

MODELLAZIONE DEL CAMPO DI MOTO ONDOSO NELLA LAGUNA DI VENEZIA NEGLI ULTIMI QUATTRO SECOLI

Laura Tommasini ^{1*}, Luca Carniello ², Marcella Roner ¹, Massimiliano Ghinassi ¹ & Andrea D'Alpaos ¹

(1) Dipartimento di Geoscienze, Università degli Studi di Padova (Padova)

(2) Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura, Università degli Studi di Padova (Padova)

*email: laura.tommasini.1@phd.unipd.it

ASPETTI CHIAVE

- Variazione della potenza d'onda negli ultimi quattro secoli all'interno della Laguna di Venezia.
- Tassi di erosione laterale dei margini di barena.
- Relazione esistente tra la potenza dell'onda incidente ed il tasso di erosione laterale dei margini di barena.

1 INTRODUZIONE

Gli ambienti costieri e lagunari, soggetti agli effetti dei cambiamenti climatici e della pressione antropica, stanno subendo in tutto il mondo un deterioramento morfologico che si accompagna alla grave perdita di servizi ecosistemici che tali ambienti sono in grado di fornire (Costanza *et al.*, 1997). In particolare le barene, entità morfologiche caratteristiche di questi ambienti, dissipano le onde, mitigano l'erosione durante eventi atmosferici particolarmente violenti, filtrano nutrienti ed inquinanti, e sono in grado di stoccare una rilevante quantità di carbonio organico. Tra tutti i fenomeni responsabili della perdita di superfici di barena nelle zone estuarine e lagunari, come ad esempio l'innalzamento del livello del medio mare, la subsidenza, le onde provocate dai natanti e le onde da vento, l'effetto prodotto da queste ultime è sicuramente uno dei più importanti (e.g., Marani *et al.*, 2011; Leonardi *et al.*, 2016b). L'erosione dei margini barenali prodotta dalle onde da vento è un fenomeno complesso che comprende sia la rimozione continua di piccole quantità di sedimento sia il crollo improvviso di porzioni più o meno estese rese instabili per effetto dello scalzamento al piede del margine barenale. In studi precedenti è stata evidenziata una relazione diretta tra la potenza dell'onda incidente e l'erosione laterale dei margini di barena (e.g., Marani *et al.*, 2011; Leonardi *et al.*, 2016a; McLoughlin *et al.*, 2015; Bondoni *et al.*, 2016). Nel contempo, un'attenzione minore è stata rivolta all'analisi dell'evoluzione temporale della potenza dell'onda incidente. La potenza che si viene a creare, a parità di forzanti meteorologiche, dipende infatti fortemente dalla conformazione batimetrica della zona analizzata e dall'estensione dei bassifondi adiacenti alle superfici della barena stessa.

Lo scopo di questo studio è quello di analizzare, attraverso i risultati di un modello matematico bidimensionale applicato al caso studio della Laguna di Venezia, l'effetto dell'azione dell'onda sui margini di barena e come è cambiata la potenza dell'onda in epoche storiche diverse a seguito dell'evoluzione morfologica del bacino lagunare a più ampia scala. Per raggiungere questo obiettivo, per prima cosa è stata analizzata la variazione della distribuzione spaziale della potenza d'onda all'interno della Laguna di Venezia considerando diverse configurazioni della stessa a partire dal 1611, anno della prima conterminazione lagunare, sino al 2012. In seguito è stata studiata la relazione esistente tra la potenza dell'onda incidente ed il tasso di erosione laterale per alcune aree di barena.

2 MATERIALI E METODI

Il modello bidimensionale adottato è il WWTM (Wind Wave Tidal Model) sviluppato specificamente per lo studio di domini dalla morfologia complessa come la Laguna di Venezia. Il WWTM è costituito da due moduli in grado di descrivere, utilizzando la medesima griglia di calcolo, l'idrodinamica e la generazione e propagazione del moto ondoso. Il modulo idrodinamico (D'Alpaos & Defina, 2007), basato su uno schema numerico bidimensionale semi-implicito agli elementi finiti, risolve le equazioni delle onde lunghe in acque basse. Il modulo di moto ondoso (Carniello *et al.*, 2005, 2011) risolve, basandosi anche sulle caratteristiche del campo di moto fornite dal modulo idrodinamico, l'equazione di conservazione dell'energia dell'onda,

parametrizzata utilizzando il momento di ordine zero dello spettro dell'energia dell'onda. Il WWTM è stato ampiamente testato per il confronto con dati di campo raccolti in diversi bacini lagunari poco profondi (e.g., in Laguna di Venezia - *Carniello et al.*, 2011 - e nelle lagune della Virginia Coast Reserve -*Mariotti et al.*, 2010).

