



Autorità di Sistema Portuale
dei Mari Tirreno Meridionale
e Ionio

**REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO
DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL
RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE
CIG: 945919784C - CUP: F11J18000050005**

PROGETTO DEFINITIVO

GRUPPO DI PROGETTAZIONE INDICATO

Mandataria:



Mandanti:



Ing. Arturo VELTRI

Progettazione:

HYSOMAR - Ing. Alberto BORSANI (Coordinatore e responsabile delle Integrazioni Specialistiche)
HYSOMAR - (Progettazione generale e marittima)
HYPRO - (Progettazione strutturale, impiantistica, paesaggistica ed ambientale)
Ing. Arturo VELTRI - (Modelli specialistici)

Geologia:

HYPRO - Dott. Giuseppe CERCHIARO

Coordinatore della Sicurezza in fase di Progettazione:

HYSOMAR - Ing. Antonella PASTORE (Coordinamento sicurezza in fase di progettazione)

Gruppo di lavoro:

Ing. Gianluigi FILIPPO (HYSOMAR)
Geom. Alfredo VOMMARO (HYSOMAR)
Ing. Maurizio CARUSO (HYPRO)
Ing. Raffaele CIARDULLO (HYPRO)
Ing. Vincenzo SECRETI (HYPRO)



Appaltatore:

FRANCO GIUSEPPE s.r.l



Elaborato:

STUDIO MORFODINAMICO

CODIFICA

Al 12 - 2022

CODICE DOCUMENTO

1 0,2 S,P R,H 0,4

REV.

0

SCALA

ELABORATO

02.SP.R04

Rev.	Data	Descrizione	Redatto	Controllato	Approvato
0	Giugno 2023	1° EMISSIONE	A. VELTRI	A. PASTORE	A. BORSANI

Visto:

Il Responsabile Unico del Procedimento

Ing. Maria Carmela DE MARIA

SOMMARIO

PREMESSA	2
1. DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO GENCADE	4
2. CARATTERISTICHE DEL MODELLO	13
3. CLIMA ONDOSI DI INPUT	16
4. CALIBRAZIONE DEL MODELLO	26
5. SIMULAZIONI DELL'EVOLUZIONE FUTURA DELLA LINEA DI RIVA	31
5.1 SCENARIO: EVOLUZIONE CONSIDERANDO LO STATO ANTE OPERAM..	32
5.2 SCENARIO: EVOLUZIONE CONSIDERANDO LO STATO POST OPERAM (PROLUNGAMENTO DELLA DIGA FORANEA)	36
CONCLUSIONI	40

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE
PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R04 – STUDIO MORFODINAMICO

PREMESSA

La presente relazione mostra l'evoluzione della linea di battigia considerando il prolungamento della diga foranea.

L'opera si rende necessaria per la protezione del bacino “vecchio” del porto di Crotona; essa non prevede nuove banchine a tergo del molo ed ha il solo scopo di garantire una maggiore sicurezza alle attività che già ora si svolgono nello specchio acqueo.

L'intervento proposto non varia sostanzialmente le modalità di esercizio attuali e/o future già assentite per il porto vecchio di Crotona e non comporta significativi aumenti e/o modifiche del traffico dei natanti e dei mezzi a terra rispetto a quello attuale.

La figura sottostante mostra il tratto di spiaggia, lungo 8 km, oggetto di studio.



Figura 1: Area di studio

Come si evince dalla figura 1 il litorale risulta, nelle aree limitrofe al porto, già stabilizzato mediante opere di difesa costiera.

ASPETTI GENERALI DEL TRASPORTO SOLIDO LITORANEO

L'aspetto preminente nella dinamica di un litorale è l'insieme dei fenomeni che determinano il movimento dei sedimenti nella parte attiva della spiaggia. Tali movimenti sono imputabili all'azione del vento e delle maree nella spiaggia emersa; la dinamica della spiaggia sommersa è legata, invece, all'azione del moto ondoso (prima e dopo il frangimento) e delle correnti generate dalla trasformazione del processo di moto da oscillatorio a traslatorio.

Il moto ondoso determina l'inizio del movimento e la messa in sospensione delle particelle di sabbia, mentre le correnti ne costituiscono il veicolo di trasporto. Queste ultime sono principalmente quelle associate alle onde frangenti, mentre quelle di circolazione generale, di vento e di marea o di densità, hanno scarsa importanza nei riguardi del trasporto solido litoraneo, come visto precedentemente.

Il trasporto dei sedimenti avviene per movimento sia di fondo sia in sospensione e ha componenti trasversali e longitudinali alla linea di riva; si parla così, rispettivamente, di trasporto cross-shore e trasporto long-shore. Queste due componenti, pur influenzandosi a vicenda, non possono essere studiate contemporaneamente perché si è in grado di caratterizzare il flusso d'energia, al quale sono legate, esclusivamente in maniera ortogonale al fronte d'onda.

Il trasporto long-shore è quello che si verifica in direzione parallela alla linea di riva. Il meccanismo delle correnti long-shore è influenzato direttamente dalla batimetria della spiaggia. Esse sono generate dalle componenti del moto ondoso che raggiungono obliquamente la costa e il valore della velocità con cui scorrono parallelamente alla linea di riva dipende principalmente dall'angolo che il fronte d'onda (al frangimento) forma con la linea di riva. L'entità del flusso della corrente così come l'entità del trasporto long-shore dipende, poi, dall'altezza del frangente. Le alterazioni che la linea di riva subisce a causa di questo tipo di trasporto sono visibili esclusivamente nel lungo periodo.

Il trasporto cross-shore interferisce, invece, più rapidamente con i cambiamenti della linea di riva e del profilo di spiaggia. I movimenti trasversali della linea di riva sono all'origine delle caratteristiche tipiche delle spiagge nelle diverse stagioni.

La morfologia della costa è comunque sempre il risultato di due azioni concomitanti: l'apporto di sedimenti dall'entroterra e la loro redistribuzione a opera del moto ondoso.

I modelli matematici costituiscono un valido strumento per l'analisi e la previsione dell'evoluzione della morfologia costiera, a condizione che si abbiano sufficienti e attendibili dati su campo che servano per la taratura. Il principale vantaggio consiste nella possibilità di studiare in tempi ragionevolmente brevi diverse soluzioni progettuali. Il modello matematico utilizzato per questo studio è il GenCade, prodotto dall'US Corps of Engineers (U.S.A). Il software è reperibile sul sito <https://cirp.usace.army.mil/products/gencade.php>, assieme a un'ampia documentazione, che si può trovare anche online al sito

<https://cirpwiki.info/wiki/GenCade>

1. DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO GENCADE

Il GenCade rappresenta un sistema di modellazione numerica sviluppato per simulare i cambiamenti a lungo termine della spiaggia e consente la simulazione dell'evoluzione della linea di riva e quindi della fascia costiera direttamente modellata dall'azione del moto ondoso.

L'area che può essere convenientemente modellata può variare da meno di un km a una decina di km, mentre gli intervalli di calcolo delle variazioni della posizione della linea di riva possono variare da qualche giorno alle decine di anni. Nell'applicazione del modello GenCade, il tratto modellato viene riportato in un sistema di riferimento cartesiano, ruotato di 66° in senso antiorario rispetto alla configurazione originale e suddiviso in una serie di celle tramite una griglia di calcolo di maglia pari a 10 m.

La figura 2 mostra la griglia di calcolo utilizzata per l'intero dominio, mentre la figura 3 mostra uno zoom sul porto vecchio e la zona sud del dominio.

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R04 – STUDIO MORFODINAMICO



Figura 2: Griglia di calcolo del modello Gencade

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R04 – STUDIO MORFODINAMICO

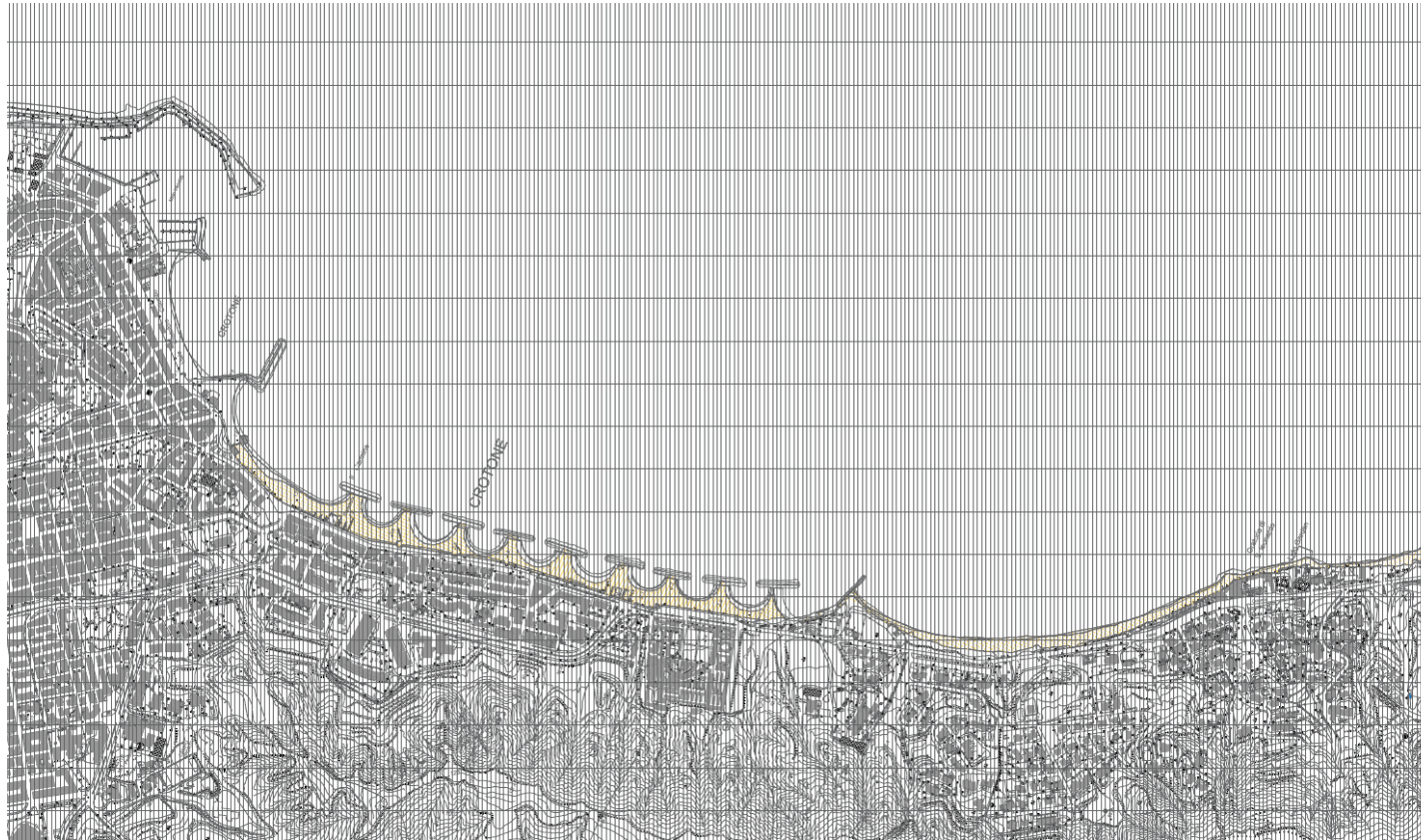


Figura 3: Griglia di calcolo nei pressi del porto vecchio e del tratto sud

I periodi delle simulazioni che riguardano il presente studio sono pari a 15 anni per la taratura del modello, dal 2008 al 2023, e di 10 anni per l'evoluzione del litorale considerando la miglioria progettuale proposta, ovvero dal 2024 al 2033, con dati d'onda, ovvero stati di mare medio annui sotto costa, alla batimetrica -10 m a intervalli temporali di 3 ore.

