

Utilizzo del modello XBeach come strumento di analisi dell'erosione costiera in seguito a eventi di mareggiata

Silvia Unguendoli^{1,2}, Aguzzi Margherita¹, Nunzio De Nigris¹,
Maurizio Morelli¹ e Tiziana Paccagnella¹

¹Arpae Emilia-Romagna, Servizio Idro-Meteo-Clima, Viale Silvani 6, 40122, Bologna, Italia;
e-mail sunguendoli@arpae.it

²Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, Università degli Studi di Bologna,
Viale Risorgimento 2, 40136, Bologna, Italia

Riassunto

Il presente studio analizza il fenomeno dell'erosione costiera mediante l'utilizzo della modellazione numerica. In particolare viene presentata un'analisi dell'evoluzione del profilo di spiaggia in caso di mareggiate intense, con quantificazione del fenomeno di erosione della spiaggia. Sull'area di indagine, un tratto di costa emiliano-romagnola compreso tra Cesenatico e Cervia, sono stati condotti rilievi topo-batimetrici e sedimentologici, prima e dopo un evento di mareggiata intenso. Mediante l'utilizzo del software di modellazione XBeach (Roelvink et al., 2009), è stato simulato il comportamento della spiaggia soggetta a tale evento. Contestualmente, è stata effettuata l'analisi di sensitività del modello in relazione alla variazione dei suoi parametri di input. Tale analisi ha reso possibile una successiva calibrazione del modello in riferimento all'area di studio. I risultati evidenziano l'importanza di una buona calibrazione dei parametri *facua*, *facAs* e *facSk*, legati alla forma dell'onda e del parametro *fw* legato all'attrito al fondo.

Parole chiave: erosione, inondazione, mareggiata, rilievo, monitoraggio, modellistica, XBeach

Abstract

*This research presents a numerical modelling analysis of the coastal erosion phenomena. The study focused on the evolution of the beach profile for intense storm events and presents an evaluation of the beach erosion. The study area is a coastal stretch of the Emilia-Romagna region, located between Cesenatico and Cervia. Topo-bathymetric and sedimentological reliefs, along 10 cross-shore transects, were carried out before and after a storm event. The behaviour of the beach profiles subject to this storm event was investigated with the use of the numerical model XBeach (Roelvink et al, 2009). The model sensitivity to the input parameters variation was assessed. Finally, the model calibration in relation of the study area is presented. The study results highlighted the importance of a good calibration of the following parameters, which take into account the wave shape: *facua*, *facAs* and *facSk* and the *fw* parameter that represents the bottom friction.*

Keywords: erosion, flooding, sea storm, survey, monitoring, numerical modelling, XBeach

Introduzione

Sempre più spesso, gli eventi ondosi che si verificano sul litorale emiliano-romagnolo, caratterizzati dalla combinazione di altezze d'onda elevate e innalzamento del livello del mare significativo (acqua alta), provocano grossi danni alle spiagge e alle strutture presenti sul territorio. L'assetto morfologico della piana costiera, caratterizzata da vaste aree con quote altimetriche prossime o inferiori al livello del mare aggrava tale criticità. (Perini et al., 2011). Le mareggiate intense che colpiscono le nostre spiagge sono la causa di forti perdite di materiale

sabbioso in particolare nella zona emersa della spiaggia (Aguzzi et al., 2016). Tale fenomeno porta alla riduzione dell'ampiezza e della quota delle spiagge e alla conseguente maggiore esposizione del territorio retrostante al rischio di ingressione marina e inondazione (Armaroli et al., 2012). In numerosi casi infatti, l'acqua risale sulla spiaggia causando allagamenti del territorio retrostante e danni alle strutture (Martinelli et al., 2013).

L'evoluzione morfologica delle spiagge nel caso di mareggiate intense è diventata negli anni una questione di grande sensibilità per la costa, dando origine alla necessità di una sempre migliore conoscenza e rappresentazione dei principali fenomeni che caratterizzano la zona costiera. Negli ultimi decenni, sono stati sviluppati numerosi modelli per l'analisi della morfologia costiera, in grado di simulare i principali processi fisici costieri per un vasto range di scale temporali (Sutherland et al., 2004). Il modello XBeach (Roelvink et al., 2009) rappresenta lo stato dell'arte della modellazione morfologica della zona costiera, a supporto dei sistemi di allertamento e di gestione della costa, come mostrato da numerosi studi (Harley et al., 2011; Pender e Karunarathna, 2013). L'articolo presenta uno studio del fenomeno dell'erosione costiera mediante l'utilizzo del software di modellazione numerica XBeach, in grado di simulare i processi idro-morfo-dinamici a scala spaziale dell'ordine dei chilometri e scala temporale degli eventi di mareggiata (ore/giorni). In particolare viene presentata un'analisi dell'evoluzione del profilo di spiaggia in caso di una mareggiata intensa, con quantificazione del fenomeno di erosione della spiaggia. L'area di studio è un tratto di costa del litorale emiliano-romagnolo compreso tra Cesenatico e Cervia. Su di esso sono stati condotti rilievi topo-batimetrici e sedimentologici prima e dopo un evento di mareggiata intenso avvenuto nell'inverno 2015. Il modello morfologico XBeach è stato utilizzato in modalità monodimensionale per simulare il comportamento della spiaggia soggetta a tale evento di mareggiata. XBeach presenta numerosi parametri di input che possono essere variati all'interno del proprio range di valori; tali parametri governano le parametrizzazioni dei fenomeni idrodinamici delle onde corte, delle correnti, del trasporto di sedimenti e della variazione morfologica del fondale (McCall et al., 2010). Al fine di valutare l'effetto della variazione di tali parametri sull'evoluzione morfologica del fondale, il modello è stato soggetto ad un'analisi di sensitività e ad una successiva calibrazione in riferimento all'area di studio.

Descrizione del modello XBeach

XBeach è un modello 2DH (depth averaged), in grado di simulare il comportamento di una spiaggia soggetta ad eventi intensi di mareggiata, includendo i fenomeni di erosione della duna, inondazione e formazione di brecce. Il campo di utilizzo di tale modello morfologico è circoscritto in particolare alla scala temporale degli eventi di mareggiata, che in pochi giorni possono causare ingenti fenomeni erosivi della spiaggia. Il suo utilizzo è quindi limitato a scale spaziali relativamente piccole e ad intervalli temporali di breve/medio periodo (giorni/mesi), come descritto da Giardino (2013).

Il modello è in grado di risolvere coppie di equazioni orizzontali 2D legate ai fenomeni di propagazione dell'onda, di flusso, di trasporto sedimentario e di variazione del fondale, imponendo condizioni al contorno di onde variabili (spettrali) e di flusso. XBeach tiene conto della variazione temporale dell'altezza d'onda e quindi è in grado di risolvere il moto legato alle *long-wave*, generato da tale variazione.

Il moto dell'azione ondosa per le onde corte viene modellato mediante l'equazione:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial c_x A}{\partial x} + \frac{\partial c_y A}{\partial y} + \frac{\partial c_\theta A}{\partial \theta} = - \frac{D_w + D_f + D_v}{\sigma} \quad (1)$$

Dove A è l'azione ondosa, c_x , c_y e c_θ sono le velocità di propagazione nello spazio orizzontale e nello spazio direzionale, D_v è la dissipazione legata alla vegetazione e σ la frequenza dell'onda.

La formulazione per il calcolo della dissipazione legata al frangimento dell'onda, D_w , può essere scelta tra 5 diverse formulazioni implementate all'interno del software, mentre la dissipazione legata al fondale D_f è calcolata mediante l'equazione:

$$D_f = \frac{2}{3} \rho f_w \left(\frac{\pi H_{rms}}{T_{m01} \sinh kh} \right) \quad (2)$$

Dove ρ è la densità dell'acqua, f_w è il coefficiente di attrito al fondo e H_{rms} è l'altezza d'onda quadratica media. Nella formula, T_{m01} rappresenta il periodo medio dell'onda definito dai momenti di ordine zero e uno dello spettro, k è il numero d'onda e h è la profondità.