Nel presente studio, il modello è stato applicato a diverse configurazioni morfologiche della Laguna di Venezia (1611, 1810, 1901, 1970 e 2012) ricostruite sulla base delle mappe storiche e delle batimetrie disponibili. Per ogni configurazione, è stata condotta una simulazione della durata di un anno utilizzando come forzanti i livelli di marea, le velocità e le direzioni del vento rilevati in Laguna nel 2005, anno rappresentativo in termini di condizioni meteorologiche (*D'Alpaos et al.*, 2013).

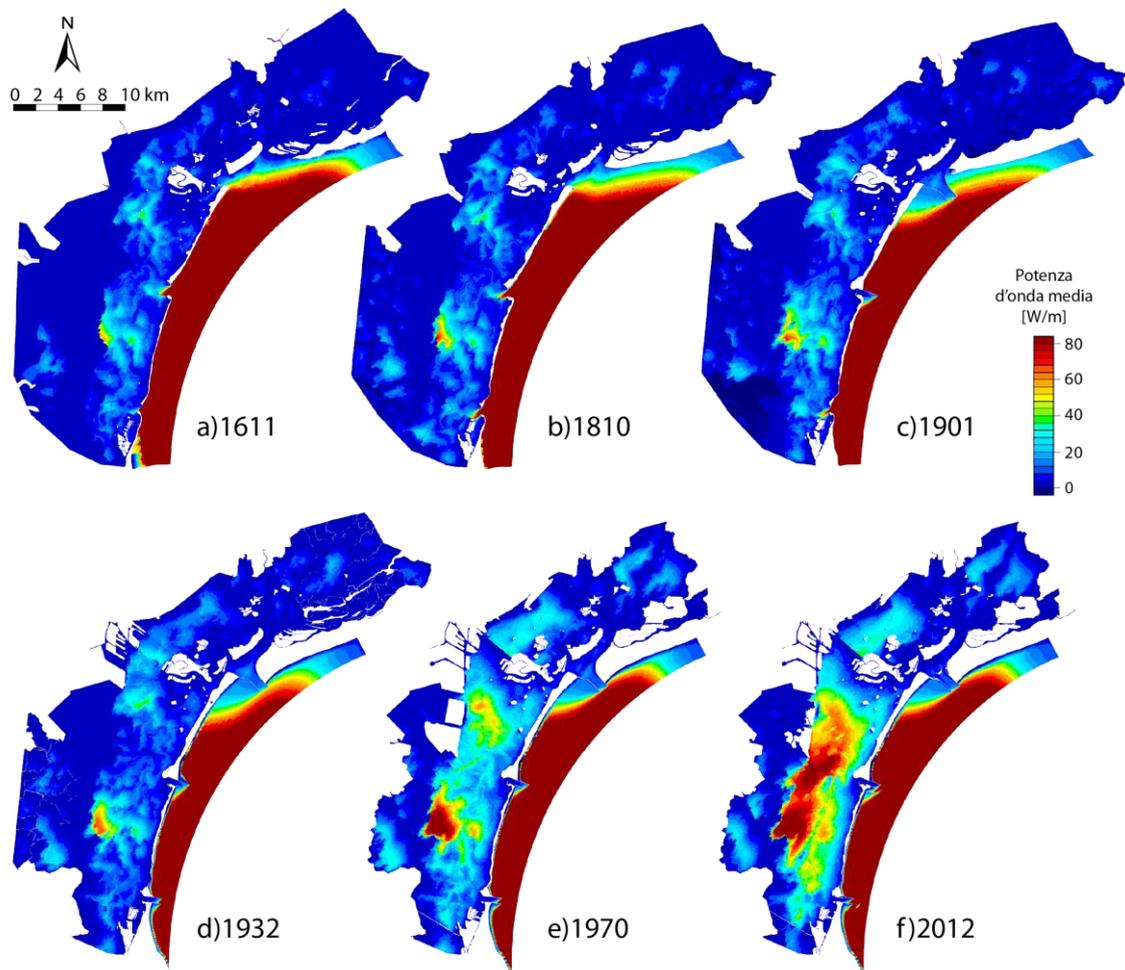


Figura 1. Rappresentazione a scala di colori delle potenze d'onda mediate in un intero anno di simulazione in diverse configurazioni morfologiche della Laguna di Venezia ((a) 1611, (b) 1811, (c) 1901, (d) 1932, (e) 1970, (f) 2012).

