

RELAZIONE MORFODINAMICA

- LITORALE DI CALOPEZZATI -



Prof. Ing. Francesco Aristodemo
Ing. Danilo Algieri Ferraro

INDICE

1. Introduzione.....	3
2. Aspetti generali del trasporto solido litoraneo	5
3. Descrizione del codice di calcolo GenCade.....	6
4. Caratteristiche del modello	10
5. Clima ondoso di input	13
6. Calibrazione del modello	21
7. Simulazioni dell'evoluzione futura della linea di riva	29
7.1 Scenario A: evoluzione dello stato attuale	29
7.2 Scenario B: evoluzione in presenza di 5 pennelli e ripascimento	31
7.3 Scenario C: evoluzione in presenza di 10 pennelli e ripascimento	34

1. Introduzione

Il presente studio riguarda la modellazione morfodinamica di un tratto litoraneo che ricade nel comune di Calopezzati (CS). L'attenzione è stata posta nel tratto a Nord e a Sud del torrente Fiumarella, per uno sviluppo complessivo della linea di riva di 2.08 km. In particolare, le linee di riva sono state analizzate da circa 600 m a Nord della foce del torrente Fiumarella fino a circa l'ultimo pennello di progettazione posto nella zona Sud del litorale in esame. Nella Figura 1 è evidenziata l'ortofoto dell'area in esame, con evidenziata la linea di riva rilevata per l'anno 2020 (tramite appositi rilievi effettuati dal gruppo di ricerca coordinato dal dott. Rocco Dominici del Dipartimento di Biologia, Ecologia e Scienze della Terra dell'Università della Calabria) e la presenza del torrente Fiumarella.

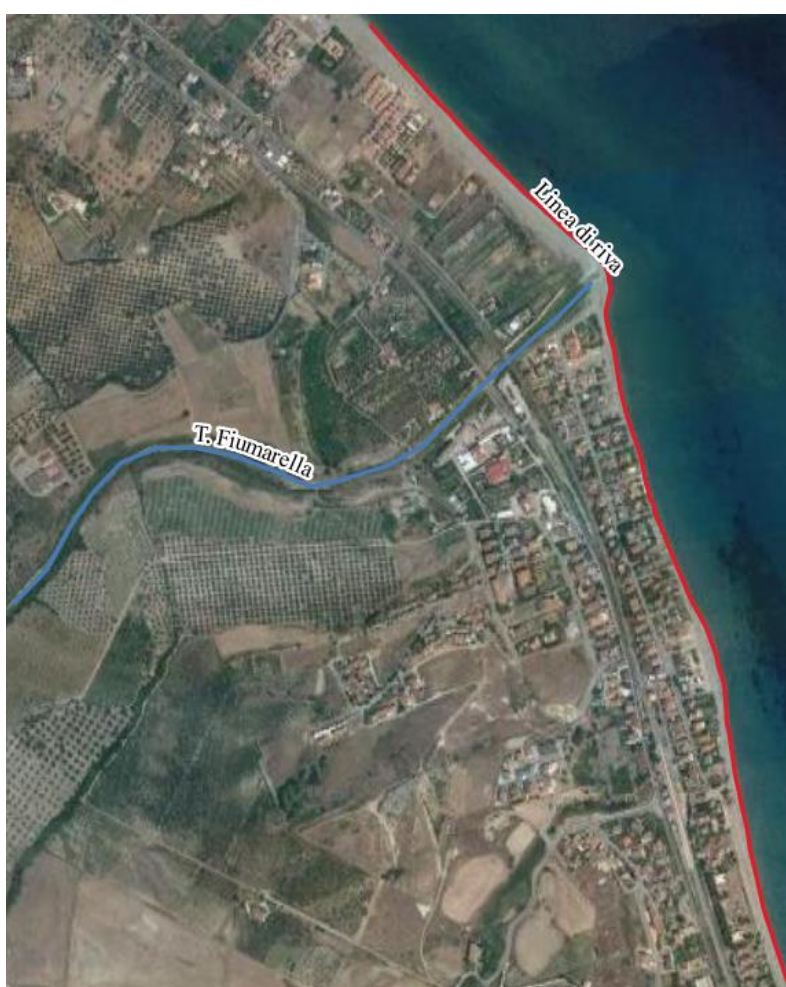


Figura 1: Ortofoto del tratto costiero in esame di Calopezzati, con evidenziazione della linea di riva del 2020 e della presenza del torrente Fiumarella

La determinazione dell'andamento temporale di un litorale, previa apposita taratura effettuata attraverso un modello numerico di morfodinamica costiera, rappresenta una base fondamentale nella conoscenza della sua dinamica evolutiva e nella eventuale progettazione di interventi di

difesa costiera nei riguardi dell'erosione. Ai fini di una corretta modellazione della morfodinamica del litorale di Calopezzati e dei possibili interventi di difesa dall'erosione dell'area in esame, risulta essenziale la definizione del clima meteomarinico medio sottocosta, in prossimità della zona dei frangenti, dell'evoluzione storica piano-altimetrica della fascia attiva di spiaggia e, in questo, del trasporto solido medio annuo alla foce del torrente Fiumarella. La determinazione di queste grandezze risulta l'input per la modellazione futura dell'evoluzione della linea di riva al fine di capire i possibili interventi atti a contrastare possibili erosioni di spiaggia.

Dall'analisi morfologica del tratto litoraneo in esame (vedi, per dettagli, la relazione relativa all'Analisi morfologica del litorale), è stato mostrato, in base alle ultime linee di riva rilevate (2011 e 2020), una tendenziale erosione del tratto a Sud del torrente Fiumarella. In tale area, sarà concentrata l'attenzione per effettuare l'analisi morfodinamica del litorale e nel prevedere delle opere di contenimento dell'erosione e per l'avanzamento della linea di riva a medio termine.

La prima parte dello studio è relativa alla descrizione delle caratteristiche del trasporto solido litoraneo e del codice numerico del tipo "ad una linea" adottato per la modellazione morfodinamica del litorale. Viene descritto lo stato recente dell'evoluzione litoranea e la metodologia di calcolo seguita per la modellazione ad una linea del tratto in esame.

Il secondo passo, dedotto dai risultati contenuti nella Relazione del clima meteomarinico del litorale di Calopezzati del presente studio, descrive la forzante idrodinamica proveniente dal mare e relativa a tutti gli stati di mare medi annui sottocosta (alla batimetrica -10 m), che incidono sull'evoluzione futura di un litorale.

Successivamente, viene effettuata la calibrazione dei parametri del modello morfodinamico ad una linea, ai fini di ottenere una corretta simulazione dello stato attuale della linea di riva e una successiva realistica evoluzione a medio termine.

L'ultima parte dello studio è incentrata alla simulazione, con il modello ad una linea, dell'evoluzione del litorale in assenza di opere di progetto e alla definizione dello scenario di evoluzione in presenza di opere di difesa costiera, in un arco temporale che risulti atto a definire una reale durabilità degli interventi. In particolare, la soluzione progettuale del I lotto di progettazione consiste in 5 pennelli emersi, della lunghezza di 50 m e ad interasse variabile, accoppiati con la presenza di un ripascimento artificiale che permette un iniziale avanzamento della linea di riva pari a 20 m. La soluzione progettuale definitiva, comprendente il I e II lotto di progettazione, consiste in 10 pennelli e un ripascimento artificiale, ambedue delle stesse caratteristiche di quelli sopra esposti.

2. 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 dipendono, 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 sempre il risultato di due azioni concomitanti: l'apporto di sedimenti dall'entroterra e la loro ridistribuzione a opera del moto ondoso.

I modelli matematici costituiscono un valido strumento per l'analisi e la previsione dell'evoluzione della morfologia costiera. 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 ad un'ampia documentazione, che si può trovare anche online al sito <https://cirpwiki.info/wiki/GenCade>.

3. 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 65° in senso antiorario rispetto alla configurazione originale e suddiviso in una serie di celle tramite una griglia di calcolo di maglia pari a 20 m. I periodi delle presenti simulazione sono pari a 9 anni (per la taratura del modello, dal 2011 al 2020) e di 9 anni (per l'evoluzione del litorale con e senza opere, ovvero dal 2020 al 2029), con dati d'onda (stati di mare medio annui sottocosta, alla batimetrica -10 m) a intervalli temporali di 1 ora.

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 illustrato in Fig. 2 una vista tridimensionale del volume di controllo considerato dal modello GenCade per svolgere tale analisi e nella Fig. 3 quella planimetrica dall'alto; viene indicato con D_b i massimi livelli idrici sulla spiaggia emersa, con D_c la profondità di chiusura e con Δy 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 Δx .

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.

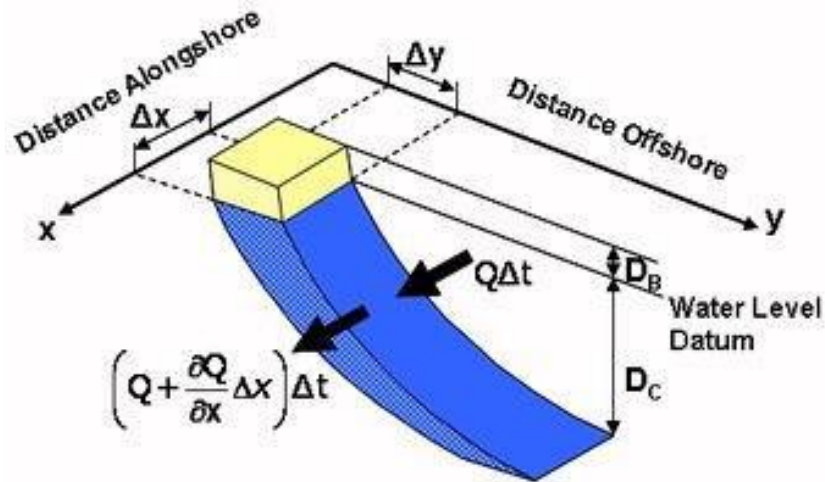


Figura 2: Vista tridimensionale del volume di controllo secondo GenCade

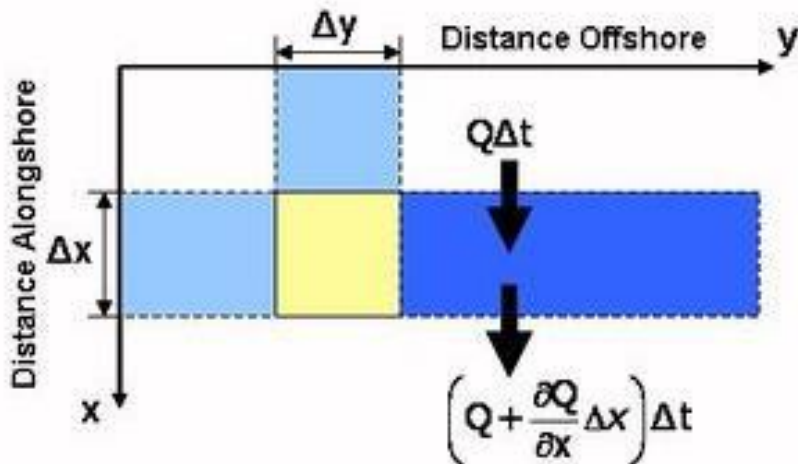


Figura 3: Vista planimetrica del volume di controllo secondo GenCade

L'equazione di continuità dei sedimenti in una generica sezione, con riferimento ai simboli della Figura 4, 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.