Il modulo di calcolo che determina lo spostamento della linea di riva in funzione del trasporto solido e la sua variazione nello spazio è basato sulla teoria dei modelli a una linea: tale teoria assume che la forma del profilo di spiaggia in direzione perpendicolare alla linea di riva si mantenga costante nel tempo, traslando semplicemente verso il largo o verso terra. Di seguito viene mostrata in Figura 4 una vista tridimensionale del volume di controllo considerato dal modello GenCade per svolgere tale analisi e nella Figura 5 quella planimetrica dall'alto; vengono indicati con D_b i massimi livelli idrici sulla spiaggia emersa, con D_c la profondità di chiusura e con D_y l'avanzamento, o arretramento, della linea di riva. Tale schematizzazione del volume di controllo si adotta per tutta la lunghezza del litorale di studio, discretizzato in celle di dimensione D_x .

In questo modo, l'evoluzione del profilo completo della spiaggia per unità di lunghezza può essere descritta attraverso la traslazione orizzontale di un unico punto appartenente al profilo stesso. Con questa ipotesi, l'evoluzione del litorale può essere descritta attraverso un'unica linea, ossia la linea di riva.

Una seconda ipotesi geometrica assunta dal modello è che il trasporto solido indotto dal moto ondoso avvenga tra due quote fissate all'interno del profilo trasversale, ovvero la componente longitudinale del trasporto solido litoraneo rimane confinata entro una fascia costiera ("fascia attiva") ed è predominante a lungo termine rispetto alla componente trasversale.

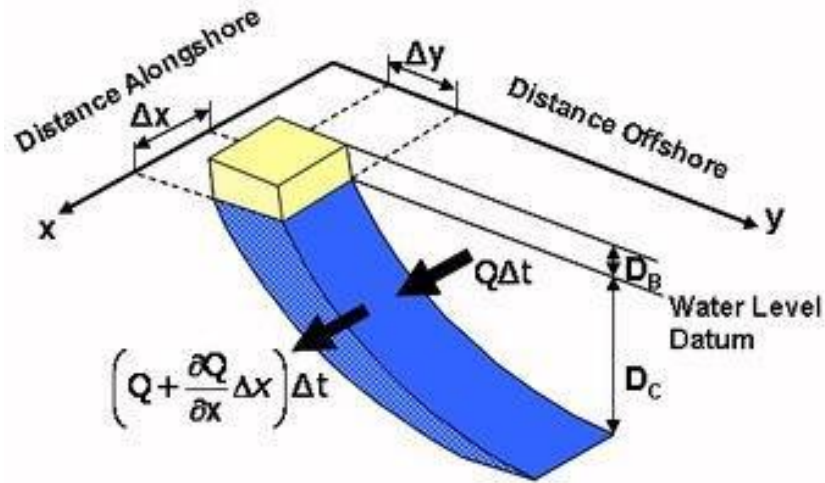


Figura 4: Vista tridimensionale del volume di controllo secondo GenCade

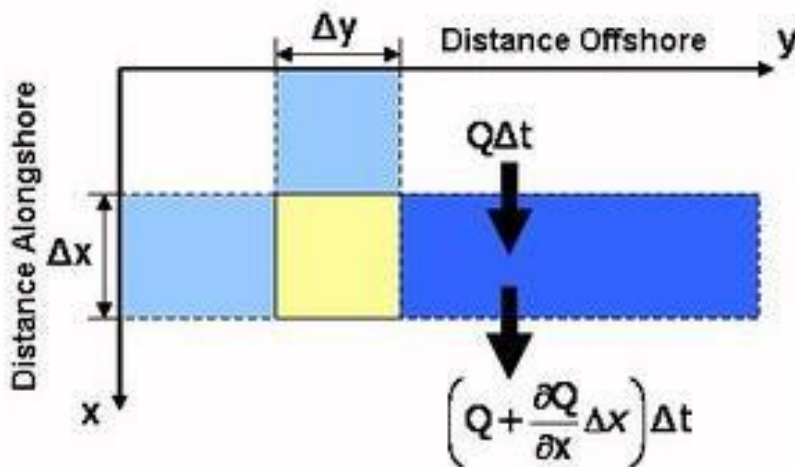


Figura 5: Vista planimetrica del volume di controllo secondo GenCade

L'equazione di continuità dei sedimenti in una generica sezione, con riferimento ai simboli della Figura 6, può essere scritta nella forma seguente

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{1}{(D_b + D_c)} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - q \right) = 0$$

dove Q rappresenta il trasporto solido longitudinale e q la quantità di materiale eventualmente apportato (ripascimenti) o asportato (dragaggi) dalla generica sezione.

Il trasporto solido longitudinale viene determinato in funzione delle caratteristiche dell'onda al frangimento, della granulometria dei sedimenti e dell'eventuale presenza di opere. È per questo motivo che il modello può essere applicato ad aree costiere per le quali il trasporto solido litoraneo è indotto essenzialmente dall'azione delle correnti connesse alle onde di superficie, mentre può ritenersi trascurabile l'effetto delle correnti di marea o di correnti collegate all'azione diretta del vento.

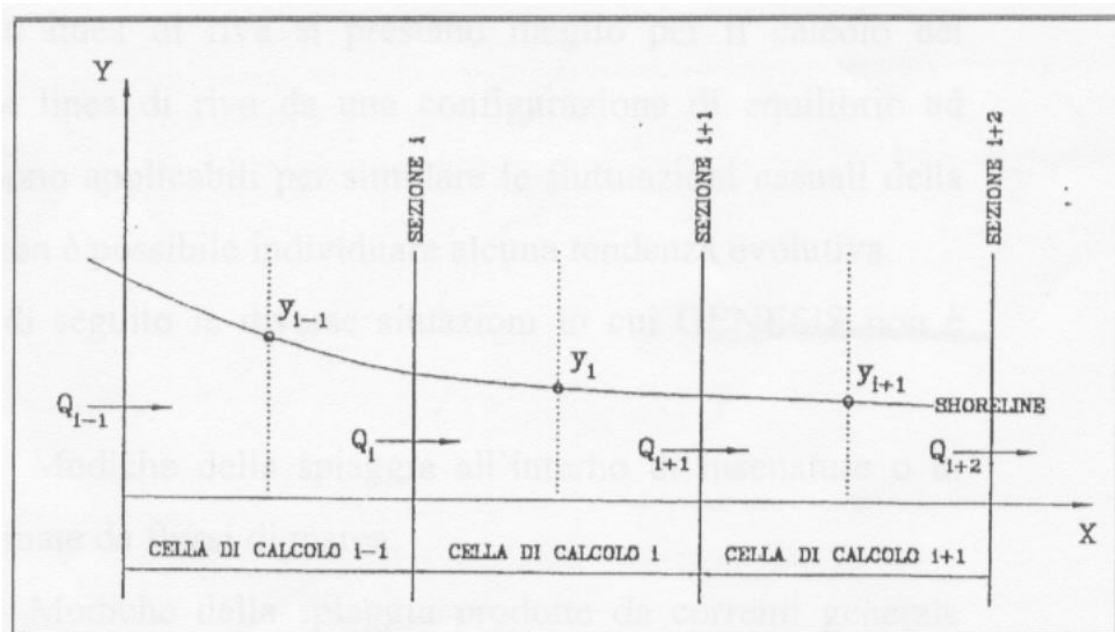


Figura 6: Discretizzazione della linea di riva e definizione delle celle di calcolo nel modello GenCade

La formula empirica per il calcolo del trasporto longitudinale nel GenCade è la seguente:

$$Q = \left(H_b^2 c_{gb} \right) \left[a_1 \sin(2\theta_{bs}) - a_2 \cos(\theta_{bs}) \frac{\partial H_b}{\partial x} \right]$$

dove il pedice b è riferito alla condizione di frangimento, H_b è l'altezza significativa dell'onda incidente, θ_{bs} è l'angolo di incidenza rispetto alla normale al litorale nella sezione e c_{gb} la celerità di gruppo. I coefficienti a_1 e a_2 sono funzioni dei due coefficienti K_1 e K_2 , che sono i coefficienti di calibrazione del modello e si determinano attraverso un procedimento di taratura dipendente dal particolare sito in esame.

Il primo termine, in parentesi tonda, della formula per il calcolo del trasporto longitudinale corrisponde alla nota formula CERC e tiene conto del trasporto di sabbia lungo riva indotto dalle onde frangenti incidenti obliquamente. Il secondo termine, in parentesi quadra, dell'equazione descrive, invece, l'effetto del gradiente lungo riva dell'altezza dell'onda al frangimento $\partial H_b / \partial x$. Il contributo del gradiente lungo riva dell'altezza dell'onda è solitamente trascurabile rispetto al contributo dovuto all'incidenza delle onde oblique in una situazione di costa aperta. Tuttavia, nella vicinanza di strutture, dove la diffrazione produce una sostanziale modifica nell'altezza d'onda al frangimento, l'aggiunta del secondo termine fornisce risultati migliori nella modellazione.

I coefficienti a_1 e a_2 hanno le seguenti espressioni:

$$a_1 = \frac{K_1}{16(s-1)(1-n)(1.416)^{2.5}}$$

$$a_2 = \frac{K_2}{2(s-1)(1-n)(\tan \beta)(1.416)^{3.5}}$$

Dove con s si indica il rapporto tra il peso specifico del costituente solido del sedimento caratteristico della spiaggia e il peso specifico dell’acqua marina, con n la porosità del sedimento in sito e con β la pendenza media del profilo di spiaggia dalla linea di riva alla profondità di chiusura.