Utilizzando i risultati forniti dal modello in termini di altezza d'onda (H) e celerità di gruppo (c_g), è stato possibile calcolare la distribuzione spaziale della potenza d'onda (P) in ogni istante della simulazione attraverso l'equazione (1), e successivamente la potenza media annua per ognuna nelle diverse configurazioni analizzate (Figura 1).

$$P = \frac{c_g \gamma H^2}{8} \tag{1}$$

Informazioni sui tassi di erosione dei margini barenali per alcune barene poste nella laguna centro-meridionale maggiormente soggette a fenomeni di degrado, sono state ricavate utilizzando due serie di foto aeree acquisite nel 1978 (Figura 2a) e nel 2010 (Figura 2b), scelte in quanto la qualità delle immagini

(risoluzione al suolo di 96 cm per il 1978 e 32 cm per il 2010) permetteva una più precisa georeferenziazione e digitalizzazione. La georeferenziazione e la sovrapposizione delle immagini digitalizzate ha permesso di calcolare il tasso di erosione dei margini delle barene maggiormente esposti all'azione erosiva del moto ondoso (Figura 2c). Per il calcolo del tasso di erosione sono stati considerati tratti della lunghezza di 100 m misurati lungo la barena.

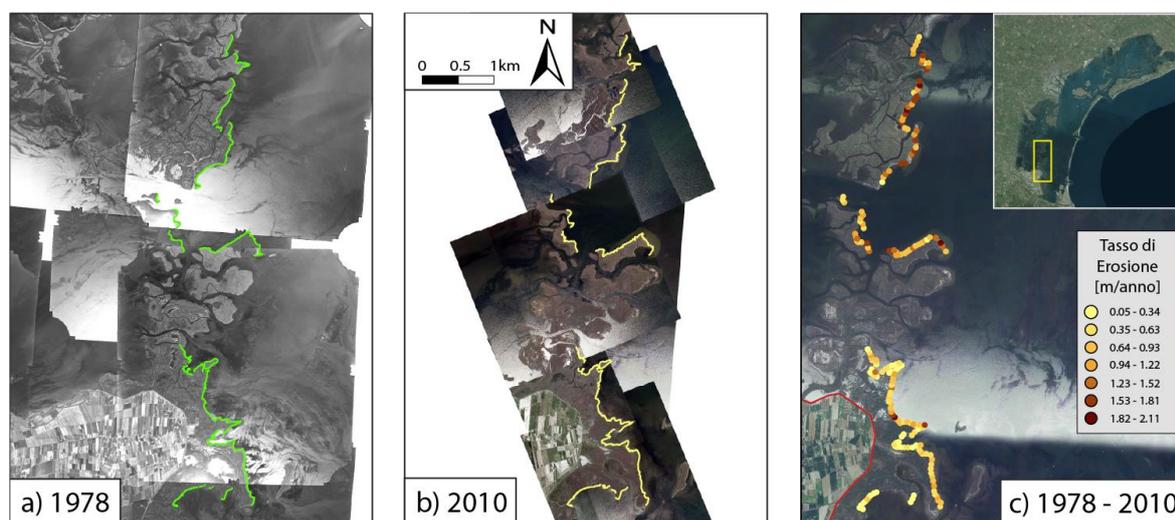


Figura 2. Fotogrammi aerei del 1978 (a) (volo 1978 Reven) e del 2010 (b) (volo 2010 Reven area Venezia volo alto) digitalizzati. Nel pannello (c) è riportato il tasso di erosione per ogni tratto di barena considerato.

