

XXXIII Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche
Brescia, 10-15 settembre 2012

EFFETTO DELLA VEGETAZIONE BARENALE SULL'ATTENUAZIONE DEL MOTO ONDOSI LAGUNARE

S. Francalanci¹, L. Cappiotti² & L. Solari³

- (1) CERAFRI – Centro di Ricerca e Alta Formazione per la prevenzione dal Rischio Idrogeologico, Retignano di Stazzema, Lucca, Italia, e-mail: simona.francalanci@dicea.unifi.it
- (2) Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università di Firenze, Italia, e-mail: cappiotti@dicea.unifi.it
- (3) Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università di Firenze, Italia, e-mail: luca.solari@dicea.unifi.it

SOMMARIO

Il moto ondoso generato in un bacino lagunare si propaga alle zone emerse adiacenti, le barene, che vengono periodicamente sommerse durante l'alta marea. In letteratura, si ritiene che la presenza o meno di vegetazione sulle aree barenali possa rappresentare un elemento importante nella valutazione della propagazione del moto ondoso nelle zone emerse. In questa memoria viene presentata un'indagine sperimentale volta alla misura dell'attenuazione del moto ondoso sulle barene lagunari; in particolare le prove sperimentali hanno consentito di stimare il tasso di attenuazione in presenza e in assenza di vegetazione, per valutare il contributo netto di quest'ultima.

1 INTRODUZIONE

Le barene sono aree emerse pianeggianti adiacenti ai canali e alle zone umide lagunari, e sono soggette regolarmente a sommersione durante i cicli di marea. Gli ambienti lagunari di cui le barene fanno parte costituiscono degli importanti ecosistemi naturali, caratterizzati da un elevato grado di biodiversità, habitat privilegiato per numerose specie animali e vegetali (Allen, 2000).

La vegetazione alofitica che in genere ricopre la superficie emersa delle barene ha un ruolo nel miglioramento della qualità dell'acqua, nella mitigazione dei danni provocati dalle tempeste, e nella protezione della costa. Inoltre il periodico verificarsi di eventi estremi e il progressivo innalzamento del livello medio del mare hanno contribuito ad un interesse crescente nella capacità della vegetazione di attenuare il moto ondoso e proteggere dall'erosione (Augustin *et al.*, 2009).

In generale l'attenuazione del moto ondoso dipende dalle caratteristiche delle piante (geometria, densità, rigidità, distribuzione spaziale, ecc) così come dalle caratteristiche del moto ondoso (principalmente altezza d'onda e periodo): data la varietà di piante caratteristiche delle zone umide lagunari, trovare un metodo generale per quantificare l'effetto della dissipazione indotta dalla vegetazione è molto difficile, per cui è preferibile inglobare tutti gli effetti in un coefficiente di attrito (Mendez e

Losada, 2004). Una approfondita conoscenza della capacità delle barene lagunari di attenuare il moto ondoso è inoltre utile per valutare la naturale azione di difesa dal mare che queste aree di confine hanno sulle zone interne; Moller (2006) ha applicato le moderne tecniche di analisi di immagini digitali per stimare la distribuzione spaziale e temporale, la densità, la struttura della copertura vegetativa in tre siti di studio su una barena nella penisola dello Essex (UK), trovando che esiste un legame diretto tra copertura vegetativa e attenuazione del moto ondoso fino ad un valore soglia del rapporto altezza d'onda/ profondità dell'acqua di circa 0.55, sotto il quale non si ha un incremento significativo dell'attenuazione del moto ondoso.

La capacità di predire correttamente l'attenuazione del moto ondoso dovuta alla vegetazione barenale è infine un elemento cruciale in tutti i modelli teorici e numerici che simulano la propagazione del moto ondoso in ambienti a marea (es. Carniello *et al.*, 2011).

Il presente lavoro ha l'obiettivo principale di valutare sperimentalmente l'effetto della vegetazione barenale sull'attenuazione del moto ondoso. L'attività di laboratorio è stata svolta prendendo a riferimento le barene della laguna di Venezia, e utilizzando vegetazione autoctona; nella presente memoria sono riportati i risultati dell'attività sperimentale, che saranno finalizzati alla stima del tasso di attenuazione, un dato utile sia nell'ambito dei modelli di propagazione del moto ondoso in Laguna di Venezia, sia per lo studio dell'evoluzione morfodinamica delle zone barenali soggette all'azione del moto ondoso.