L’angolo β viene calcolato per ciascuna mareggiata simulata nel modello ed è ottenuto dalla seguente relazione di Dean:

$$\tan \beta = \left(\frac{A^3}{D_{LT0}} \right)$$

dove A è il parametro semi empirico di Dean, e D_{LT0} è la massima profondità interessata dal trasporto solido longitudinale calcolata come:

$$D_{LT0} = (2,3 - 10,9H_s) \frac{H_s}{L_0}$$

In cui L_0 rappresenta la lunghezza d’onda e H_s l’altezza d’onda significativa in acque profonde.

La massima profondità del trasporto lungo riva D_{LT0} viene calcolata dal GenCade per ciascun passo temporale ed è assunta valida per l’intera estensione lungo riva del tratto modellato.

GenCade è anche dotato di un modello interno di trasformazione in grado di produrre dalle onde al largo la serie di onde frangenti lungo riva da utilizzare nella valutazione del tasso del trasporto di sabbia. Tale modello è applicabile nel caso di un fondo marino costituito da

contorni approssimativamente rettilinei e paralleli. Se nel tratto modellato sono localizzate strutture che producono fenomeni di diffrazione, la strategia di risoluzione del modello è di ottenere una prima approssimazione senza tenere conto della diffrazione e poi modificare il risultato considerando i risultati subiti dal campo d'onda per ciascuna sorgente di diffrazione.

Le incognite, omettendo la diffrazione, rimangono tre: l'altezza, la direzione e la profondità dell'onda al frangimento. Le equazioni utilizzate dal modello per la risoluzione del problema sono tre.

L'equazione per il calcolo dell'onda frangente che tiene conto dello shoaling e della diffrazione è:

$$H_b = K_r \cdot K_s \cdot H_{rif}$$

in cui H_b è l'altezza d'onda in punto arbitrario, K_r è il coefficiente di rifrazione, K_s è il coefficiente di shoaling e H_{rif} è l'altezza al largo. I coefficienti sono dati dalla teoria lineare.

L'equazione per il frangimento dell'onda a profondità limitata è data da:

$$H_b = \gamma \cdot D$$

in cui D_b è la profondità al frangimento e γ è una funzione della ripidità dell'onda in acque profonde e della pendenza media della spiaggia.

La terza equazione utilizzata dal modello è la legge di Snell, che specifica l'angolo di incidenza dell'onda ovvero:

$$(\sin \alpha_b) / L_b = (\sin \alpha) / L$$

in cui α_b e L_b sono l'angolo e la lunghezza d'onda al frangimento e α e L sono le corrispondenti grandezze al largo.

Se non ci sono strutture che producono diffrazione, le caratteristiche delle onde non diffratte sono usate come input nelle equazioni del trasporto dei sedimenti. Se, invece, ci sono ostacoli, le altezze e gli angoli delle onde al frangimento sono calcolati nuovamente tenendo conto della diffrazione causata dalle strutture presenti.

2. CARATTERISTICHE DEL MODELLO

I programmi di evoluzione morfologica a “una linea”, come il GenCade, per interpretare correttamente i fenomeni di trasporto solido richiedono l’assegnazione di alcuni parametri rappresentativi del sito oggetto di studio. In particolare, le equazioni di corrispondenza fra flusso di energia “long shore” e corrispondente trasporto solido necessitano della definizione di due costanti, precedentemente denominate, K_1 e K_2 , che racchiudono tutte le incertezze teoriche dovute alle approssimazioni introdotte nella schematizzazione della realtà con il modello matematico.

Infatti, i dati di letteratura consigliati dagli Autori sono da considerarsi poco attendibili per la realtà delle coste italiane, visto che la tipologia di costa, di mare, di onde e di fondali è estremamente diversa da quella americana, in cui è stato testato il modello.

La taratura è, quindi, un’operazione estremamente delicata e importante e necessita di attenzione nell’esecuzione e nella successiva interpretazione.

La bontà di una simulazione evolutiva della costa dipende essenzialmente dalla bontà della taratura, che non vuol dire necessariamente che la linea di riva calcolata dal programma debba ricalcare perfettamente la linea di riva rilevata (un caso del genere sarebbe più unico che raro), ma che complessivamente riesca a riprodurre qualitativamente le tendenze di evoluzione della battigia.

È da precisare, infatti, che l’utilizzo dei modelli matematici è di supporto alla progettazione e mai può essere di essa sostitutivo: i risultati vanno sempre e comunque interpretati sulla base dell’analisi dello stato di fatto e, ancora meglio, dell’evoluzione storica, ponderando adeguatamente gli accadimenti passati e i dati di ingresso, sovente affetti da errori. Infatti, gli errori nella modellazione matematica non sono soltanto dovuti a un difetto di

interpretazione della realtà da parte delle equazioni matematiche, ma dipendono anche dalla qualità dei dati a disposizione, in particolare dell'andamento della linea di riva e dei valori sotto costa di altezza, periodo e direzione d'onda.

Per quanto riguarda i rilievi della linea di riva, c'è da considerare la fonte del dato, se cartografica (e in questo caso va valutata la scala del disegno), oppure da rilievo su campo.

Nel caso della cartografia, bisogna verificare innanzitutto la scala della carta, perché se si considerano scale troppo piccole (1:25000 o 1:50000) c'è il rischio che l'errore grafico (1 mm sulla carta corrisponde a 25 o 50 m nella realtà) renda improponibile il confronto storico, soprattutto se le variazioni non sono eccessive. Nel caso in cui la cartografia sia di scala sufficientemente grande (1:5000 e meglio 1:2000), bisogna verificare precisamente se sia stata adeguatamente georeferenziata, ricercando singolarità che siano immutate nel corso degli anni (case, chiese, o meglio caposaldi I.G.M.I.) e verificandone le mutue distanze.

Nel caso di rilievi piano altimetrici, bisogna verificare sicuramente la posizione dei punti singolari a terra e poi il metodo di calcolo della linea di riva. La linea di riva, infatti, non è la linea di confine fra mare e terra nel momento in cui viene fatto il rilievo, bensì l'intersezione fra la terra e il piano geometrico passante per i punti che si trovano in corrispondenza dello zero geodetico, definito, per l'Italia, dal mareografo di Genova.

I rilievi della spiaggia sommersa sono importanti quanto quelli della linea di riva. Infatti, se si disponesse di una serie storica sarebbe possibile quantificare esattamente l'entità del trasporto solido e definire precisamente la profondità di chiusura della fascia attiva.

In mancanza di questi, si fa riferimento alle relazioni semi-empiriche di letteratura come quella di Dean, noto il solo diametro mediano del terreno costituente la spiaggia, e di Hellermeier per la definizione della profondità di chiusura.

I rilievi batimetrici al largo sono sicuramente le informazioni più difficili da reperire. Queste si possono ricavare essenzialmente dalle carte nautiche, che hanno un tempo di aggiornamento molto lungo. Per fortuna, gli errori introdotti dalle imperfezioni di queste

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE
PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R04 – STUDIO MORFODINAMICO

informazioni sono sicuramente poco significativi rispetto agli altri e quindi, a meno di errori macroscopici o di eventi particolari che hanno sconvolto gli abissi, le carte nautiche fornite dall'Ufficio Idrografico e Mareografico dello Stato forniscono sufficienti approssimazioni.

Un set di dati molto difficile da ottenere con l'approssimazione necessaria è quello che si riferisce alla serie storica delle altezze, dei periodi e delle direzioni di provenienza delle onde. La difficoltà risiede sia nel ricercare i dati d'onda a largo, ossia onde che non hanno subito trasformazioni per effetto dell'interazione col fondale, sia nel propagare queste correttamente fino al frangimento, in quello spazio in cui subiscono modificazioni di altezza e direzione, per effetto dei fenomeni di shoaling e rifrazione. Un altro errore difficile da quantificare e quindi da correggere si riscontra quando si è in presenza di “anomalie batimetriche”.

Una terza fonte di errore sulle onde, da considerare per gli effetti di trasporto solido, risiede nella propagazione delle onde da largo a sotto costa. La teoria che comunemente si adotta negli studi di idraulica marittima, nota come “teoria lineare”, presuppone delle ipotesi di base difficilmente coincidenti con la realtà:

1. onda monocromatica;
2. costanza del periodo dell'onda nella sua propagazione;
3. fondale fisso;
4. attrito sul fondo nullo.

In realtà le onde si propagano in modo diverso, risentono dell'attrito del fondo e subiscono modificazioni per effetto del vento e del frangimento delle piccole onde per raggiunti limiti di ripidità, producendo alterazioni spettrali che vanno a modificare le altezze, i periodi e le direzioni in modo diverso da come previsto dalla teoria lineare.

Il GenCade richiede, come file di input delle onde, che venga definito un clima ondoso che rappresenti un anno “medio”. Per anno medio si intende un anno che contenga una sequenza di eventi ondosi che restituiscano valori di energia scaricata sul litorale mediata negli anni di cui si posseggano dati di onde.

Consapevoli di queste imprecisioni che nascono dalla impossibilità di interpretare adeguatamente i fenomeni naturali, si è proceduto alla taratura del modello, verificando che, almeno qualitativamente, i risultati restituiti possano considerarsi soddisfacenti e congruenti con i risultati dell'analisi storica.

3. CLIMA ONDOSO DI INPUT

Le forzanti ondometriche da inserire in input nel modello GenCade sono state ricavate a partire dai risultati contenuti nella Relazione del clima meteomarinario.

L'evoluzione del litorale è stata riprodotta a partire dal regime del moto ondoso al largo del sito in esame rappresentativo delle condizioni medio climatiche. In seguito, il clima ondoso è stato propagato sotto costa in corrispondenza di un punto che si trova alla profondità di circa 10 m (Figura 7), mediante l'applicazione del modello di rifrazione diretta spettrale SWAN.

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE
PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R04 – STUDIO MORFODINAMICO



Figura 7: Evidenziazione della batimetrica -10 e dei punti utilizzati per la definizione del clima meteomarinò sotto costa

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE
PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R04 – STUDIO MORFODINAMICO

La seguente tabella mostra le forzanti meteomarine ricavate nel punto sottocosta.