3 RISULTATI E DISCUSSIONI

Grazie all'applicazione del modello matematico è stato possibile valutare la variazione temporale e spaziale della potenza media dell'onda per le sei configurazioni disponibili della Laguna di Venezia (1611, 1810, 1901, 1932, 1970 e 2012) sottoposte alle stesse condizioni al contorno. I risultati evidenziano come la potenza media dell'onda incidente sia cresciuta negli ultimi quattro secoli a causa dell'evoluzione morfologica e batimetrica della Laguna stessa. Mentre dal 1611 al 1901 le potenze si sono mantenute pressoché costanti, nell'ultimo secolo, si nota un rapido aumento dei valori di potenza dovuto principalmente dall'incremento della profondità dei bassifondi e del fetch che caratterizza l'odierna configurazione della Laguna. In particolare, nello specchio d'acqua di fronte ai margini di barena della Laguna centro-meridionale le forzanti meteorologiche, nelle condizioni più gravose caratterizzate da vento di Bora, sono in grado di generare la condizione di fetch illimitato producendo maggiori altezze e quindi maggiore potenza d'onda.

È stata in seguito analizzata la relazione esistente tra tassi di erosione e potenza dell'onda incidente sui margini barenali della Laguna centro-meridionale (Figura 3). I tassi di erosione sono stati correlati con le potenze medie d'onda del 1970 (Figura 3a) e del 2012 (Figura 3b) calcolate sulla base di batimetrie note. Le potenze medie del 1970 e del 2012, sono state ricavate mediando i dati di potenza calcolati per le porzioni di dominio adiacenti ad ogni tratto di 100 m di margine barenale e ricadenti all'interno di un raggio anch'esso pari a 100 m. Inoltre, considerando l'intervallo in cui è stato calcolato il tasso di erosione (tra il 1978 e il 2010), un processo di linearizzazione tra i valori di potenza delle due configurazioni esistenti ha permesso di associare la potenza d'onda relativa all'anno intermedio 1994 (Figura 3c).

I risultati ottenuti sono stati mediati ogni venti valori di potenza, confermando nei tre casi considerati l'esistenza di una relazione lineare tra potenza dell'onda incidente ed il tasso di erosione. Si può inoltre affermare che la potenza intermedia del 1994 sembra essere la scelta migliore da adottare in quanto riesce implicitamente a tener conto delle variazioni batimetriche e di morfologia avvenute tra il 1970 e il 2012. La disposizione dei punti mediati, suggerisce una doppia pendenza: la prima relativa alle potenze d'onda più basse, inferiori agli 8 W/m e la seconda per potenze superiori. Tale comportamento potrebbe essere attribuito al metodo di quantificazione dell'erosione impiegato. L'erosione è stata infatti misurata come lunghezza,

seguendo il procedimento adottato da *Leonardi et al.* (2016b). In altri studi invece, l'erosione, che viene misurata come volume (e.g., *Marani et al.*, 2011), tiene in considerazione anche la variabilità dell'intervallo di quota tra bassofondo e barena.