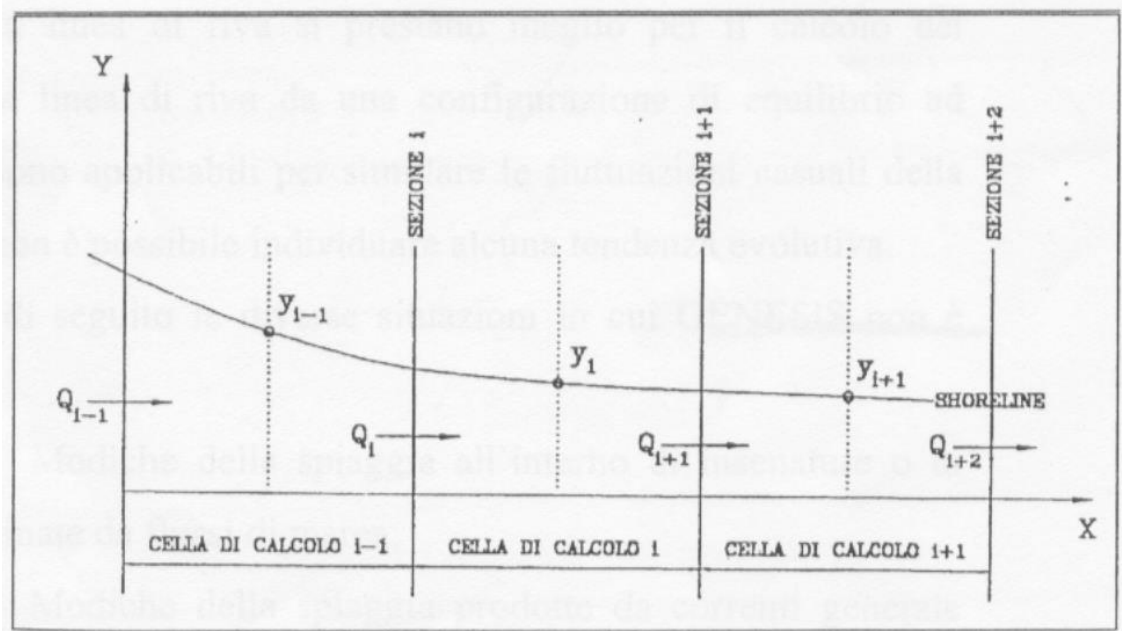


Figura 4: Discretizzazione della linea di riva e definizione delle celle di calcolo nel modello GenCade

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 della formula per il calcolo del trasporto longitudinale corrisponde alla nota formula CERC e tiene conto del trasporto di sabbia lungoriva indotto dalle onde frangenti incidenti obliquamente. Il secondo termine dell'equazione descrive, invece, l'effetto del gradiente lungoriva dell'altezza dell'onda al frangimento $\partial H_b / \partial x$. Il contributo del gradiente lungoriva 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 s indica il rapporto tra il peso specifico del costituente solido del sedimento caratteristico della spiaggia e il peso specifico dell'acqua marina, n la porosità del sedimento in sito e 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 semiempirico di Dean, e D_{LT0} è la massima profondità interessata dal trasporto solido longitudinale calcolata come:

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

dove L_0 rappresenta la lunghezza d'onda e H_s l'altezza d'onda significativa in acque profonde. La massima profondità del trasporto lungoriva D_{LT0} viene calcolata dal GenCade per ciascun passo temporale ed è assunta valida per l'intera estensione lungoriva del tratto modellato.

GenCade è anche dotato di un modello interno di trasformazione capace 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

$$H_b = \gamma \cdot D_b$$

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 quantità 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.

4. 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.

E' da precisare, infatti, che l'utilizzo dei modelli matematici è di supporto alla progettazione e mai può essere 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 sottocosta 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 planoaltimetrici, 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 trovare. 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 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, periodi e 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 sottocosta. Senza entrare nel dettaglio, che esula dai contenuti di questo studio, si può dire che la teoria che comunemente si adotta negli studi di idraulica marittima, nota come "teoria lineare", presuppone delle ipotesi di base di difficile realizzazione:

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 perfettamente congruenti con i risultati dell’analisi storica.

5. *Clima ondoso di input*

Le forzanti ondamiche, 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 sottocosta in corrispondenza di 3 punti (A, B e C) che si trovano alla profondità di circa 10 m (Figura 5), mediante l’applicazione del modello di rifrazione diretta spettrale SWAN.

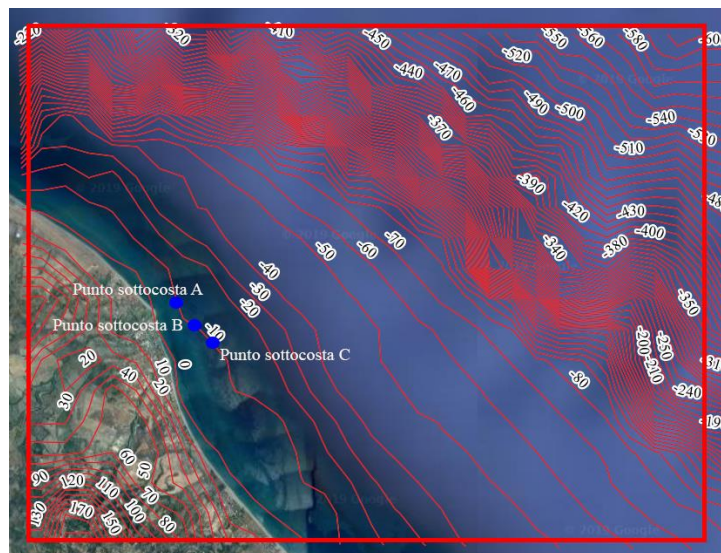


Figura 5: Evidenziazione delle principali batimetriche e dei punti utilizzati per la definizione del clima meteomarinario sottocosta (A: foce torrente Fiumarella, B: tratto centrale del litorale in esame, C: tratto Sud del litorale in esame)

In particolare, il modello GenCade richiede come file di input per effettuare la simulazione della linea di riva i dati del clima meteomarinario medio annuo sottocosta. Tali dati vengono

definiti considerando le frequenze di apparizione del clima meteomarinico medio sottocosta, 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 Calopezzati. Il clima meteomarinico medio annuo sottocosta è pari al prodotto della frequenza di apparizione della classe di moto ondoso considerata per il numero di ore presenti in un anno medio, ossia 8760. Per i punti sottocosta A, B e C, nelle Tabella 1, 2 e 3 sono state evidenziate in rosso le classi degli stati di mare che verranno considerate per il modello Gencade.

		Classi di altezza d'onda significativa, Hs (m)									TOTALE
		calme	0.25-0.75	0.75-1.25	1.25-1.75	1.75-2.25	2.25-2.75	2.75-3.25	3.25-3.75	3.75- 4.25	
Dir (°N)											
345	355	310	879	0	0	0	0	0	0	0	1189
355	5	318	1054	775	109	0	0	0	0	0	2256
5	15	158	408	662	396	133	35	13	0	0	1805
15	25	119	209	40	106	22	14	9	1	0	520
25	35	104	115	25	11	12	6	2	1	0	276
35	45	67	63	14	9	3	4	2	0	1	163
45	55	53	49	12	7	2	1	0	0	0	124
55	65	40	43	12	7	2	2	0	0	0	106
65	75	43	55	16	8	4	2	0	0	0	128
75	85	69	98	36	20	33	7	3	1	0	267
85	95	102	192	81	75	40	7	1	0	0	498
95	105	161	338	166	96	2	0	0	0	0	763
105	115	96	187	133	3	1	0	0	0	0	420
115	125	89	155	0	0	0	0	0	0	0	244
125	135	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTALE		1729	3845	1972	847	254	78	30	3	1	

Tabella 1: Numero di apparizioni medie annue degli stati di mare sottocosta per il punto A

		Classi di altezza d'onda significativa, Hs (m)									
		calme	0.25-0.75	0.75-1.25	1.25-1.75	1.75-2.25	2.25-2.75	2.75-3.25	3.25-3.75	3.75- 4.25	TOTALE
Dir	(°N)										
345	355	310	879	524	0	0	0	0	0	0	1713
355	5	318	1054	547	622	47	14	4	0	0	2606
5	15	158	408	114	54	239	31	13	4	0	1021
15	25	119	209	40	19	29	20	5	1	0	442
25	35	104	115	25	11	5	3	4	1	1	269
35	45	67	63	14	9	3	2	0	0	0	158
45	55	53	49	12	7	2	1	0	0	0	124
55	65	40	43	12	7	2	2	0	0	0	106
65	75	43	55	16	8	4	2	1	0	0	129
75	85	69	98	36	20	13	26	2	1	0	265
85	95	102	192	81	44	71	7	1	0	0	498

RELAZIONE MORFODINAMICA DEL LITORALE DI CALOPEZZATI

95	105	161	338	166	96	2	0	0	0	0	763
105	115	96	187	133	3	1	0	0	0	0	420
115	125	89	155	0	0	0	0	0	0	0	244
125	135	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTALE		1729	3845	1720	900	418	108	30	7	1	

Tabella 2: Numero di apparizioni medie annue degli stati di mare sottocosta per il punto B

		Classi di altezza d'onda significativa, H _s (m)									TOTALE
		calme	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	
Dir (°N)		0.25-0.75	0.75-1.25	1.25-1.75	1.75-2.25	2.25-2.75	2.75-3.25	3.25-3.75	3.75-4.25		
345	355	310	879	0	0	0	0	0	0	0	1189
355	5	318	1054	1072	360	47	0	0	0	0	2851
5	15	158	408	114	396	72	45	17	0	0	1209
15	25	119	209	40	73	55	14	5	5	0	520
25	35	104	115	25	11	12	9	2	1	0	278
35	45	67	63	14	9	3	2	2	1	0	160
45	55	53	49	12	7	2	1	0	0	0	124
55	65	40	43	12	7	2	2	0	0	0	107
65	75	43	55	16	8	4	2	0	0	0	128
75	85	69	98	36	20	26	15	3	1	0	267
85	95	102	192	81	75	40	7	1	0	0	498
95	105	161	338	166	96	2	0	0	0	0	764
105	115	96	187	133	3	1	0	0	0	0	421
115	125	89	155	0	0	0	0	0	0	0	244
125	135	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTALE		1729	3845	1722	1065	265	96	30	8	1	