Xbeach considera l'energia delle onde come mediata sulla loro lunghezza e quindi non è in grado di simulare la forma dell'onda. Tuttavia, quando le onde si propagano dal largo verso riva la loro forma si modifica gradualmente a causa della combinazione dei processi di shoaling, frangimento e non-linearità. All'interno del modello l'effetto dell'asimmetria e della distorsione dell'onda viene considerato all'interno della equazione di avvezione-diffusione mediante il calcolo della velocità u_x , definita come segue:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_1^n (x_m - x_p)^2}{n}} \quad (3)$$

La formulazione per il trasporto sedimentario è quella definita da Soulsby-Van Rijn (Soulsby, 1997; van Rijn, 1985) mentre la concentrazione di equilibrio è calcolata come segue:

$$C_{eq} = \max \left(\min \left(C_{eq,b}, \frac{1}{2} C_{max} \right) + \min \left(C_{eq,s}, \frac{1}{2} C_{max} \right), 0 \right) \quad (4)$$

Il sistema di coordinate su cui si basa il modello è caratterizzato dall'asse delle ascisse con orientamento verso la costa e l'asse delle ordinate orientato lungo riva. Il modello utilizza una griglia di calcolo sfalsata, nella quale alcune variabili vengono definite al centro delle celle e altre sulle loro interfacce. XBeach permette di utilizzare una griglia con distanze tra i punti variabili in entrambe le direzioni.

Il modello può essere utilizzato in modalità "idrostatica" e "non-idrostatica"; nel primo caso, la variazione dell'ampiezza delle onde corte viene risolta in maniera separata dalle onde lunghe, dalle correnti e dalle variazioni morfologiche mentre nel secondo caso, tali processi vengono risolti includendo l'azione delle onde corte, a discapito del maggiore costo computazionale. Inoltre, XBeach può essere utilizzato in modalità mono-dimensionale (1D) e bi-dimensionale (2D). Nel primo caso il dominio spaziale è limitato al singolo transetto perpendicolare a riva, mentre nel secondo è possibile eseguire simulazioni su aree costiere più estese. La scelta tra le due diverse modalità dipende, in particolare, dallo scopo dell'analisi, in riferimento ai fenomeni da studiare e al compromesso che si vuole raggiungere tra il costo computazionale del modello e la precisione richiesta nei risultati. Per maggiori dettagli sulle formulazioni del modello XBeach, si faccia riferimento a Roelvink et al., (2009).

Inquadramento e area di studio

La costa dell'Emilia-Romagna si affaccia nella zona settentrionale del Mare Adriatico con orientamento nord ovest – sud est e limita una piattaforma epicontinentale poco acclive caratterizzata da basse ampiezze di marea (Martinelli et al., 2010). Il litorale regionale è caratterizzato da spiagge dissipative composte da sabbia medio-fine e con basse elevazioni al di sopra del livello del mare (Regione Emilia-Romagna: Servizio Geologico Sismico e dei Suoli, 2010). Oltre la metà delle spiagge emiliano-romagnole (circa 74 km) è protetta da opere rigide di vario tipo. Le più diffuse sono le scogliere parallele emerse che difendono circa 40 km di costa (Preti et al., 2008). I restanti 30 km circa sono protetti da scogliere radenti, scogliere a cresta bassa, barriere sommerse in sacchi di sabbia e pennelli (Aguzzi et al., 2016). Il trasporto solido litoraneo netto è diretto da sud verso nord (Aguzzi et al., 2016). Il fondale in corrispondenza delle zone prive di opere di difesa è caratterizzato generalmente da barre sommerse ben formate, elementi morfologici che favoriscono il frangimento delle onde con conseguente dissipazione energetica. Gli eventi ondosi che rappresentano le maggiori criticità per il litorale provengono da nord-est (Bora) e da sud-est (Scirocco). Gli eventi più energetici sono generati dal vento di Bora, forte vento freddo che soffia da nord-est a intermittenza soprattutto durante l'inverno. I getti di Bora hanno una forte influenza sul clima ondoso e sulla circolazione delle correnti in tutto l'Adriatico settentrionale (Signell et al., 2010). Il litorale presenta un regime di marea astronomica di tipo microtidale (escursione media delle *neap tides* di 0.3-0.4m; escursione media delle *spring tides* di 0,8-0,9 m) con entrambe le componenti diurna e semidiurna.



Figura 1. Ubicazione dell'area di studio.

L'area di studio consiste in un tratto di costa del litorale emiliano-romagnolo che si estende per circa 1 km ed è collocato tra il Porto Canale di Cesenatico e il Porto di Cervia (Fig. 1).

Il tratto di studio è stato individuato in un'area costiera sprovvista di opere di difesa rigide al fine di semplificare la rappresentazione modellistica mediante il software XBeach, escludendo i processi più complessi legati alla presenza delle opere rigide. Nell'area sono stati individuati 10 transetti perpendicolari a riva, distanziati di circa 100 m, lungo i quali sono stati effettuati i rilievi topo-batimetrici prima e dopo l'evento di mareggiata.

Caso studio

L'evento di mareggiata, avvenuto nell'inverno 2015, ha colpito gran parte del litorale emiliano-romagnolo. Il forte vento proveniente da Nord-Est ha originato una situazione di mare molto agitata, caratterizzata da valori elevati di altezza d'onda in combinazione ad un livello di mare sostenuto. Tale combinazione ha provocato fenomeni di ingressione marina, erosione costiera e danni alle strutture e alle dune di protezione invernali. In riferimento all'area di studio di Cesenatico, sono stati raccolti i dati rappresentativi di tale mareggiata.

Dati rappresentativi dello stato del mare

I dati di altezza d'onda, relativi all'evento, sono stati estratti dalle misurazioni della boa onda-metrica Nausicaa, collocata circa 8 km al largo di Cesenatico su un fondale di circa 10 m di profondità. La boa è posizionata in una zona interdotta alla navigazione, all'attracco ed alla pesca ed è in funzione dal maggio 2007. I dati, acquisiti ogni 30 minuti ed archiviati nel Dbase meteo-marino del Servizio Idro-Meteo-Clima, sono accessibili attraverso il sistema DEXTER (<https://www.arpae.it/sim>). A causa del mancato funzionamento del mareografo di Porto Corsini (Ravenna), è stato necessario effettuare un'elaborazione tra dati misurati e dati previsti.

La procedura seguita è stata la seguente:

- a) estrazione dei dati di livello misurati dai mareografi di Porto Garibaldi e dal mareografo di Hera, localizzato a Rimini;
- b) estrazione dei dati di livello previsti dal modello AdriaROMS, in corrispondenza di Porto Garibaldi, Rimini e Cesenatico (area di interesse);

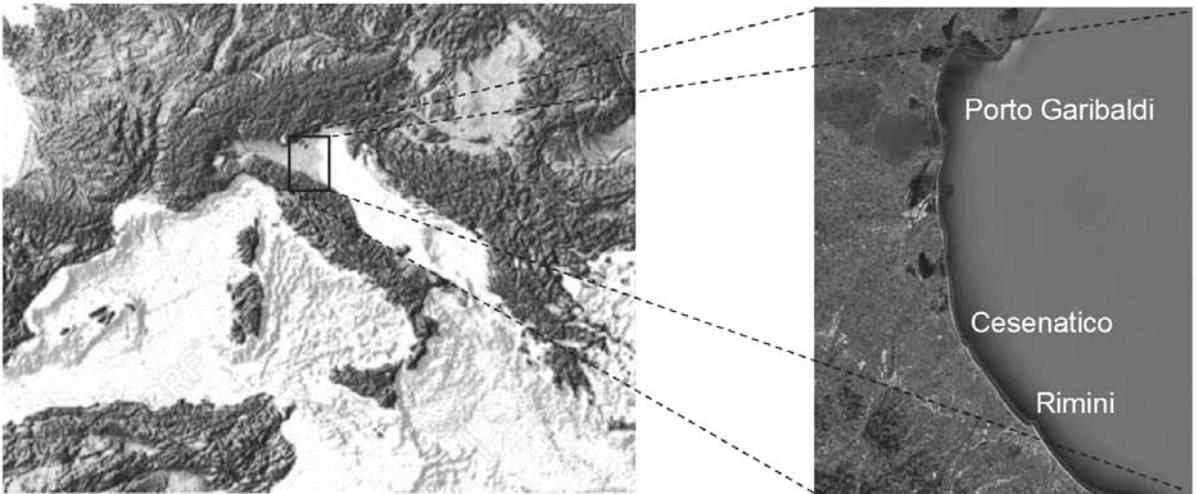


Figura 2. Localizzazione dei mareografi di Rimini e Porto Garibaldi rispetto all'area di studio.

- c) analisi del valore di *bias* dei valori previsti rispetto a quelli misurati di Porto Garibaldi e di Rimini, inteso come la differenza tra dato previsto e misurato rapportata al numero di dati;
- d) correzione dei valori di livello previsti a Cesenatico in riferimento alla media dei *bias* calcolati nelle altre due stazioni.