CLIMA ONDOSI MEDIO AL LARGO				CLIMA ONDOSI MEDIO SOTTOCOSTA					
DIR (°N)	Hs (m)	Tm (s)	Tp (s)	$\Delta\alpha$ (°)	DIR (°N)	Hs (m)	Tm (s)	Tp (s)	ΔHs (%)
5	0.5	3.64	4.50	3.42	8.42	0.46	3.11	4.50	7%
5	1	4.66	5.85	8.56	13.56	0.84	4.00	5.85	16%
5	1.5	5.38	6.83	12.90	17.90	1.19	4.65	6.83	21%
5	2	5.96	7.62	16.64	21.64	1.56	5.24	7.62	22%
5	2.5	6.45	8.29	19.95	24.95	1.95	5.81	8.29	22%
5	3	6.88	8.89	22.48	27.48	2.31	6.30	8.89	23%
5	3.5	7.27	9.43	25.03	30.03	2.77	6.87	9.43	21%
5	4	7.62	9.92	26.82	31.82	3.18	7.31	9.92	20%
15	0.5	3.64	4.50	2.13	17.13	0.48	3.14	4.50	5%
15	1	4.66	5.85	6.38	21.38	0.88	4.06	5.85	12%
15	1.5	5.38	6.83	10.17	25.17	1.24	4.71	6.83	17%
15	2	5.96	7.62	13.39	28.39	1.63	5.30	7.62	19%
15	2.5	6.45	8.29	16.19	31.19	2.04	5.87	8.29	19%
15	3	6.88	8.89	18.31	33.31	2.42	6.33	8.89	19%
15	3.5	7.27	9.43	20.48	35.48	2.90	6.89	9.43	17%
15	4	7.62	9.92	21.99	36.99	3.33	7.31	9.92	17%
15	4.5	7.95	10.37	23.49	38.49	3.79	7.78	10.37	16%
25	0.5	3.64	4.50	1.40	26.40	0.48	3.16	4.50	4%
25	1	4.66	5.85	4.74	29.74	0.91	4.12	5.85	9%
25	1.5	5.38	6.83	7.81	32.81	1.31	4.82	6.83	13%
25	2	5.96	7.62	10.42	35.42	1.73	5.44	7.62	13%

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE
PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R04 – STUDIO MORFODINAMICO

25	2.5	6.45	8.29	12.70	37.70	2.18	6.02	8.29	13%
25	3	6.88	8.89	14.39	39.39	2.59	6.48	8.89	14%
25	3.5	7.27	9.43	16.11	41.11	3.10	7.02	9.43	11%
35	0.5	3.64	4.50	0.93	35.93	0.49	3.18	4.50	3%
35	1	4.66	5.85	3.32	38.32	0.93	4.18	5.85	7%
35	1.5	5.38	6.83	5.62	40.62	1.36	4.91	6.83	9%
35	2	5.96	7.62	7.59	42.59	1.82	5.56	7.62	9%
35	2.5	6.45	8.29	9.35	44.35	2.30	6.14	8.29	8%
35	3	6.88	8.89	10.62	45.62	2.74	6.60	8.89	9%
35	3.5	7.27	9.43	11.91	46.91	3.27	7.13	9.43	7%
35	4.5	7.95	10.37	13.76	48.76	4.18	7.97	10.37	7%
45	0.5	3.64	4.50	0.57	45.57	0.49	3.18	4.50	2%
45	1	4.66	5.85	2.12	47.12	0.94	4.21	5.85	6%
45	1.5	5.38	6.83	3.68	48.68	1.39	4.97	6.83	7%
45	2	5.96	7.62	5.04	50.04	1.87	5.62	7.62	6%
45	2.5	6.45	8.29	6.25	51.25	2.38	6.22	8.29	5%
45	3	6.88	8.89	7.15	52.15	2.83	6.67	8.89	6%
45	4	7.62	9.92	8.74	53.74	3.83	7.58	9.92	4%
55	0.5	3.64	4.50	0.27	55.27	0.49	3.18	4.50	2%
55	1	4.66	5.85	1.07	56.07	0.95	4.22	5.85	5%
55	1.5	5.38	6.83	1.95	56.95	1.41	4.99	6.83	6%
55	2	5.96	7.62	2.76	57.76	1.90	5.65	7.62	5%
55	2.5	6.45	8.29	3.50	58.50	2.41	6.25	8.29	4%
55	3	6.88	8.89	4.08	59.08	2.87	6.70	8.89	4%
55	3.5	7.27	9.43	4.69	59.69	3.42	7.22	9.43	2%

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE
PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R04 – STUDIO MORFODINAMICO

55	4.5	7.95	10.37	5.59	60.59	4.32	8.05	10.37	4%
65	0.5	3.64	4.50	-0.01	64.99	0.49	3.18	4.50	2%
65	1	4.66	5.85	0.06	65.06	0.95	4.21	5.85	5%
65	1.5	5.38	6.83	0.26	65.26	1.41	4.99	6.83	6%
65	2	5.96	7.62	0.52	65.52	1.89	5.65	7.62	5%
65	2.5	6.45	8.29	0.81	65.81	2.41	6.25	8.29	4%
65	3	6.88	8.89	1.05	66.05	2.86	6.71	8.89	5%
65	3.5	7.27	9.43	1.32	66.32	3.42	7.22	9.43	2%
75	0.5	3.64	4.50	-0.29	74.71	0.49	3.18	4.50	3%
75	1	4.66	5.85	-0.94	74.06	0.94	4.20	5.85	6%
75	1.5	5.38	6.83	-1.42	73.58	1.39	4.96	6.83	7%
75	2	5.96	7.62	-1.74	73.26	1.87	5.62	7.62	7%
75	2.5	6.45	8.29	-1.97	73.03	2.37	6.21	8.29	5%
75	3	6.88	8.89	-2.10	72.90	2.81	6.66	8.89	6%
75	3.5	7.27	9.43	-2.22	72.78	3.36	7.18	9.43	4%
75	4.5	7.95	10.37	-2.33	72.67	4.26	8.01	10.37	5%
85	0.5	3.64	4.50	-0.56	84.44	0.49	3.18	4.50	3%
85	1	4.66	5.85	-1.91	83.09	0.93	4.18	5.85	7%
85	1.5	5.38	6.83	-3.08	81.92	1.37	4.92	6.83	9%
85	2	5.96	7.62	-3.99	81.01	1.82	5.56	7.62	9%
85	2.5	6.45	8.29	-4.75	80.26	2.30	6.14	8.29	8%
85	3	6.88	8.89	-5.27	79.74	2.73	6.58	8.89	9%
95	0.5	3.64	4.50	-0.93	94.07	0.48	3.17	4.50	3%
95	1	4.66	5.85	-2.96	92.04	0.92	4.16	5.85	8%
95	1.5	5.38	6.83	-4.78	90.22	1.34	4.88	6.83	11%

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE
PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R04 – STUDIO MORFODINAMICO

95	2	5.96	7.62	-6.28	88.72	1.78	5.50	7.62	11%
95	2.5	6.45	8.29	-7.54	87.46	2.23	6.05	8.29	11%
95	3	6.88	8.89	-8.44	86.56	2.63	6.48	8.89	12%
95	3.5	7.27	9.43	-9.37	85.63	3.11	6.98	9.43	11%
95	4	7.62	9.92	-9.99	85.01	3.52	7.35	9.92	12%
95	4.5	7.95	10.37	-10.62	84.39	3.94	7.75	10.37	12%
105	0.5	3.64	4.50	-1.77	103.23	0.48	3.17	4.50	4%
105	1	4.66	5.85	-4.49	100.51	0.91	4.15	5.85	9%
105	1.5	5.38	6.83	-6.96	98.05	1.31	4.85	6.83	13%
105	2	5.96	7.62	-8.97	96.04	1.73	5.45	7.62	14%
105	2.5	6.45	8.29	-10.70	94.30	2.15	5.98	8.29	14%
105	3	6.88	8.89	-11.95	93.05	2.52	6.39	8.89	16%
105	3.5	7.27	9.43	-13.25	91.75	2.97	6.87	9.43	15%
105	4	7.62	9.92	-14.14	90.86	3.36	7.23	9.92	16%
105	4.5	7.95	10.37	-15.05	89.96	3.76	7.62	10.37	16%
105	5	8.25	10.80	-15.97	89.03	4.20	8.10	10.80	16%
115	0.5	3.64	4.50	-3.71	111.29	0.46	3.17	4.50	8%
115	1	4.66	5.85	-7.06	107.94	0.87	4.14	5.85	13%
115	1.5	5.38	6.83	-10.14	104.86	1.25	4.82	6.83	17%
115	2	5.96	7.62	-12.62	102.38	1.64	5.41	7.62	18%
115	2.5	6.45	8.29	-14.78	100.22	2.03	5.93	8.29	19%
115	3	6.88	8.89	-16.32	98.68	2.38	6.33	8.89	21%
115	3.5	7.27	9.43	-17.92	97.08	2.79	6.80	9.43	20%
115	4	7.62	9.92	-19.05	95.96	3.15	7.14	9.92	21%
115	4.5	7.95	10.37	-20.19	94.81	3.52	7.51	10.37	22%

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE
PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R04 – STUDIO MORFODINAMICO

115	5	8.25	10.80	-21.36	93.64	3.94	7.97	10.80	21%
115	5.5	8.53	11.19	-22.22	92.78	4.27	8.37	11.19	22%
125	0.5	3.64	4.50	-7.20	117.80	0.42	3.16	4.50	17%
125	1	4.66	5.85	-11.02	113.98	0.78	4.12	5.85	22%
125	1.5	5.38	6.83	-14.63	110.37	1.12	4.80	6.83	26%
125	2	5.96	7.62	-17.55	107.45	1.46	5.38	7.62	27%
125	2.5	6.45	8.29	-20.05	104.95	1.81	5.91	8.29	27%
125	3	6.88	8.89	-21.82	103.18	2.12	6.31	8.89	29%
125	3.5	7.27	9.43	-23.67	101.33	2.49	6.78	9.43	29%
125	4	7.62	9.92	-24.96	100.04	2.81	7.12	9.92	30%
125	4.5	7.95	10.37	-26.26	98.74	3.15	7.48	10.37	30%
125	5	8.25	10.80	-27.56	97.44	3.54	7.90	10.80	29%
125	5.5	8.53	11.19	-28.51	96.49	3.86	8.24	11.19	30%
125	6	8.80	11.57	-29.50	95.50	4.16	8.62	11.57	31%
135	0.5	3.64	4.50	-12.18	122.82	0.34	3.17	4.50	32%
135	1	4.66	5.85	-16.24	118.76	0.63	4.11	5.85	37%
135	1.5	5.38	6.83	-20.30	114.70	0.91	4.78	6.83	40%
135	2	5.96	7.62	-23.70	111.30	1.19	5.37	7.62	41%
135	2.5	6.45	8.29	-26.56	108.44	1.48	5.92	8.29	41%
135	3	6.88	8.89	-28.58	106.42	1.75	6.34	8.89	42%
135	3.5	7.27	9.43	-30.65	104.35	2.07	6.84	9.43	41%
135	4	7.62	9.92	-32.06	102.94	2.34	7.20	9.92	41%
135	4.5	7.95	10.37	-33.48	101.53	2.63	7.57	10.37	42%
135	5	8.25	10.80	-34.85	100.15	2.97	7.99	10.80	41%
135	5.5	8.53	11.19	-35.83	99.17	3.26	8.30	11.19	41%