Tabella 3: Numero di apparizioni medie annue degli stati di mare sottocosta per il punto C

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 ognuna di esse il periodo di picco T_p dalla legge di correlazione altezza-periodo H_s - T_p , essendo $T_p = 4.79 H_s^{0.35}$ (vedi, per dettagli, la relazione dello studio meteomarinò) e la direzione media della classe, ruotata considerando la convenzione angolare del modello GenCade. Per poter determinare tale direzione, in primo luogo bisogna ruotare la direzione media normale alla linea di riva (pari a 67°) di un'angolazione pari a 65° in senso antiorario, così come è stato fatto per l'analisi morfologica. 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° rispetto alla direzione d'osservazione) da dare al modello, così come schematizzato in Figura 6, si basa sulla direzione normale al litorale $\alpha_{normale}$, pari a 2°N nel caso in esame, e sulla direzione secondo il Nord Cartografico α (°N), in base alla relazione:

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

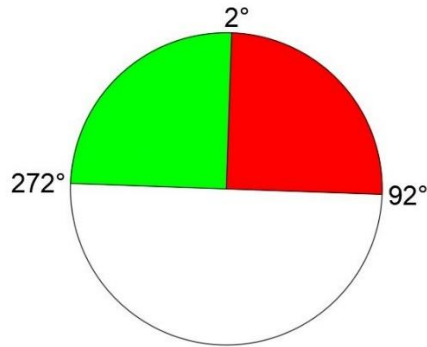


Figura 6: Convezione angolare della direzione del moto ondoso medio annuo secondo GenCade (lato sinistro in verde per i valori positivi, lato destro in rosso per i valori negativi)

Nelle successive Tabelle 4, 5 e 6 vengono mostrati i dati di input delle caratteristiche del clima meteomarinico medio annuo sottocosta da inserire nel GenCade, rispettivamente per i punti sottocosta A, B e C. Occorre notare che nell'ultima riga delle Tabelle 4, 5 e 6 sono stati inseriti anche gli eventi di calma, posti pari a valori nulli perché ininfluenti ai fini della morfodinamica del litorale, in modo da ottenere un numero totale di eventi medio annui pari a 8760. Avendo a disposizione i dati nei punti sottocosta A, B e C del clima meteomarinico medio annuo, pari a 8760 eventi, è stata necessaria una duplicazione di questi dati nove volte ciascuno (per un totale di 78840 eventi), così da ricoprire i nove anni di simulazione (dal 2011 al 2020 per la taratura, e successivamente dal 2020 al 2029 per l'evoluzione futura). In seguito, tali dati sono stati randomizzati grazie ad un codice di calcolo compilato in ambiente Matlab.

numero di apparizioni	H _s (m)	T _p (s)	Dir GenCade (°)
879	0.5	3.76	77
1054	0.5	3.76	67
775	1	4.79	67
109	1.5	5.52	67
408	0.5	3.76	57
662	1	4.79	57
396	1.5	5.52	57
133	2	6.11	57
35	2.5	6.60	57
13	3	7.04	57
209	0.5	3.76	47
40	1	4.79	47
106	1.5	5.52	47
22	2	6.11	47
14	2.5	6.60	47
9	3	7.04	47

RELAZIONE MORFODINAMICA DEL LITORALE DI CALOPEZZATI

1	3.5	7.43	47
115	0.5	3.76	37
25	1	4.79	37
11	1.5	5.52	37
12	2	6.11	37
6	2.5	6.60	37
2	3	7.04	37
1	3.5	7.43	37
63	0.5	3.76	27
14	1	4.79	27
9	1.5	5.52	27
3	2	6.11	27
4	2.5	6.60	27
2	3	7.04	27
1	4	7.78	27
49	0.5	3.76	17
12	1	4.79	17
7	1.5	5.52	17
2	2	6.11	17
1	2.5	6.60	17
43	0.5	3.76	7
12	1	4.79	7
7	1.5	5.52	7
2	2	6.11	7
2	2.5	6.60	7
55	0.5	3.76	-3
16	1	4.79	-3
8	1.5	5.52	-3
4	2	6.11	-3
2	2.5	6.60	-3
98	0.5	3.76	-13
36	1	4.79	-13
20	1.5	5.52	-13
33	2	6.11	-13
7	2.5	6.60	-13
3	3	7.04	-13
1	3.5	7.43	-13
192	0.5	3.76	-23
81	1	4.79	-23
75	1.5	5.52	-23
40	2	6.11	-23
7	2.5	6.60	-23
1	3	7.04	-23
338	0.5	3.76	-33
166	1	4.79	-33
96	1.5	5.52	-33
2	2	6.11	-33
187	0.5	3.76	-43
133	1	4.79	-43

3	1.5	5.52	-43
1	2	6.11	-43
155	0.5	3.76	-53
1730	0	0	0

Tabella 4: Dati di input delle caratteristiche del clima meteomarinò medio annuo sottocosta per il GenCade (punto A)

numero di apparizioni	H _s (m)	T _p (s)	Dir GenCade (°)
879	0.5	3.76	77
524	1	4.79	77
1054	0.5	3.76	67
547	1	4.79	67
622	1.5	5.52	67
47	2	6.11	67
14	2.5	6.60	67
4	3	7.04	67
408	0.5	3.76	57
114	1	4.79	57
54	1.5	5.52	57
239	2	6.11	57
31	2.5	6.60	57
13	3	7.04	57
4	3.5	7.43	57
209	0.5	3.76	47
40	1	4.79	47
19	1.5	5.52	47
29	2	6.11	47
20	2.5	6.60	47
5	3	7.04	47
1	3.5	7.43	47
115	0.5	3.76	37
25	1	4.79	37
11	1.5	5.52	37
5	2	6.11	37
3	2.5	6.60	37
4	3	7.04	37
1	3.5	7.43	37
1	4	7.78	37
63	0.5	3.76	27
14	1	4.79	27
9	1.5	5.52	27
3	2	6.11	27
2	2.5	6.60	27
49	0.5	3.76	17
12	1	4.79	17
7	1.5	5.52	17
2	2	6.11	17
1	2.5	6.60	17

43	0.5	3.76	7
12	1	4.79	7
7	1.5	5.52	7
2	2	6.11	7
2	2.5	6.60	7
55	0.5	3.76	-3
16	1	4.79	-3
8	1.5	5.52	-3
4	2	6.11	-3
2	2.5	6.60	-3
1	3	7.04	-3
98	0.5	3.76	-13
36	1	4.79	-13
20	1.5	5.52	-13
13	2	6.11	-13
26	2.5	6.60	-13
2	3	7.04	-13
1	3.5	7.43	-13
192	0.5	3.76	-23
81	1	4.79	-23
44	1.5	5.52	-23
71	2	6.11	-23
7	2.5	6.60	-23
1	3	7.04	-23
338	0.5	3.76	-33
166	1	4.79	-33
96	1.5	5.52	-33
2	2	6.11	-33
187	0.5	3.76	-43
133	1	4.79	-43
3	1.5	5.52	-43
1	2	6.11	-43
155	0.5	3.76	-53
1731	0	0	0

Tabella 5: Dati di input delle caratteristiche del clima meteomarinò medio annuo sottocosta per il GenCade (punto B)

numero di apparizioni	H _s (m)	T _p (s)	Dir GenCade (°)
879	0.5	3.76	77
1054	0.5	3.76	67
1072	1	4.79	67
360	1.5	5.52	67
47	2	6.11	67
408	0.5	3.76	57
114	1	4.79	57
396	1.5	5.52	57
72	2	6.11	57

RELAZIONE MORFODINAMICA DEL LITORALE DI CALOPEZZATI

45	2.5	6.60	57
17	3	7.04	57
209	0.5	3.76	47
40	1	4.79	47
73	1.5	5.52	47
55	2	6.11	47
14	2.5	6.60	47
5	3	7.04	47
5	3.5	7.43	47
0	4	7.78	47
115	0.5	3.76	37
25	1	4.79	37
11	1.5	5.52	37
12	2	6.11	37
9	2.5	6.60	37
2	3	7.04	37
1	3.5	7.43	37
0	4	7.78	37
63	0.5	3.76	27
14	1	4.79	27
9	1.5	5.52	27
3	2	6.11	27
2	2.5	6.60	27
2	3	7.04	27
1	3.5	7.43	27
0	4	7.78	27
49	0.5	3.76	17
12	1	4.79	17
7	1.5	5.52	17
2	2	6.11	17
1	2.5	6.60	17
0	3	7.04	17
0	3.5	7.43	17
43	0.5	3.76	7
12	1	4.79	7
7	1.5	5.52	7
2	2	6.11	-353
2	2.5	6.60	-353
0	3	7.04	-353
0	3.5	7.43	-353
55	0.5	3.76	-3
16	1	4.79	-3
8	1.5	5.52	-3
4	2	6.11	-3
2	2.5	6.60	-3
0	3	7.04	-3
0	3.5	7.43	-3

98	0.5	3.76	-13
36	1	4.79	-13
20	1.5	5.52	-13
26	2	6.11	-13
15	2.5	6.60	-13
3	3	7.04	-13
1	3.5	7.43	-13
192	0.5	3.76	-23
81	1	4.79	-23
75	1.5	5.52	-23
40	2	6.11	-23
7	2.5	6.60	-23
1	3	7.04	-23
338	0.5	3.76	-33
166	1	4.79	-33
96	1.5	5.52	-33
2	2	6.11	-33
187	0.5	3.76	-43
133	1	4.79	-43
3	1.5	5.52	-43
1	2	6.11	-43
155	0.5	3.76	-53
1729	0	0	0

Tabella 6: Dati di input delle caratteristiche del clima meteomarinò medio annuo sottocosta per il GenCade (punto C)

6. Calibrazione del modello

La taratura è stata effettuata considerando le linee di riva negli ultimi 2 periodi temporali a disposizione, ovvero gli anni 2011 e 2020 (Figura 7). In questa Figura viene mostrata anche la posizione del torrente Fiumarella che, rispetto al dominio di calcolo considerato, è collocato tra la cella 30 (600 m) e la cella 35 (700 m), per un'estensione in larghezza pari a 120 m.