L'evento è caratterizzato dalla presenza di due picchi di altezza d'onda consecutivi e si estende quindi per una durata di circa 7 giorni (Fig. 3). Il ristretto intervallo tra i due picchi e le condizioni di mare avverse, non hanno permesso il rilievo della spiaggia subito dopo il primo picco.

L'evento, con direzione dominante corrispondente al vento di Bora ($\sim 60^\circ$ N) visibile nel grafico in basso di Figura 5, raggiunge i picchi di altezza d'onda 3.33 m alle ore 23:00 del 21/11/2015 e di 3.16 m alle ore 23.30 del 26/11/2015. Dal grafico superiore di Figura 3 è possibile notare il mancato funzionamento della boa per un intervallo di tempo di circa 5 ore, in corrispondenza del primo picco di mareggiata. L'analisi della mareggiata indica la possibile presenza di un picco di altezza d'onda in tale intervallo in concomitanza di un elevato innalzamento del livello del mare. Durante l'evento il livello ha raggiunto il valore massimo di 0.58 m sopra il livello del mare.

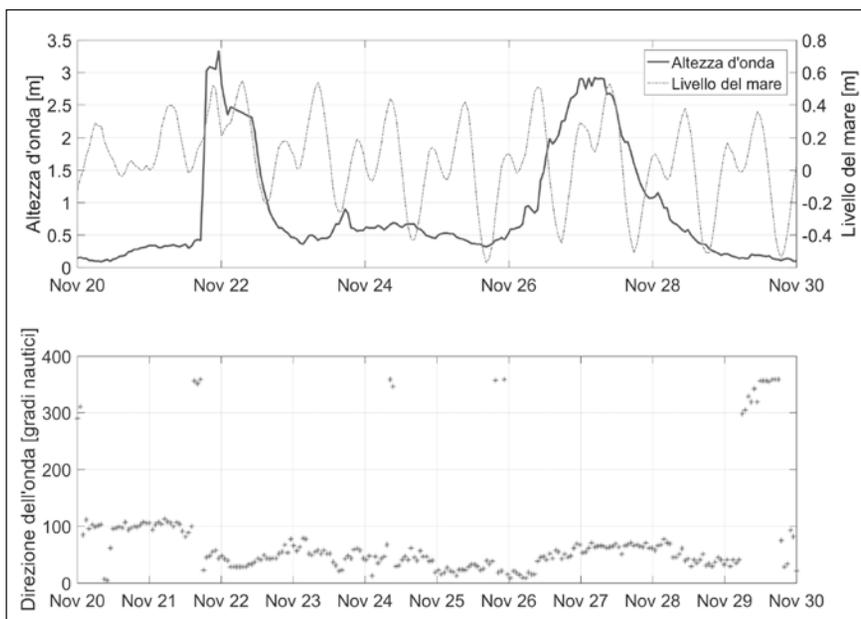


Figura 3. Condizioni dello stato del mare relative all'evento di mareggiata. Grafico in alto: altezza d'onda e livello del mare. Grafico in basso: direzione dell'onda.

La principale difficoltà riscontrata nello studio è legata alla previsione dell'evento, in particolar modo al fine di prevederlo nei tempi necessari ad effettuare il rilievo prima della mareggiata. Per far fronte a tale complicazione è stato fondamentale il supporto dell'area previsionale-modellistica di Arpa Emilia-Romagna. L'elaborazione della previsione meteorologica fino a 3 giorni prima dell'evento è stata effettuata mediante il Modello Globale del Centro Europeo (ECMWF) in modalità deterministica e di Ensemble (ECMWF – EPS). Inoltre, per affinare la previsione a breve termine sono stati osservati i modelli previsionali ad area limitata di COSMO (COntortium for Small-Scale MOdelling).

Dati topo-batimetrici

Il rilievo di dettaglio della spiaggia emersa e sommersa è stato eseguito lungo i 10 profili individuati nella zona di studio, visibili in Figura 4, a partire dal punto più alto della spiaggia emersa, fino alla profondità di 8 m. In particolare, verso terra il rilievo è stato esteso fino al primo punto non erodibile (muretto, strada, stabilimento balneare, ecc.). Complessivamente il rilievo ha coperto circa 20-22 km di profili topo-batimetrici. Se presente, l'argine invernale è stato opportunamente rilevato, definendo i punti di misura al piede e al colmo della struttura. Le sezioni sono distanziate tra loro di circa 100m, al fine di rendere possibile una futura modellazione bi-dimensionale dell'area di studio. Lo studio di modellazione, svolto in modalità monodimensionale, comporta infatti una semplificazione nell'analisi, che in particolare non considera nei processi di erosione il contributo del trasporto longitudinale. Tale semplificazione risulta accettabile in quanto i processi legati al singolo evento di mareggiata sono dominati dal trasporto trasversale.

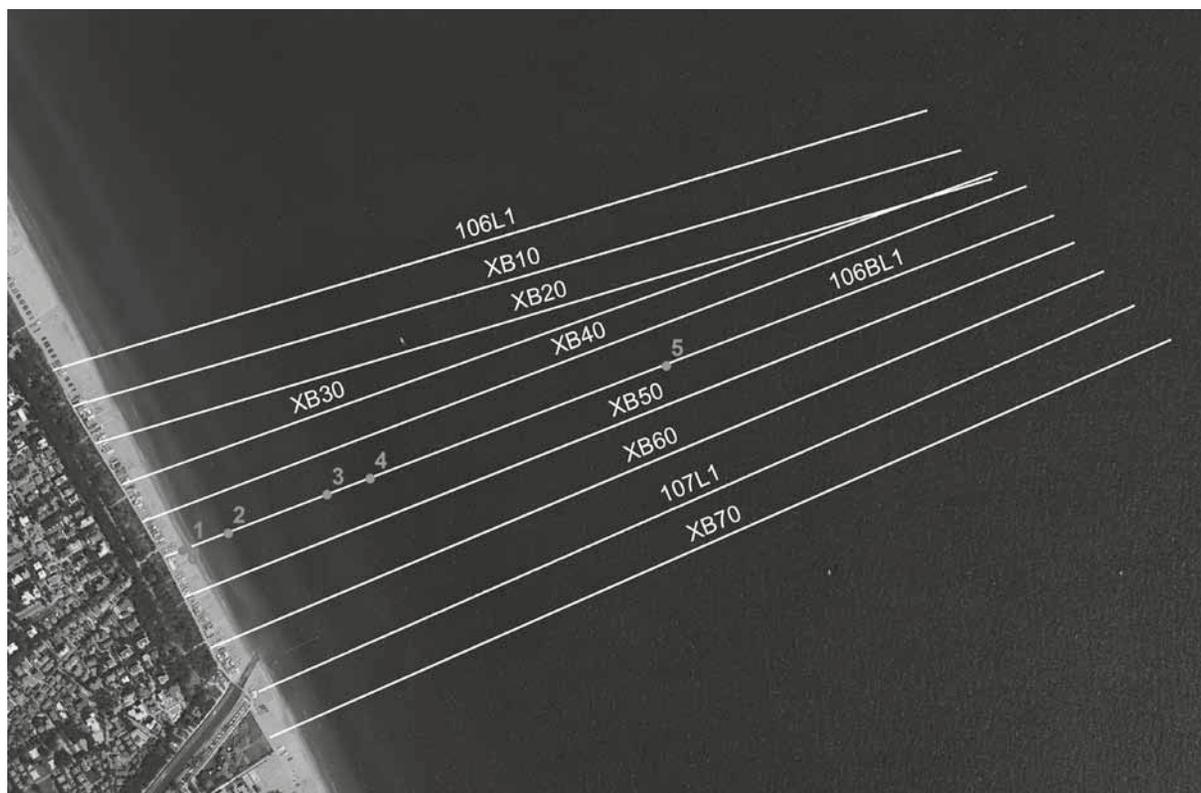


Figura 4. Mappa delle sezioni interessate dal rilievo topo-batimetrico e dei punti di campionamento dei sedimenti.