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE
PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R04 – STUDIO MORFODINAMICO

135	6.5	9.06	11.93	-37.91	97.09	3.89	9.03	11.93	40%
145	0.5	3.64	4.50	-18.43	126.57	0.24	3.15	4.50	52%
145	1	4.66	5.85	-22.97	122.03	0.45	4.07	5.85	55%
145	1.5	5.38	6.83	-27.61	117.39	0.64	4.75	6.83	58%
145	2	5.96	7.62	-31.40	113.60	0.85	5.39	7.62	58%
145	2.5	6.45	8.29	-34.67	110.33	1.08	5.99	8.29	57%
145	3	6.88	8.89	-36.96	108.04	1.29	6.48	8.89	57%
145	3.5	7.27	9.43	-39.21	105.79	1.55	7.04	9.43	56%
145	4	7.62	9.92	-40.73	104.27	1.78	7.45	9.92	55%
145	4.5	7.95	10.37	-42.23	102.77	2.02	7.88	10.37	55%
145	5	8.25	10.80	-43.64	101.36	2.31	8.36	10.80	54%
155	0.5	3.64	4.50	-28.67	126.33	0.10	3.20	4.50	79%
155	1	4.66	5.85	-34.51	120.49	0.21	4.37	5.85	79%
155	1.5	5.38	6.83	-39.25	115.75	0.34	5.35	6.83	77%
155	2	5.96	7.62	-43.07	111.93	0.50	6.20	7.62	75%
155	2.5	6.45	8.29	-46.24	108.76	0.67	6.97	8.29	73%
155	3	6.88	8.89	-48.41	106.60	0.84	7.57	8.89	72%
155	3.5	7.27	9.43	-50.36	104.64	1.06	8.21	9.43	70%
155	4	7.62	9.92	-51.69	103.31	1.24	8.68	9.92	69%
155	4.5	7.95	10.37	-53.02	101.98	1.44	9.17	10.37	68%
165	0.5	3.64	4.50	-41.23	123.77	0.03	3.37	4.50	94%
165	1	4.66	5.85	-47.04	117.96	0.09	5.22	5.85	91%
165	1.5	5.38	6.83	-51.63	113.37	0.18	6.49	6.83	88%
165	2	5.96	7.62	-54.94	110.06	0.29	7.37	7.62	85%
165	2.5	6.45	8.29	-57.58	107.42	0.43	8.09	8.29	83%

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE
PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R04 – STUDIO MORFODINAMICO

165	3	6.88	8.89	-59.40	105.60	0.57	8.64	8.89	81%
165	3.5	7.27	9.43	-60.90	104.10	0.74	9.17	9.43	79%
165	4	7.62	9.92	-61.97	103.03	0.89	9.56	9.92	78%
165	4.5	7.95	10.37	-63.07	101.93	1.05	9.98	10.37	77%
175	0.5	3.64	4.50	-51.60	123.40	0.01	3.53	4.50	98%
175	1	4.66	5.85	-59.11	115.89	0.04	6.19	5.85	96%
175	1.5	5.38	6.83	-62.95	112.05	0.11	7.24	6.83	93%
175	2	5.96	7.62	-65.66	109.34	0.20	7.94	7.62	90%
175	2.5	6.45	8.29	-67.85	107.15	0.32	8.55	8.29	87%
175	4.5	7.95	10.37	-72.46	102.54	0.85	10.28	10.37	81%
185	0.5	3.64	4.50	-66.38	118.62	0.00	6.11	4.50	99%
185	1	4.66	5.85	-69.93	115.07	0.03	6.85	5.85	97%
185	1.5	5.38	6.83	-72.80	112.20	0.08	7.51	6.83	94%
185	2	5.96	7.62	-75.14	109.86	0.16	8.12	7.62	92%
185	2.5	6.45	8.29	-76.92	108.08	0.25	8.68	8.29	90%
195	0.5	3.64	4.50	-76.59	118.41	0.00	6.50	4.50	100%
195	1	4.66	5.85	-79.47	115.53	0.02	7.24	5.85	98%
195	1.5	5.38	6.83	-80.84	114.16	0.06	7.69	6.83	96%
195	2	5.96	7.62	-82.01	112.99	0.12	8.15	7.62	94%
205	0.5	3.64	4.50	-74.84	130.16	0.01	4.65	4.50	97%
205	1	4.66	5.85	-77.56	127.44	0.04	5.79	5.85	96%
205	1.5	5.38	6.83	-80.16	124.84	0.08	6.53	6.83	95%
215	0.5	3.64	4.50	-83.92	131.08	0.01	4.45	4.50	98%
215	1	4.66	5.85	-86.59	128.41	0.03	5.47	5.85	97%
215	1.5	5.38	6.83	-88.01	127.00	0.04	5.97	6.83	97%

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE
PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R04 – STUDIO MORFODINAMICO

215	2	5.96	7.62	-88.42	126.59	0.05	6.31	7.62	97%
215	2.5	6.45	8.29	-88.64	126.36	0.06	6.59	8.29	98%
215	3	6.88	8.89	-88.83	126.17	0.06	6.82	8.89	98%
215	3.5	7.27	9.43	-89.04	125.96	0.07	7.12	9.43	98%
215	4	7.62	9.92	-89.18	125.82	0.07	7.36	9.92	98%
215	4.5	7.95	10.37	-89.31	125.69	0.07	7.60	10.37	98%

Tabella 1: Clima ondoso medio a largo e sottocosta (-10 m) per il paraggio di Crotone

In particolare, il modello GenCade richiede come file di input per effettuare la simulazione della linea di riva i dati del clima meteomarinico medio annuo sotto costa. Tali dati vengono definiti considerando le frequenze di apparizione del clima meteomarinico medio sotto costa, classificate secondo classi di altezza d'onda significativa H_s pari a 0.5 m, escludendo le calme ($H_s < 0.25$ m), e classi di direzione di provenienza del moto ondoso, Dir, pari a 10° , all'interno del settore di traversia di Crotone.

In seguito, per ogni singola classe avente un valore di H_s maggiore di 0.25 m si considera il valore medio di H_s e Dir. Inoltre, si calcola per ciascuna di esse il periodo di picco T_p dalla legge di correlazione altezza-periodo H_s - T_p (vedi, per dettagli, la Relazione dello studio meteomarinico) e la direzione media della classe, ruotata considerando la convenzione angolare del modello GenCade. Secondo la convenzione di un osservatore posto sulla costa che guarda verso il largo, la direzione di provenienza $\alpha_{GenCade}$ delle onde (positiva o negativa, e compresa fra -90° e $+90^\circ$ rispetto alla direzione d'osservazione) da dare al modello si basa sulla direzione normale al litorale $\alpha_{normale}$ e sulla direzione secondo il Nord Cartografico α ($^\circ N$), in base alla relazione:

$$\alpha_{GenCade} = \alpha_{normale} - \alpha(^\circ N)$$

4. CALIBRAZIONE DEL MODELLO

La taratura, ovvero le operazioni che permettono di definire le caratteristiche del modello utilizzato, è stata effettuata considerando le linee di riva negli ultimi 2 periodi temporali a disposizione, ovvero gli anni 2008 e 2023 (Figura 8).

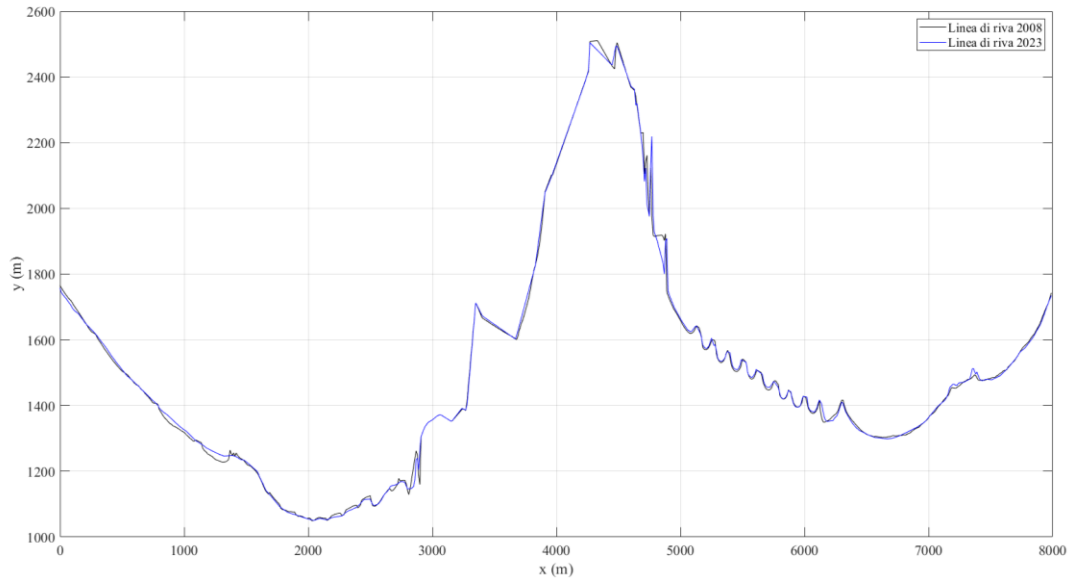


Figura 8: Confronto fra la linea di riva del 2008 e quella del 2023

Nella fase di taratura, il modello numerico ha considerato i seguenti input:

- rilievo della battigia in due anni diversi, quello allo stato attuale di studio (2023) e un altro in un anno precedente (2008);
- clima meteomarinico medio annuo in condizione di pre-frangimento in un punto sotto costa, deducibili dagli stati di mare propagati sotto costa attraverso il modello SWAN;
- profondità alla quale sono state calcolate le onde sotto costa;
- diametro medio dei sedimenti D_{50} caratteristico del litorale;
- profondità di chiusura di spiaggia, dedotta dall’analisi del clima meteomarinico;
- massimi livelli raggiunti dall’acqua sulla spiaggia emersa in condizioni estreme;
- presenza di eventuali opere di difesa costiera quali pennelli o frangiflutti, conoscendo la distanza dalla riva, la lunghezza e la profondità alla quale si trovano le estremità di tali opere (in questo caso non sono presenti opere);
- conoscenza di eventuali ripascimenti naturali (apporto solido fluviale) o antropici (dragaggi), dove nel caso in esame è stato considerato solo il primo tra i due;
- definizione delle celle di calcolo, avendo discretizzato la linea di riva con un passo $\Delta x = 10$ m (v. figure 2 e 3).