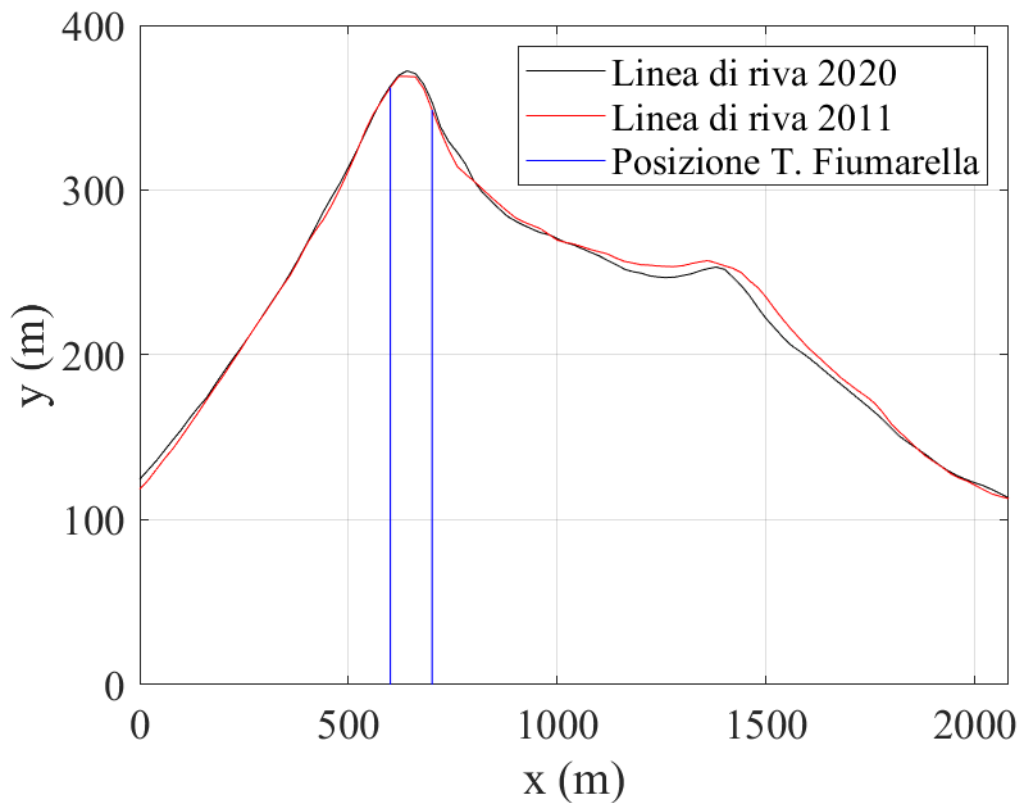


Figura 7: Confronto fra la linea di riva del 2011 e quella del 2020, con la posizione del torrente Fiumarella nel dominio di calcolo

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 (2020) e un altro in un anno precedente (2011). Per evitare che il modello non dia una simulazione idonea, l'analisi va effettuata su un arco massimo temporale di dieci anni, poiché oltre tale valore potrebbero verificarsi delle modifiche antropiche apportate al litorale;
- clima meteomarinico medio annuo in condizione di pre-frangimento in 3 punti sottocosta, deducibili dagli stati di mare propagati sottocosta attraverso il modello SWAN;
- profondità alla quale sono state calcolate le onde sottocosta;
- 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 ($R = R_{u2\%} + 0.6 \text{ Sovr. Tempesta}$), anch'essi dedotti dall'analisi del clima meteomarinico;
- 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 $\Delta x = 20$ m.

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

- Console1.shi: linea di riva misurata al tempo iniziale $t = t_1$ (2011) (vedi Figura 8);
- Console1.wave: file contenente i dati randomizzati del clima meteomarinico medio annuo propagati sottocosta, per tutto l'arco temporale di analisi (nove anni). Tale file, ognuno corrispondente ai punti A, B e C sottocosta, è composto da 5 colonne in cui la prima indica anno/mese/giorno, la seconda l'ora (dati orari), 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 α_{GenCade} .

```
*****
INITIAL SHORELINE DATA FOR GENCADE:
110 Offsets - TITLE: Benchmark Case 1: Straight Shoreline No Structures
*****
185.03 189.83 195.59 202.56 208.84 214.90 222.43 229.71 237.14 244.82
252.16 259.49 267.14 274.73 282.72 290.34 297.57 305.36 312.90 320.74
329.93 339.85 347.11 354.17 363.82 373.95 385.06 396.87 408.95 418.65
426.57 434.04 439.00 438.74 437.46 427.67 414.82 401.97 391.27 382.43
378.37 374.04 369.24 364.64 360.20 355.87 352.23 349.88 347.84 345.58
341.88 339.04 337.82 336.63 334.96 333.29 332.11 330.48 328.01 326.38
325.34 324.31 324.23 323.76 323.54 323.47 324.38 325.65 326.55 326.73
325.14 323.55 322.05 318.41 313.58 309.29 302.82 295.87 289.57 283.74
278.22 273.00 268.36 263.71 259.06 254.52 250.85 247.19 243.53 239.09
232.63 225.92 221.65 216.84 211.88 207.65 204.40 200.86 197.05 194.82
192.87 190.06 187.39 185.00 183.70 183.70 183.70 183.70 183.70 183.70
```

Figura 8: File Console1.shi relativo alla linea di riva di input del 2011

Osservando la matrice di dati in Figura 8, si nota che i dati della linea di riva discretizzata raggiungono la quinta colonna (da sinistra verso destra) nell'ultima riga; tuttavia, GenCade può solo ricevere in input una matrice quadrata di valori, quindi per completarla è stato necessario ricopiare l'ultimo valore nelle celle vuote.

Dopo aver definito i file di input per il modello numerico GenCade, viene effettuata l'analisi morfodinamica impostando nel file Config_all.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 2011 e del 2020, nella sezione FILES viene caricato in input il file Console1.shi contenente i dati geometrici che ricostruiscono la linea di riva del 2011; di seguito, l'analisi morfodinamica viene svolta rispetto ai 3 punti sottocosta (A, B e C) del clima

meteomarinario di input, posizionati in corrispondenza della cella 18, ossia a 360 m lungo l'ascissa del dominio di calcolo, della cella 55, ossia a 1100 m lungo l'ascissa del dominio di calcolo, e della cella 92, ossia a 1840 m lungo l'ascissa del dominio di calcolo. Infine, viene caricato in input i file Console1.wave, Console2.wave e Console3.wave in cui sono descritti, per tutti i 78840 giorni di simulazione, 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, un azimuth pari a 90° ed una lunghezza totale della linea di riva di 2.08 km discretizzata in 110 celle ampie ciascuna 20 m. 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, vengono 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 ad 1 poiché il clima meteomarinario medio annuo sottocosta è già stato definito in modo dettagliato nei file di input Console1.wave, Console2.wave e Console3.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 che 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). In particolare, per la determinazione del diametro medio dei sedimenti D_{50} da inserire nel GenCade, sono stati effettuati appositi rilievi di campioni di sedimenti nella spiaggia emersa e sommersa da parte del Dipartimento di Biologia, Ecologia e Scienze della Terra (DiBEST) nel gennaio 2020. In particolare, sono stati raccolti 9 campioni di sedimenti lungo 3 transetti costieri, così come mostrato nell'ortofoto di Figura 9. Nel primo transetto, a Nord del torrente Fiumarella, sono stati prelevati campioni di sedimenti nei punti A1, A2 e A3. Nel secondo transetto, appena a Sud del torrente Fiumarella, sono stati prelevati campioni di sedimenti nei punti B1, B2 e B3. Nel terzo ed ultimo transetto, corrispondente al tratto più a Sud del litorale in esame, sono stati prelevati campioni di sedimenti nei punti C1, C2 e C3.

Dalle analisi delle 9 curve granulometriche dei sedimenti dedotte lungo la spiaggia emersa e sommersa del tratto litoraneo in esame (Figura 10), è stato determinato un valore medio del diametro medio dei sedimenti, D_{50} , pari a 17.80 mm.



Figura 9: Ortofoto del litorale di Calopezzati con la localizzazione dei 9 punti di prelievo (A1, A2, A3, B1, B2, B3, C1, C2 e C3)

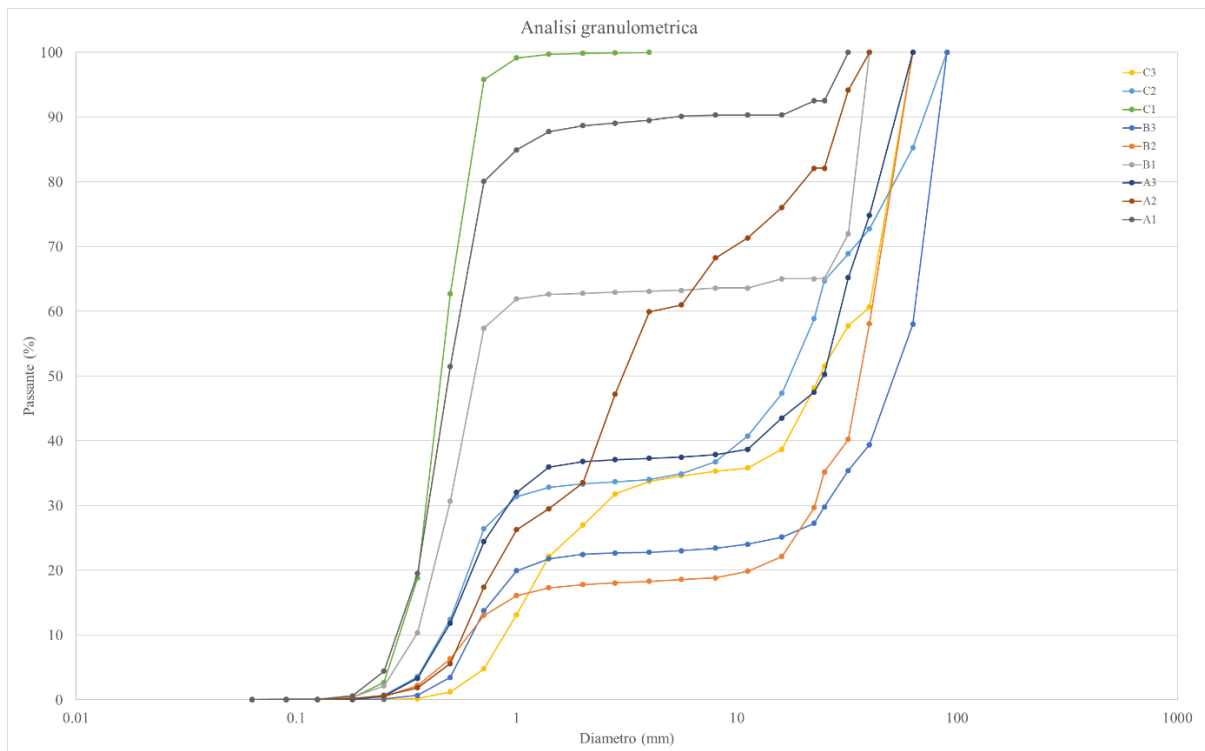


Figura 10: Curve granulometriche relative ai punti di prelievo A1, A2, A3, B1, B2, B3, C1, C2 e C3