2 ATTIVITÀ SPERIMENTALE

2.1 Apparato sperimentale

Gli esperimenti sono stati svolti nel canale per onde e correnti del Laboratorio di Idraulica del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli Studi di Firenze. Il canale ha una lunghezza di circa 50 m, una altezza di circa 0.8 m, e una larghezza di 0.8 m; è equipaggiato ad una estremità da un generatore di moto ondoso che consente di creare all'interno del canale stesso sequenze di onde sia regolari che irregolari, in base ad uno spettro di frequenze imposto dall'utilizzatore (Figura 1).

Il moto ondoso generato all'interno del canale viene misurato mediante delle sonde di livello del tipo resistivo collegate ad un sistema di acquisizione. In un tratto di canale lungo circa 7 m e antistante il modello della barena la larghezza è stata ristretta a 0.5 m, per cercare di accentuare il comportamento bidimensionale dei processi indagati.

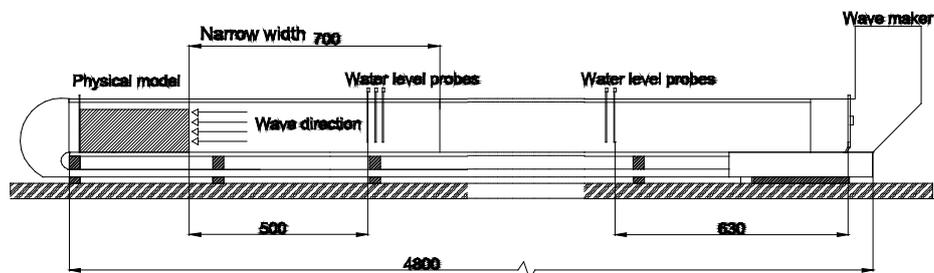


Figura 1. Apparato sperimentale. Le dimensioni sono espresse in cm.

2.2 Modello della barena e set-up sperimentale

Il modello della barena è stato costruito, in scala 1:1, alla estremità opposta del canale marittimo rispetto al generatore di moto ondoso. Le dimensioni della barena sono state determinate sulla base di osservazioni e rilievi di campo effettuati in Laguna di Venezia. Il modello aveva una lunghezza di 3 m, una altezza di 0.6 m sul fondo del canale e una larghezza di 0.5 m. Questi dati geometrici sono stati scelti in accordo ad una precedente attività sperimentale finalizzata allo studio dei processi di arretramento delle barene vegetate e non vegetate, e della loro interazione con il moto ondoso (Francalanci *et al.*, 2011).

Il terreno utilizzato per costruire il modello è stato prelevato in una barena nella Laguna di Venezia, nella zona di Campalto: tale terreno risulta caratterizzato dalla predominanza di sedimenti melmoso-argillosi e dalla presenza di matrice organica. Ciò ha consentito di riprodurre in laboratorio la scabrezza reale del terreno. Al fine di contenere la quantità di materiale solido necessario, è stato costruito un sottofondo rigido ad una quota di circa 50 cm sul fondo canale, sul quale sono state disposte le sonde di acquisizione e 10 cm di strato di terreno (vedi figura 2).

Il livello medio mare è stato ipotizzato ad una quota di 47 cm sul fondo del canale; l'escursione mareale è stata assunta pari a 30 cm, in accordo ai dati disponibili registrati in Laguna di Venezia, in modo tale che in concomitanza del massimo livello di marea, la barena fosse inondata con un battente d'acqua di circa 2 cm.

Il moto ondoso lungo la barena è stato misurato mediante due diversi tipi di sensori, secondo lo schema indicato in Figura 2:

- I trasduttori di pressione, disposti lungo la mezzeria della sezione con la membrana di contatto all'interfaccia terra-acqua, sono stati posti ravvicinati in prossimità del bordo e poi via via più distanziati. Un trasduttore di pressione è stato disposto a metà altezza sulla parete verticale del modello di barena, per poter misurare la pressione esercitata dal moto ondoso incidente sulla barena stessa.
- Le sonde resistive, utilizzate per la misura diretta del moto ondoso sulla barena, sono state disposte di fianco a quattro dei sei trasduttori di pressione, nelle posizioni indicate come 1, 2, 3, e 4 in Figura 2. Una sonda ulteriore è stata posta di fronte alla barena per misurare il moto ondoso incidente.