I file di input per eseguire il modello GenCade sono stati:

- Console1.shi: linea di riva misurata al tempo iniziale $t = t_1$ (2008);
- Console1.wave: file contenente i dati randomizzati del clima meteomarinico medio annuo propagati sotto costa, per tutto l’arco temporale di analisi (tredici anni). Tale file è composto da 5 colonne in cui la prima indica anno/mese/giorno, la seconda l’ora (dati triorari), la terza colonna l’altezza d’onda significativa H_s , la quarta il periodo di picco T_p e la quinta la direzione di provenienza del moto ondoso secondo GenCade $\alpha_{GenCade}$.

Dopo aver definito i file di input per il modello numerico GenCade, viene effettuata l’analisi morfodinamica impostando nel file Config.gen i dati caratteristici del litorale in esame; in tale

file vengono definiti tutti i parametri caratterizzanti del clima meteomarinico medio annuo, la morfologia del litorale e l'eventuale presenza di strutture o foci fluviali. Esaminando il codice adottato nel nostro caso di studio, per effettuare la taratura del modello confrontando le linee di riva storiche del 2008 e del 2023, nella sezione FILES viene caricato in input il file Console1.shi contenente i dati geometrici che ricostruiscono la linea di riva del 2008; di seguito, l'analisi morfodinamica viene svolta rispetto al punto sotto costa (P1) del clima meteomarinico di input caricando i file Console1.wave, di cui sono descritte le caratteristiche del moto ondoso medio annuo, ovvero i valori di H_s , T_p e $Dir_{GenCade}$.

Nella sezione successiva, denominata MODEL SETUP, viene impostato il modello di calcolo avente coordinate spaziali bidimensionali espresse in metri e un azimuth pari a 90° . Nelle stringhe di codice SIMDATS e SIMDATE vengono definite: la data di inizio e fine simulazione; essa viene svolta con un passo temporale DT pari a 0.5 (ogni mezz'ora), mentre K_1 e K_2 rappresentano i parametri di taratura del modello.

Nella sezione WAVES, invece, sono definiti i fattori di amplificazione dell'altezza d'onda significativa HAMP, della direzione d'incidenza del moto ondoso THETAAMP e della variazione della direzione di incidenza del moto ondoso THETADEL, che sono stati posti pari a 1 poiché il clima meteomarinico medio annuo sotto costa è già stato definito in modo dettagliato nel file di input Console1.wave.

Dopo aver definito i parametri caratterizzanti il dominio di calcolo e la linea di riva, nella sezione BEACH si determinano i parametri necessari a ricostruire la spiaggia attiva, come il diametro medio caratteristico D_{50} , l'altezza della berma sulla spiaggia emersa BERMHT (pari al massimo livello idrico raggiunto sulla spiaggia emersa) e la profondità di chiusura DCLOS; successivamente, in tale sezione vengono elencati i parametri che definiscono in che modo la spiaggia può deformarsi sotto l'azione delle forzanti meteomarine, sia per il lato sinistro sia per il lato destro della stessa (tali parametri sono stati posti pari a zero poiché si ipotizza di avere una *pinned beach*, ossia una spiaggia che non subisce modifiche lungo i tratti laterali del dominio di calcolo). Inoltre, per la determinazione del diametro medio dei

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R04 – STUDIO MORFODINAMICO

sedimenti D_{50} da inserire nel GenCade, si è fatto riferimento a un diametro caratteristico pari a 1.50 mm per come riportato nel Master Plan della Difesa Costiera della Regione Calabria.

L'ultima sezione presente nel file in input del GenCade è quella inerente ai possibili ripascimenti che possono avvenire in tale zona (BEACH FILL).

Lo scopo dell'operazione di taratura, come precedentemente anticipato, è di ottenere i valori dei parametri numerici significativi che permettano di particolarizzare il litorale oggetto di studio.

Nel caso in esame sono state tarate 2 costanti numeriche:

- il coefficiente K_1 , posto pari a 0.005;
- il coefficiente K_2 , posto pari a 0.003;

Il risultato è stato raggiunto attraverso successivi tentativi, procedendo alle simulazioni in modo che, partendo dall'anno 2008, la linea di riva calcolata approssimi al meglio la linea di riva rilevata all'anno 2023. Come si può osservare dalla Figura 9, il risultato può ritenersi più che soddisfacente per il tratto litoraneo considerato, essendosi riprodotti in maniera più che sufficienti gli andamenti qualitativi della linea di riva rilevata al 2023. L'errore medio che è stato ottenuto confrontando la linea di riva al 2023 simulata e quella al 2023 rilevata da Google è stato pari al 1.36%. Tale errore medio è risultato essere il più basso rispetto a tutte le altre simulazioni effettuate con differenti valori dei parametri di taratura K_1 e K_2 .

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE
PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R04 – STUDIO MORFODINAMICO

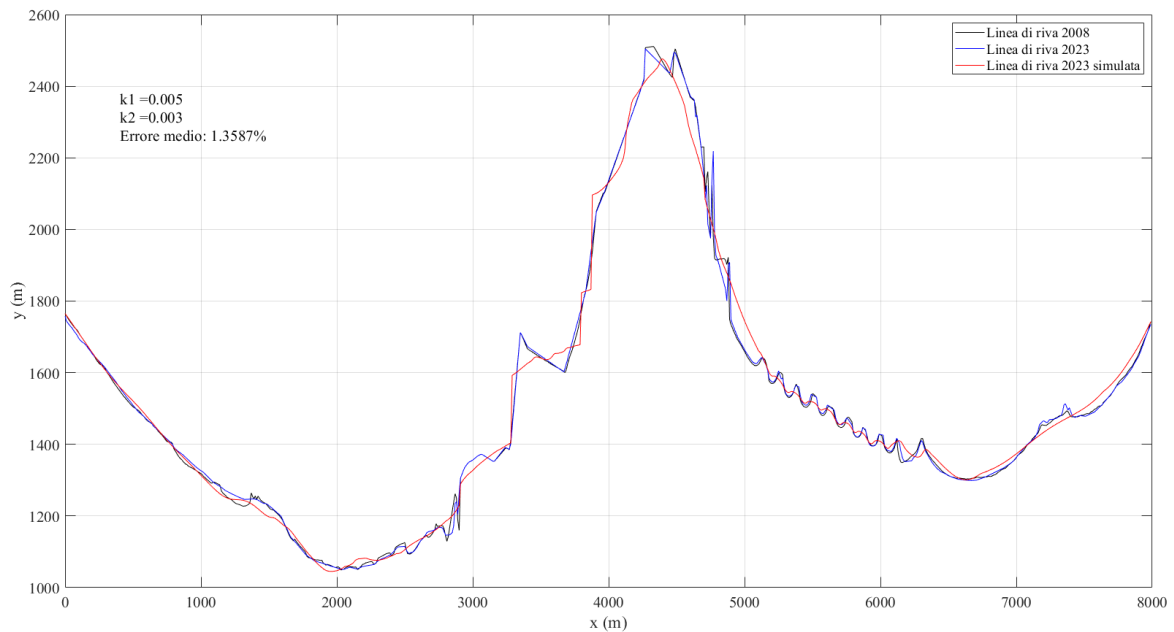


Figura 9: Taratura del modello GenCade, con il confronto fra la linea di riva rilevata al 2023 e quella simulata al 2023 dal modello

5. SIMULAZIONI DELL'EVOLUZIONE FUTURA DELLA LINEA DI RIVA

La seconda fase dell'applicazione del modello GenCade ha avuto per obiettivo la simulazione numerica dell'evoluzione futura della linea di riva in uno scenario di previsione a 10 anni (dal 2023 attuale al 2033).

Nel complesso, per la simulazione numerica è stato considerato:

1. lo scenario che tiene conto della situazione ante operam.
2. lo scenario che tiene conto della situazione post operam, ovvero la presenza del prolungamento della diga foranea (figura 10).



Figura 10: Dominio di calcolo di 8 km con presenza del prolungamento della diga foranea

La figura 10 mostra l'intero dominio di calcolo che si estende per 8 km. Le opere presenti nel tratto di costa sono state modellate utilizzando i comandi breakwater e groin.

5.1 SCENARIO: EVOLUZIONE CONSIDERANDO LO STATO ANTE OPERAM

Il presente scenario evolutivo fa riferimento allo stato ante operam. In particolare si è proceduto alla simulazione dell'evoluzione della linea di riva considerando lo stato attuale del porto. La Figura 11 mostra la variazione della linea di riva, y (m), dal 2023 al 2033.

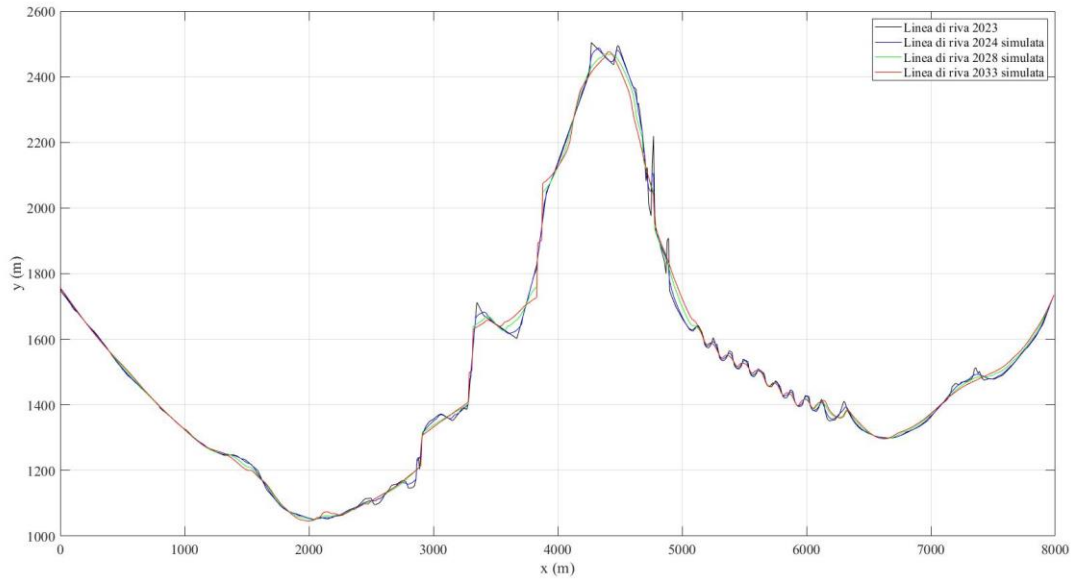


Figura 11: Evoluzione della linea di riva tramite il modello GenCade nella condizione ante operam

La figura 12 mostra la sovrapposizione della linea di battigia simulata a 5 anni (linea rossa) con la Carta Tecnica Regionale. Si evince che agli interventi realizzati in passato.