L'ultima sezione presente nel file in input del GenCade è quella inerente ai possibili ripascimenti che possono avvenire in tale zona (BEACH FILL); nel caso in esame, in assenza di opere costiere, è stato simulato un ripascimento naturale caratterizzato dal trasporto solido fluviale di fondo medio annuo proveniente dal bacino idrografico del torrente Fiumarella che, rispetto al dominio di calcolo, è collocato tra la cella 30 (600 m) e la cella 35 (700 m). In base agli studi contenuti nella Relazione del trasporto solido del presente studio, è stato determinato il trasporto solido fluviale di fondo medio annuo alla foce del torrente Fiumarella mediante l'applicazione di 14 formule empiriche; di queste, è stato osservato che la migliore corrispondenza fra la linea di riva osservata al 2020 e quella simulata al 2020 col GenCade, nei pressi della foce, è stata fornita dalla formula di Ackers e White (1973), dalla cui applicazione è risultato un valore di portata solida medio annua alla foce, $G_s = 2340.4 \text{ m}^3/\text{anno}$. E' da notare che l'applicazione delle altre formule di calcolo della portata solida medio annua ha comportato una forte sovrastima (avanzamento) della linea di riva simulata col modello GenCade rispetto a quella osservata. Il valore di portata solida medio annua ottenuta con la formula di Ackers e White (1973) ha prodotto un corrispondente avanzamento iniziale della linea di riva (YADD) pari a circa 6 m, avendo ipotizzato che il volume di sedimenti fluviale viene simulato attraverso un prisma a sezione triangolare, la cui altezza del prisma è data dalla somma della profondità di chiusura, h_c , e del massimo livello idrico sulla spiaggia emersa, R , e la cui larghezza risulta essere pari alla larghezza della foce. Nei processi di morfodinamica costiera, tale trasporto solido fluviale risulta essere un trasporto di cross-shore per il litorale in esame e diretto verso il largo.

In Figura 11 viene mostrato il file di input Config_all.gen utilizzato per la taratura del modello GenCade.

Eseguendo il codice dal prompt di comandi, si ottiene in output il file Console1.slo contenente, per ogni giorno di simulazione, la discretizzazione della linea di riva.

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

GENCADE:

```
TITLE:    SMS
***** FILES *****
INIFILE:  Console1.shi
REGFILE:  Console1.shr
NUMWAVES: 3
WAVEID:   18      10      78888 Console1.wave
WAVEID:   55      10      78888 Console2.wave
WAVEID:   92      10      78888 Console3.wave
PRFILE:   Console1.prt
```

***** MODEL SETUP *****

```
GENUNITS: (m)
X0:       0.0
Y0:       0.0
AZIMUTH:  90.0
NX:       110
DX:       20
SIMDATS:  20110101
SIMDATE:  20200101
DT:       0.50
DTSAVE:   24.00
K1:       0.003
K2:       0.0015
PRTOUT:   t
PRWARN:   f
ISMOOTH:  11
IREG:     1
```

***** WAVES *****

```
HAMP:     1.000000
THETAAMP: 1.000000
THETADEL: 0.000000
```

***** BEACH *****

```
D50:      17.80
BERMHT:   1.50
DCLOS:    6.30
LBCTYPE:  0
LMOVY:    0
LMOVPER:  2
LGROINY:  0.00
RBCTYPE:  0
RMOVY:    0
RMOVPER:  2
RGROINY:  0.00
```

***** BEACH FILLS *****

```
BFDATS:   20110101
BFDATE:   20191231
IBFS:     30
IBFE:     35
YADD:     5.000000
```

Figura 11: File Config_all.gen per la taratura del modello GenCade

Nel caso in esame sono state 2 le costanti numeriche che sono state tarate:

- il coefficiente K_1 , posto pari a 0.003;
- il coefficiente K_2 , posto pari a 0.0015;

Il risultato è stato raggiunto attraverso successivi tentativi, procedendo alle simulazioni in modo che, partendo dall'anno 2011, la linea di riva calcolata approssimi al meglio la linea di riva rilevata all'anno 2020. Come si può osservare dalla Figura 12, il risultato è risultato essere più che soddisfacente per il tratto litoraneo considerato, andando a riprodurre gli andamenti qualitativi della linea di riva rilevata al 2020. In particolare, nei primi 400 m del litorale si ha un'ottima sovrapposizione tra la linea di riva rilevata e quella simulata al 2020, come anche nel tratto compreso tra 800 e 1100 m; invece, tra i 400 e 800 m e tra i 1100 e 1800 m vi è una lieve variazione tra le due linee di riva in esame. L'errore medio che è stato ottenuto confrontando la linea di riva al 2020 simulata e quella al 2020 rilevata è stato pari al 1.357%. 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 .

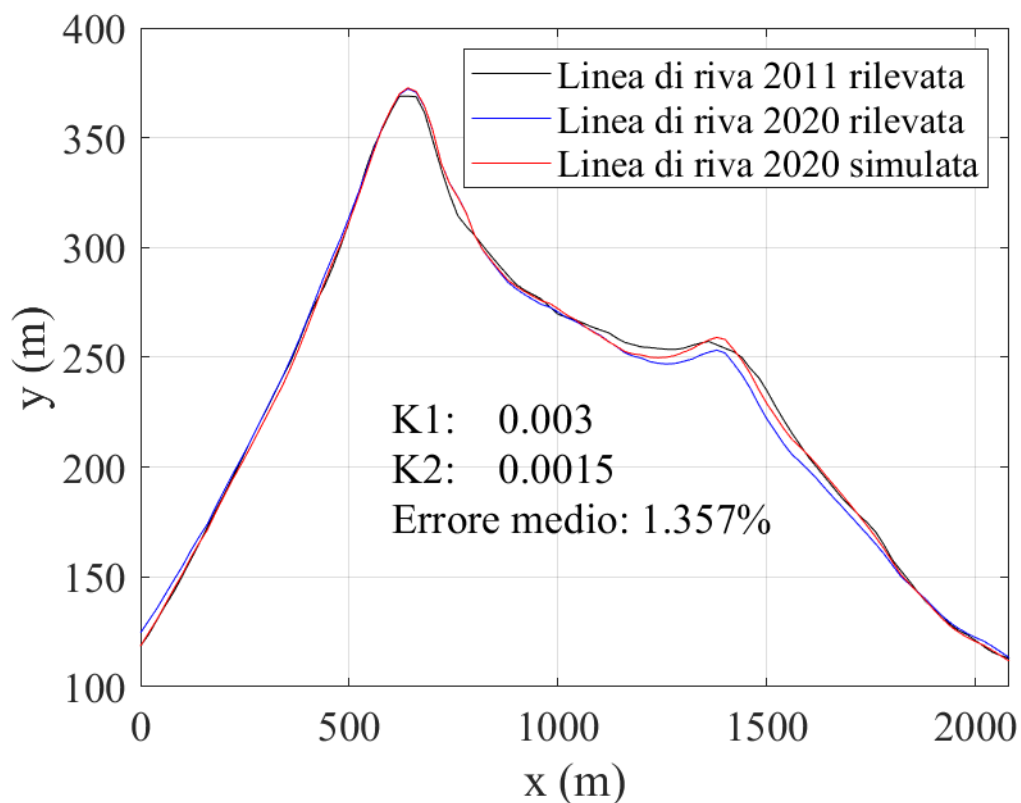


Figura 12: Taratura del modello GenCade, con il confronto fra la linea di riva rilevata al 2020 e quella simulata al 2020 dal modello

7. 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 9 anni (dal 2020 attuale al 2029).

A tal fine è stata considerata sia la configurazione attuale, sia quella relativa allo scenario di “intervento” costituito dalla realizzazione degli interventi di protezione del litorale costituiti da una batteria di 5 o 10 pennelli assieme ad un ripascimento artificiale di 20 m. Le simulazioni sono state condotte mantenendo i valori dei parametri di taratura K_1 e K_2 individuati nella fase di calibrazione.

Nel complesso, per le simulazioni numeriche sono stati considerati i seguenti scenari:

- Scenario A: evoluzione dello stato attuale;
- Scenario B: evoluzione in presenza di opere di protezione dall'erosione costiera corrispondente al I stralcio di progettazione (5 pennelli + ripascimento artificiale);
- Scenario C: evoluzione in presenza di opere di protezione dall'erosione costiera corrispondente al I e II stralcio di progettazione (10 pennelli + ripascimento artificiale).

Nel seguito vengono illustrati nel dettaglio i risultati delle simulazioni degli scenari A, B e C sopra riportati, condotti con il modello numerico GenCade.

7.1 Scenario A: evoluzione dello stato attuale

L'evoluzione futura della linea di riva è un'operazione che viene condotta sulla base dei risultati della taratura. Come si è visto in precedenza, infatti, l'operazione di taratura permette di assegnare dei valori nelle equazioni di corrispondenza fra il flusso di energia long-shore e il trasporto solido litoraneo che garantiscono la migliore interpretazione matematica della realtà fisica per il sito in esame e per i dati a disposizione.

L'evoluzione, quindi, permette di prevedere l'andamento futuro della linea di riva, in un orizzonte temporale comparabile con quello adottato per la taratura (9 anni) e, comunque, non superiore ai 10 anni. Il limite temporale dipende sempre dalle imprecisioni numeriche e dalla presenza di errori che aumentano all'aumentare del tempo di simulazione e rischiano di “distruggere” completamente la soluzione.

In Figura 13 viene mostrata la variazione della linea di riva, y (m), dal 2020 al 2029, e per ogni anno intermedio (2021, 2022, 2023, 2024, 2025, 2026, 2027 e 2028). Osservando la Figura 13, le linee di riva future (dal 2021 al 2029) si mantengono pressoché costante a quella rilevata nel 2020 nei primi 200 m. Successivamente, fra circa la progressiva $x = 200$ m e la $x = 550$ m (a

Nord del torrente Fiumarella) si assiste ad un progressivo arretramento della linea di riva. Fra la progressiva $x = 550$ m e la $x = 1000$ m (a cavallo del torrente Fiumarella), si osserva un progressivo aumento della linea di riva, perlopiù imputabile al contributo del trasporto solido fluviale proveniente dal bacino idrografico del Fiumarella. Nell'ultimo tratto, che va dalla progressiva $x = 1000$ m fino alla $x = 2080$ m, si può evincere un generale arretramento della linea di riva, in particolare in corrispondenza della progressiva $x = 1150$ m.