Nel caso delle prove con barena vegetata, il modello di barena è stato costruito con una geometria identica a quella non vegetata, utilizzando però delle zolle con vegetazione autoctona prelevata in Laguna di Venezia, per poter riprodurre una scabrezza media analoga a quella effettivamente presente in campo. Le zolle vegetate, prelevate nel periodo primaverile (Aprile 2011) mostravano la presenza delle specie vegetate maggiormente diffuse in Laguna di Venezia: *Sarcocornia fruticosa*, *Limonium narbonense*, *Juncus maritimus* (Marani *et al.*, 2006).

Per la riproduzione del moto ondoso irregolare in canale è stato scelto di fare riferimento allo spettro JONSWAP, i cui parametri significativi sono stati scelti in base a misurazioni ondometriche raccolte nella zona Sud della Laguna di Venezia. L'evento più probabile è risultato caratterizzato da altezza significativa pari a $H_s = 10$ cm e periodo significativo pari a $T_s = 1.4$ s. Il fattore di elevazione del picco è stato assunto pari a $\gamma = 2$. Il moto ondoso irregolare è stato generato con algoritmo "deterministic spectral amplitude and random phases" (Huges, 1993).

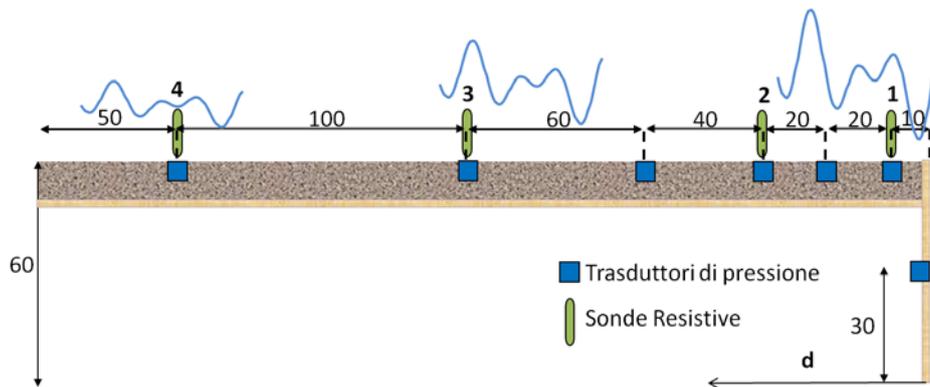


Figure 2. Schema del modello di barena, con posizionamento delle sonde resistive e dei trasduttori di pressione. d indica la distanza dal bordo della barena. Le dimensioni sono in cm.

2.3 Procedura sperimentale

- Le prove sperimentali si sono svolte seguendo la seguente procedura sperimentale:
- inizialmente il livello d'acqua in canale è stato posizionato al valore scelto;
 - sono state calibrate le sonde di livello;
 - è stata effettuata l'acquisizione del livello di zero dei sensori, sia trasduttori di pressione che sonde di livello, ovvero il valore misurato dalle sonde ad acqua ferma;
 - è stato generato l'attacco ondoso;
 - il tempo di acquisizione ha avuto una durata variabile tra 30 e 60 minuti.

Le prove più significative ai fini della valutazione della attenuazione del moto ondoso sono state quelle con barena sommersa; pertanto nel seguito sono riportati i risultati principali di tre prove sperimentali nelle seguenti configurazioni, dove con h si indica il pelo libero medio rispetto al fondo del canale:

- Barena non vegetata e sommersa con un battente di circa 2 cm, $h = 62$ cm;
- Barena vegetata e sommersa con un battente di circa 2 cm, $h = 62$ cm,
- Barena vegetata e sommersa con un battente di circa 4 cm, $h = 64$ cm.

Il confronto tra la configurazione a) e la b) ha l'obiettivo di fornire una valutazione dell'effetto della vegetazione sull'attenuazione del moto ondoso. La prova svolta nella configurazione c) ha invece l'obiettivo di valutare l'influenza del battente idrico medio in barena sulla attenuazione del moto ondoso, in caso di barena vegetata.

3 RISULTATI SPERIMENTALI

I risultati sperimentali qui riportati si riferiscono esclusivamente ai dati acquisiti dalle sonde di livello.