In base alla strumentazione utilizzata e alla modalità di acquisizione dati in funzione della diversa configurazione morfologica della spiaggia, ogni profilo è stato suddiviso nelle seguenti zone:

- *Spiaggia emersa/sommersa*: tra la testa della sezione e la batimetrica di 1 m. Il rilievo è stato effettuato utilizzando un ricevitore geodetico GNSS a doppia frequenza trasportato manualmente da un operatore. In tale tratto l'acquisizione dei punti è stata eseguita con una distanza reciproca che sta nell'intervallo 2-5 m.
- *Litorale sommerso*: tra la batimetrica di 1 m e la chiusura della sezione (- 8 m). Il rilievo è stato eseguito utilizzando un ricevitore geodetico GNSS a doppia frequenza accoppiato con Ecoscandaglio idrografico single-beam a singola frequenza (210 kHz), con un trasduttore P01540 avente 10° di apertura del fascio acustico, installati su apposita imbarcazione. L'interfacciamento degli strumenti, l'accoppiamento delle stringhe NMEA, la gestione della latenza, l'acquisizione dati e la navigazione sono stati eseguiti grazie al software NavPro.

Il posizionamento plano-altimetrico è stato effettuato utilizzando il ricevitore satellitare in modalità differenziale NRTK con l'ausilio del servizio di posizionamento fornito dalla rete nazionale di stazioni permanenti Netgeo.

Le misure planimetriche sono state riferite al sistema geodetico nazionale ETRF2000-RDN e proiettate nel reticolo cartografico UTM32N. Le quote, inizialmente riferite all'ellissoide ETRF2000, sono state convertite in quote ortometriche utilizzando i capisaldi della rete di livellazione Arpa (ora Arpae). Le quote ortometriche sul livello medio mare di detti capisaldi sono state ottenute tramite livellazione di alta precisione collegandosi ai capisaldi dell'Istituto Geografico Militare Italiano (mareografo di Genova). In Figura 5 viene riportato, come esempio, l'andamento del profilo 106L1 misurato prima e dopo la mareggiata, nel quale è visibile il processo erosivo che ha interessato in particolare la parte emersa di spiaggia e lo spostamento verso il largo della barra lato mare.

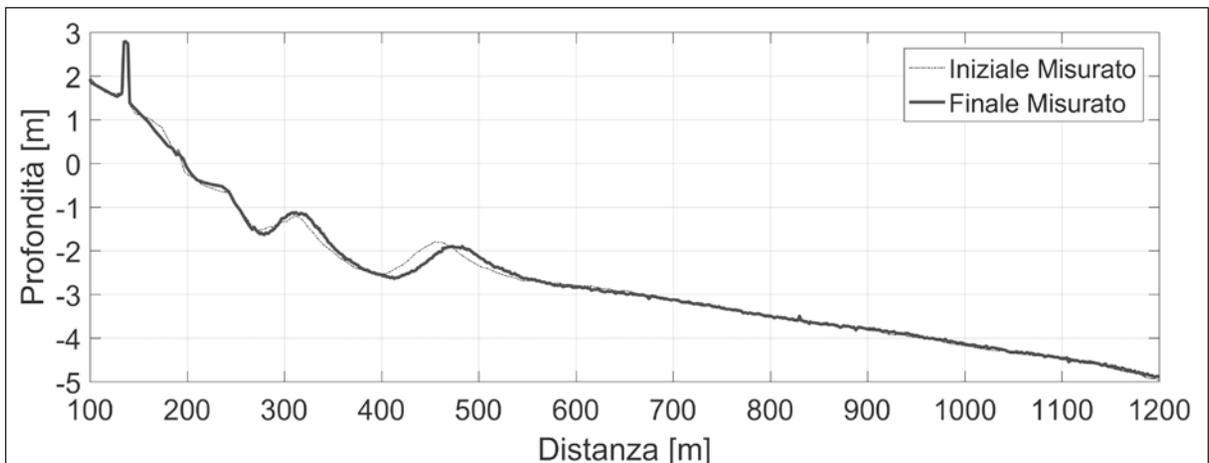


Figura 5. Andamento del profilo di spiaggia 106L1, misurato prima e dopo la mareggiata.

Dati sedimentologici

Lungo il profilo 106BL1, sono stati inoltre prelevati i campioni di sedimento superficiali da sottoporre ad analisi sedimentologica, in corrispondenza di 6 punti posizionati a varie profondità, indicate in Tabella 1. La distanza dalla linea di riva di ciascun punto e la classe di sedimenti che li caratterizza sono inoltre presentati in tabella.

Tabella 1. Caratteristiche dei campioni di sedimento prelevati durante il rilievo.

Campioni		D50 [mm]	Profondità [m]	Distanza dalla linea di riva (km)	Classe
1	106BL1-T	0,184	+1,00	-0,015	Sabbia fine
2	106BL1-0	0,161	0,00	0,000	Sabbia fine
3	106BL1-1	0,155	-1,00	0,100	Sabbia fine
4	106BL1-2	0,088	-2,00	0,365	Sabbia molto fine
5	106BL1-3	0,087	-3,00	0,480	Sabbia molto fine
6	106BL1-6	0,085	-6,00	1,250	Sabbia molto fine
Media		0,127			

I campioni di spiaggia emersa sono stati raccolti con apposita paletta. Per i campioni di spiaggia sommersa è stata utilizzata una benna leggera di tipo Van Veen. Il posizionamento planimetrico dei campioni è stato effettuato con ricevitore satellitare in modalità differenziale NRTK, ed è stata registrata la profondità di campionamento mediante ecoscandaglio single-beam. La conservazione dei campioni è avvenuta in contenitori di plastica sufficientemente grandi da poter inizialmente inserire buona parte dell'acqua presente nella bennata, lasciar decantare la frazione granulometrica fine, ed infine rimuovere con cautela l'acqua in eccesso. Le analisi granulometriche sono state effettuate presso il Laboratorio della Sezione Provinciale di Arpa Ravenna, mentre i parametri sedimentologici sono stati calcolati tramite il software Gradistat (Blott e Pye, 2001).

Metodi

Nello studio, il software di modellazione numerica XBeach è stato utilizzato per analizzare l'evoluzione morfologica del fondale in relazione all'evento di mareggiata. Il profilo iniziale della spiaggia, in input al modello, si basa sui rilievi topo-batimetrici eseguiti nell'area di studio, descritti nel capitolo precedente. Le simulazioni sono state svolte in modalità monodimensionale, lungo i singoli profili di spiaggia. L'andamento del fondale è stato rappresentato mediante la creazione di una griglia di calcolo con distanza tra i punti che varia da 10 m al largo a 1 m sulla spiaggia emersa. Il D50 medio, calcolato sui 6 campioni sedimentologici rilevati, è stato utilizzato come dato sedimentologico di input per il modello. XBeach richiede in input le condizioni al contorno rappresentative delle condizioni ondose e della variazione del livello del mare. I dati di altezza d'onda e livello descritti nel capitolo precedente, rappresentano una buona stima delle condizioni reali della mareggiata. Il modello è stato quindi forzato con le condizioni ondose estratte dalla boa, definite in modalità spettrale (spettro JONSWAP) e la serie temporale dei livelli, estratta per l'intera durata della simulazione. Le simulazioni dell'evento hanno inizio il 20/11/2015 alle ore 00:00 e terminano il 30/11/2015 alle ore 00:00, con durata complessiva di 10 giorni.

Il modello è stato sottoposto ad un'analisi di sensitività, in relazione ai parametri di input, allo scopo di definire quali di essi influenzano maggiormente la performance del modello, definendo come esso sia sensibile alla variazione del settaggio dei parametri di input. L'analisi è stata svolta lungo 2 profili di spiaggia rilevati (106BL1 e 106L1). È stata eseguita una simulazione "di riferimento" nella quale ciascun parametro è stato mantenuto pari al proprio valore di default come definito da Roelvink et al. (2010). Nelle restanti simulazioni è stato variato un singolo parametro all'interno del suo range di validità, utilizzando l'approccio definito "one-at-the-time" (Simmons et al., 2015). L'analisi è stata eseguita sui parametri legati al fenomeno del trasporto di sedimenti e alla variazione morfologica del fondale. In Tabella 2 viene riportata la lista dei parametri analizzati, la loro descrizione, il range di validità e il corrispettivo parametro di default.

Tabella 2. Parametri di input del modello, variati nell'analisi di sensitività.