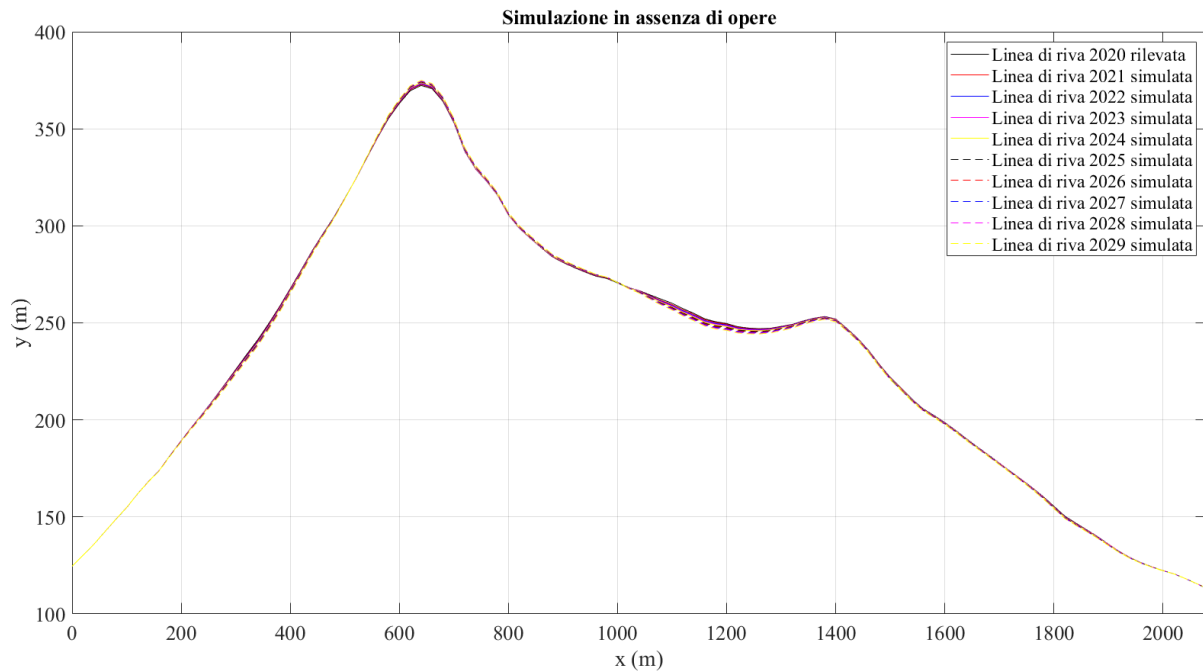


Figura 13: Scenario A: Evoluzione della linea di riva tramite il modello GenCade in assenza di opere di difesa costiera (dal 2020 al 2029)

Tali variazioni della linea di riva sono meglio distinguibili dall'analisi delle variazioni relative della linea di riva, dy (m), così come mostrato nella Figura 14. I valori di dy negli anni futuri che vanno dal 2021 al 2029 sono calcolati rispetto all'anno di riferimento del 2020. Dall'osservazione della Figura 14, si evince una stabilità evolutiva nel primo tratto (da $x = 0$ a $x = 200$ m) con valori di dy prossimi a 0. Nel secondo tratto che va dalla progressiva $x = 200$ m alla progressiva $x = 550$ m (a Nord del torrente Fiumarella), i valori di dy legati ad un arretramento della linea di riva presentano picchi massimi in corrispondenza della progressiva $x = 330$ m e vanno da valori minimi inferiori ad 1 m, riscontrabili fino al 2022, a valori massimi dell'ordine dei 3 m, corrispondenti all'ultimo anno di simulazione (2029). Per ciò che riguarda il tratto costiero in avanzamento, ovvero fra la progressiva $x = 550$ m e la $x = 1000$ m (a cavallo del torrente Fiumarella), i valori massimi si hanno in corrispondenza della foce del torrente Fiumarella, con valori di dy che oscillano fra 0.5 m (nel 2021) e 2.5 m (nel 2029). Nel terzo

tratto compreso fra la progressiva $x = 1000$ m e la progressiva $x = 2080$ m, i valori di dy sono negativi e relativi quindi a fenomeni di arretramento della linea di riva. I valori massimi di arretramento si hanno in corrispondenza della progressiva $x = 1150$ m, con valori di dy che variano fra circa 1 m (nel 2021) e quasi 4 m (nel 2029). Arretramenti via via più lievi sono riscontrabili andando verso la fine del tratto costiero in esame (fino alla progressiva finale pari a 2080 m).

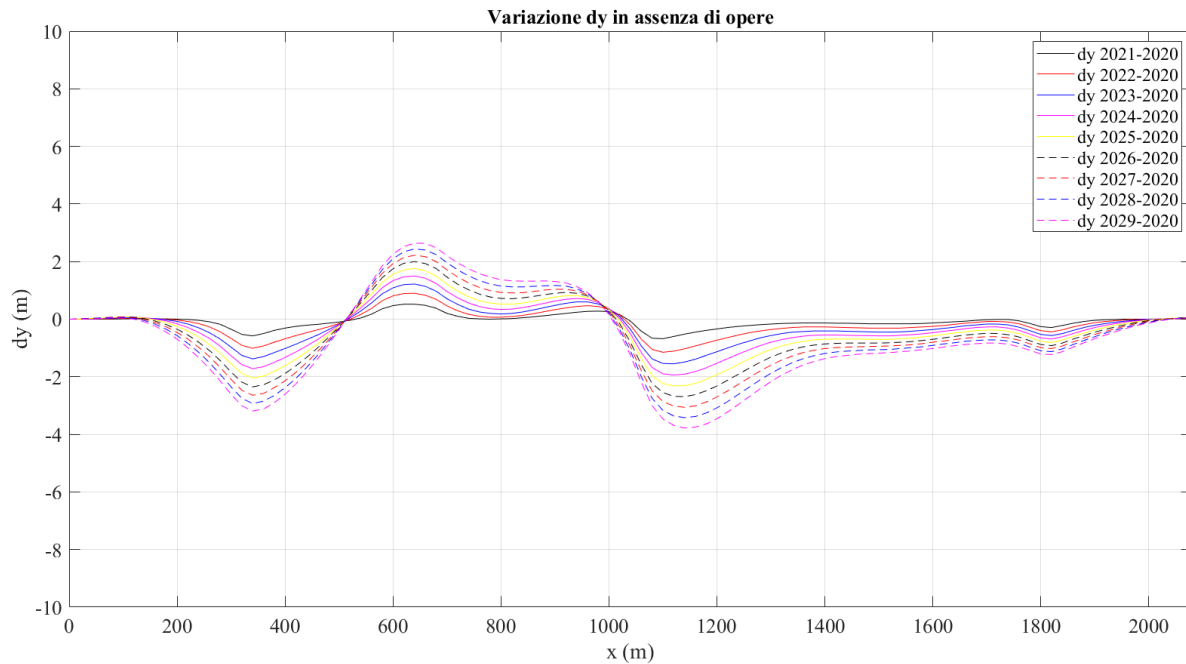


Figura 14: Scenario A: Evoluzione della variazione relativa della linea di riva tramite il modello GenCade in assenza di opere di difesa costiera (dal 2020 al 2029)

7.2 Scenario B: evoluzione in presenza di 5 pennelli e ripascimento

Il presente scenario evolutivo fa riferimento al I lotto di progettazione ed è caratterizzato dalla presenza di interventi di progetto antierosione costituiti dalla realizzazione di 5 pennelli e di un ripascimento artificiale. I pennelli sono opere di difesa costiera con andamento planimetrico ortogonale o leggermente obliquo alla linea di riva. Il principio di funzionamento di questa tipologia di intervento si basa sull'intercettazione del trasporto solido, in modo particolare della componente longitudinale. L'intervento di ripascimento artificiale di un litorale consiste invece nel versamento di un notevole volume di sedimenti di idonea granulometria allo scopo di spostare in avanti la linea di riva. Lo scopo di questa tipologia di intervento combinato è quello di costruire o salvaguardare aree fruibili a scopo turistico e ricreativo e di offrire protezione dall'attacco del moto ondoso.

In particolare, sono stati pensati 5 pennelli emersi trasversali al litorale di tipo corti aventi lunghezza pari a 50 m (meglio definiti come non-diffracting, cioè che non generano effetti di diffrazione ondosa nel loro intorno e che non inducono rilevanti variazioni di spiaggia nel sopraflutto e nel sottoflutto) e di un ripascimento artificiale di lunghezza pari a 20 m. La profondità rilevata della testa di ogni pennello è di 2.5 m in base ai rilievi effettuati della batimetria del litorale di Calopezzati, mentre la permeabilità di ogni pennelli è stata posta pari a 0.4, valore tipico di un pennello non-diffracting costruito in massi naturali. Così come descritto nel Progetto preliminare per lo studio del litorale di Calopezzati effettuato dal locale Ufficio Tecnico, i 5 pennelli sono stati posizionati nelle celle 40, 45, 50, 58 e 63, corrispondenti alle progressive $x = 800$ m, 900 m, 1000 m, 1160 m e 1260 m. Il ripascimento artificiale di 20 m è stato posizionato dalla cella 40 alla cella 63, ovvero fra la progressiva $x = 800$ m e la progressiva $x = 1260$ m. Invece, dalla cella 37 (progressiva $x = 740$ m) alla cella 39 (progressiva $x = 780$ m) è stato inserito un ripascimento che passa da 0 m a 20 m e dalla cella 64 (progressiva $x = 1280$ m) alla cella 66 (progressiva $x = 1320$ m) un ripascimento che passa da 20 m a 0 m.

In Figura 15 viene mostrata la linea di riva rilevata al 2020 e le linee di rive simulate col GenCade per gli anni 2021, 2022, 2023, 2024, 2025, 2026, 2027, 2028 e 2029 in presenza dei 5 pennelli e del ripascimento artificiale. E' possibile osservare un generale avanzamento della linea di riva in corrispondenza del tratto costiero soggetto all'intervento combinato di difesa dall'erosione. Nel tratto a Nord del torrente Fiumarella, non interessato dall'intervento di protezione costiera e in generale non antropizzato, risulta essere stabile per i primi 200 m ed è soggetto a lievi e continui fenomeni di arretramento negli anni che vanno dal 2021 al 2029 nella sua parte centrale (circa dalla progressiva $x = 200$ m alla progressiva $x = 500$ m). Il tratto costiero che va poco più a Nord della foce del torrente Fiumarella ($x = 500$ m) alla progressiva $x = 1400$ m, ovvero a valle e, più specificatamente, più a Sud della zona dove sono stati pensati di posizionare i 5 pennelli e il ripascimento artificiale, risulta essere in generale avanzamento. Tale avanzamento, indotto perlopiù dall'apporto di sedimenti del ripascimento artificiale e dall'azione di stabilizzazione della linea di riva dovuta ai diversi pennelli, risulta essere particolarmente visibile nel tratto litoraneo dove sono state posizionate tali opere. In particolare, progressivi aumenti nel tempo della linea di riva si possono evincere a cavallo della foce del torrente Fiumarella, legati principalmente all'apporto del trasporto solido fluviale di fondo proveniente dal bacino idrografico, e nella zona fra il posizionamento del 2° e del 3° pennello. Fra il 1° e il 2° pennello e a metà fra 3° e 4° pennello e il 5° pennello è possibile osservare una lieve diminuzione temporale della linea di riva dal suo iniziale

avanzamento. Tale fenomeno di spanciamento nel tempo della linea di riva è tipico di una sistemazione costiera con un ripascimento artificiale. Nel lato sottoflutto, ovvero dalla progressiva $x = 1400$ m fino alla fine del litorale (parte Sud), si assiste un lieve aumento temporale dell'arretramento della linea di riva. Il picco dell'arretramento è individuale circa alla progressiva $x = 1500$ m.