I dati misurati sono stati analizzati sia nel dominio del tempo, (analisi "zero-up crossing"), che nel dominio della frequenza (analisi spettrale). L'analisi zero-crossing ha permesso di contare il numero di onde, calcolare l'altezza di ogni singola onda, ricavare

la distribuzione delle altezze d'onda e determinare i parametri significativi caratteristici H_s e T_s alle varie sonde lungo la barena. I risultati sono stati espressi in termini di distribuzione di probabilità, normalizzata con il valore medio dell'altezza d'onda incidente H_{mi} . In Figura 3 sono riportati a confronto i risultati per la barena non vegetata (a) e vegetata (b) nel caso di $h = 62$ cm. Nel caso di barena non vegetata si osserva che l'altezza d'onda modale sui primi 50 cm della barena è circa un quarto di quella media incidente, per effetto del frangimento indotto dalla repentina variazione del fondale; nell'interno della barena il valore modale manifesta una tendenza all'aumento là dove il moto ondoso si riorganizza in favore delle onde un po' più alte. Nel caso di barena vegetata, come atteso, l'attenuazione è ancora più evidente, tanto che in posizione più arretrata rispetto al bordo della barena non si ha moto ondoso come evidenziato dalle distribuzioni mostrate in destra della figura 3.

L'analisi spettrale dei segnali misurati dalle sonde ha consentito di misurare la trasformazione degli spettri del moto ondoso lungo la barena. Gli spettri sono stati adimensionalizzati con il valore di picco dello spettro incidente, e le frequenze con la relativa frequenza di picco. Il confronto dei risultati (Figura 4) evidenzia come nel passaggio da moto ondoso incidente alla barena si ha una forte diminuzione di energia per effetto sia della dissipazione per frangimento che della riflessione indotta dalla parete verticale della barena. Nel caso di barena vegetata la dissipazione per metro di penetrazione è ancora più elevata tanto che a distanza di 150 cm dal bordo barena lo spettro non mostra più nessun picco significativo (figura 4 a destra). Contestualmente anche la frequenza di picco tende a diminuire, spostandosi a valori più bassi ovvero relativi a onde lunghe. Dalla figura 4 è anche evidente, maggiormente nel caso di sponda vegetata, un piccolo picco a frequenze molto basse, caratteristiche delle così dette *infragravity waves*.

Infine i valori dell'altezza significativa del moto ondoso registrata dalle varie sonde H_{m0} sono riportate in funzione della distanza d dal bordo della barena (Figura 5); le grandezze sono rese adimensionali nel modo seguente:

$$H_{m0}^* = \frac{H_{m0}}{H_{m0(1)}}, \quad d^* = \frac{d}{H_{m0(1)}} \quad (1)$$

dove $H_{m0(1)}$ è il valore di *altezza d'onda significativa* registrato in corrispondenza della prima sonda di livello vicino al bordo della barena.

L'analisi qualitativa dei risultati evidenzia, in accordo con la descrizione delle trasformazioni spettrali, un netto abbattimento dell'altezza significativa nel passare dalla laguna alla barena sommersa e come atteso tale effetto di attenuazione si è rivelato maggiore nei test effettuati con barena vegetata. Nel caso del test con altezza d'acqua media pari a 64 cm, si osserva che nel passaggio dalla sonda 1 alla sonda 2 l'abbattimento dell'altezza d'onda è maggiore rispetto al caso di 62 cm a causa di un frangimento più intenso; successivamente il tasso abbattimento nel passare dalla sonda 2 alla sonda 3 è identico per poi diminuire nel passaggio dalla sonda 3 alla sonda 4.

Infine si riportano in Tabella 1 i dati sintetici di Energia e Potenza del moto ondoso registrato dalle varie sonde lungo la barena. L'energia totale è calcolata tramite la seguente formula, valida per un moto ondoso irregolare:

$$E_{tot} = \frac{1}{16} \gamma H_{m0}^2 \quad (2)$$

dove γ è il peso specifico dell'acqua.

La potenza del moto ondoso è calcolata come:

$$P_{tot} = c_g \cdot E_{tot} \quad (3)$$

dove c_g è la celerità di gruppo calcolata come quella in acque basse: $c_g = \sqrt{gh_m}$, con h_m altezza media dell'acqua, rispetto alla quota della barena registrata dalla sonda in una data posizione.

Si può osservare che l'energia e la potenza associate al moto ondoso diminuiscono man mano che ci si allontana dal bordo della barena.