Parametri	Descrizione	Valore di default	Intervallo dei valori
bedfric	Coefficiente di attrito al fondo	55	20 – 100
cmax	Massima concentrazione dei sedimenti	0.1	0.0 – 1.0
delta	Frazione di altezza d'onda aggiunta alla profondità dell'acqua.	0	0.0 – 1.0
eps	Soglia di profondità al di sopra della quale le celle sono considerate bagnate.	0.005	0.001 – 0.1
facua	Fattore di calibrazione del flusso legato all'asimmetria e alla distorsione dell'onda.	0.1	0.0 – 1.0
fw	Fattore di attrito legato alle onde corte.	0	0.0 – 1.0
gamma	Parametro di frangimento	0.55	0.4 – 0.9
hmin	Soglia di profondità sopra la quale sono incluse le correnti di Stokes.	0.2	0.001 – 1.0
lws	Abilita l'agitazione legata alle onde lunghe.	1	0 / 1
smax	Massimo parametro di Shields per la concentrazione di equilibrio dei sedimenti.	-1	-1.0 – 3.00
turb	Turbolenza legata alle onde corte.	bore_averaged	none, wave_averaged, bore_averaged
umin	Limite di velocità nell'equazione della concentrazione di equilibrio dei sedimenti.	0	0.0 – 0.2
wetslp	Pendenza critica di valanga sotto il livello del mare (dz/dx and dz/dy)	0.3	0.1 – 1.0
dryslp	Pendenza critica di valanga sopra il livello del mare (dz/dx, and dz/dy)	1	0.1 – 2.0
break	Formulazione legata al frangimento dell'onda	Roelvink2	Roelvink1, Roelvink2, Roelvink_daly, Janssen

Per ogni simulazione è stata valutata l'evoluzione del profilo di spiaggia, mediante il calcolo dei seguenti fattori: arretramento della linea di riva, runup su spiaggia ed erosione della spiaggia emersa. Per ognuno dei fattori sopraelencati è stato definito l'indice di sensitività (SI) tramite l'equazione:

$$SI = \frac{Valore_x}{Valore_{default}} \quad (5)$$

Dove $Valore_x$ è il valore dell'output della simulazione n-esima e $Valore_{default}$ rappresenta il corrispettivo valore di output della simulazione di riferimento.

A seguito dell'analisi sui parametri, il modello è stato calibrato, in riferimento alle coste basse e sabbiose della zona di studio. Utilizzando il criterio del Brier Skill Score (BSS), sono stati messi a confronto i profili misurati prima e dopo l'evento e il profilo simulato dal modello. Il BSS è comunemente utilizzato come indicatore statistico per la valutazione della performance dei modelli numerici, in particolar modo nel caso di variazioni morfologiche (Bugajny *et al.*, 2013) ed è stato calcolato come riportato in equazione:

$$BSS = 1 - \left(\frac{\langle |x_m - x_p|^2 \rangle}{\langle |x_p - x_b|^2 \rangle} \right) \quad (6)$$

Dove x_m rappresenta il profilo finale previsto dal modello, x_b il profilo iniziale osservato e x_p il profilo misurato

dopo l'evento. La classificazione della performance del modello tramite il BSS è definita come segue: $BSS < 0$ *bad*, $0 < BSS < 0.3$ *poor*, $0.3 < BSS < 0.6$ *reasonable/fair*, $0.6 < BSS < 0.8$ *good* and $0.8 < BSS < 1$ *excellent* (van Rijn et al., 2003). Ci si aspetta che il valore di tale indicatore, non raggiunga sempre il valore di "eccellenza". Ciò indica che i risultati del modello includono sia componenti casuali di errore che errori sistematici. Per analizzare tali errori, sono stati calcolati il Root Mean Square Error (RMSE) e il bias, che permettono un confronto tra il profilo finale misurato e il profilo finale simulato di modello. Tali parametri sono stati calcolati tramite le equazioni:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_1^n (x_m - x_p)^2}{n}} \quad bias = \frac{\sum_1^n (x_m - x_p)}{n} \quad (7) \text{ e } (8)$$

Dove n è il numero di punti del profilo sul quale viene eseguito il calcolo.

Il calcolo del BSS è stato riferito alla sola parte emersa della spiaggia a causa della presenza di elementi altamente dinamici nella parte sommersa, quali le barre di fondo. La crescita e la migrazione delle barre di fondo definiscono probabilmente uno dei punti più sensibili della modellazione numerica, in quanto la configurazione morfologica di un sistema può cambiare nettamente in relazione a tali processi (Walstra et al., 2011). XBeach, comprende i principali processi necessari a modellare il comportamento della barra, ad eccezione dell'effetto della miscelazione verticale da turbolenza, legata alla rottura dell'onda, sui trasporti longitudinale e trasversale (Trouw et al., 2012). La rappresentazione del complesso processo di migrazione delle barre risulta quindi ancora in sviluppo e miglioramento (Cohn et al., 2014).

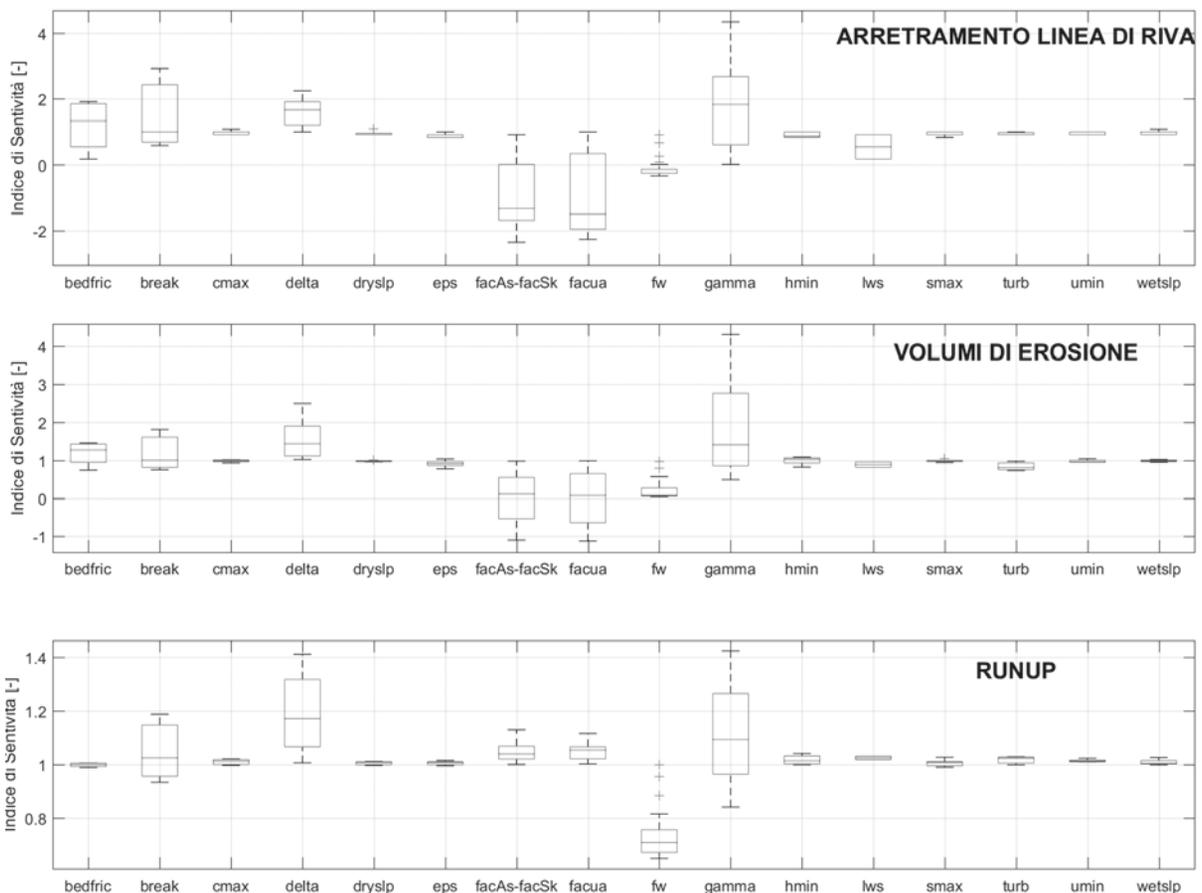


Figura 6. Indice di sensitività calcolato in riferimento ai diversi parametri del modello. I valori si riferiscono ai 10 profili di spiaggia.

L'inclusione delle barre di fondo nel calcolo influenzerebbe in maniera altamente negativa i valori indicativi delle prestazioni del modello, il calcolo è stato quindi eseguito sulla parte di spiaggia emersa, al di sopra della linea di riva. Tenendo conto di tale semplificazione, gli indicatori statistici calcolati non saranno rappresentativi dell'accuratezza previsionale del modello per la totalità del profilo di spiaggia, ma in particolare per la sola parte emersa.