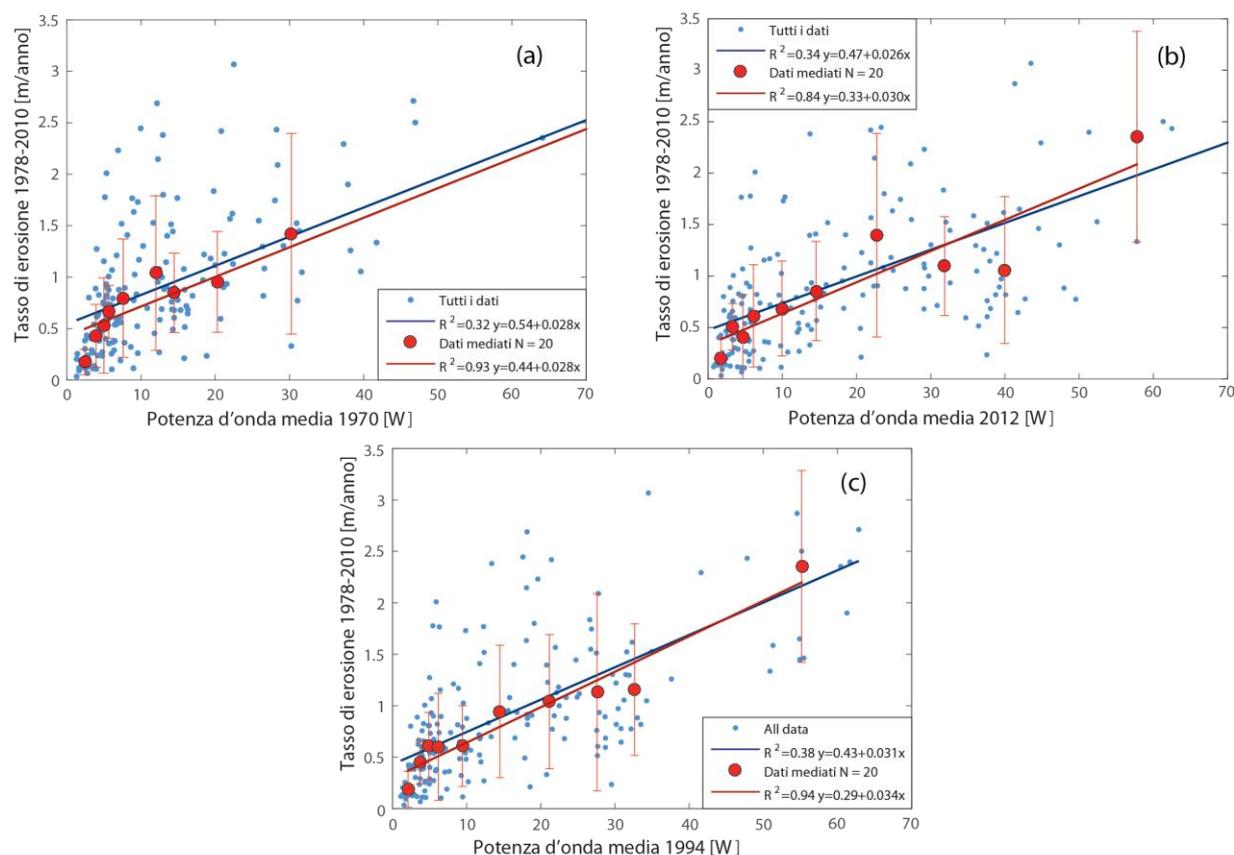


Figura 3. Relazioni lineari esistenti tra i tassi di erosione calcolati tra il 1978 e il 2010 e le potenze d'onda del 1970 (a) del 1994 (b) e del 2012 (c).

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Bendoni M., Mel R., Solari L., Lanzoni S., Francalanci S. & Oumeraci H. Insights into lateral marsh retreat mechanism through localized field measurements, *Water Resources Research*. 2016, 52, pp. 1446–1464.
- Carniello L., Defina A., Fagherazzi S. & D'Alpaos L. A combined wind wave-tidal model for the Venice lagoon, Italy. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2005, 110.
- Carniello L., D'Alpaos A. & Defina A. Modeling wind waves and tidal flows in shallow micro-tidal basins. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 92(2), pp. 263-276.
- Costanza R., D'Arge R., De Groot R., Farberk S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R., Paruelo J., Raskin R., Sutton P. & van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(May).
- D'Alpaos A., Carniello L. & Rinaldo A. Statistical mechanics of wind wave-induced erosion in shallow tidal basins: Inferences from the Venice Lagoon. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(13), pp.3402-3407.
- D'Alpaos L. & Defina A. Mathematical modeling of tidal hydrodynamics in shallow lagoons: A review of open issues and applications to the Venice lagoon. *Computers & Geosciences*, 2007, 33(4), pp.476-496.
- Leonardi N., Ganju N.K. & Fagherazzi S. A linear relationship between wave power and erosion determines salt-marsh resilience to violent storms and hurricanes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016a, 113(1), pp.64-68.
- Leonardi N., Defne Z., Ganju N.K. & Fagherazzi S. Salt marsh erosion rates and boundary features in a shallow Bay. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2016b, 121(10), pp.1861-1875.
- Marani M., D'Alpaos A., Lanzoni S. & Santalucia M. (2011). Understanding and predicting wave erosion of marsh edges. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(21).
- Mariotti G., Fagherazzi S., Wiberg P.L., McGlathery K.J., Carniello L. & Defina A. Influence of storm surges and sea level on shallow tidal basin erosive processes. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2010, 115(C11).
- McLoughlin S.M., Wiberg P.L., Safak I. & McGlathery K.J. Rates and Forcing of Marsh Edge Erosion in a Shallow Coastal Bay. *Estuaries and coasts*, 2015, 38(2), pp.620-638.