Figura 12: Sovrapposizione della simulazione a 5 anni con la CTR

La figura 13 mostra, invece, la sovrapposizione della linea di battigia simulata a 10 anni (linea rossa) con la Carta Tecnica Regionale.



Figura 13: Sovrapposizione della simulazione a 10 anni con la CTR

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE
PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R04 – STUDIO MORFODINAMICO

La simulazione dello stato ante operam mostra un litorale che risulta oramai stabile e non soggetto a modifiche. Infatti negli 8 km analizzati sono presenti opere radenti (che bloccano la linea di riva), barriere frangiflutto e pennelli.

La seguente figura, riportata anche in allegato, mostra uno zoom sull’area sottoflutto del porto vecchio di Crotona mostrando l’evoluzione della linea di riva.

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R04 – STUDIO MORFODINAMICO

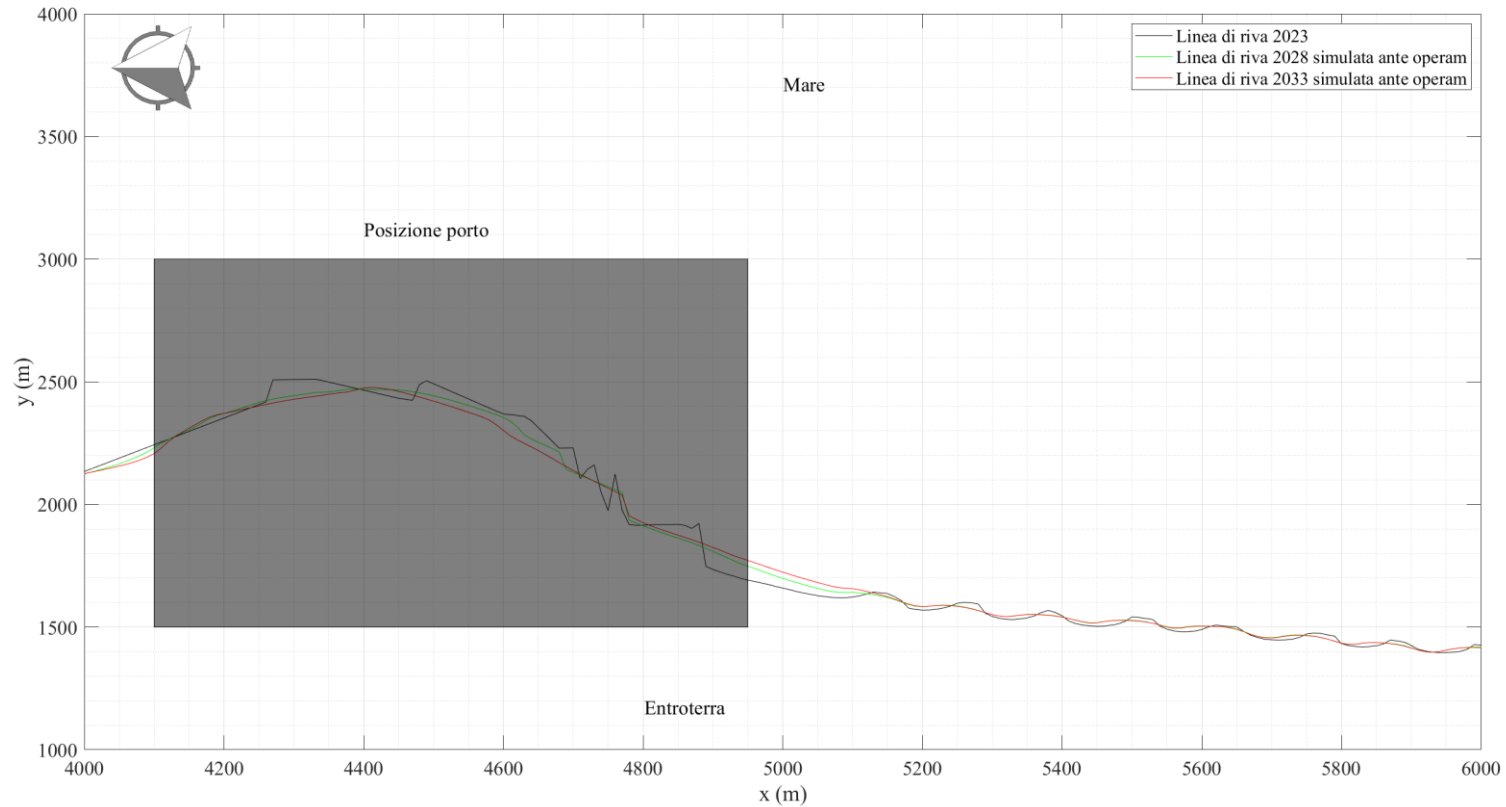


Figura 14: Zoom dell’evoluzione della linea di riva a sud del porto vecchio di Crotona nella condizione ante operam

**5.2 SCENARIO: EVOLUZIONE CONSIDERANDO LO STATO POST OPERAM
(PROLUNGAMENTO DELLA DIGA FORANEA)**

Il presente scenario evolutivo fa riferimento alla realizzazione del prolungamento della diga foranea per come mostrato in figura 10. In Figura 15 viene mostrata la variazione della linea di riva, y (m), dal 2023 al 2033.

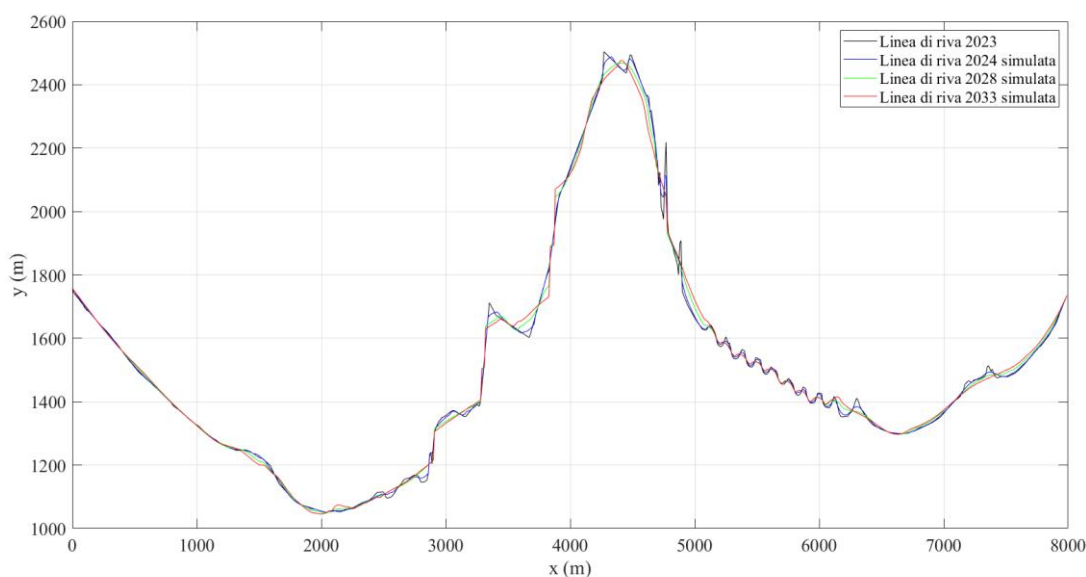


Figura 15: Evoluzione della linea di riva tramite il modello GenCade in presenza del prolungamento della diga foranea

La figura 16 mostra la sovrapposizione della linea di battigia simulata a 5 anni (linea rossa) con la Carta Tecnica Regionale. Si evince che il prolungamento della diga foranea non modifica l'andamento della dinamica costiera attuale, che ribadiamo essere stabile anche grazie agli interventi realizzati in passato.



Figura 16: Sovrapposizione della simulazione a 5 anni con la CTR

La figura 17 mostra, invece, la sovrapposizione della linea di battigia simulata a 10 anni (linea rossa) con la Carta Tecnica Regionale.



Figura 18: Sovrapposizione della simulazione a 10 anni con la CTR

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE
PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R04 – STUDIO MORFODINAMICO

La seguente figura, riportata anche in allegato, mostra uno zoom sull'area sottoflutto del porto vecchio di Crotona mostrando l'evoluzione della linea di riva.

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R04 – STUDIO MORFODINAMICO

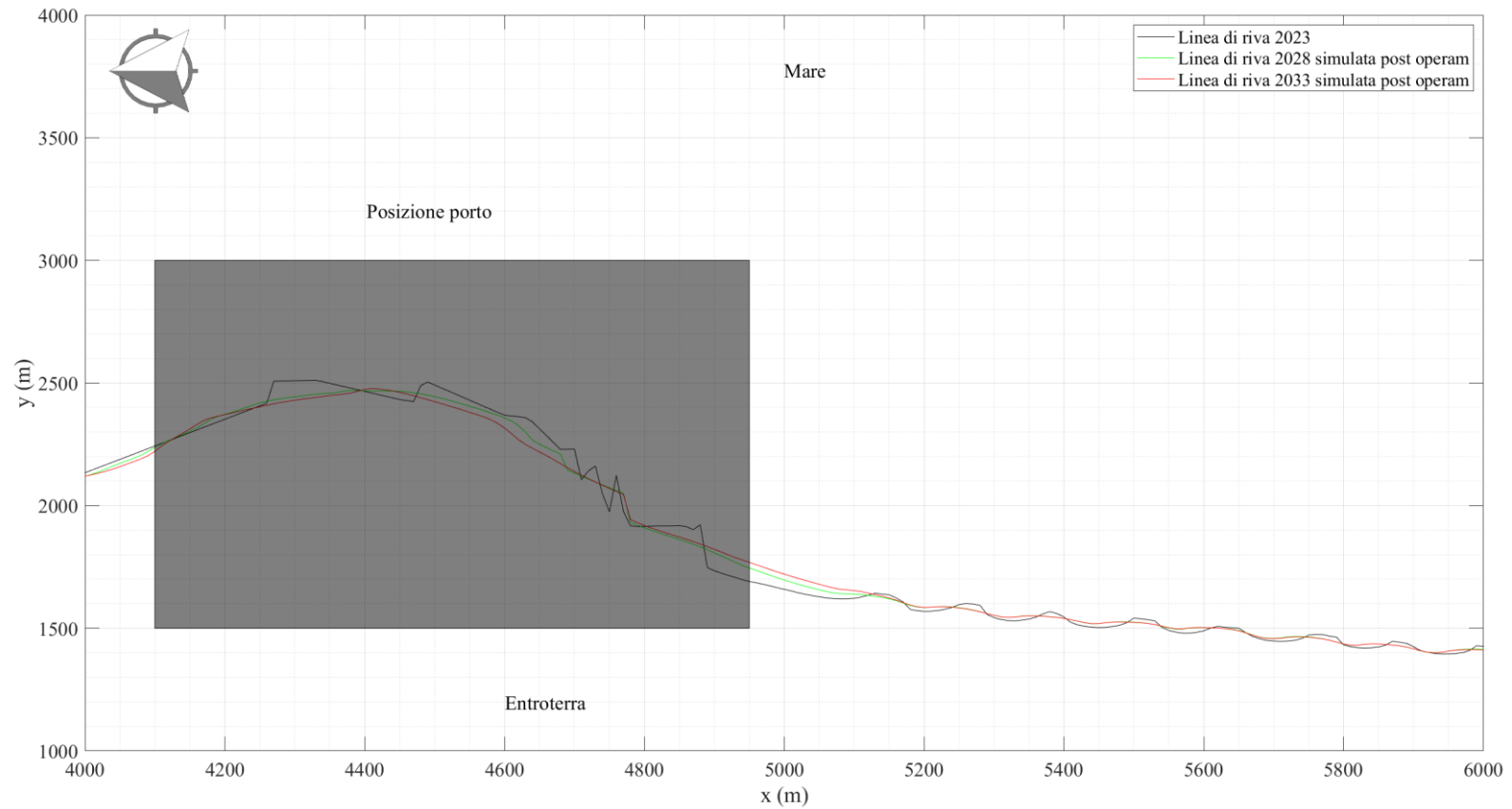


Figura 19: Zoom dell’evoluzione della linea di riva a sud del porto vecchio di Crotona nella condizione post operam