Risultati

L'arretramento della linea di riva rappresenta un indicatore della variazione dell'estensione della spiaggia emersa a seguito dell'evento ondoso. Il confronto tra i risultati del modello e l'arretramento simulato in condizioni di default, attraverso l'indice di sensitività, mostra una differente risposta del modello ai diversi settaggi dei parametri di input. Il modello risulta essere maggiormente sensibile ai parametri *bedfric*, *facAs*, *facSk*, *facua*, *fw* e *gamma* (Fig. 6, in alto). La significativa influenza di tali parametri sulle previsioni del modello, viene riconfermata dall'analisi degli indici di sensitività relativi ai volumi erosi della spiaggia emersa, riportati nel grafico centrale di Figura 6. Nel grafico in basso di Figura 6, sono infine riportati i valori relativi al *runup*, il quale mostra forti variazioni per i parametri *delta*, *fw* e *gamma*.

Per i restanti parametri, l'analisi mostra che anche a seguito di sostanziali variazioni del proprio valore non producono forti cambiamenti nelle previsioni del modello confermando il corretto utilizzo dei valori di default. I risultati prodotti dal modello sono quindi influenzati dalla variazione di alcuni parametri che governano i processi fisici del modello, ma anche dalle differenti formulazioni scelte per il calcolo della dissipazione dell'energia ondosa legata al frangimento definito dal valore *break*. Il confronto tra i volumi erosi ottenuti dalla simulazione di "riferimento" e i volumi erosi misurati mostra una netta sovrastima del processo erosivo, nel caso in cui i valori dei parametri vengano mantenuti pari a quelli di default, come mostrato in Figura 7.

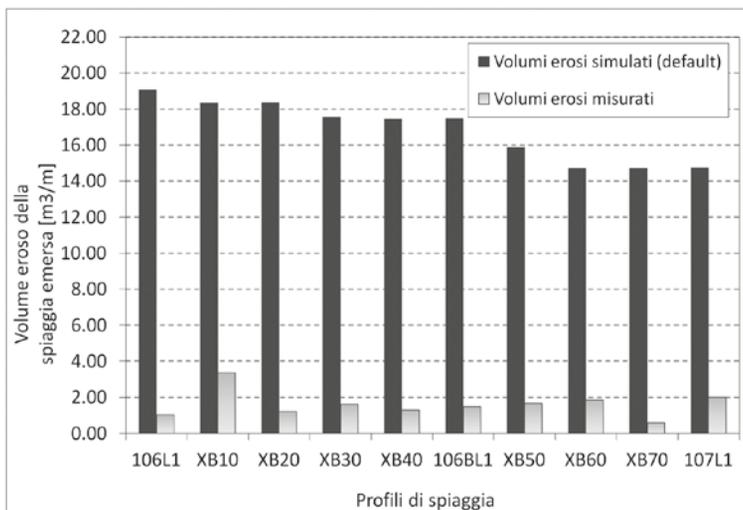


Figura 7. Volumi erosi della spiaggia emersa, misurati e simulati (simulazione di riferimento).

Se nella formulazione del modello viene considerata la forma dell'onda, mediante la variazione della sua asimmetria e distorsione, i processi erosivi previsti dal modello si avvicinano alla reale variazione morfologica avvenuta durante l'evento. L'utilizzo di un valore del parametro *facua* pari a 0,25, superiore al suo valore di default, permette al modello di prevedere con maggiore precisione i cambiamenti del profilo di spiaggia nella zona emersa. Tale risultato è bene visibile nel grafico in alto a sinistra di Figura 8 nel quale si denota una buona corrispondenza tra i volumi erosi simulati e misurati per il valore indicato.

Il grafico in alto a destra di Figura 8 mostra invece che l'inserimento della componente di dissipazione ondosa legata all'attrito al fondo (*fw*) nell'equazione dell'azione ondosa, che nella configurazione di default viene

trascurata, produce un miglioramento della previsione del modello, in particolare in corrispondenza del range di valori 0,2-0,3. Il grafico in basso di Figura 8, mostra inoltre le combinazioni di asimmetria (facAs) e distorsione (facSk) che producono la migliore previsione dei volumi erosi.

Il parametro facua, legato all'asimmetria e alla distorsione dell'onda, produce un miglioramento dell'effetto della non-linearità dell'onda, modificandone la forma ed influenzando in particolar modo i tassi di trasporto sedimentario. A differenza di facua, i parametri facAs e facSk permettono di variare i fattori di asimmetria e distorsione distintamente permettendo l'assegnazione di due diversi valori.

L'incremento dei valori di asimmetria e distorsione dell'onda, produce un aumento del trasporto diretto verso riva, visibile dai grafici di Figura 8, dove la differenza tra simulato e misurato mostra un andamento crescente.

Il parametro fw che rappresenta invece il fattore di attrito al fondo viene utilizzato nella formulazione per il calcolo della dissipazione dell'energia ondosa legata al fondale. Il valore di default imposto pari a 0, implica l'annullamento della componente di dissipazione ondosa legata all'attrito del fondale.

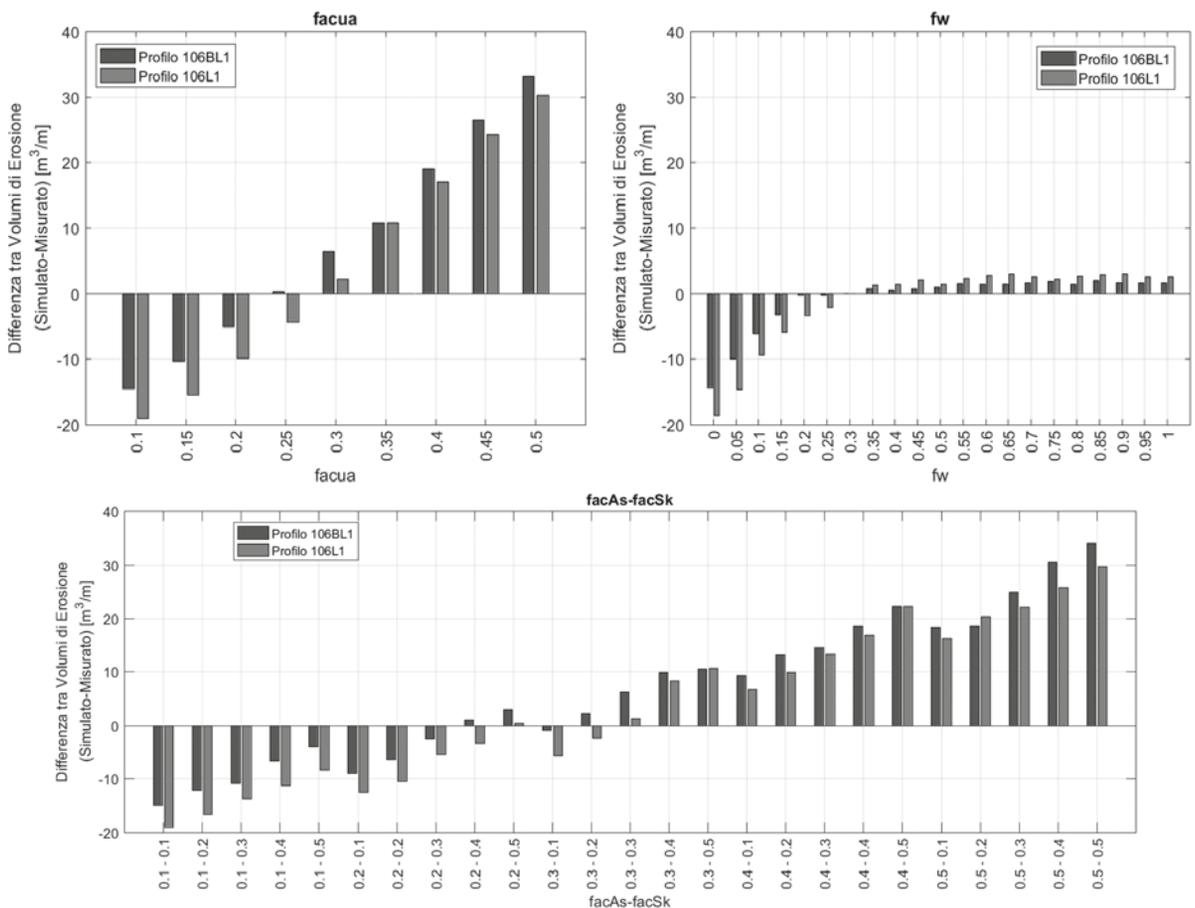


Figura 8. Differenza tra i volumi erosi simulati e misurati, in relazione ai parametri facua, fw e facAs- facSk.