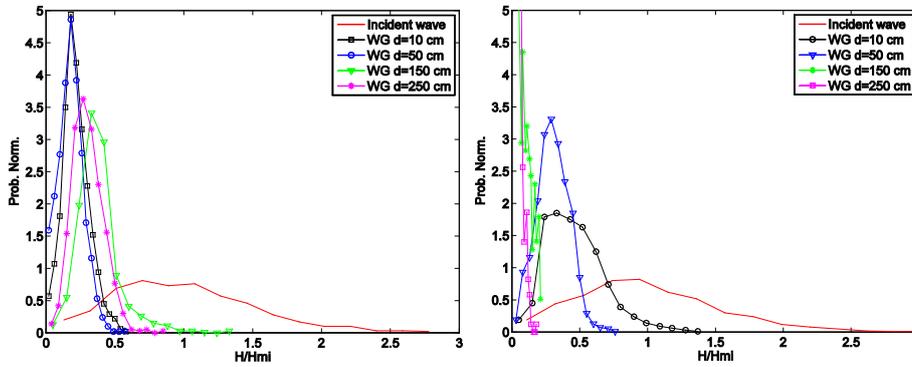


Figura 3. Distribuzione delle altezze d'onda *zero-crossing* registrate dalle varie sonde lungo la barena non vegetata (a) e vegetata (b). In ascissa le altezze d'onda sono normalizzate con l'altezza d'onda media incidente, in ordinata la Probabilità normalizzata è calcolata come $n/N/(\Delta H/H_{mi})$. La legenda identifica le sonde con la distanza progressiva dal bordo della barena.

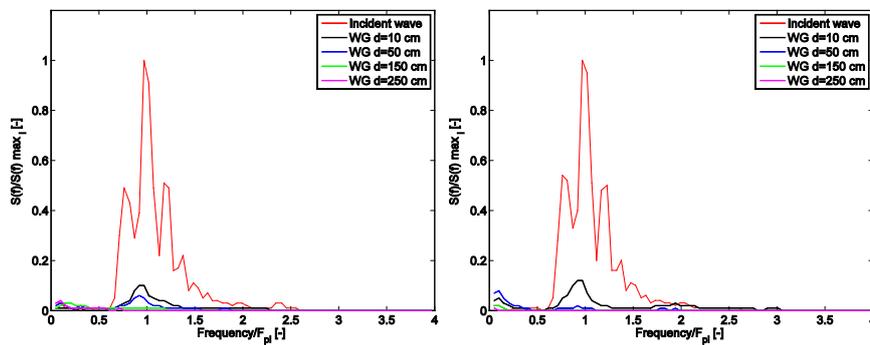


Figura 4. Andamento degli spettri relativi ai segnali delle sonde di livello disposte lungo la barena non vegetata (a) e vegetata (b). In ascissa la frequenza è adimensionalizzata con la frequenza di picco dell'onda incidente, in ordinata lo spettro è adimensionalizzato con il valore massimo dello spettro relativo all'onda incidente.

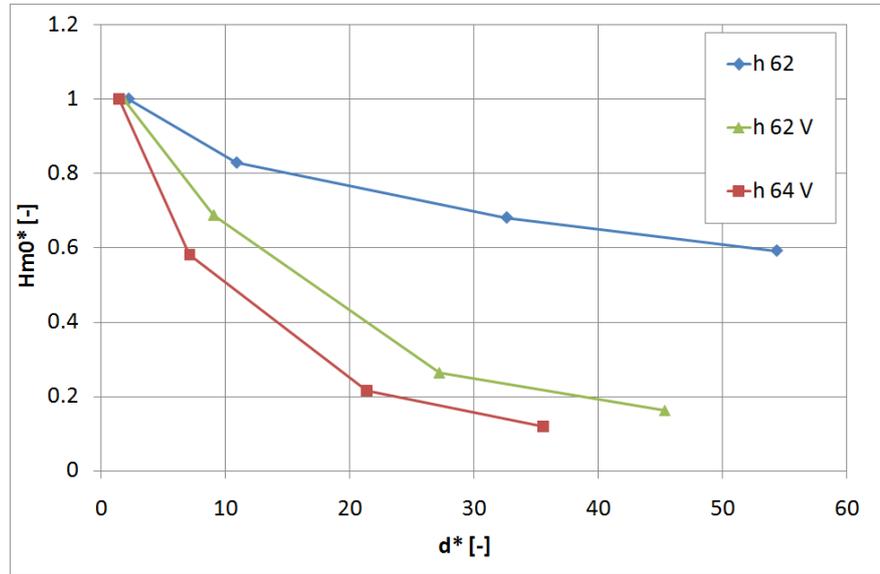


Figura 5. Andamento dell'altezza d'onda media significativa in funzione della distanza dal bordo barena, nel caso di barena non vegetata (h=62 cm) e vegetata (h=62 cm, 64 cm).