CONCLUSIONI

Le simulazioni dell'evoluzione della linea di costa è stata condotta considerando:

1. Il clima meteomarinario medio determinato sottocosta;
2. La condizione ante operam (ovvero considerando il porto senza il prolungamento della diga foranea);
3. La condizione post operam (ovvero considerando il prolungamento della diga foranea).

Lungo tutto il dominio non si apprezzano modifiche sostanziali tra la simulazione ante e post operam.

Le figure seguenti mostrano la sovrapposizione delle simulazioni condotte considerando il tratto a sud del porto e per una estensione di circa 1 km. In particolare, la figura 20 mostra la sovrapposizione delle simulazioni ante e post operam a 5 anni, mentre la figura 21 mostra la sovrapposizione delle simulazioni a 10 anni.

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R04 – STUDIO MORFODINAMICO

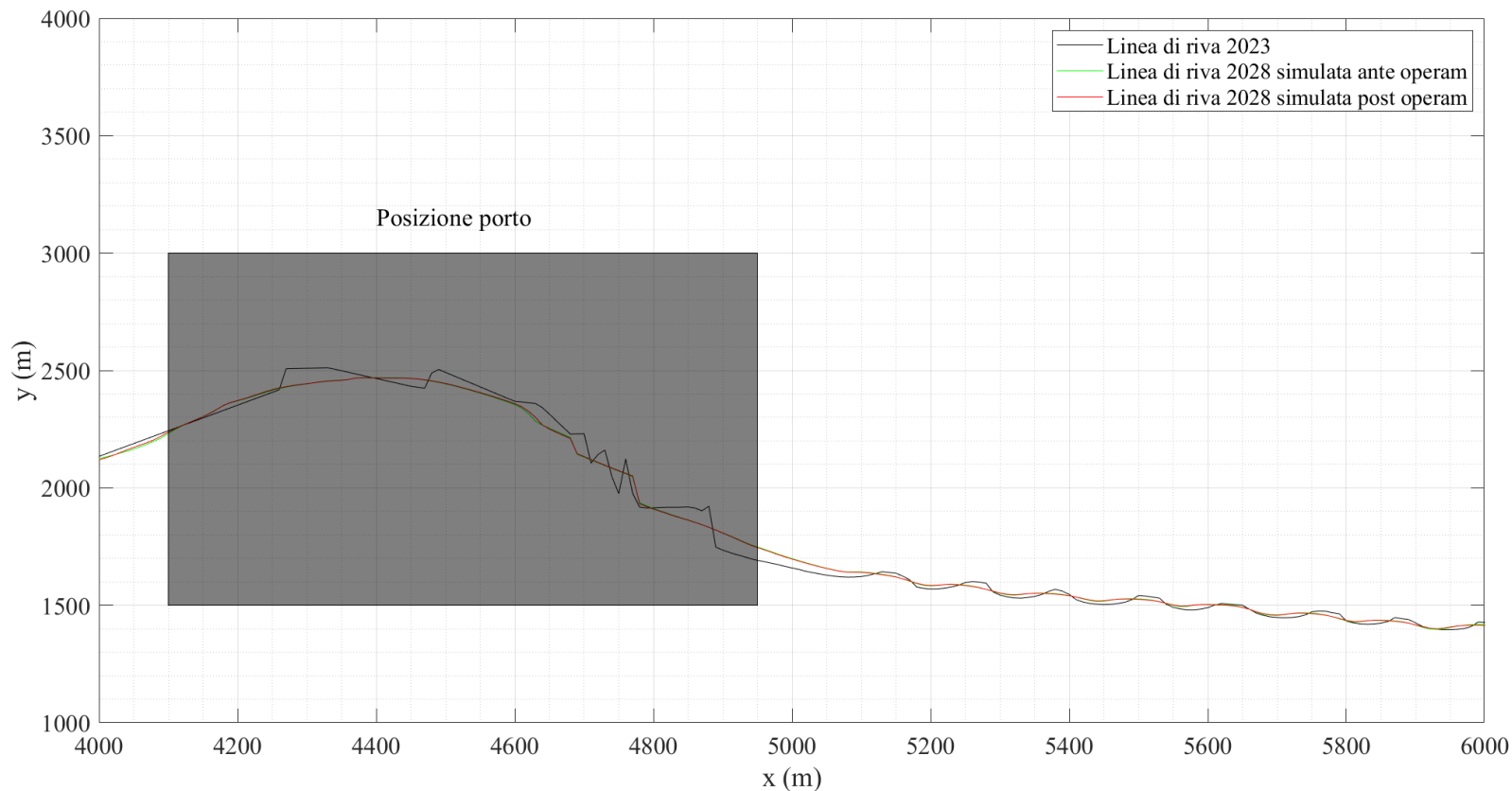


Figura 20: Sovrapposizione delle simulazioni ante e post operam a 5 anni

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R04 – STUDIO MORFODINAMICO

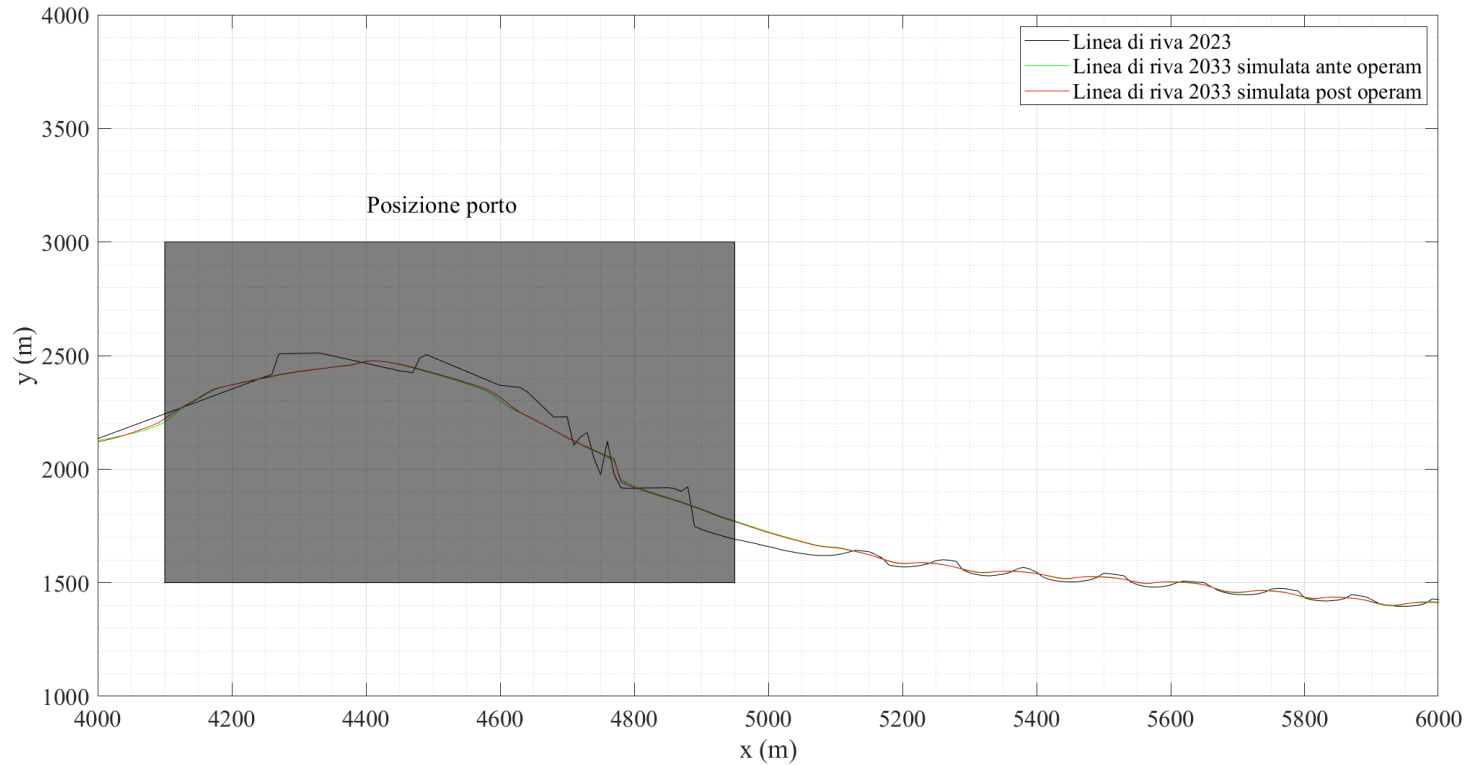


Figura 21: Sovrapposizione delle simulazioni ante e post operam a 10 anni

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE
PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R04 – STUDIO MORFODINAMICO

Le simulazioni condotte hanno dimostrato come il prolungamento della diga foranea non comporta problematiche per l'evoluzione della linea di riva. Infatti, le figure 17 e 18 mostrano come le evoluzioni della linea di riva a 5 e 10 anni nelle condizioni ante e post operam presentano una perfetta sovrapposizione dei risultati.

Si può concludere affermando che le opere di progetto sono compatibili sotto il profilo morfodinamico al mantenimento dell'equilibrio costiero delle zone in sopraflutto e sottoflutto.