Il calcolo dei BSS, che mette a confronto i risultati del modello con l'evoluzione morfologica misurata, conferma come la variazione dei parametri facua, facAs-facSk e fw, permetta di ottenere una migliore previsione del processo di erosione della spiaggia emersa rispetto all'utilizzo dei parametri di default. In Figura 9 vengono riportati i valori del BSS relativi al parametro facua, calcolati per i 10 profili di spiaggia. Come visibile dal grafico a destra, che riporta i soli valori di BSS compresi tra 0 e 1, il settaggio di facua al valore di 0,25 anziché 0,1 (default) produce un netto miglioramento dell'accuratezza della previsione del modello.

La variazione del fattore di attrito al fondo (f_w) mostra una buona corrispondenza tra il profilo misurato e simulato per il range di valori compresi tra 0,2 e 0,3, raggiungendo un valore pari a 0,8 dell'indicatore morfologico BSS. I valori negativi di tale indicatore, prodotti dalla variazione dei restanti parametri, implica che per tali casi la previsione del modello è peggiore rispetto alla previsione di variazione nulla del fondale. A supporto dell'analisi, il bias permette di fornire maggiori informazioni sull'affidabilità della previsione. L'andamento di tale parametro in relazione alla forma dell'onda, riportato in Figura 10, evidenzia una sovrastima della variazione morfologica legata ad un incremento del valore di f_{acua} , mostrando invece una buona corrispondenza per il valore già indicato dalle precedenti analisi. Lo stesso risultato si ottiene mediante il calcolo del Root Mean Square Error (Figura 10, sinistra).

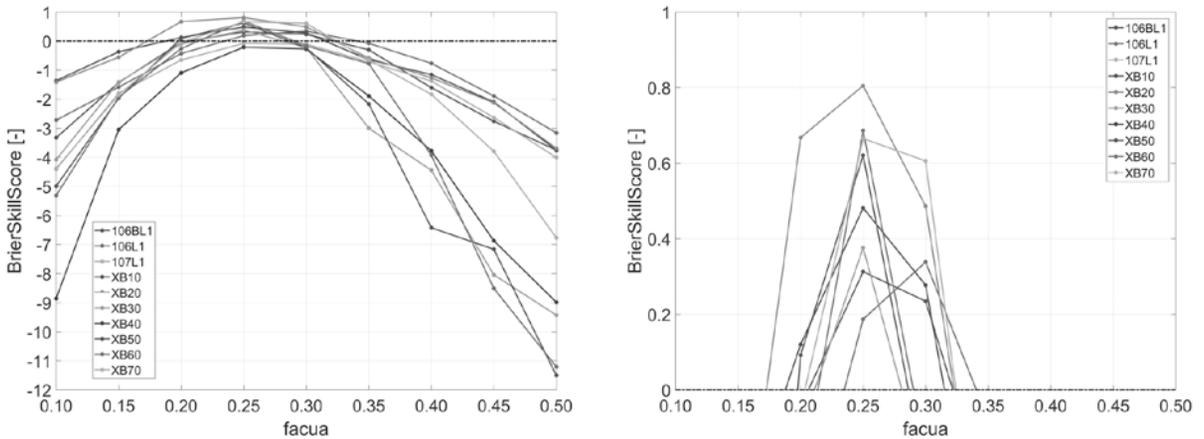


Figura 9. Valori del BSS calcolati per il parametro f_{acua} .

Una chiara visualizzazione dell'analisi presentata è mostrata in Figura 11 dove vengono mostrati i profili di spiaggia simulati e misurati in riferimento al profilo 106L1, preso come esempio.

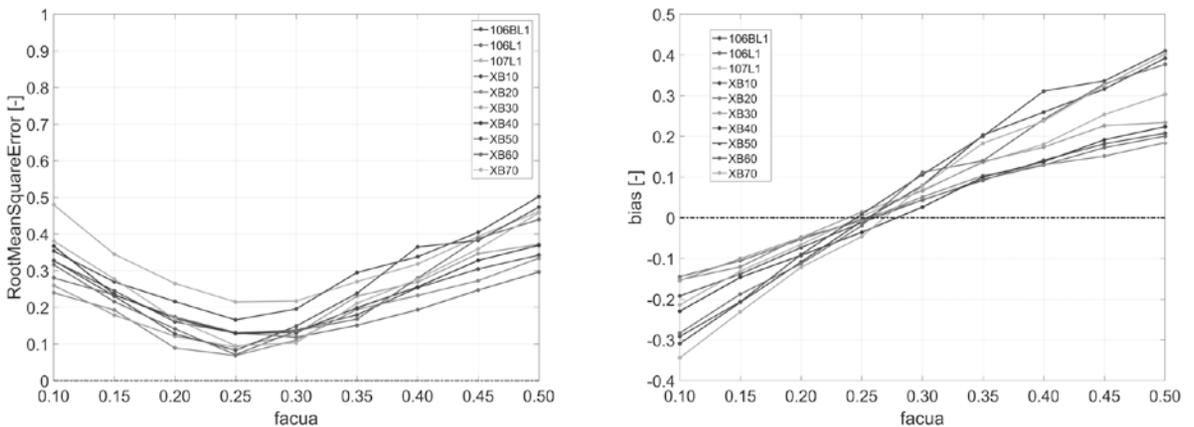


Figura 10. Valori degli indici RMSE e bias calcolati per il parametro f_{acua} .

La parametrizzazione di default produce un'erosione della spiaggia emersa nettamente superiore a quella misurata, provocando inoltre un accumulo di sedimento a ridosso della prima barra di fondo, non riscontrato durante l'evento. Qualora invece vengano imposti valori più elevati dei parametri legati alla forma dell'onda

e all'attrito del fondale, il modello è in grado di prevedere in maniera più accurata il processo erosivo della parte emersa. L'andamento dei profili simulati in corrispondenza delle barre mostra una minore affidabilità del modello nella previsione della loro movimentazione.

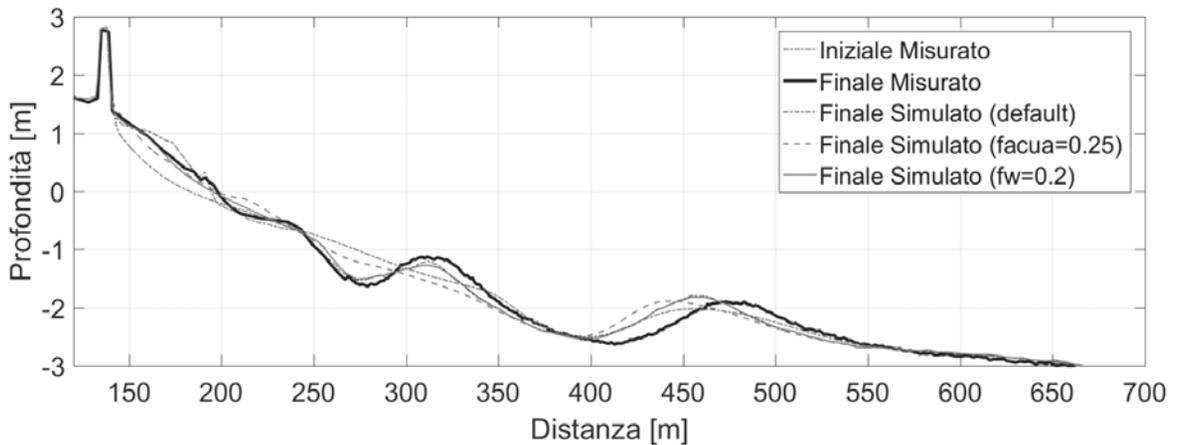


Figura 11. Andamenti del profilo 106L1 simulati con le diverse impostazioni del modello.

Conclusioni

Lo studio presenta un'applicazione del software di modellazione numerica XBeach, per la valutazione dell'erosione costiera di un tratto di litorale della regione Emilia-Romagna, nei pressi di Cesenatico.