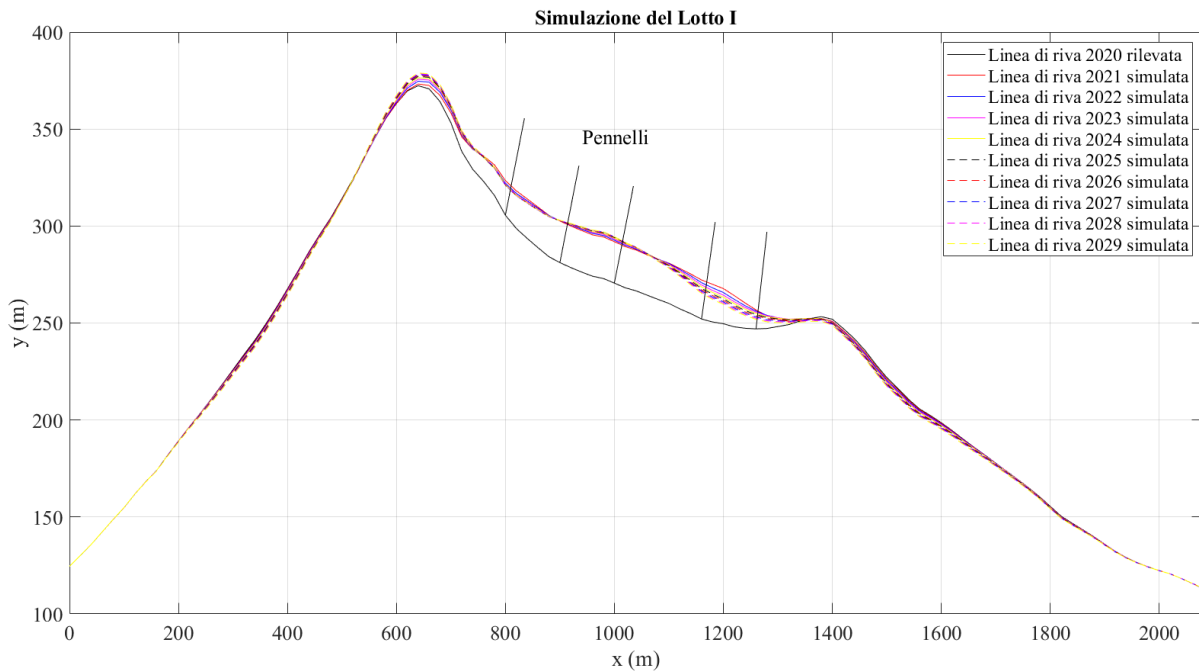


Figura 15: Scenario B: Evoluzione della linea di riva tramite il modello GenCade in presenza di 5 pennelli e di un ripascimento artificiale (dal 2020 al 2029)

La Figura 16 è relativa alla variazione relativa della linea di riva (dy), su tutto il litorale in esame, fra la linea di riva al 2020 e la linea di riva agli anni successivi (dal 2021 al 2029) con la presenza dei 5 pennelli e del ripascimento artificiale. L'analisi di tale Figura 16 permette una più chiara distinzione e quantificazione delle zone in arretramento e in avanzamento della linea di riva. Nella zona a Nord del torrente Fiumarella, si assiste ad una stabilizzazione temporale della linea di riva (dy molto prossimo a 0) nei primi 200 m, mentre fra circa la progressiva $x = 200$ e la progressiva $x = 500$ m si assistono fenomeni erosivi via via col tempo con picchi che variano da 0.5 m (nel 2021) a circa 3 m (nel 2029). Per un tratto costiero di circa 1 km, ovvero dalla progressiva $x = 500$ m alla progressiva $x = 1500$ m, è visibile un generale avanzamento della linea di riva, indotto nella parte più Nord dall'apporto di materiale solido proveniente dal torrente Fiumarella (avanzamento variabile fra circa 0 m e 10 m) e nella parte centrale e Sud dai 5 pennelli e dal ripascimento artificiale. Si osserva nel primo anno (dal 2020 al 2021) un avanzamento medio di circa 20 m fra il primo e l'ultimo pennello per effetto del versamento di

sedimenti caratterizzanti il ripascimento artificiale. Negli anni successivi, i sedimenti del ripascimento si muovono in modo tale da creare un picco di avanzamento nella parte centrale della sistemazione costiera (fra il 2° e il 3° pennello) con valore massimo che si attesta attorno ai 23 m. Fra il 1° e il 2° pennello, ovvero quelli più a Nord, l'avanzamento della linea di riva si riduce nel tempo, passando a valore lievemente superiori a 20 m a circa 16 m. Il suddetto fenomeno è riscontrabile anche nella zona fra 3° e 4° pennello e la progressiva $x = 1400$ m, ovvero più a Sud del 5° pennello. In particolare, l'avanzamento iniziale della linea di riva di 20 m si riduce, nei 9 anni successivi, di aliquote variabili fra 2 m e 5 m fra la progressiva $x = 1100$ m e la progressiva $x = 1250$ m. Dalla progressiva $x = 1400$ m alla progressiva $x = 2080$ m, il fenomeno di lieve arretramento della linea di riva risulta generalizzato. In questo ultimo tratto che risulta essere sottoflutto, l'erosione avanza lievemente nel tempo, con un picco corrispondente alla progressiva $x = 1500$ m pari circa a 3 m e relativo all'anno 2029.

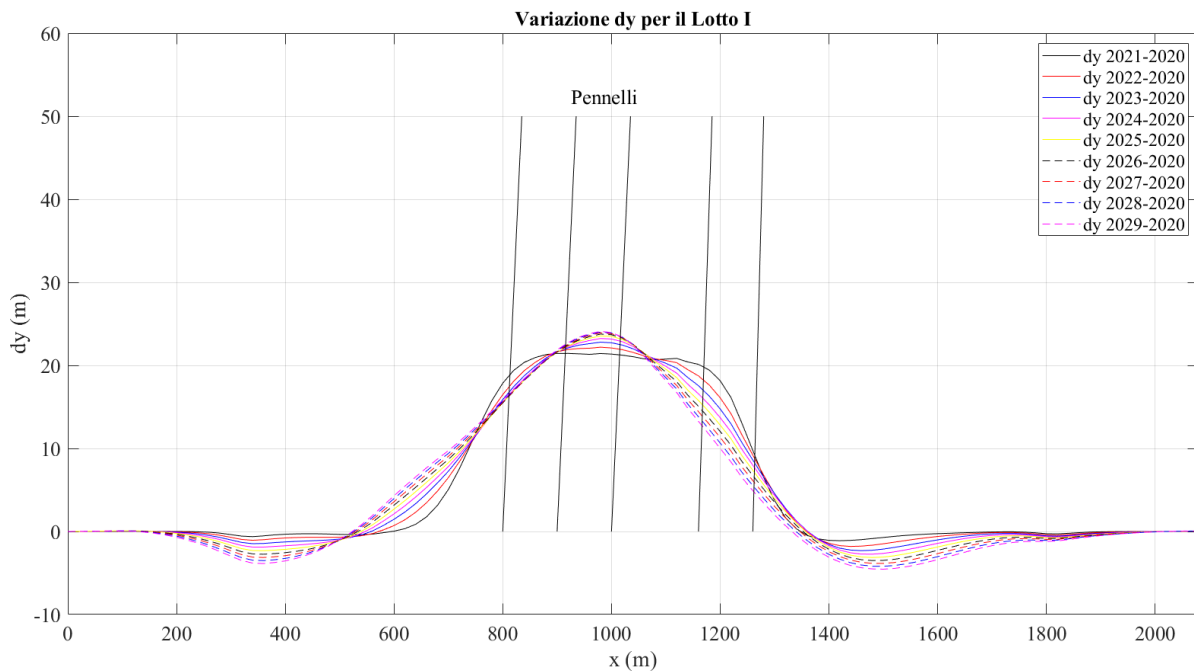


Figura 16: Scenario B: Evoluzione della variazione relativa della linea di riva tramite il modello GenCade in presenza di 5 pennelli e di un ripascimento artificiale (dal 2020 al 2029)

7.3 Scenario C: evoluzione in presenza di 10 pennelli e ripascimento

Il presente scenario evolutivo fa riferimento al I e II lotto di progettazione ed è caratterizzato dalla presenza di interventi di progetto antierosione costituiti dalla realizzazione di 10 pennelli emersi trasversali al litorale di tipo corti aventi lunghezza pari a 50 m e di un ripascimento artificiale di lunghezza pari a 20 m. Anche in questo caso, la profondità rilevata della testa di

ogni pennello è di 2.5 m in base ai rilievi effettuati della batimetria del litorale di Calopezzati, mentre la permeabilità di ogni pennelli è stata posta pari a 0.4. Così come descritto nel Progetto preliminare per lo studio del litorale di Calopezzati effettuato dal locale Ufficio Tecnico, i 10 pennelli sono stati posizionati nelle celle 40, 45, 50, 58, 63, 68, 73, 78, 83 e 88 corrispondenti alle progressive $x = 800$ m, 900 m, 1000 m, 1160 m, 1260 m, 1360 m, 1460 m, 1560 m, 1660 m e 1760 m. Il ripascimento artificiale di 20 m è stato posizionato dalla cella 40 alla cella 88, ovvero fra la progressiva $x = 800$ m e la progressiva $x = 1760$ m. Invece, dalla cella 37 (progressiva $x = 740$ m) alla cella 39 (progressiva $x = 780$ m) è stato inserito un ripascimento che passa da 0 m a 20 m e dalla cella 89 (progressiva $x = 1780$ m) alla cella 91 (progressiva $x = 1820$ m) un ripascimento che passa da 20 m a 0 m.

