alpaos, A., & Carniello, L. (2020). How do storm events and fair-weather conditions affect sedimentation patterns on salt marshes? In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 10828.
- Umgiesser, G., & Matticchio, B. (2006). Simulating the mobile barrier (MOSE) operation in the Venice Lagoon, Italy: global sea level rise and its implication for navigation. *Ocean Dynamics*, 56(3-4), 320-332.
- Vergano, L., Umgiesser, G., & Nunes, P. A. (2010). An economic assessment of the impacts of the MOSE barriers on Venice port activities. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 15(6), 343-349.