Il comportamento della spiaggia soggetta ad un evento di mareggiata intenso, avvenuto durante l'inverno 2015, è stato modellato al fine di valutare l'utilizzo di XBeach come supporto all'analisi dei processi morfodinamici costieri. Nell'area di studio sono stati eseguiti dei rilievi topo-batimetrici e sedimentologici prima e dopo l'evento di mareggiata. Il modello, forzato con le condizioni ondose e di livello misurate durante l'evento, è stato sottoposto ad un'analisi di sensitività in relazione alla variazione dei parametri interni. Tale analisi, effettuata sui fenomeni di arretramento della linea di riva, runup ed erosione della spiaggia emersa, ha evidenziato la sensitività del modello ai parametri break, bedfric, facAs-facSk, facua, fw e gamma. La variazione di tali parametri produce una significativa modifica dei risultati del modello, indicando la necessità di una corretta calibrazione in riferimento all'area di studio. Il confronto tra i volumi di erosione misurati e quelli ottenuti dalla simulazione di riferimento ha inoltre evidenziato che l'utilizzo dei parametri di default produce una netta sovrastima del processo erosivo. L'analisi dei volumi erosi, evidenzia che la variazione dei parametri legati alla forma dell'onda (facua, facAs e facSk) e all'attrito del fondale (fw) influenza in modo rilevante la modellazione della morfologia, in particolare della spiaggia emersa. Per tali parametri, valori differenti da quelli di default producono una modifica del trasporto sedimentario e della dissipazione dell'energia ondosa, consentendo al modello di prevedere in maniera più accurata l'evoluzione morfologica del profilo di spiaggia. Mediante il calcolo dell'indicatore statistico Brier Skill Score, utilizzato in particolare per valutare le prestazioni dei modelli morfologici, il profilo simulato è stato confrontato con la topografia della spiaggia misurata dopo l'evento. Il modello è in grado di produrre risultati maggiormente accurati quando i valori di facua e fw vengono variati rispetto al valore di default. La calibrazione del modello ha permesso di definire i valori di tali parametri che, in riferimento all'area di studio caratterizzata da una spiaggia bassa e sabbiosa, producono un'accettabile rappresentazione dell'evoluzione morfologica. Per il parametro legato alla forma dell'onda tale valore è pari a 0,25 mentre per fw è compreso tra 0,2 e 0,3. L'analisi mostra che il modello XBeach è in grado di simulare i processi morfologici inerenti all'area costiera rivelandosi un utile strumento di previsione, a seguito di una corretta calibrazione dei parametri interni in relazione all'area di

studio. Il modello produce una previsione attendibile della variazione morfologica della spiaggia emersa, tuttavia, mostra un netto miglioramento quando i valori dei parametri legati alla forma dell'onda (facua) e all'attrito del fondale (fw) vengono variati. I risultati presentati nell'articolo si riferiscono ad un'analisi di modellazione numerica mono-dimensionale eseguita in particolare per la zona di spiaggia emersa, tralasciando i complessi processi di rappresentazione del moto delle barre di fondo. Future analisi del trasporto sedimentario e dell'erosione costiera attraverso il software XBeach, svolte in modalità bi-dimensionale, permetteranno di migliorare la conoscenza dei processi idro-morfo-dinamici della zona costiera.

Biografia

- Aguzzi M., Bonsignore F., De Nigris N., Morelli M., Paccagnella T., Romagnoli C., Unguendoli S., 2016. *Stato del litorale emiliano-romagnolo al 2012. Erosione e interventi di difesa*. I quaderni di Arpa. 227 pp.
- Armaroli C., Ciavola P., Perini L., Calabrese L., Lorito S., Valentini A., Masina M., 2012. *Critical storm thresholds for significant morphological changes and damage along the Emilia-Romagna coastline, Italy*. *Geomorphology*, 143-144: 34-51.
- Blott S.J., Pye K., 2001. *Gradistat: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments*. *Earth Surf. Process. Landforms*, 26: 1237-1248.
- Bugajny N., Furmańczyk K., Dudzińska Nowak J., Paplińska Swerpel B., 2013. *Modelling morphological changes of beach and dune induced by storm on the Southern Baltic coast using XBeach (case study: Dziwnow Spit)*. *Journal of Coastal Research*, 65 - International Coastal Symposium Volume 1: 672-677.
- Cohn N., Ruggiero P., Ortiz J., Walstra D.J., 2014. *Investigating the role of complex sandbar morphology on nearshore hydrodynamics*. In: Green, A.N. and Cooper, J.A.G. (eds.), *Proceedings 13th International Coastal Symposium (Durban, South Africa)*, *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 66.
- Giardino A., De Boer W., Den Heijer K., Huisman B., Mulder J., Walstra D.J., 2013. *Innovative approaches and Tools for Erosion Control and Coastline Management.*, *Proceedings of the MEDCOAST2013 Conference*, Marmaris, Turkey.
- Harley M., Armaroli C., Ciavola P., 2011. *Evaluation of XBeach predictions for a real-time warning system in Emilia-Romagna*. Northern Italy. *Journal of Coastal Research*, 64: 1861-1865.
- Martinelli L., Zanuttigh B., Corbau C., 2010. *Assessment of coastal flooding hazard along the Emilia Romagna littoral, IT*. *Coastal Engineering*, 57, 11-12: 1042-1058.
- Martinelli L., Zanuttigh, B., S. Bagli, 2013. *Modelling coastal risk at Cesenatico, Northern Adriatic Sea, Italy*. *Proc. Coastal Structures 2011, Japan*, 5-9 September 2011, vol. 1: 59-70.
- McCall R.T., Van Thiel de Vries J.S.M, Plant N.G., Van Dongeren A.R., Roelvink J.A., Thompson D.M., Reniers A.J.H.M., 2010. *Two-dimensional time dependent hurricane overwash and erosion modeling at Santa Rosa Island*. *Coastal Engineering*, 57: 668-683.
- Pender D., Karunarathna H., 2013. *A statistical-process based approach for modelling beach profile variability*, *Coastal Engineering*, 81:19-29
- Perini L., Calabrese L., Deserti M., Valentini A., Ciavola P., Armaroli C., 2011. *Le mareggiate e gli impatti sulla costa in Emilia-Romagna 1946-2010. Progetto Micore*. I quaderni di Arpa. 144 pp.
- Preti M., De Nigris N., Morelli M., Monti M., Bonsignore F., Aguzzi M., 2008. *Stato del litorale all'anno 2007 e piano decennale di gestione*. I quaderni di Arpa. 271 pp.
- Regione Emilia-Romagna: Servizio Geologico Sismico e dei Suoli, 2010, *Il Sistema Mare-Costa dell'Emilia-Romagna*, a cura di Perini L. & Calabrese L. 239 pp.
- Roelvink D., Ad Reniers A., Van Dongeren A., Van Thiel de Vries J., McCall R., Lescinski J., 2009. *Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands*. *Coastal Engineering*, 56: 1133-1152.
- Roelvink D., Ad Reniers A., Van Dongeren A., Van Thiel de Vries J, Lescinski J., McCall R.F., 2010. *XBeach model description and manual GenD*. Unesco-IHE Institute for Water Education, Deltares and Delft University of Technology. 108 pp.

- Signell R.P., Chiggiato J., Horstmann J., Doyle J.D., Pullen J., Askari F., 2010. *Highresolution mapping of Bora winds in the northern Adriatic Sea using Synthetic Aperture Radar*. Journal of Geophysical Research. 20 pp.
- Simmons J. A., Marshall L. A., Turner I. L., Splinter K. D., Cox R. J., Harley M. D., Hanslow D. J., Kinsela M.A., 2015. *A more rigorous approach to calibrating and assessing the uncertainty of coastal numerical models*. Australasian Coasts & Ports Conference 2015: 22nd Australasian Coastal and Ocean Engineering Conference and the 15th Australasian Port and Harbour Conference. Auckland, New Zealand: Engineers Australia and IPENZ: 821-827.
- Soulsby R. L., 1997, *Dynamics of Marine Sands*. London: Thomas Telford Publications. 249 pp.
- Sutherland J., Peet A.H., Soulsby R.L., 2004. *Evaluating the performance of morphological models*. Coastal Engineering, 51: 917-939.
- Trouw K., Zimmermann N., Mathys M., Delgado R., Roelvink D., 2012. *Numerical modelling of hydrodynamics and sediment transport in the surf zone: a sensitivity study with different types of numerical models*. In: International Conference on Coastal Engineering (ICCE 2012), Santander, Spain, July 1-6 2012: book of papers. pp. 1-12
- Van Rijn L. C., 1985, *Sediment transport, part III: bed forms and alluvial roughness*. Journal of Hydraulic Engineering, 110: 1733-1754.
- Van Rijn L.C., Walstra D.J.R., Grasmeyer B., Sutherland J., Pan S., Sierra J.P., 2003. *The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based Profile models*. Coastal Engineering, 47: 295-327.
- Zanuttigh B., Simcic D., Bagli S., Bozzeda F., Pietrantoni L., Zagonari F., 2014. *THESEUS decision support system for coastal risk management*. Coastal Engineering 2014.

Ricevuto il 01/08/2016; accettato 05/05/2017