In Figura 17 viene mostrata la linea di riva rilevata al 2020 e le linee di rive simulate col GenCade per gli anni 2021, 2022, 2023, 2024, 2025, 2026, 2027, 2028 e 2029 in presenza dei 10 pennelli e del ripascimento artificiale. Rispetto alla soluzione precedente relativa alla presenza di 5 pennelli e del ripascimento, è possibile ora osservare che il generale avanzamento della linea di riva in corrispondenza del tratto costiero soggetto all'intervento combinato di difesa dall'erosione risulta essere più ampio. Le tendenze evolutive, di tipo perlopiù erosivo, del tratto a Nord del torrente Fiumarella, ovvero per i primi 500 m di litorale di studio, risultano essere le stesse al caso dei 5 pennelli e del ripascimento, poiché non influenzati da tali opere. Stessa tendenza evolutiva si può anche evincere a cavallo del torrente Fiumarella e nel tratto più a Nord dell'intervento di difesa costiera. Come nel caso precedente, si assiste ad un avanzamento indotto dal trasporto solido del torrente Fiumarella nel tratto più a Nord e dalla presenza combinata dei pennelli e del ripascimento artificiale nel tratto più a Sud. Tuttavia, rispetto al caso progettuale precedente, l'effetto dei 5 pennelli aggiuntivi e del prolungamento del ripascimento artificiale risulta essere benefico per il litorale continuando più a Sud. In particolare, da circa la progressiva $x = 1260$ m alla progressiva $x = 1900$ m, si assiste ad un generale avanzamento della linea di riva, non presente nel caso dei 5 pennelli accoppiato al ripascimento artificiale. La parte sottoflutto del litorale, confinata agli altri 180 m circa, ovvero fra la progressiva $x = 1900$ m e la progressiva $x = 2080$, risulta essere in lieve erosione.

La Figura 18 fa riferimento alla variazione relativa della linea di riva (dy), su tutto il litorale in esame, fra la linea di riva al 2020 e la linea di riva agli anni successivi (dal 2021 al 2029) con la presenza dei 10 pennelli e del ripascimento artificiale. Anche in questo caso, l'analisi di tale Figura 18 permette una più chiara distinzione e quantificazione delle zone in arretramento e in avanzamento della linea di riva. Le variazioni relative nella zona a Nord del torrente Fiumarella risultano essere le stesse del caso precedente con 5 pennelli e ripascimento artificiale. In questo

caso, per un tratto costiero di circa 1.4 km, ovvero dalla progressiva $x = 500$ m alla progressiva $x = 1900$ m, è visibile un generale avanzamento della linea di riva, indotto nella parte più Nord dall'apporto di materiale solido proveniente dal torrente Fiumarella e nella parte centrale e Sud dai 10 pennelli e dal ripascimento artificiale. Nel primo anno di simulazione (dal 2020 al 2021), si assiste ad un avanzamento medio di circa 20 m che si mantiene fra il primo e l'ultimo pennello per effetto del versamento iniziale di sedimenti caratterizzanti il ripascimento artificiale. Negli anni successivi, i sedimenti del ripascimento si muovono in modo tale da creare picchi via via crescenti di avanzamento fra il 2° e il 3° pennello a Nord, con valori massimi che si attestano attorno ai 23 m. Nei tratti fra gli altri pennelli, ovvero fra il 1° e il 2° pennello e fra poco più a Sud del 3° pennello e il 10° pennello, l'avanzamento iniziale di 20 m tende via via a decrescere, con valori minimi, che via via crescono negli anni di simulazione, pari a circa 16 m e che si riscontrano fra il 4° e il 5° pennello. In questa zona fra il 3° e il 10° pennello, gli arretramenti massimi relativi, rispetto ai 20 m iniziali creati dal ripascimento artificiale, variano fra circa 2 m e 4 m e sono relativi all'anno 2029. Poco più a Sud del 10° pennello, ovvero fra la progressiva $x = 1750$ m e la progressiva $x = 1900$ m gli avanzamenti della linea di riva sono minori rispetto ai tratti all'interno dei pennelli e tendono a crescere nel tempo, con valori massimi compresi fra 0.5 m e 3 m. Dalla progressiva $x = 1900$ m alla progressiva $x = 2080$ m, il fenomeno di lieve arretramento della linea di riva risulta generalizzato. In questo ultimo tratto che risulta essere sottoflutto, l'erosione avanza lievemente nel tempo, con un picco corrispondente alla progressiva $x = 2000$ m pari circa a 2.5 m e relativo all'anno 2029.

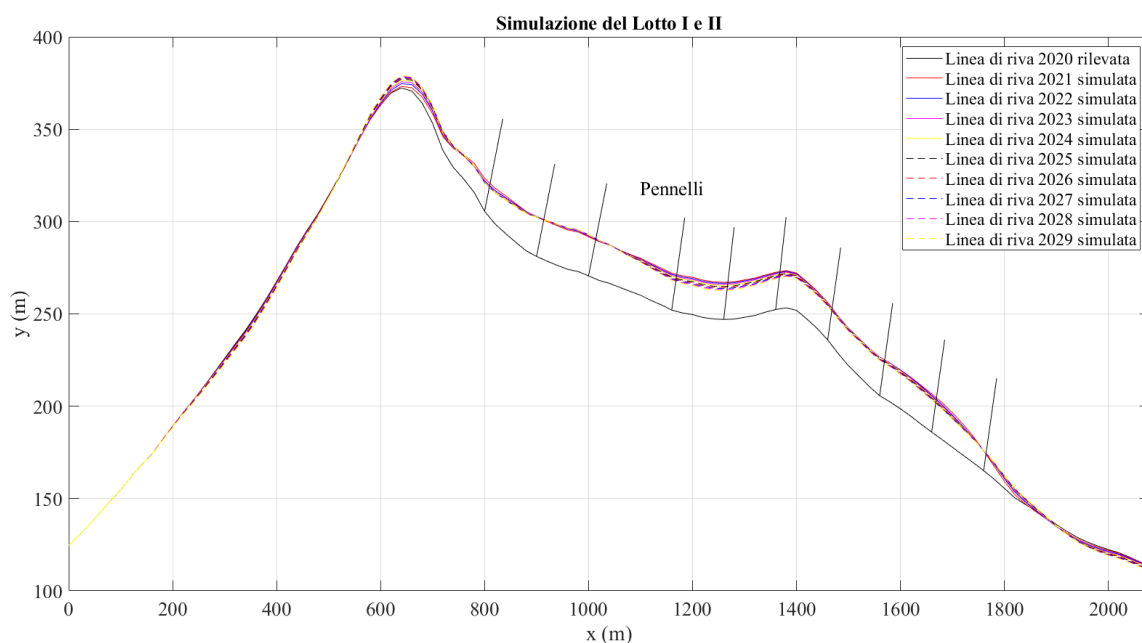


Figura 17: Scenario B: Evoluzione della linea di riva tramite il modello GenCade in presenza di 10 pennelli e di un ripascimento artificiale (dal 2020 al 2029)

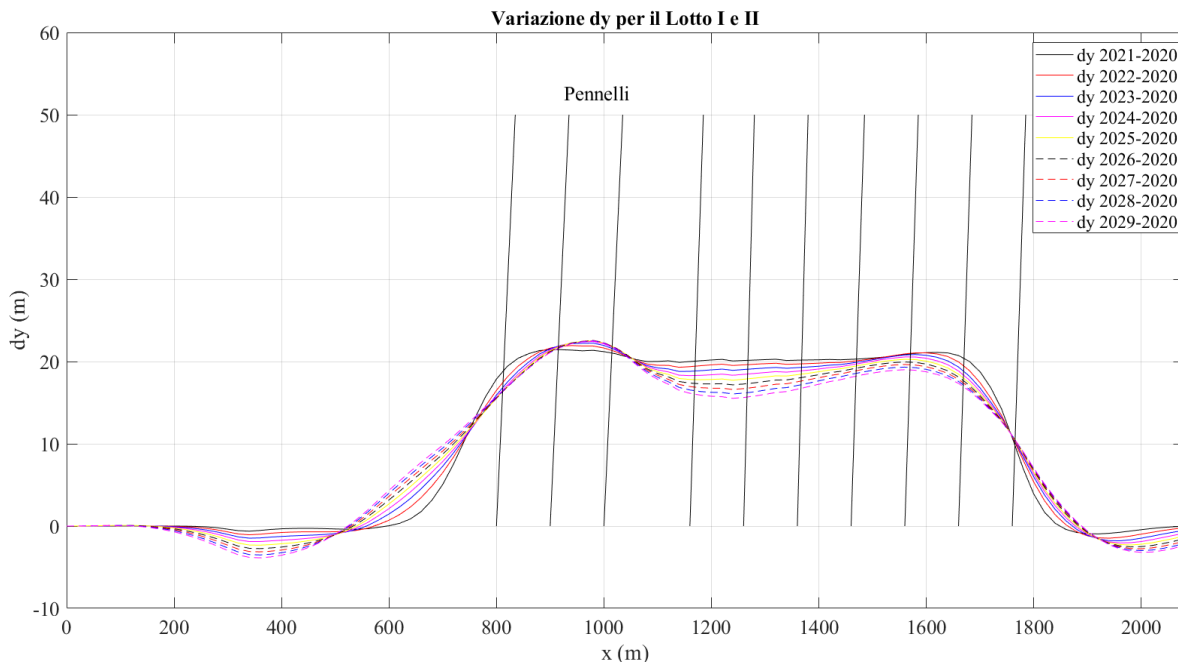


Figura 18: Scenario B: Evoluzione della variazione relativa della linea di riva tramite il modello GenCade in presenza di 10 pennelli e di un ripascimento artificiale (dal 2020 al 2029)

In sintesi, è stata mostrata, in termini di avanzamento temporale della linea di riva, l'efficacia delle soluzioni progettuali previste, ovvero di 5 pennelli e del ripascimento artificiale relativa al lotto I di progettazione e di 10 pennelli e del ripascimento artificiale relativa al lotto I e II di progettazione. La prima soluzione progettuale risulta efficace per un tratto di circa 1 km, mentre la seconda si estende per un tratto di circa 1.4 km. L'avanzamento iniziale di 20 m indotto dal versamento di sedimenti costituenti il ripascimento artificiale è mantenuto abbastanza stabile dalla presenza dei pennelli. Si osservano, per tutte e 2 le soluzioni progettuali, picchi di avanzamento superiori ai 20 m e avanzamenti, nei tratti terminali dei pennelli, fra il 1° e il 5° nel primo caso e fra il 1° e il 10° nel secondo caso, avanzamenti consistenti, dell'ordine dei 10 m alla fine del periodo di simulazione (anno 2029). E' da notare inoltre il positivo effetto del trasporto solido fluviale nell'intorno del torrente Fiumarella sull'avanzamento della linea di riva, in particolare nella zona più a Sud di esso.