Sonda	Test h 62 cm		Test Veg. h 62 cm		Test Veg. h 64 cm	
	E_{tot} [J/m ²]	P_{tot} [W/m]	E_{tot} [J/m ²]	P_{tot} [W/m]	E_{tot} [J/m ²]	P_{tot} [W/m]
1	1.30	0.39	1.86	0.77	3.03	0.98
2	0.89	0.30	0.88	0.41	1.02	0.37
3	0.60	0.22	0.13	0.05	0.14	0.03
4	0.45	0.15	0.05	-	0.04	-

Tabella 1. Parametri sintetici dell'energia e della potenza totale del moto ondoso registrato dalle varie sonde nelle prove "h 62 cm non vegetato", "h 62 cm vegetato", e "h 64 cm vegetato".

4 DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Nel presente lavoro sono riportati i risultati di una attività sperimentale finalizzata alla valutazione dell'effetto della vegetazione barenale sull'attenuazione del moto ondoso lagunare. I test effettuati nel caso di barena non vegetata e vegetata per uno stesso valore del battente idrico hanno evidenziato che la vegetazione ha un ruolo determinante nell'attenuazione del moto ondoso.

I risultati sperimentali fanno riferimento a condizioni in cui la vegetazione è emersa e i rapporti battente idrico/altezza d'onda sono molto minori di 1, e incontrano dei limiti di applicabilità nel caso di condizioni opposte.

Dai dati sperimentali misurati è possibile stimare il tasso di attenuazione del moto ondoso nel caso di barena non vegetata e vegetata, da utilizzare all'interno di modelli di generazione e propagazione del moto ondoso per lo studio dell'evoluzione degli ambienti lagunari.

Ringraziamenti. Il presente lavoro è stato svolto nell'ambito del Progetto di Ricerca PRIN 2008 "Ecomorfodinamica di ambienti a marea e cambiamenti climatici", finanziato dal MIUR. Il primo autore ha ricevuto supporto finanziario a valere sul Programma Operativo Regionale finanziato dal FSE per l'obiettivo "Competitività regionale e occupazione" anni 2007-2013, nell'ambito del progetto MITI "Metodologie Innovative per la Tutela dei bacini Idrografici e delle coste". Si ringrazia l'Ing. Lorenzo Lotti per il prezioso supporto nell'attività sperimentale.

BIBLIOGRAFIA

- Allen J. R. L., 2000. Morphodynamics of Holocene salt marshes: a review sketch from the Atlantic and Southern North Sea coast of Europe, *Quaternary Science Reviews*, 1155-1231.
- Augustin L. N., Irish J. L., e Lynett P., 2009. Laboratory and numerical studies of wave damping by emergent and near-emergent wetland vegetation, *Coastal Engineering* 56, 332-340.
- Carniello L., D'Alpaos A., e Defina A., 2011. Modeling wind waves and tidal flows in shallow micro-tidal basins, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 114, F04002. doi:10.1016/j.ecss.2011.01.001.
- Francalanci S., Solari L., Cappiotti L., Rinaldi M. e Federici G.V., 2011. Experimental observations on bank retreat of salt marshes. *Proc. River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, RCEM 2011*, Tsinghua University Press, 543-551.
- Huges S. A., 1993. Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering. *Advances Series on Ocean Engineering - Volume 7*, World Scientific, 568 pagine.
- Marani M., Silvestri S., Belluco E., Ursino N., Comerlati A., Tosatto O., e Putti M., 2006. Spatial organization and ecohydrological interactions in oxygen-limited vegetation ecosystems. *Water Resources Research*, Vol. 42, W06D06, doi:10.1029/2005WR004582.
- Mendez F. J., e Losada I. J., 2004. An empirical model to estimate the propagation of random breaking and nonbreaking waves over vegetation fields. *Coastal Engineering* 51, 103-118.
- Moller I., 2006. Quantifying saltmarsh vegetation and its effect on wave height dissipation: Results from a UK East coast saltmarsh. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 69, 337-351.